

测绘大地图

BIG MAP OF SURVEYING AND MAPPING



(内部资料 免费交流)

主办：中国测绘地理信息学会

承办：中国测绘地理信息学会地图大数据创新工作委员会

总第 **1** 期
2016年05月
试刊



测绘地理成果跨界应用

特约访谈

遥感技术助力“十三五” 引领跨界应用

跨界应用

基于大数据技术的水利信息现代化框架探讨
智慧城市建设中的地理平台

童庆禧

中国科学院院士



中国测绘地理信息学会
官方微信公众平台

中国测绘地理信息学会

地址：北京市海淀区莲花池西路28号，中国测绘创新基地（100830）

《测绘大地图》编辑部

地址：北京市朝阳区安翔北里甲11号创业大厦8座2层（100101）

电话：010-51286880 传真：010-51286880-801 邮箱：cehuidaditu@mapuni.com

《测绘大地图》

关注热点 前瞻行业 引领发展

编辑委员会

主办：中国测绘地理信息学会

承办：中国测绘地理信息学会地图大数据创新工作委员会

总顾问：童庆禧

专家顾问：王 瑞 申慧群 宁津生 朱 光 刘 锐 刘玉璋 刘先林
(按姓氏笔划排序) 刘耀林 孙和平 李志刚 李德仁 杨元喜 吴劲风 邹熹光
张卫强 张文若 张建平 张继贤 陈 军 周成虎 宫辉力
(名单待最后确定) 姚 新 倪光南 倪庆华 郭华东 龚健雅 程鹏飞 翟跃欢

总编辑：彭震中

副总编：孙世友 马振福

执行主编：杨竞佳

责任编辑：周 露

编辑部：马志勇 谢大尉 马 艳 张媛媛

美术编辑：李英杰

发送对象：中国测绘地理信息学会会员单位

印刷单位：北京市海天舜日印刷有限公司

印刷日期：2016 年 5 月 10 日

印刷数量：2000 册

编辑部电话：010-51282880

地址：北京市朝阳区安翔北里甲 11 号北京创业大厦 B 座 2 层

邮编：100101

投稿邮箱：cehuidaditu@mapuni.com



中国测绘地理
信息学会微信
公众平台

创刊贺词

近年来，我国测绘地理信息产业发展迅猛，不仅在国家信息化、现代化建设中发挥了显著作用，而且在促进经济增长和保持社会稳定中作出了重要贡献。随着经济社会快速发展，特别是人民群众对地理信息的需求日益旺盛，地理信息产业呈现出巨大增长潜力和无限广阔的发展前景。

经过多年的发展，我国在测绘地理信息领域已经积累了大量的信息数据：全国重力、三角、水准和 GPS 大地测量成果，以及超过 500 万张的航空影像数据等等。这些从海洋、气象、资源等卫星获得的空间地球大数据，已经在政府决策辅助、公共应急救急、规划管理、重大基础设施建设、土地资源动态监测与调查管理、水资源和水利工程调查与监测、生态环境监测与管理、森林资源调查和监测、地质矿产资源调查与监测、自然灾害监测和评估管理、轨道交通规划设计、新农村建设、电力、航空航天、通信、防灾减灾、军事、气象，以及提高百姓生活质量等领域发挥了重要作用。

放眼世界，发达国家也高度重视测绘地理信息的战略地位，纷纷加强地理信息资源建设，加快推进卫星导航定位、高分辨率卫星遥感等技术的升级，推动云计算、物联网、移动互联、大数据等高新技术与测绘地理信息的深度融合。尤其是随着信息科技和网络通信技术的快速发展，以及信息基础设施的完善，全球数据呈爆发式增长。“地理信息 + 大数据”作为一种新型战略资源正在引起国内外政界、学界和相关业界的高度关注。

目前，我国测绘地理信息事业正处于改革创新发展的关键时期，科技创新面临重大机遇和挑战。要求我们广大的测绘地理信息科技工作者不断学习和掌握新技术，认识新事物、了解新动态。因此，《测绘大地图》的创刊既是顺应时代的发展趋势，也是紧跟测绘地理信息行业发展的需求。作为交流学术，普及知识的一本刊物，它不仅是测绘地理信息科技工作者启迪思想的指路灯，而且是砥砺学术的磨刀石。我由衷希望此刊能发挥好宣传、交流平台的作用，积极推动测绘地理信息行业的热点问题研究，在促进测绘地理信息科技进步中发挥出更大的作用。

最后，谨对《测绘大地图》的创刊，以及对积极参与期刊编辑策划的各专家成员表示热烈的祝贺，并衷心期待此刊能集各方面智慧于一身，打造一个重要的学术交流平台，促进测绘地理信息的大数据、大地图领域的发展。

童庆禧

热烈庆祝

“2016中国测绘地理信息高端论坛” 盛大开幕

“互联网+”时代的测绘地理信息

时间：2016年5月10日

地点：中国测绘创新基地三楼多功能厅

指导单位：国家测绘地理信息局 中国科学技术协会

主办单位：中国测绘地理信息学会

承办单位：北京超图软件股份有限公司

中科宇图科技股份有限公司

北京北科天绘科技有限公司

服务大发展 谱写新篇章

刊首语

岁在三月，大地回春，万物竞生。如春天萌发的新绿一样，由中国地理信息学会创办的《测绘大地图》今天试刊了！作为学会交流学术、普及知识和服务会员的载体，《测绘大地图》旨在传播测绘地理信息领域国家相关政策、行业信息，宣传学会开展的重要工作和活动，并活跃学术氛围、共享成果交流，更好地推动我国测绘地理信息行业科技创新与发展。

近年来，随着我国经济社会发展进入新常态，各行业对测绘地理信息服务提出了更加旺盛和迫切的需求，测绘地理信息事业迎来了加快发展的黄金机遇期。曾经测绘人用坐标编织纵横南北、横贯东西的大地经纬新衣，如今大数据应用、智慧城市、商业卫星和无人机等新技术、新应用、新业态层出不穷，为测绘地理信息领域谱写了新的篇章。

为了促进测绘地理信息科技繁荣和发展，中国测绘地理信息学会成立 57 年来，始终坚持“科学发展、科技创新、服务会员”的理念，注重学术交流，普及科学知识，促进学科发展。在大众创业、万众创新的时代浪潮下，学会始终积极探索提升学术交流和服务行业、服务个人会员能力的有效方式，因此，就有了今天创办的《测绘大地图》。相信通过这本内部资料的编辑出版，整合学会各分支机构、团体会员单位内的科技信息和资源，营造浓厚的学术交流氛围，普及科学、共享知识、引领创新，积极服务测绘地理信息“十三五”事业发展，共同打造学会学术出版的又一品牌。

2016 年是我国“十三五”规划的开局之年，也将是测绘地理信息事业改革创新发展的关键之年。在今后的日子里，《测绘大地图》将与广大企事业单位、专家学者及所有测绘地理信息行业的科技工作者一起，整合与测绘相关的科研成果、成功应用案例，并积极探索测绘地理信息行业的新产品、新技术、新思路、新方向，共同开拓美好的未来！

中国测绘地理信息学会

2016 年 5 月

P
1-4

业界要闻 INDUSTRY NEWS

《测绘地理信息事业“十三五”规划》专家研讨会在京召开

3月4日,国家测绘地理信息局规划财务司组织召开专家研讨会,对《测绘地理信息事业“十三五”规划》进行研究讨论。会上规划财务司有关同志介绍了规划编制过程、主要内容以及重大问题等。各位专家对规划文本结构、内容以及指标等进行了细致讨论,提出了宝贵的意见建议……

P
5-8

特约访谈 EXCLUSIVE INTERVIEW

遥感技术助力“十三五”,引领跨界应用

好雨知时节,当春乃发生。伴随着2016年北京的第一场春雨,《测绘大地图》走进中国科学院遥感与数字地球研究所采访了中国科学院院士,国际欧亚科学院院士童庆禧。作为我国遥感技术应用领域的最早开拓者之一,童院士80岁高龄依然精神矍铄,面对记者的提问侃侃而谈,围绕遥感测绘从“十三五”规划讲到大数据应用……

P
9-44

深度观察 DEPTH OBSERVATION

地理国情与复杂系统

研究地理国情复杂系统的意义在于合理表达“资源—环境—生态—经济—社会”系统的综合复杂关系。针对我国地理国情统计分析工作所面临的研究内容不统一、范围不一致、目标不明确等问题,本文基于复杂系统理论和协调度分析方法,分别从概念、理论与方法的角度探讨并设计了相应的解决途径……

P
45-72

跨界应用 CROSS-BOUNDARY APPLICATION

基于大数据技术的水利信息现代化框架探讨

本研究充分利用了大数据、物联网、3S以及云计算等先进技术,同时依据“十二五”水利信息化的发展方向,明确了水利现代化总体建设思路,对水利现代化框架进行了总体设计,提出了水利信息建设的包括现代化、智慧化、信息化、数字化以及智能化在内的“五化”建设思想……

P
73-74

国际瞭望 INTERNATIONAL OUTLOOK

杰克:为时不晚 GIS 尚能提供可持续发展方案

编者按:Esri公司创始人杰克·丹杰蒙德是一位不折不扣的环保人士,他在各大场合都积极倡导以GIS系统平台来为全世界提供可持续发展的解决方案。这一次,他毫无例外地再次谈起了环保与GIS。前不久,在位于加利福尼亚举行的世界事务理事会50周年晚宴上,Esri公司创始人杰克·丹杰蒙德(Jack Dangermond)表示……

P
75-76

科普天地 POLULAR SCIENCE

地球到底是什么样子,人类是怎样认识它的?

在科学技术高速发展的今天,人类对自己居住的地球面貌已愈来愈清楚明白。但是,人们对地球到底是什么样子的认识,是经历了相当漫长的过程的。古代,由于科学技术不发达,对地球的样子曾流传过许多传说和神话,人类只能通过简单的观察和想象来认识地球。例如,中国的古人观察到“天似穹隆”,就提出了“天圆地方”的说法。西方的古人按照自己所居住的陆地为大海所包围,就认为……

P
77-78

学会动态 SOCIETY DYNAMICS

“国际摄影测量与遥感发展动态”专题学术报告会在京举行

1月8日,“国际摄影测量与遥感发展动态”专题学术报告会在中国测绘创新基地举行。报告会由国家测绘地理信息局科技与国际合作司、国家基础地理信息中心、中国测绘地理信息学会、基础地理信息建设及应用国家测绘地理信息局工程技术研究中心联合举办,是国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)执行局2016年度工作会议的一项重要活动……

P
79-82

行业快讯 INDUSTRY NEWS

南宁市获批建设国家航空应急测绘保障基地

日前,国家发改委批复国家航空应急测绘保障能力建设项目可行性研究报告,根据报告,国家测绘地理信息局将在广西壮族自治区南宁市建设国家航空应急测绘保障基地。届时,国家测绘地理信息局将在南宁市部署一套长航时固定翼无人机航空应急测绘系统,负责保障广西、广东、海南3省区和南海部分海域应急测绘工作。系统主要载荷包括:固定翼无人机1架,机长6米……



声 明

内部资料, 免费交流。欢迎转载文章和图片, 转载时须注明出处。对不当使用者, 将依法追究其法律责任, 最终解释权归中国测绘地理信息学会地图大数据创新工作委员会所有。



《测绘地理信息事业“十三五”规划》专家研讨会在京召开

3月4日，国家测绘地理信息局规划财务司组织召开专家研讨会，对《测绘地理信息事业“十三五”规划》进行研究讨论。会上规划财务司有关同志介绍了规划编制过程、主要内容以及重大问题等。各位专家对规划文本结构、内容以及指标等进行了细致讨论，提出了宝贵的意见建议。

专家一致认为，规划结构清晰、目标明确、任务具体、措施有力，对全国测绘地理信息事业起到了引领作用。该规划能够紧密衔接国家“十三五”规划《纲要》，融入了五大发展理念，细化了测绘地理信息事业业务领域，为未来事业发展拓展了空间。但也提出一些具体意见，认为规划还需要进一步明确新型基础测绘发展路线图，理清新型基础测绘、地理国情监测、应急测绘、航空航天遥感测绘、全球地理信息资源开发建设等业务之间的关系和界面，对主要任务作进一步的凝练，突出重点，分清层次，强化任务的可操作性，提升规划对地方测绘地理信息事业发展的指导性。

规划编写组相关人员参加会议，对专家提出的中肯意见建议表示感谢，并表示将在会后尽快进行研究整理，对规划文本作进一步修改完善。



国家北斗导航位置服务数据中心在太原落地，总投资 21 亿元

自2015年12月提出申请，到今年3月4日通过专家组评审，国家北斗导航位置服务数据中心（山西）分中心暨山西北斗导航应用服务平台建设正式提上日程。这也是北斗导航数据中心展开全国布局后，国内较快落地且首家通过专家评审的项目。

据了解，山西北斗导航数据中心项目由山西长娥北斗导航数据服务有限公司投资建设，主要包括：山西北斗位置服务公共平台，山西北斗数据及运营中心，山西北斗室内外高精度位置网，山西国防动员北斗位置服务系统，北斗科技创新试验区域产业化基地，山西北斗终端设备检测认证中心，智慧城市、交通、旅游、安全生产等产业应用项目。

此后，太原将重点申报国家级重大专项，大力扶持省级、市级重点项目，注重人才培养和储备，优先发展有资质的北斗企业，引入一批行业优质企业与当地骨干企业协同发展，提升产业技术实力，掌握关键核心技术，形成自主创新新能力，打造太原市北斗全产业链服务能力。



浙江省举行高分专项中心揭牌成立暨签约仪式

3月23日，高分分辨率对地观测系统浙江中心成立暨卫星数据应用合作协议签约仪式在杭州举行。浙江省常务副省长袁家军，国家国防科技工业局副局长吴艳华、局重大专项工程中心主任童旭东，中国航天科工集团副总经理方向明，浙江大学书记金德水等领导出席成立大会。

袁家军与方向明共同为高分分辨率对地观测系统浙江数据与应用中心（简称高分专项浙江中心）揭牌。浙江大学与航天科工一院签署高分专项浙江中心建设合作协议；浙江航天泰坦空间信息产业有限责任公司与浙江地省地理信息产业园签署正式入驻德清地理信息小镇协议；浙江航天泰坦、浙江大学、北京航天泰坦、浙江省地理信息中心、国家海洋局第二海洋研究所、杭州师范大学等签署联合推进高分专线浙江省产业化应用项目协议等。

高分专项浙江中心将与浙江航天泰坦空间信息产业有限责任公司一体化建设，“一个机构，两块牌子”，对数据实行统一管理。高分专项浙江中心主要负责高分数据的公益应用，航天泰坦公司主要负责高分数据的产业化应用，共同打造高分专项实体运营的地方示范平台及产业化基地。



2016 年中国智慧城市与测绘地理信息发展高层论坛在盐城召开

3月16日，由中国测绘地理信息学会、江苏省测绘地理信息局、中国矿业大学和盐城市人民政府联合主办的2016年中国智慧城市与测绘地理信息发展高层论坛在盐城成功召开。国家测绘地理信息局副局长李维森、江苏省测绘地理信息局局长施建石、盐城市人民政府副市长张京麒出席了开幕式并致辞。李德仁、王家耀、杨元喜、郭仁忠、张祖勋等两院院士出席论坛。

国家测绘地理信息局副局长李维森，李德仁、王家耀、杨元喜、郭仁忠等院士，长江学者吴立新教授分别作报告。与会专家学者全面梳理当前智慧城市建设与测绘地理信息发展过程中所暴露出的难点及问题，寻找行业解决方案和未来发展之路，探讨高分遥感、物联网、云计算、大数据、卫星导航、对地观测、室内定位等在智慧城市的融合应用进行了深度剖析、交流探讨，为智慧城市建设指明了发展方向。围绕测绘地理信息在智慧城市建设中的作用、测绘地理信息行业如何借助“互联网+时空大数据”实现跨界融合跨越发展、测绘地理信息行业如何更好地服务“智慧城市”建设等议题进行高端对话，并与参会人员互动。



全国人大环资委在浙江开展《测绘法》修订调研

为做好《测绘法》修订工作，推动《测绘法》修订草案尽快审议出台，全国人大环资委组成调研组，于3月21日至25日赴浙江开展了《测绘法》修订调研。调研组由全国人大常委会委员、环资委主任委员陆浩带队，成员包括：环资委副主任委员卫留成、王庆喜，全国人大常委会委员李清印，全国人大民委委员金华，国家测绘地理信息局副局长宋超智。

调研组首先来到浙江省测绘地理信息产业园，考察了产业园地理信息行政服务中心，联合国全球地理信息管理德清论坛永久会址建设情况，听取了入园企业产品、技术成果介绍。22日上午，调研组召开《测绘法》实施情况座谈会，浙江省人大、省政府法制办、省测绘与地理信息局及有关单位人员参加座谈。省测绘与地理信息局负责人向调研组汇报了全省测绘地理信息工作情况及《测绘法》贯彻执行情况，并对《测绘法》修订提出了意见和建议，宋超智作了补充和说明。23日和24日，调研组分别考察了台州市和温州市测绘地理信息工作；25日上午，调研组在温州市召开座谈会，听取了全国和浙江省海洋测绘工作报告。



测绘地理信息工作被列入甘肃省五年规划纲要

近日，甘肃省人民政府印发了《甘肃省第十三个五年规划纲要》（以下简称纲要），对全省“十三五”基础测绘工作提出了明确的要求“加强基础测绘，实现省级基础测绘成果省域更新，开展地理国情监测，建立地理信息大数据共享交换平台”，这是测绘地理信息工作继列入“十二五”规划纲要之后又一次被列入甘肃省五年规划纲要，充分体现了省委省政府对测绘地理信息工作的高度重视，也充分体现了测绘地理信息工作在国民经济和社会发展中的重要性。

甘肃省测绘地理信息局高度重视，第一时间学习传达了纲要精神，并对落实纲要提出的目标任务进行了安排部署：一是纲要对测绘地理信息工作提出的要求，是“十三五”期间全省测绘地理信息工作转型升级发展的指导性文件，要认真学习、深刻理解，充分认识其重要性和重要意义，为落实纲要提出的目标任务奠定思想基础；二是要积极主动与相关职能部门做好衔接落地工作，为实现纲要提出的目标任务创造宽松的外部环境；三是机关各处室在深刻领会纲要精神的同时，研究提出落实纲要对测绘地理信息工作提出的目标任务的具体措施，并结合工作重点和具体情况，排出时间表，明确责任部门、责任人，抓好督查和落实工作，真正把纲要对测绘地理信息工作提出的目标任务落到实处，收到实效。



农业部、财政部、国土资源部、国家测绘地理信息局联合下发通知要求

4月18日，农业部、财政部、国土资源部、国家测绘地理信息局联合下发通知，要求进一步做好农村土地承包经营权确权登记颁证有关工作。

通知从加快工作进度、抓好任务落实，严守工作程序、确保工作质量，规范采购行为、加强管理服务，严格权属调查、保证信息准确，强化过程督查、做好成果验收，加快数据库建设、保障成果汇交，严守保密规定、保障数据安全，强化资金保障、规范资金使用，积极探索创新、拓展成果应用，妥善解决纠纷、维护农村稳定十个方面提出工作要求。其中多个章节涉及测绘地理信息工作。

通知指出，各地要按照法律政策规定和技术标准要求，严格遵循准备工作、权属调查、纠纷调处、审核公示、完善合同、建立健全数据库和信息系统、建立登记簿、颁发证书、资料归档等程序，扎实做好各个环节的工作，确保图形、簿证记载的面积、坐落、界址与实地相符，确保承包合同、登记簿、证书记载的确权信息真实准确、完整一致，符合标准规范，得到农民群众认可，经得起历史检验。严禁减少必要的实地指界、测量等环节，防止简单以图定界、以面积定界。

通知要求，各地要严格执行《政府采购法》等法律和有关规定，规范权属调查测绘、数据建库等采购行为，确保公开、公平、公正。参与权属调查测绘项目竞标单位，原则上需具备乙级以上相关专业测绘资质。不提倡采用最低价评标法确定测绘单位，不得低于成本价采购，不得违法收取中标、成交单位有关费用，不得恶意拖欠中标、成交单位项目经费。



重庆启动“公益地图 智绘重庆”编制工作

为贯彻落实《地图管理条例》相关规定，推进公益性地图产品服务社会、服务民生，促进测绘地理信息行业提升服务水平，近日，重庆市规划局（重庆市测绘地理信息局）印发通知，正式启动面向全市范围内的“公益地图智绘重庆”编制工作。

通过此项工作，各级测绘地理信息行政主管部门一是要编制本行政区域标准地图，如区县标准画法样图、区县在全市区位关系地图、综合地图等（包含政区、居民地、交通、水系等基本要素）；二是要编制本行政区域便民地图，如美食地图、休闲地图、公交地图等；三是积极争取本级政府网站和手机客户端开设地图链接，提供免费浏览、下载服务；公开展示、登载、赠阅纸质地图、互联网地图、电子地图等。



广西出台“多规合一”试点工作方案

日前，广西壮族自治区人民政府正式印发《广西开展省级空间性规划“多规合一”试点工作方案》，明确“多规合一”试点工作的指导思想、目标任务、主要措施、任务分工、时间要求等。

广西“多规合一”试点工作的主要目标任务是：打造全国省级空间性规划“多规合一”示范区，形成可复制、可推广的经验，为全国推进“多规合一”先行先试。自治区政府要求于2016年6月底前，研究提出广西开展国家“多规合一”改革总体思路和对策建议，将试点方案、专题研究、“一区三县”试点空间规划总图、空间规划基础信息技术规程和平台等系列成果汇总，报国家发展改革委和国家测绘地理信息局。为加强试点工作的组织领导，广西壮族自治区成立了试点工作领导小组，由自治区主席陈武担任组长。



智慧太原大数据建设将步入快车道

4月11日，太原市国土资源局与国家北斗导航位置服务数据中心（山西）分中心项目相关负责人就国家北斗导航位置服务大数据建设进行了协商对接，初步达成大数据共建共享协议，将着手大数据融合的顶层设计与制定相应的实施方案和技术细则。此举标志着“智慧太原”大数据建设将步入快车道。

山西数据中心项目将由山西长娥北斗导航数据服务有限公司投资建设并负责运营，建设周期为3年共计3期，总投资约21亿元。该项目受到省市领导的高度重视，山西省长李小鹏专门召开常务办公会议研究，太原市副市长王建生召开了建设现场办公会议，明确了近期的工作任务。目前，6万平方米的数据中心大楼已在太原经济开发区建成，正在进行硬件设备安装。

山西长娥北斗导航数据服务有限公司负责人介绍，北斗大数据融合以“政府引领、企业牵头、市场调节”的模式，进行资源整合，大数据融合是山西数据中心建设的关键内容。太原市国土资源局现有的各类基础地理信息数据成果融合到“山西数据中心”后，将使国家北斗数据中心的太原市域基础地理信息数据更加丰富，促进“智慧太原”大数据建设步入快车道，在山西省智慧城市、交通、旅游、安全生产等产业应用项目中起到积极的示范作用，对提高区域内城市管理水平及应急响应能力、提高社会生产效率、改善人民生活质量、促进转变经济发展方式都具有积极意义。



乌鲁木齐市2016年1:1万基础测绘项目签约仪式举行

近日，乌鲁木齐市2016年1:1万基础测绘项目签约仪式举行。

签约仪式上，新疆维吾尔自治区测绘地理信息局相关负责人介绍了自治区2016年1:1万基础测绘项目总体情况，其中安排落实乌鲁木齐市1:1万基础测绘地形图86幅，面积达2150平方千米。乌鲁木齐测区在2014年实现乌鲁木齐市1:1万基础测绘基本全覆盖的基础上，首次安排更新项目。该项目成果将为乌鲁木齐市丝绸之路经济带核心区“五大中心”建设提供坚实的、现实性强的测绘地理信息保障。

乌鲁木齐市相关负责人指出，截至目前，新疆局在乌鲁木齐市基础测绘方面累计投入资金1180多万元，完成1:1万基础测绘面积1.55万平方千米。该项目成果广泛应用于乌鲁木齐市城市建设、维稳处突、脱贫攻坚等领域，成效显著。此次更新范围涉及乌鲁木齐市天山区、沙依巴克区，经济技术开发区（头屯河区）等多个区县，各区县及相关部门要高度重视基础测绘工作的重要性，落实好各项工作安排。乌鲁木齐市国土资源局要认真做好基础测绘业务联系和协调工作，确保项目顺利完成。



四川省卫星导航与位置服务基础平台启用

3月10日，目前国内规模最大、覆盖区域最广、以北斗为主的四川省卫星导航与位置服务基础平台正式启用，将面向全省政府部门、行业及公众用户提供空间基准服务、位置服务。

四川省卫星导航与位置服务基础平台是我省重要的空间定位基础设施，是国家现代测绘基准体系的重要组成部分。该平台建设历时7年，由四川省测绘地理信息局组织建设，现已建成由100座北斗连续运行基准站、数据链路系统及数据处理与服务中心组成的覆盖全省的连续运行基准站服务平台。平台自去年4月试运行以来，注册单位超过300家，注册用户超过2300个。

遥感技术助力“十三五”，引领跨界应用

——访中国科学院院士童庆禧

好雨知时节，当春乃发生。伴随着 2016 年北京的第一场春雨，《测绘大地图》走进中国科学院遥感与数字地球研究所采访了中国科学院院士、国际欧亚科学院院士童庆禧。作为我国遥感技术应用领域的最早开拓者之一，童院士 80 岁高龄依然精神矍铄，面对记者的提问侃侃而谈，围绕遥感测绘从“十三五”规划讲到大数据应用，又延伸到智慧城市，童院士字字珠玑，并且结合时事深入浅出地描绘出了一幅幅中国测绘地理信息行业发展的“大地图”。

1. 随着全国“两会”的闭幕，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》（以下简称“十三五”）的正式发布，我国又进入到新的五年规划。在“十三五”期间，测绘地理信息行业将有什么样的发展？您对于测绘地理信息行业有什么样的期许？

童庆禧院士：测绘地理信息在“十三五”期间，作为国家基础信息建设主要是提升服务保障国计民生的能力和水平，更好服务国民经济发展。在未来五年中，中国遥感技术将步入能快速及时提供多种观测数据的新阶段。遥感图像的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率都会有极大的提高。其应用领域随着空间技术发展，尤其是地理信息系统和北斗系统的发展及相互渗透，将会越来越广泛。

此外，社会经济的发展离不开科学决策，而国家地理国情普查对决策有着重要价值。以国民经济的支撑点土地资源为例，我国到底有多少土地，多少可用耕地，这件事情关乎着中国发展的根本。以国土资源部为主的开展第二次土地资源大调查，在调查中基本上全是运用遥感技术采集的信息。首先收集遥感信息，然后在遥感信息基础上分析，最后得出的数据建立数据库。随着先进测绘技术的发展和运用，在“十三五”期间，国家对地理国情将更加了解，制定发展规划也



童庆禧 中国科学院院士

将更有科学依据。

在“十三五”规划纲要中明确提出“提升测绘地理信息服务保障能力，开展地理国情常态化监测，推进全球地理信息资源开发”。我想国家测绘地理信息局和中国测绘地理信息学会以及测绘地理信息的从业者都肩负着重要的历史使命，完成好国家规划，也将是我的期待。

2. 目前，我国的遥感技术应用，已经取得了巨大的成就。您能不能介绍下遥感技术在我国的发展情况？

童庆禧院士：从 1970 年发射第一颗卫星开始，

中国已经陆续发射了一百多颗卫星。近年来，中国每年都要发射十几颗卫星，其中约一半是遥感卫星，这些卫星为我国的测绘及地理国情监测发挥了重要作用。

在测绘卫星广泛应用之前，我国测绘主要依靠航空摄影，随着卫星技术的发展才逐渐过渡到卫星测绘。在大比例尺制图方面，目前我国仍是以航空摄影为主。但是，近两年大量无人机遥感企业在“大众创新，万众创业”的浪潮中涌现，成为了遥感测绘领域新生力量，这也是产业发展和技术发展相结合的重要趋势。

一直以来，国家对遥感卫星发展十分重视，以前卫星都是国家单位进行研发、设计并发射。现在国家鼓励民间资本参与国家民用空间基础设施建设，鼓励民间资本研制、发射和运营商业遥感卫星，提供市场化、专业化服务。国家提倡多渠道投资，政府部门也陆续出台了一些政策。目前国内已经出现了第一家自行研制卫星的商业遥感公司——长光卫星技术有限公司，该公司已经具备了年产 15 颗卫星的能力。同时，我国卫星遥感分辨率也在不断提高，目前已经突破米级分辨率。例如“吉林一号”，地面分辨率达到 0.72 米。“吉林一号”的发射是一个很大的突破，最主要的是立足于国产技术自行研制和发射卫星并以民营企业的方式进入卫星发展行列。北京二十一世纪空间技术应用股份有限公司是另一种类型的企业，根据市场需求自主提出了“北京一号”和“北京二号”卫星的设计指标，通过与英国合作开发完成了商业遥感卫星的研制、发射、测控、接收以及遥感数据和信息的服务，形成了完整的遥感卫星应用技术和服务的产业链。开创了企业拥有卫星、运营卫星并基于卫星开展信息服务的先河。这不仅在中国而且在亚洲地区均尚无先例。通过两家卫星企业的发展也可以推断，商业卫星产业有着广阔的发展空间，但是，这些企业的发展和完善还有很长的路要走，还有待卫星技术的日臻完善，商业运作和管理水平的提高，更有待于国家政策支持。

虽然我国卫星产业与国际发展基本保持同步态势，但是也要看到与发达国家的差距，像美国在综合实力和创新能力仍是处于世界领先地位，美国太空探

索技术公司不仅实现了卫星运载火箭的商业化，大大降低了卫星，特别是微小卫星的发射成本。当前他们已经成功实现了一级火箭的海上回收试验，如果一级火箭，甚至将来二级火箭的回收达到常态化和业务化，卫星的发射成本将成数量级的下降。我相信凭借我们中华民族的聪明才智，我国的卫星技术不会亚于国外。尤其是在遥感技术的应用方面，我国还是一直走在前列。作为一个从事遥感专业的科学工作者，我由衷地为我国遥感测绘地理信息行业欣欣向荣的发展感到欣慰，相信今后的发展也将会越来越好。

3. 遥感技术的应用方面有着那些重要进展及事例？

童庆禧院士：遥感技术能够应用于土地调查、资源勘查、环境监测、灾害监测、智慧城市建设、交通设施监测等很多领域。对具体一个城市来讲，遥感测绘应用在城市整体规划上，通过卫星影像可以很容易判断哪些是违章建筑，哪里需要修路、修桥。有了卫星数据，城市里新建的马路很快就能进入导航系统，不用再担心地图更新速度落后于城市建设步伐了。

卫星和航空遥感在 2008 年的汶川抗震救灾中发挥了重要作用。汶川地震发生后，国家紧急启动应急工作机制，利用多种卫星，调集了遥感飞机，获取了大量信息，为抗震救灾提供了及时的遥感信息服务。在汶川地震后几年的玉树地震、舟曲泥石流、雅安地震等一系列救灾过程中，不同分辨率的卫星和航空遥感数据，为中央领导和有关部门，特别是对于各级抗震救灾指挥系统了解灾情、部署救援行动提供了重要而及时的信息。遥感卫星监测分析了道路通行状况，标识了沿路山体滑塌、泥石流的分布及其现状；不断监测堰塞湖，特别是堰塞湖的分布及其准确位置，分析堰塞湖动态变化，为疏导工作提供了重要信息。

此外，当下许多互联网公司也在参与到遥感技术的合作中，例如导航、数字地图等，已经与我们的日常生活密不可分。

4. 随着大数据时代的到来，遥感技术如何能借助大数据信息，实现更多的跨界应用？

童庆禧院士：现在我们往往称呼遥感大数据，我认为不是很科学。大数据是一个庞大的数据量，包含了你能得到的一切数据，仅是一张测绘图或者更多，都不能称之为大数据。“大数据”的四大特征概括起来即4个“V”，即Volume（容量）、Variety（种类）、Value（价值）、Velocity（速度）。

在国外的一些机构利用遥感测绘获得的夜间灯光图，可以测算出交通道路、居民地等与人口、城市等信息。这就是利用包括自然、人文、社会等数据和遥感数据进行的综合分析而产生的有价值的信息。近段时间，我也在思考大数据的应用。例如，目前我国有些城市存在住宅小区、开发区、广场等的盲目建设问题，没有进行有效的科学分析和规划就开工建设，受到地方利益的驱动，导致了很多小区占地很大，入住率很低，出现所谓“鬼城”的现象。近年来，我到过一些地区，许多城市在发展上由于没能把握好科学的规划，出现了很多空置的住房。我国的住房空置率是一项不可忽视的问题，有专家认为，我国现有的空置住房甚至可容纳32亿人居住！假设通过遥感地理信息和大数据分析方法相结合，把白天和夜间的高分辨率遥感影像进行对比分析，就能很清楚地了解“鬼城”的分布和住房空置的情况，从而为政府出台房地产行业政策提供依据。因此我觉得应该把不同时间、不同来源的数据进行融合，并和经济、人口等数据进行综合分析，肯定能得出有用的信息，进行更多相关的跨界应用。

5. 近两年，国家提出加强现代信息基础设施建设，建设智慧城市。遥感技术在其中将发挥什么样的作用？作为跨界应用的过程中有没有技术难点？

童庆禧院士：遥感技术主要提供空间信息，智慧城市的建设是一个综合、复杂的工程，必须要有空间信息支撑才能正常运转。

打个比喻，智慧城市的建设就像一个人。人为什

么智慧？是因为他有感官，感官系统构成了人对周围环境系统的认知，而眼睛又是获取信息的最重要的器官。所以智慧城市的建设也必须要有“一双眼睛”，才能够对城市发展形成有效全面的监测，甚至对于“眼睛”看不到的地方和现象也要进行监测，这就是遥感。如果一个城市有完善了遥感系统，将会为城市的发展提供更智慧化的发展意见。如果没有对城市及时完整的了解，制定政策计划肯定会盲目。

除了“五官”的感知系统之外，智慧城市还要不断积累和学习。前一段时间，像谷歌AlphaGo通过深度学习，已经能够在极其复杂的围棋上打败了韩国的李世石，这就是计算机的高度智慧化和智能化。其实，智慧城市的建设，也是需要借助城市的大脑，云计算系统，对庞大的、无处不在的数据和信息进行分析并不断深化学习的过程。城市对信息要有自采集、自组织、自学习、自完善、自认知、自决断、自执行的能力，不能像现在一样事事靠人。只有这样吉林松花江的污染事件、天津危险品仓库的爆炸事件才能从根本上杜绝。

虽然我国智慧城市建设取得了一定成效，但智慧城市的建设实际上也只处于初级阶段，是我们努力的方向和愿景，建设仍需积极探索。随着遥感技术、传感技术、通信技术、互联网和物联网技术等的运用，我们的城市会越来越聪明，越来越智慧，但是距离理想中的智慧化城市，恐怕还是有很远的路要走。当下最重要的是建立起城市的多维遥感监测和视频监控体系、城市互联网体系、数据和指令传输体系等，只有这些基础信息收集体系的建成，我们的智慧城市才有可能实现。

6. 作为中国测绘地理信息学会的会刊，《测绘大地图》正式创刊，对于刊物您有什么建议？

童庆禧院士：集各方面智慧于刊物，形成一个重要的交流平台，促进我们测绘地理信息的大数据、大地图的发展。让业内认识到事情的重要性，更好地运用这些数据，更多地普及知识。

大数据时代的来临，基于地理信息的新型应用和服务越来越多，测绘地理信息如何利用大数据？

为推动和繁荣地图大数据领域的发展

中国测绘地理信息学会地图大数据创新工作委员会正待成立

服务宗旨

立足于地理信息，吸纳更多行业外的成员加入，促进产业发展

通过多领域、多行业合作，实现资源整合和数据共享，促进测绘地理信息与大数据融合及成果应用

促进地图大数据行业的发展，推进相关标准规范的制定和应用

开展国内外相关学术交流等活动，激发创新成果的产出

加强测绘地理信息行业与大数据行业的交流，推动大数据技术在测绘地理信息行业的应用

地理国情与复杂系统

王家耀¹, 谢明霞²

(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 河南郑州 450052; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079)

【摘要】研究地理国情复杂系统的意义在于合理表达“资源—环境—生态—经济—社会”系统的综合复杂关系。针对我国地理国情统计分析工作所面临的研究内容不统一、范围不一致、目标不明确等问题, 本文基于复杂系统理论和协调度分析方法, 分别从概念、理论与方法的角度探讨并设计了相应的解决途径。通过对地理国情、地理国情普查、地理国情统计分析的概念以及三者间的关系分析, 明确和界定了地理国情的统计内容和分析范围, 具体化了地理国情统计分析目标; 对比分析了地理国情与复杂系统的基本特征, 以及协调度分析与地理国情统计分析的目标一致性, 提出了地理国情复杂系统的概念, 并对其进行了定量描述; 复杂系统理论为地理国情统计分析提供了新的理论指导, 协调度为地理国情统计分析提供了新思路。在此基础上设计了地理国情复杂系统的测度方法和决策分析方案。通过地理国情复杂系统协调度从宏观上分析总体趋势, 结合各子系统间协调度和单系统协调度从微观上确定修复方向, 并制定具体改进策略, 从而实现地理国情统计分析的宏观目标。

【关键词】地理国情; 复杂系统; 统计分析; 协调度

1 概念分析

地理国情主要是指地表自然和人文地理要素的空间分布、特征及其相互关系^[1-2]。狭义来看, 地理国情是指与地理空间紧密相连的自然环境、自然资源基本情况和特点的总和; 广义来看, 地理国情是指通过地理空间属性将包括自然环境与自然资源、科技教育状况、经济发展状况、政治状况、社会状况、文化传统、国际环境和国际关系等在内的各类国情进行关联与分析, 从而得出能够深入揭示经济社会发展的时空演变和内在关系的综合国情^[3]。地理国情普查是指对一个国家的陆地国土范围内的地表自然和人文地理要素进行普查。它是全面获取地理国情信息的重要手段之一, 是掌握地表自然、生态以及人类活动基本情况的基础性工作^[3]。

我国地理国情普查要素包括地形地貌、植被覆盖、荒漠与裸露地、水域、交通网络、居民地及设施和地理单元七大类^[4]。其中, 地形地貌、植被覆盖、荒漠与裸露地和水域等属于自然地表要素; 交通网络、居

民地及设施和地理单元等属于人文地理要素。

地理国情统计分析是指通过建立多尺度地理空间单元划分标准体系, 形成地理国情统计单元, 以地理国情普查数据为基础, 融合其他专业部门的统计数据, 采用有效的(适当的)统计分析方法, 从不同的维度综合分析资源、环境、生态、经济、社会等要素的内在空间特性及其在地理空间上的相互作用和关系, 揭示它们的分布规律和发展趋势, 从而提取有用的地理国情信息并形成结论, 为科学决策提供依据或建议。从以上概念可以看出: 我国目前所开展的地理国情普查的对象和研究内容属于狭义角度的地理国情, 而地理国情统计分析对象则为广义的地理国情。地理国情、地理国情普查以及地理国情统计分析概念间的相互联系如图1所示。无论是单从概念的角度分析, 还是结合三者之间的联系, 不难看出地理国情普查是地理国情研究工作的基础, 其目标是摸清我国地理国情家底。地理国情统计分析是核心, 是地理国情普查数据向地理国情信息转化和提升的必要手段之一。

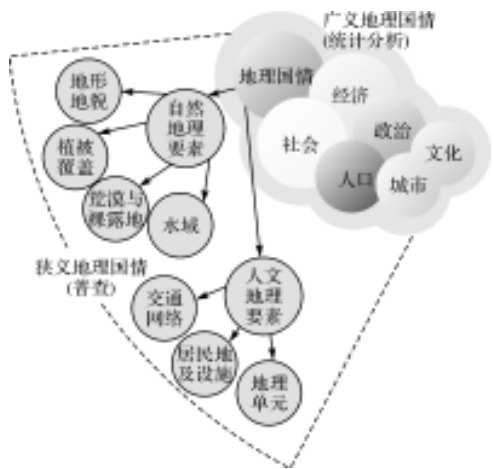


图1 地理国情概念分析

现阶段我国承担或从事地理国情统计分析任务的科研院所和研究人员大多将地理国情统计分析作为工程项目, 无论从方法、过程还是成果发布上, 基本上是参照基础测绘、传统地图制图、空间分析、GIS系统开发等思想和模式进行实施, 而未对地理国情统计分析的研究对象进行前期的理论分析和探讨。显然这种以工程技术方法解决复杂系统问题并不是地理国情所对应的理论框架, 因为地理国情是一个关系复杂、多维、兼具多理论和多技术背景的复杂课题。理论研究滞后于应用研究导致了目前研究成果难以整合, 在具体实践过程中存在着以下问题:

(1) 内容不统一。目前地理国情普查的要素内容已统一, 但对于需结合的其他要素(如资源、环境、经济、人口、社会、政治、文化)的研究内容不统一。

(2) 范围不一致。由于内容的不统一直接导致了研究范围的不一致, 目前的研究成果大多体现了大而全的特点, 而未从概念出发充分分析和挖掘地理国情的本质特征。

(3) 目标不明确。一方面, 现阶段研究方法考虑了单要素的综合成果(如各要素的综合指数), 而未针对地理国情提出具体的总体目标和成果形式; 另一方面, 由于没有理论的指导, 在方法的选择上目的性不明确。

概念是反映客观对象本质属性的思维形式, 地

理国情统计分析的前提是弄清地理国情的概念, 分析地理国情的内涵和实质, 明确和界定地理国情需要统计和分析的内容和范围, 并制定具体的地理国情统计分析目标。关于地理国情普查内容, 国外一些测绘机构都有各自的定位和侧重^[5]。例如: 美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)将地理分析与监测内容定位于生态环境、气候变化、土地利用、能源矿产、环境评估、自然灾害和水资源等方面; 澳大利亚地学署侧重资源开发、环境管理、重要基础设施安全、灾害应急管理 with 评估等方面的研究; 英国军械测量局(Ordnance Survey, OS)、德国联邦制图与大地测量局(Bundesamt fuer Kartographie und Geodäsie, BKG)和法国法国地理院(Institut Géographique National, IGN)等测绘部门仍主要关注对基础地理信息数据库的管理和维护; 日本测绘的重点在于对土地利用的管理。整合和借鉴国外测绘机构所从事的地理分析与监测的内容和经验, 根据概念分析、普查要素规定及采集内容和现有研究成果, 以及国务院下达的相关文件和通知精神, 笔者认为我国地理国情统计分析内容应该包括资源、环境、生态、经济和社会要素。其中, 资源要素由水、土地和森林资源构成; 环境要素由环境保护和环境质量构成; 生态要素主要研究生态基本状况, 包括生物丰度、生态脆弱性、生态弹性等; 经济要素研究整体发展和城镇和交通网络等发展情况; 社会要素研究主要包括社会条件和社会现象。地理国情统计分析的具体目标为分析、表达和度量各要素在地理空间上的相互作用和内在关系, 客观反映我国的资源利用程度、环境承载能力、生态平衡状态、区域经济发展潜能和社会事业发展水平。

如何继承和发挥传统测绘的优势, 在地理国情研究工作中实现思想和技术的双重转型, 从而避免用基础测绘的思维方式解决地理国情普查与监测的问题, 避免地理国情普查与监测可能出现的“数据海量, 知识贫乏”等问题, 是摆在我们面前迫切需要解决的问题。

(1) 思想上转型: 吸纳地理学、统计学、社会

经济学、系统论、协同论等其他学科思想，做到思想先行，理论指导行动。

(2) 技术上转型：发挥测绘部门在地图制图、空间分析等方面的优势，借鉴和结合地理分析、统计分析、系统分析、协同分析等方法，纳百家之长，补己之短。

2 地理国情与复杂系统的关系剖析

从广义上看，地理国情包括资源、生态、环境、经济、社会等众多要素，虽然各要素都是不同性质的系统，都有各自的结构、功能和发展规律，但其各自的存在和发展又受其他系统结构和功能的制约，要素间具有广泛的非线性作用机制，各要素间的联系和制约呈现了地理国情的本质属性——复杂性和综合性。随着“资源—环境”、“环境—经济”、“资源—环境—经济”、“资源—环境—生态”、“资源—环境—经济—社会”等二元、三元和四元等系统^[6-16]研究的不断深入，在研究地理国情时不能将资源、环境、生态、经济和社会要素割裂开来，而必须将它们视为一个统一的整体，否则很难开展更加全面、深入、系统的分析工作。地理国情除了本身的整体性、复杂性和综合性外，还具有以下特征：

(1) 地理国情的多维结构特征。一是地理国情信息的多维性；二是地理国情的综合分析研究是一个多维决策过程。地理国情信息在同一坐标位置上会具有多个专题和属性的信息结构。例如在一个地面点位上，可取得高度、噪声、污染、交通等多种信息。地理国情的综合分析是对地理国情及其组成要素的相关性、有序性、目的性的综合评判、规划和协调^[9]。

(2) 地理国情的非线性特征。地理国情的组成要素是由无限多个自然和社会因子（指标）构成的函数，各要素通过相互作用耦合成一种全新的整体，这一整体功能远超出各要素功能之和。非线性思维方式力图把资源、环境、生态、经济和社会的矛盾与利益加以整合，探求资源开发利用、环境保护、生态

平衡、经济有序增长、社会可持续发展的协调统一^[16]。

(3) 地理国情的时序特征。地理国情反映的是客观变化的物质世界和社会现实，这就要求对地理国情涉及的相关要素进行及时采集和更新，并根据多时相的数据和信息来寻找随时间变化的地理国情变化趋势，进而对未来作出预测或预报；地理国情各要素间和要素内部本身都存在着物质、能量和信息的流转，要素间的协调度和地理国情的整体功能是随时间的变化而变化的。

(4) 地理国情的协同共生特征。既包括各要素组成指标之间的协同共生性，即资源内部分布格局与开发利用水平的协同共生，环境内部保护水平与质量状态的协同共生，生态内部生态功能与生态平衡的协同共生，经济发展水平和发展质量的协同共生，社会条件、人民生活状况与社会体制的协同共生，又包括资源、环境、生态、经济和社会要素间的协同共生，即经济、社会的发展通过技术手段的提升和社会制度的进步改变资源的结构、环境的存在状态以及生态的物质和能量流转。同样，资源、环境和生态在为经济的发展、社会的稳定提供物质支持的同时，也通过资源结构的合理性、环境的承载力、生态的文明程度制约着经济的发展和社会的稳定。由此可见，资源、环境、生态、经济与社会之间存在着彼此共生、相互关联的关系。资源、环境、生态、经济与社会协调发展是既要求它们之间的彼此协调，也要求它们具有发展的持续性。

综上所述，地理国情与复杂系统的基本特征是一致的。在研究方法和相应的研究目标方面，协调度作为研究复杂系统的重要方法之一，其宗旨是全局协调优化设计，使复杂系统中各子系统相互协调、彼此配合，共同完成复杂系统的总任务，实现总目标，这与地理国情统计分析的具体目标在方向上是一致的。地理国情与复杂系统之间的相互联系和内在关系如图2所示。因此，地理国情本质上是一个集资源、环境、生态、经济、社会要素于一体的复杂系统。具体目标就是定量反映和表达“资源—环境—生态—经济—社

会”复杂系统的关系，而这种关系到底以何种方式进行度量在以往的研究中未得到充分重视。复杂系统理论为地理国情统计分析提供了新的理论指导，作为复杂系统测度分析的重要方法，协调度为地理国情要素间的关系度量提供了新思路。地理国情的统计分析工作可以在复杂系统科学视角下进行理论转型。在此基础上，地理国情的统计分析理论基础会得到极大的丰富和完善，在理论指导下的地理国情统计分析工作将会使研究内容更合理、目标更明确、成果更具说服力。

3 地理国情复杂系统

地理国情复杂系统是由资源（resources）、环境（environment）、生态（ecology）、经济（economy）、社会（society）5个子系统（要素）相互交织、相互作用、相互渗透而构成的具有特定结构和功能的开放复杂的动态大系统，其组成及各子系统的相互联系如图3所示。地理国情复杂系统可定量描述为

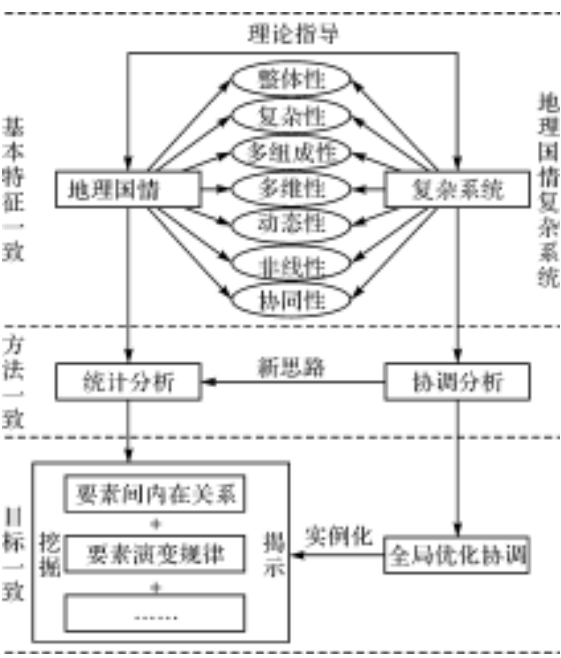


图2 地理国情与复合系统的相互联系和内在关系

$$GCCS \subseteq \left\{ \begin{array}{l} S_{resource}, S_{environment}, S_{ecology}, \\ S_{economy}, S_{society}, R, T \end{array} \right\} \quad (1)$$
$$\left. \begin{array}{l} S_{resource} \subseteq \{I_{resource}, C_{resource}, F_{resource}\} \\ S_{environment} \subseteq \{I_{environment}, C_{environment}, F_{environment}\} \\ S_{ecology} \subseteq \{I_{ecology}, C_{ecology}, F_{ecology}\} \\ S_{economy} \subseteq \{I_{economy}, C_{economy}, F_{economy}\} \\ S_{society} \subseteq \{I_{society}, C_{society}, F_{society}\} \end{array} \right\}$$

式中 $S_{resource}$ 、 $S_{environment}$ 、 $S_{ecology}$ 、 $S_{economy}$ 、 $S_{society}$ 分别表示构成地理国情复杂系统中的资源、环境、生态、经济和社会子系统； $I_{resource}$ 、 $I_{environment}$ 、 $I_{ecology}$ 、 $I_{economy}$ 、 $I_{society}$ 分别表示上述子系统的指标（复杂系统中动态序参量）； $C_{resource}$ 、 $C_{environment}$ 、 $C_{ecology}$ 、 $C_{economy}$ 、 $C_{society}$ 分别表示各子系统的结构； $F_{resource}$ 、 $F_{environment}$ 、 $F_{ecology}$ 、 $F_{economy}$ 、 $F_{society}$ 分别表示组成各子系统的指标计算函数或方法。地理国情复杂系统中各子系统都是多指标（多因子）的系统，都包含着许多具有复杂关联关系的指标。Ra 为关联系统，是地理国情复杂系统中相关关系的集合，其中既包括各子系统间的关联关系，也包括子系统内部各指标间的关联关系，这种关联关系是各子系统间直接的深层结构的多重关联和借助相关因子而形成的复杂的多向性效应关系，它具有多元性，交互性、层次性和动态性等基本属性^[17-22]。T 为时间，体现了地理国情复杂系统的时序性。

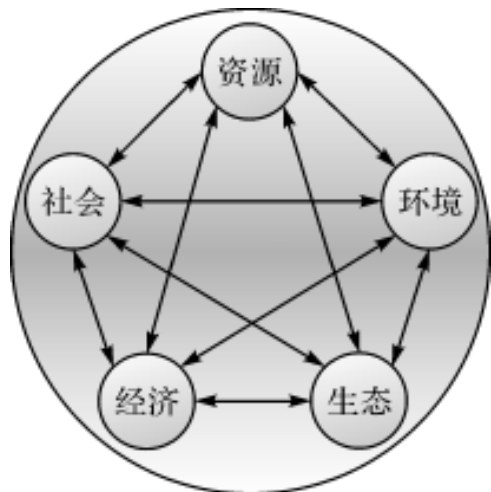


图3 地理国情复杂系统要素组成及其相互联系

（1）资源子系统。资源子系统的物流、能流是环境、生态、经济和社会子系统物流、能流的来源，环境、生态、经济和社会子系统是资源子系统物流、能流持续流动的保证。一个区域内资源的开发程度影响着该区域环境的承载容量、生态的文明程度，也决定着经济、社会的发展程度。

（2）环境子系统。资源的优化、生态的文明对环境具有客观依赖性；环境是经济发展的基础，经济发展对于环境的改变是不可避免的，但这种改变必须保持在环境本身的承载容量内；健康的环境是社会稳定的必要条件之一，环境质量的衰退和环境系统的功能失调，不仅威胁到社会良性运行的物质基础，而且会导致社会系统内部的摩擦和冲突。

（3）生态子系统。区域生态子系统的修复不能突破资源和相关联的外部环境承载力的限制；生态子系统在服务功能上要与经济子系统发展相一致；生态子系统的发展要与社会体制和政策相互协调，生态的动态平衡和良性循环是社会稳定、可持续发展的基础。

（4）经济子系统。资源结构和开发利用的合理能够促进经济的发展；经济的发展不能超过环境的承载容量，且经济活动产生的污染物需在环境的自净能力范围之内；经济的健康发展有助于维持良好的生态环境；经济发展和社会发展的良性循环，能够持续满足人们物质和文化的需求。

（5）社会子系统。社会子系统是有一定联系、相互依存的各种要素的集合。这些要素主要有3类：一是影响经济发展的社会体制，比如政治体制、经济体制以及教育体制等；二是影响环境健康、生态文明的社会条件，比如基础设施建设情况、社会保障福利体系情况、文化教育卫生事业的发展情况等；三是说明人们生活现状的社会现象，比如消费水平、文化形式、生活方式、贫富差距等。这些要素相互作用、相互影响，形成了复杂的系统。地理国情复杂系统的研究内容是探索地理国情各组成要素（子系统）间的内

在联系。复杂系统的不协调是绝对的，协调是相对的，复杂系统追求的总目标是使总体优化。地理国情复杂系统的研究目标是使资源、环境、生态、经济和社会子系统复合后尽量趋于理想协调状态，因此，需要根据构成地理国情复杂系统的各个子系统间相互联系、复杂耦合的特点，按照系统协调的思路，进行全局协调优化设计，使各个子系统相互协调、彼此配合^[22-23]。

4 复杂系统理论支持的地理国情统计分析

这是指以地理国情复杂系统作为统计分析对象，利用协调度分析“资源—环境—生态—经济—社会”复杂系统中各子系统间和子系统内部的协调关系，并以此作为依据对地理国情的整体协调状况进行决策分析，确定地理国情修复和完善的方向，制定相应的调整和改进策略，实现资源、环境、生态、经济与社会子系统的协调最优化。

4.1 地理国情复杂系统的测度分析

对地理国情复杂系统进行测度分析是决策分析工作的前提。复杂系统的协调性是体现复杂系统各子系统内部关系的一个重要特征，协调度是度量系统或系统内部要素之间在发展过程中彼此和谐一致的程度，体现了系统由无序走向有序的趋势，是协调状况好坏程度的定量指标^[23-27]。笔者认为，地理国情复杂系统的测度应采用协调度进行度量。地理国情复杂系统的协调度包括：地理国情复杂系统综合协调度，简称地理国情协调度；地理国情各子系统间的协调度，简称系统间协调度；地理国情各子系统内的协调度，简称单系统协调度。系统间协调度和单系统协调度表达如表1所示，其中 地理国情协调度是描述系统整体协调状态的综合性指标。假设地理国情复杂系统的状态空间为X，任意状态 $x \in X$ ，由协调性定义可知，地理国情协调性实际上是刻画系统状态的一种标量函数，

$$\left. \begin{aligned} cd_{res_env} &= cd_{env_res} & cd_{res_ecol} &= cd_{ecol_res} & cd_{res_econ} &= cd_{econ_res} & cd_{res_soc} &= cd_{soc_res} & cd_{res_ecol} &= cd_{ecol_env} \\ cd_{env_econ} &= cd_{econ_env} & cd_{env_soc} &= cd_{soc_env} & cd_{ecol_econ} &= cd_{econ_ecol} & cd_{ecol_soc} &= cd_{soc_ecol} & cd_{econ_soc} &= cd_{soc_econ} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则对应于状态 x，有 $CDx = cd(x)$ （3）

式中，CDx 表示系统在状态 x 的协调程度，即为地理国情复杂系统协调度， $cd(\bullet)$ 是定义在 X 上的实函数。整体性原则是系统论的一个重要原则。研究地理国情时要始终将其看作一个有机整体。整体的功能不等于各部分功能的简单相加，而是等于各子系统功能之和加上各子系统相互作用形成结构产生的功能^[26]。

子系统	S _{resource}	S _{environment}	S _{ecology}	S _{economy}	S _{society}
S _{resource}	cd _{resource}	cd _{res_env}	cd _{res_ecol}	cd _{res_econ}	cd _{res_soc}
S _{environment}	cd _{env_res}	cd _{environment}	cd _{env_ecol}	cd _{env_econ}	cd _{env_soc}
S _{ecology}	cd _{ecol_res}	cd _{ecol_env}	cd _{ecology}	cd _{ecol_econ}	cd _{ecol_soc}
S _{economy}	cd _{eco_res}	cd _{eco_env}	cd _{econ_ecol}	cd _{economy}	cd _{econ_soc}
S _{society}	cd _{soc_res}	cd _{soc_env}	cd _{soc_ecol}	cd _{soc_econ}	cd _{society}

表1 地理国情复杂系统各子系统间协调度和单系统协调度

（1）单系统协调度计算。

单系统协调度内在表现为组成子系统的各指标间的相互协调程度，外在反映为在多指标综合作用下的各子系统的发展与复杂系统的整体发展状态的协调程度。因此，地理国情复杂系统单系统协调度的计算可通过计算单系统各指标（多因子）与地理国情复杂系统整个指标体系（多因子）的关联关系的求解获得。在构建单系统协调度计算方法时，首先选择能解决多因子与多因子关联关系的数学模型和计算方法，如离差系数分析、隶属函数模型、基尼系数、数据包络分析工具等。其中，对于各子系统及复杂系统的发展状态可用多元回归分析、典型相关分析、主成分分析等方法。然后根据地理国情复杂系统中各子系统的特征确定和设计合理的计算方法。

（2）系统间协调度计算。本质上就是多因子（子系统指标）对多因子（子系统指标）的关联关系分析，因此，其计算原理同单系统协调度，仅计算对象不同。图4为地理国情复杂系统的单系统和系统间协调度计算的具体流程。

（3）地理国情协调度计算方法为

$$CD = \frac{\sum \text{单系统协调度} + \sum \text{系统间协调度}}{n + C_i^2} \quad (4)$$

地理国情协调度计算的前提是假设资源、环境、生态、经济和社会子系统的发展对于地理国情的整体发展具有同等重要程度，其中，n为地理国情复杂系统包含的子系统个数，即 n=5。

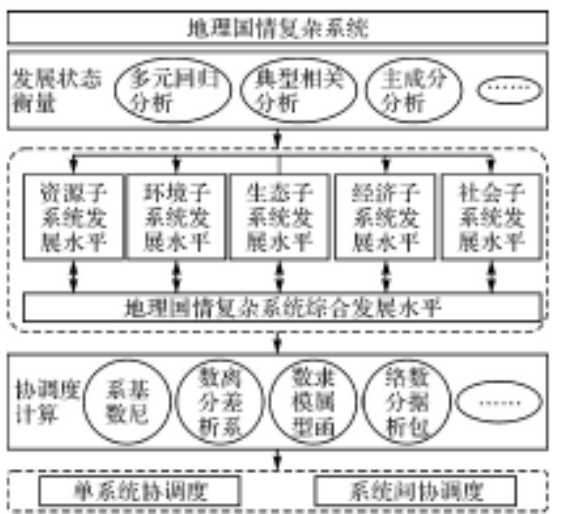


图4 地理国情单系统和系统间协调度计算

4.2 地理国情复杂系统的决策分析

首先分析地理国情复杂系统的当前状态 x_0 ；然后确定地理国情复杂系统期望达到的协调状态 x_t ；最后通过控制、调整和优化方法实现由状态 $x_0 \rightarrow x_t$ 的转移，这一状态转移过程称为地理国情复杂系统的决策支持^[18, 27-28]。其中，具体的控制、调整与优化方法和策略则通过协调度的计算结果判断和确定。根据地理国情复杂系统的时序特征，对不同阶段的地理国情协调度、系统间协调度以及单系统协调度进行计算和分析，从而指导后续地理国情的修复和完善，以及决策的制定。图5为地理国情复杂系统的决策分析框架。

从图5可看出，地理国情复杂系统协调度是从宏观上分析总体趋势，结合各子系统间协调度和单系统协调度从微观上确定修复方向，并制定具体改进策略。

5 总 结

理论研究不足是造成现阶段地理国情统计分析面临各种问题的根本原因。文章在对地理国情、地理国情普查、地理国情统计分析的概念进行深入分析的前提下，明确和界定了地理国情需要统计和分析的要素内容和研究范围，确定了具体的统计分析目标；通过对地理国情和复杂系统的关系剖析，提出了地理国情复杂系统的概念，并对其进行了定量表达；在此基础上，提出了复杂系统支持下的地理国情统计分析和决策分析框架。复杂系统为地理国情的统计分析提供了理论指导，同时，协调度分析为地理国情各组成要素的关系度量提供了新的思路。实现地理国情复杂系统中资源、环境、生态、经济和社会子系统的协调发展是地理国情研究的重要课题，也是当前解决地理国情统计分析面临的各问题的有效途径。

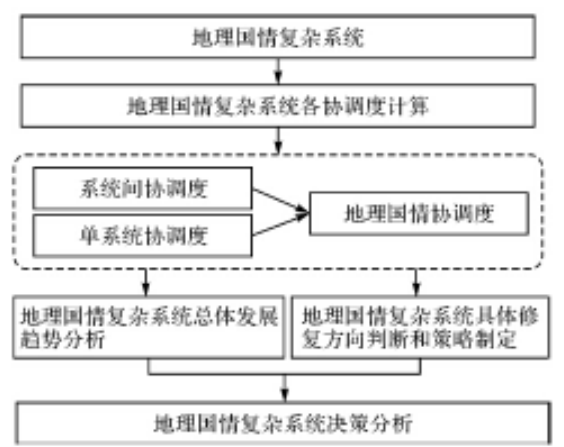


图5 地理国情复杂系统决策分析框架

完全掌握系统的所有信息，由于系统的复杂而变得不可能或由于获取信息代价太大而变得不可行，这表明只能在不完全掌握信息和不确定性的条件下探索地理国情复杂系统演化规律^[29]。测绘部门作为基础地理数据生产和管理的核心部门，过去的工作目标是

基础测绘，包括地图制图、基础地理数据的维护、更新和处理分析，转型后的测绘部门除了提供基础测绘地理信息产品外，应将目标定位在服务于国家当前和未来资源合理开发利用、环境健康、生态文明、经济和社会可持续发展，包括为国土资源利用、环境承载能力、生态文明程度、区域经济发展潜能以及社会发展水平等方面的科学决策提供可靠的、公正的地理国情研究报告和监测信息等。在借鉴国外已有地理国情统计分析经验的基础上，循序渐进地将地理国情复杂系统的协调发展融入资源节约型、环境友好型、生态文明的可持续发展的社会建设各方面和全过程。

参考文献：

[1] 徐德明. 监测地理国情服务科学发展 [N]. 人民日报, 2011-3-29 (016).

[2] 陈俊勇. 地理国情监测的学习札记 [J]. 测绘学报, 2012, 41 (5): 633-635.

[3] 陈俊勇. 关于地理国情普查的思考 [J]. 地理空间信息, 2014, 12 (2): 1-3.

[4] 国家测绘地理信息局. 地理国情普查内容与指标 [EB/OL]. [2013-01-15].

[5] 乔朝飞. 国外地理国情监测概况与启示 [J]. 测绘通报, 2011 (11): 81-83.

[6] 李胜芬, 刘斐. 资源环境与社会经济协调发展探析 [J]. 地域研究与开发, 2002, 21 (1): 78-80.

[7] HUF SCHMIDT M M, JAMES D E, MEISTER A D, et al. Environment, Natural Systems, and Development: An Economic Valuation Guide [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1983.

[8] 杨猛兴. 人口, 资源环境, 经济与社会协调发展研究——以贵州省为例 [D]. 成都: 西南财经大学, 2014.

[9] 马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统 [J]. 生态学报, 1984, 4 (1): 1-9.

[10] 钱利英. 3E 系统协调度评价模型比较及其应用研 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.

[11] 赵涛, 李暄煜. 能源—经济—环境 (3E) 系统协调度评价模型研究 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2008, 10 (2): 11-16.

[12] 毛汉英. 县域经济和社会同人口, 资源, 环境协调发展研究 [J]. 地理学报, 1991, 46 (4): 385-395.

[13] 崔和瑞, 王娣. 基于 VAR 模型的我国能源—经济—环境 (3E) 系统研究 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2010, 12 (1): 23-28.

[14] 罗铭, 陈艳艳, 刘小明. 交通—土地利用复合系统协调度模型研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2008, 32 (4): 585-588.

[15] KAMBONS, HANDABR, BOSERK. A Linear Goal Programming Model for Urban Energy Geconomy Genvironment Interaction [J]. Energy and Buildings, 1991, 16 (1): 537-551.

[16] 秦书生. 复合生态系统自组织特征分析 [J]. 系统科学学报, 2008, 16 (2): 45-49.

[17] 哈肯. 协同学: 大自然构成的奥秘 [M]. 上海: 上海译文出版社, 2005.

[18] 白华, 韩文秀. 复合系统及其协调的一般理论 [J]. 运筹与管理, 2000, 9 (3): 1-7.

[19] VATTAM S, GOEL A K, RUGABER S, et al. Understanding Complex Natural Systems by Articulating Structure Gbehavior Gfunction Models [J]. Educational Tech Gnology & Society, 2011, 14 (1): 66-81.

[20] SAN MIGUEL M, JOHNSON JH, KERTESZ J, et al.

[21] 陈禹, 钟佳佳. 系统科学与方法概论 [M]. 北京: 中

国人民出版社, 2006.

[22] ESPINOSAA, PORTERT. Sustainability, Complexity and Learning: Insights from Complex Systems Approaches [J]. The Learning Organization, 2011, 18 (1): 54-72.

[23] ŠILJAK DD. When is a Complex Ecosystem Stable? [J]. Mathematical Biosciences, 1975, 25 (1): 25-50.

[24] 樊华, 陶学禹. 复合系统协调度模型及其应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35 (4): 515-520.

[25] 孟庆松, 韩文秀. 复合系统协调度模型研究 [J]. 天津大学学报, 2000, 33 (4): 444-446.

[26] MALONET W, CROWSTONK. The Interdisciplinary Study of Coordination [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1994, 26 (1): 87-119.

[27] ZADEHLA. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973 (1): 28-44.

[28] BLUMM N, GHOSHAL G, FORRÓ Z, et al. Dynamics of Ranking Processes in Complex Systems [J]. Physical Review Letters, 2012, 109 (12): 128701.

[29] 吕鸣伦, 刘卫国. 区域可持续发展的理论探讨 [J]. 地理研究, 1998, 17 (2): 131-137.

—— 摘自《测绘学报》——

中国大陆 GPS 速度场的球面小波模型 及多尺度特征分析

程鹏飞¹ 文汉江² 孙罗庆³, 成英燕², 张鹏⁴, 秘金钟², 王华²

(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 河南郑州 450052; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079)

【摘要】利用 1999—2009 年间中国大陆共 1068 个 GPS 站点在东方向、北方向的速度值, 采用 DOG 球面小波多尺度分析方法, 建立了中国大陆东方向、北方向多尺度速度场。球面小波模型的尺度主要根据观测站点的密度来确定, 利用检核点上的已知速度与模型速度之间的均方差来评定模型的精度。利用球面小波模型可以更加清晰地表示速度场的大尺度特征和复杂的局部变化特征。站点稠密区域, 模型在东方向、北方向上的精度分别为 ±0.95 mm/a、±0.97 mm/a, 稀疏区域对应的精度分别为 ±1.32 mm/a 和 ±1.30 mm/a。

【关键词】GPS 速度场; DOG 球面小波; 多尺度估计

1 引言

2000 国家大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000) 于 2008 年 7 月 1 日开始作为我国法定的大地坐标系, CGCS2000 采用 ITRF97 框架, 2000.0 历元^[1, 2, 3]。在使用时, 不同历元下的坐标转换到 CGCS2000 坐标系, 需要进行框架和历元的转换, 而历元转换则需要速度场模型。

GNSS、VLBI、DORIS 和 SLR 等空间大地测量技术的发展极大地推动了速度场和板块运动的研究^[3, 4, 5], 中国地壳运动观测网络工程 (简称“网络工程”) 为研究中国大陆地壳运动速度场提供了丰富的数据^[6]。速度场研究方面, 文献 [7] 采用欧拉矢量法研究了中国大陆速度场, 并给出了相关结果; 文献 [8] 采用基于欧拉矢量的自适应拟合推估模型对中国大陆速度场进行解算, 该方法可以顾及位移场的整体变化趋势和局部运动特征, 提高水平运动速度场的计算精度; 还有多面函数拟合法等方法^[9, 10, 11], 但是这些方法都不能对速度信号进行多尺度分析。

小波分析是目前多尺度分析的主要方法, 球面小波分析技术把小波理论从无限空间的应用转移到球面有限空间。球面小波具有空间和频率局部化的能力, 大尺度主要体现信号的低频信息, 而小尺度对信号的局部特征更敏锐, 主要体现信号的高频信息^[12]。目前球面小波分析方法已经在重力场、磁场和温度场等领域中得到了运用^[12, 13, 14]。文献 [15] 采用球面小波分析方法, 利用 GPS 观测数据对美国南加利福尼亚州速度场进行了研究。

本文介绍了 DOG(difference of Gauss) 球面小波函数的性质^[16], 并利用“网络工程”的 GPS 观测数据, 采用球面小波分析方法对中国大陆水平方向速度场进行了建模分析。

2 速度场的球面小波模型

速度场球面小波模型的构建可简化为 3 个部分:

①进行球面剖分, 获得在球面近似均匀分布的离散格点, 结合观测站点的位置, 对离散格点进行取舍, 选择球面小波函数, 得到小波框架;

②用小波框架表示站点速度;

③求解模型待定系数, 进行多尺度分析。

2.1 DOG 球面小波

DOG 球面小波的函数表达式^[16]为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{X,a}(X') &= \lambda_a(\gamma)^{1/2} \exp\left[-\frac{\tan^2(\gamma/2)}{a^2}\right] - \\ &\quad \frac{1}{a} \lambda_a(\gamma)^{1/2} \exp\left[-\frac{\tan^2(\gamma/2)}{(aa)^2}\right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$
$$\lambda_\xi(\gamma) = \frac{4\xi^2}{[(\xi^2 - 1)\cos\gamma + (\xi^2 + 1)]^2}$$

式中, X 为球面小波的中心极, 且 $X \in S$ (球面); γ 为中心极 $X(\lambda, \phi)$ 和球面上点 $X'(\lambda', \phi')$ 之间的夹角; (λ, ϕ) 和 (λ', ϕ') 为点的经纬度; $a=2-q$, q 为尺度, $q=0, 1, 2, \dots$; $a>1$, 用于调节函数形状; λ_ξ 是以 ξ 、 γ 为变量的函数。图 1 显示了以北极为中心极, $q=3$ 时, 不同 a 所对应的球面小波函数图形, 图 2 显示了它们沿子午线的剖面。由图 1、图 2 可以看出, 球面小波函数的幅值随 a 、 q 的增大而增大; 函数的空间支撑 (以函数中心极为中心, 函数 $\psi_{X,a}(X')=0$ 的最小解 γ 为半径的内部区域) 随 a 的增大而增大, 随 q 的增大而减小^[15]。

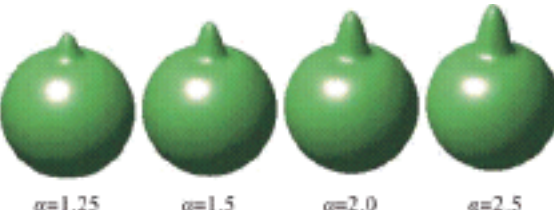


图 1 尺度相同 ($q=3$) 时不同 a 对应的球面小波

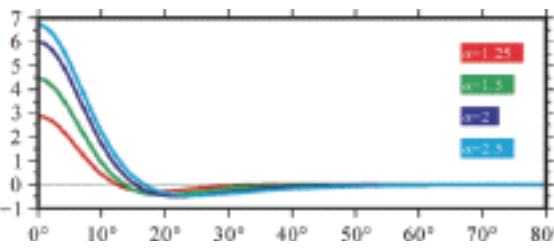


图 2 尺度相同 ($q=3$) 时不同 a 的球面小波函数沿子午线变化

将函数式 (1) 进行球谐展开^[17], 得到不同尺度球面小波函数对应的 n 阶 0 次的正规化球谐系数, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, DOG 球面小波函数是有限带宽函数, 其带宽随尺度的减小而增大。不同尺度球面小波函数的频谱支撑详见文献 [15]。

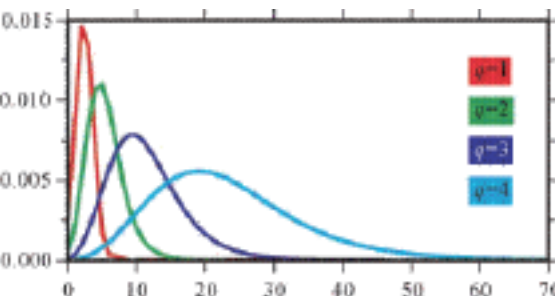


图 3 $a=1.25$ 时不同尺度球面小波函数的球谐系数

2.2 球面小波框架

球面小波框架由一系列球面小波函数组成, 函数之间可以是线性相关的, 相对于基而言, 它在表示信号时更加灵活, 小波框架可通过对位置和尺度进行离散化得到^[12]。通过对正二十面体进行球面三角剖分, 可以获得在球面上近似均匀分布的球面三角格网^[12, 18], 剖分的层次和球面小波函数的尺度相对应, 如图 4 所示, 不同的 q 对应于不同的尺度。

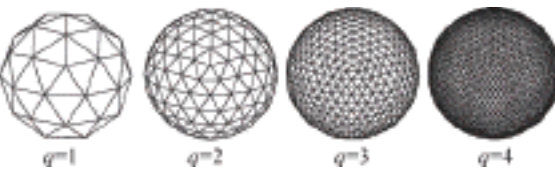


图 4 正二十面体不同尺度的三角剖分

将 $q=0, 1, 2, \dots, q_{\max}$ 球面剖分得到的格网点作为中心极, 并定义不同尺度的球面小波函数, 构成球面小波框架 F

$$F = \{\psi_{X(i,j),a}(X'), X_{(q,j)} \in G_q, q=0, 1, 2, \dots, q_{\max}\} \quad (2)$$

式中，X(q, j) 为球面小波中心极；q 为尺度；j 为格点序号；Gq 为球面格点的集合；a=2^{-q}；X' 含义同前。

球面格点数随剖分层次呈指数增长，这将影响计算速度，因此对框架 F 的简化显得尤为重要。根据站点分布来选取框架可以减少框架中函数的数目，使模型变得更加实用^[15]。简化过程如下：

(1) 去除“空间支撑”内部少于 3 个站点的框架函数，获得模型可用的最小尺度 q_{max}；对于区域内任一点，若 q 对应的空间支撑内多于 3 个站点，则认为该点可用 q 尺度。

(2) 根据站点分布区域范围，求取“半径”L， $L=2\sqrt{S/\pi}$ ，其中 S 为站点分布区域的球面面积（根据站点的最大、最小经纬度确定球面上 4 个点，将这 4 个点围成的区域按 2 个球面三角形的面积计算得到），根据 L 确定可用的最大尺度 q_{min}，使得该尺度所对应的球面小波的空间支撑小于 2L。

按该简化方法，站点分布范围越大 q_{min} 越小，站点密度越大则 q_{max} 越大。

2.3 球面小波表示站点速度的方法

观测站点的速度可用沿东、北及垂直 3 个方向的速度来表示，站点 (λ, φ) 的速度 v(λ, φ) 表示为

$$v(\lambda, \varphi) = v_r(\lambda, \varphi)\hat{r} + v_\lambda(\lambda, \varphi)\hat{\lambda} + v_\varphi(\lambda, \varphi)\hat{\varphi} \tag{3}$$

式中，&rcirc; 为垂直方向；λcirc; 为东方向；φcirc; 为北方向。

由式 (2) 所得 F 作为估计速度场的框架，将速度场用小波函数表示为

$$v(\lambda, \varphi) = \sum_{k=1}^M [a_k g_k(\lambda, \varphi)\hat{r} + b_k g_k(\lambda, \varphi)\hat{\lambda} + c_k g_k(\lambda, \varphi)\hat{\varphi}] \tag{4}$$

式中，M 为框架函数个数；g_k(λ, φ) 为第 k 个小波函数；a_k、b_k 和 c_k 分别为 3 个不同方向上的待定系数。对于给定的 N 个观测站点 (λ_i, φ_i) (i=1, 2, …, N)，观测方程可写为

$$\left. \begin{aligned} v_r^i(\lambda_i, \varphi_i) &= \sum_{k=1}^M a_k g_k(\lambda_i, \varphi_i)\hat{r} + n_r^i \\ v_\lambda^i(\lambda_i, \varphi_i) &= \sum_{k=1}^M b_k g_k(\lambda_i, \varphi_i)\hat{\lambda} + n_\lambda^i \\ v_\varphi^i(\lambda_i, \varphi_i) &= \sum_{k=1}^M c_k g_k(\lambda_i, \varphi_i)\hat{\varphi} + n_\varphi^i \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中，n_rⁱ、n_λⁱ 和 n_φⁱ 为噪声。将观测方程 (5) 写为如下的矩阵形式

$$f = Gm + n \tag{6}$$

式中 $f = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_N]^T$ ； $f_i = [v_r^i \ v_\lambda^i \ v_\varphi^i]^T$ ； $n = [n_r^i \ n_\lambda^i \ n_\varphi^i]$ 为噪声；m 为 a_k、b_k 和 c_k 组成的模型向量，其求解方法详见 2.4 节。G 的展开式为

$$G = \begin{bmatrix} g_1(\lambda_1, \varphi_1) & g_2(\lambda_1, \varphi_1) & \cdots & g_M(\lambda_1, \varphi_1) \\ g_1(\lambda_2, \varphi_2) & g_2(\lambda_2, \varphi_2) & \cdots & g_M(\lambda_2, \varphi_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_1(\lambda_N, \varphi_N) & g_2(\lambda_N, \varphi_N) & \cdots & g_M(\lambda_N, \varphi_N) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，(λ_i, φ_i) 为观测站点坐标；N 为观测站点个数；M 为框架函数个数。

求得 m 后，区域内任一站点 (λ, φ) 的速度可由式 (8) 计算

$$f = [g_1(\lambda, \varphi) \ g_2(\lambda, \varphi) \ \cdots \ g_M(\lambda, \varphi)] \cdot m \tag{8}$$

均方根误差计算公式为

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^t (V_i - \hat{V}_i)^2}{t}} \tag{9}$$

式中，V_i、 \hat{V}_i 分别为站点的模型值和观测值；t 为点数量。

2.4 正则化问题与模型向量的求解

通过离散化球面小波函数的位置和尺度的方式获取的小波框架可能存在冗余，采用该框架表示速度场将导致不唯一的解，另外观测误差以及数据分布不规

则，将产生病态问题^[13, 16]。对于速度场的球面小波模型，通过正则化方法^[19]，可以求解模型向量 m，公式为

$$\left. \begin{aligned} L(m) &= \frac{1}{2}(Gm - d)^T C_D^{-1}(Gm - d) + \\ &\quad \frac{1}{2}\rho^2 m^T Rm \\ R_{kk'} &= \int_S \nabla g_k(\lambda, \varphi)^T \nabla g_{k'}(\lambda, \varphi) d\Omega \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式中，d 为已知站点上的速度值；CD 为观测值的方差阵；R_{kk'} 为正则化矩阵元素；S 表示球面；ρ 为正则化参数。正则化的目的是克服模型中线性方程组存在的病态问题，也有助于解决框架内球面小波函数之间不完全正交的问题^[15]。

正则化参数 ρ 采用交叉验证法 (ordinary cross-validation, OCV，又称“留一交叉验证法”) 求解^[20, 21, 22, 23]，首先去除一个观测点的数据，计算待求参数，然后计算该点的观测值与模型估值之差 $\hat{\epsilon}_i$ ，继而选出最优的正则化参数。

OCV 方法选择正则化参数的函数式可以表示为^[15]

$$\left. \begin{aligned} H(\rho) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\epsilon}_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{d_i - \hat{d}_i}{1 - K_{ii}(\rho)} \right]^2 \\ K(\rho) &= G(G^T G + \rho I)^{-1} G^T \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式中， d_i 为第 i 个站点的观测值； \hat{d}_i 为模型使用所有观测数据时第 i 个站点对应的估值。当 H(ρ) 取最小值时，对应的 ρ 为选定的正则化参数。

模型向量 m 的解可表示为

$$m = (G^T C_D^{-1} G + \rho^2 R)^{-1} G^T C_D^{-1} d \tag{12}$$

后验协方差计算公式^[24] 为

$$\bar{C}_D = G(G^T C_D^{-1} G + \rho^2 R)^{-1} G^T \tag{13}$$

3 中国大陆 GPS 站点的球面小波分析

采用“网络工程”跨度长达 10 年 (1999—2009 年) 的 GPS 观测数据，其中包括基准网站点 34 个，基本网站点 56 个和区域网站点，共 1068 个。采用 GAMIT/GLOBK (V10.35) 软件，获得站点在 ITRF2005 框架下的东方向和北方向的速度值 V_E、V_N。速度场在东、北和垂直 3 个方向的建模方法是一致的，由于垂直方向速度解算精度较差，只对东方向和北方向进行分析。

中国大陆 GPS 速度场的旋转趋势性非常明显，通常将欧拉旋转量作为趋势项。文中对 V_E、V_N 采用全局欧拉矢量法求解欧拉向量^[6]，得到旋转速率为 0.28° / Ma，欧拉极为 (43.27° N, 87.31° W)。将 VE、VN 与采用全局欧拉矢量法获得的速度值之差称为剩余速度场 V' _E、V' _N，作为球面小波模型建模数据，欧拉旋转速度作为速度场的趋势项。

选定站点的分布区域范围为 (73° E—135° E，17° N—55° N)，采用 DOG 球面小波，参数 α=1.25，按框架简化方法，求出其球面面积，得到区域半径 L 约为 5400km。当 q=0 时，其空间支撑为 9167km<2L=10800km，可取 q_{min}=0。当 q=10 尺度，球面小波空间支撑内至少包含 3 个站点的格点数为 0，因此可取 q_{max}=9，q_{max} 的分布如图 5 所示。

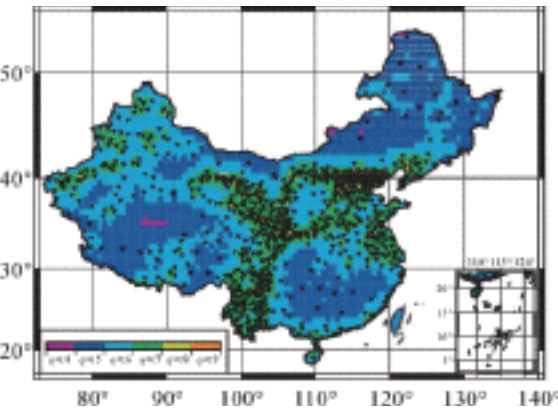


图 5 区域内可用 qmax 分布

鉴于速度场趋势项已采用全局欧拉矢量法分离，取最大尺度 q_{min}=2。因为可用小尺度 q=8、9 的区域极

少,取模型最小尺度 $q_{\min}=7$,即算例中使用的模型尺度 q 为 $2\sim 7$ 。需要说明的是,2.2 节中框架函数选择方法只能初步选出适用尺度范围,更合适的建模尺度可根据 q_{\max} 的分布及建模数据的实际情况做相应的调整。经计算共包括 2050 个框架函数,此时模型构建的方程组存在病态问题和秩亏问题。通过选择合适的正则化矩阵,将秩亏问题转化为满秩问题,获得稳定的解。

建模时首先采用模型对数据预处理,求取站点残差,并剔除站点残差大于 3 倍中误差的站点 17 个。采用剩下的站点数据作为建模数据,按式 (11),求出 V'_E 、 V'_N 的正则化参数均为 492,正则化参数的变化如图 6 所示。

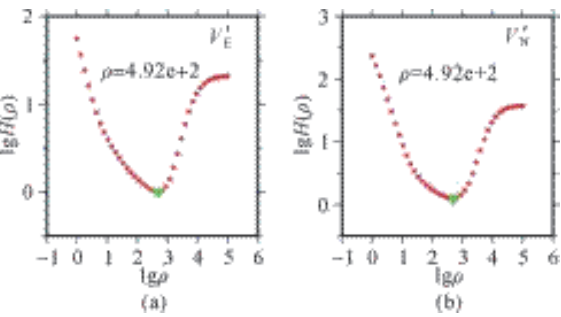


图 6 正则化参数

按式 (12) 分别计算出 V'_E 、 V'_N 的模型向量,按式 (8) 可估算站点的模型速度。模型中大尺度主要表征速度场的主要信息,小尺度主要刻画细节信息。随着大尺度与更多小尺度组合,模型对速度场体现出不断逼近的过程。当模型尺度 $q=2\sim 7$ 时,建模站点东方向、北方向的估计均方差分别为 0.55mm/a、0.71mm/a。

按式 (8) 对速度场进行等间距格网内插,得到内插值在各个尺度的分量如图 7 和图 8 所示。图 7(a)、(b) 为速度场模型在尺度 $q=2\sim 5$ 的分量,表示的是速度场的大尺度特征;图 7(c)、(d) 为速度场模型值,即速度场的大尺度分量与局部细节特征之和。由图 7 可以看出,中国大陆西南地区的相对运动较其他地区更大,大陆北部和南部分别存在向西和向东的相对性运动,大陆西部及东北部存在向北的运动,南部及西南部分地区存在向南的相对性运动特征。

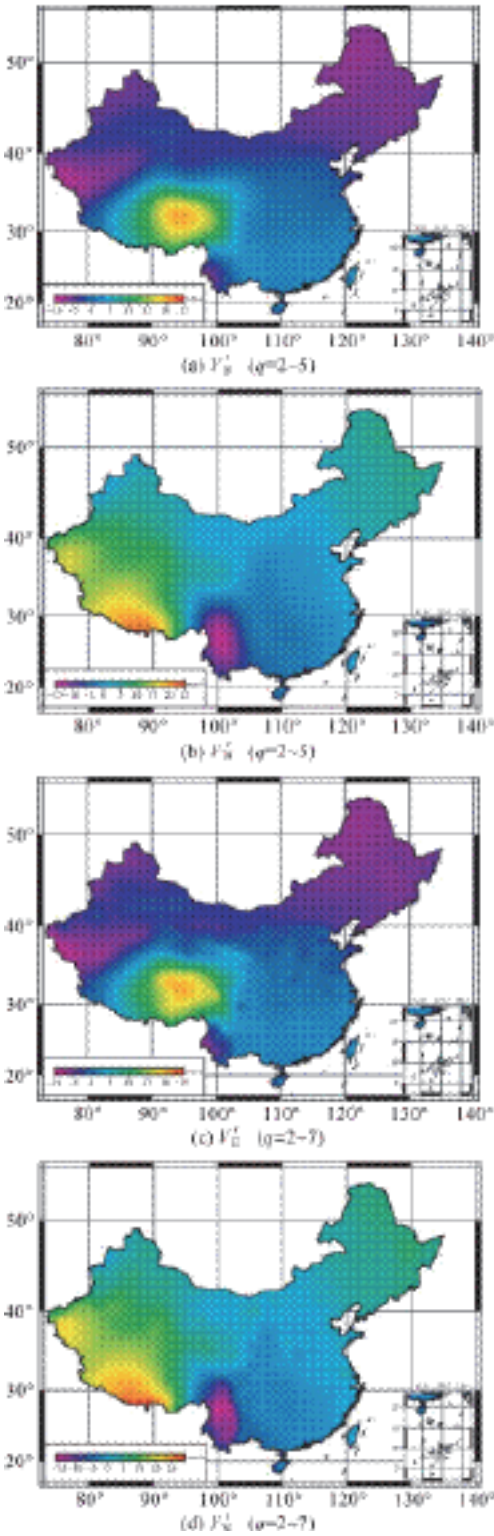


图 7 剩余速度场的球面小波模型多尺度估计

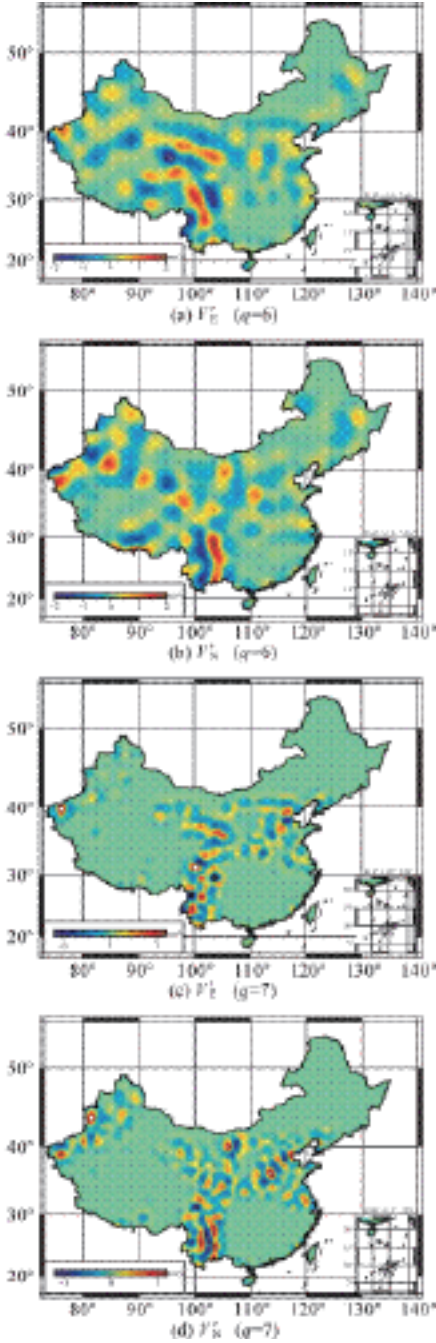


图 8 剩余速度场的细节特征

速度场的小尺度分析必须要有足够密度的站点才能进行。图 8(a)、(b) 和 (c)、(d) 分别表示模型在尺度 $q=6$ 和 $q=7$ 的分量,是速度场的细节特征。结合图 5, 尺度 $q=6$ 和 $q=7$ 只有在部分区域可用,所以图

8(a)~(d) 中只有在尺度 $q=6$ 和 $q=7$ 可用区域才有意义。从图 8 中可以看出,在尺度 $q=6$,西部地区存在东西向的相对运动,西南地区存在南北向的相对运动,具有明显的运动特征;而在尺度 $q=7$,除西南局部地区存在明显的南北向的相对运动特征,其他区域在该尺度的分量主要呈点状不规则分布,表明在该尺度上无明显的运动特征。速度场的变化与地学运动(地震、局部重力变化等)存在联系,进一步的解释有待作更多分析。

GPS 速度场的估值为剩余速度场的球面小波模型值与欧拉旋转速度之和,如图 9 所示。由图 9(a) 可以看出,中国大陆存在整体的向东运动趋势,由图 9(b) 可以看出,西部主要是沿北方向的运动,而中部和东部主要为沿南方向的运动。东方向速度平均值为 28.3mm/a,局部最大值为 50.7mm/a;北方向速度绝对值的平均值为 9.0mm/a,局部最大值为 25.9mm/a。

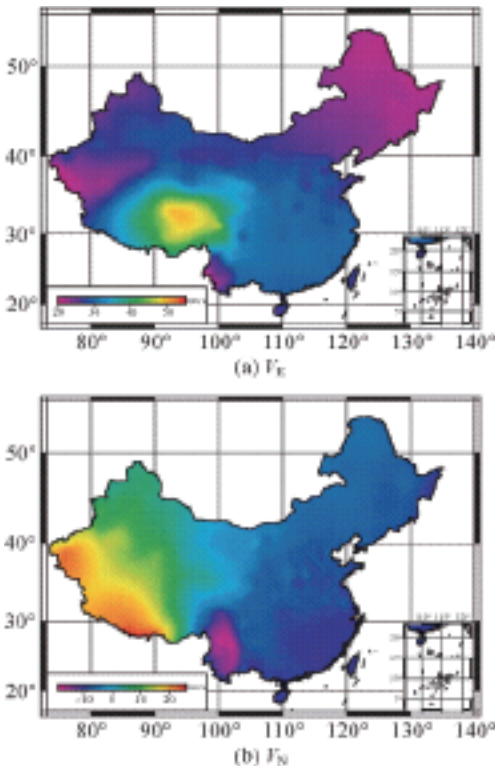


图 9 GPS 速度场模型值

为了检核模型的精度,在站点稠密和稀疏区域分

别随机选取 80 个站点，将其从建模站点中剔除，作为模型外部检核点。测试站点如图 10(a) 所示，红色为稠密区域外部检核站点，绿色为稀疏区域外部检核站点；图 10(b) 为站点分布稠密处的外部检核误差；图 10(c) 为站点分布稀疏处的外部检核误差。稠密和稀疏区域外部检核站点在东方向、北方向的估计均方差分别为 $\pm 0.95\text{mm/a}$ 、 $\pm 0.97\text{mm/a}$ 和 $\pm 1.32\text{mm/a}$ 、 $\pm 1.30\text{mm/a}$ ，两种方案外部检核统计结果见表 1。稠密区域的外部检核误差在 $-3\sim 5\text{mm/a}$ ，绝大部分在 $-1\sim 1\text{mm/a}$ ；稀疏区域外部检核误差波动相对较大，个别误差达到 $\pm 10\text{mm/a}$ ，这跟剔除站点时设置的阈值和站点分布有关。虽然剔除了部分粗差点，当外检核站点在数据稀疏的区域时（包括检核站点处于边沿区域），建模站点将更加稀疏，导致对模型缺乏足够的约束，出现个别外部检核误差较大的情况。这也说明使用时需要注意模型在站点稀疏区域（站点分布边沿）的精度较差的情况。

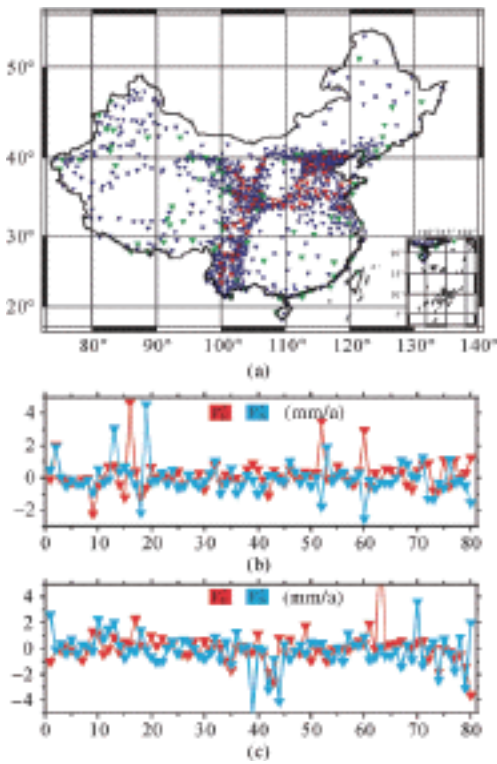


图 10 检核站点及其精度

4 结束语

采用全局欧拉矢量法只能顾及大陆的整体性运动趋势，不能反映局部范围的细节性运动。而多尺度估计方法对速度场具有很好的适用性，既可以刻画出大尺度特征，也可以表征小尺度运动。采用欧拉矢量法对速度场进行预处理，对剩余速度场采用球面小波模型，所获得的速度场模型精度较高。

表 1 稠密、稀疏区域外部检核精度
Tab.1 The accuracy of the model in the region with dense/sparse stations

	方向	最大值	最小值	平均值	均方差
稠密区域	东	4.67	-2.23	0.19	0.95
	北	4.53	-2.55	-0.94	0.97
稀疏区域	东	8.68	-3.42	-0.96	1.32
	北	3.63	-5.13	0.13	1.30

GPS 速度场的球面小波模型按站点密度自适应确定可用的尺度，实现不同区域不同分辨率的分析。按框架简化方法，模型强调多个站点对速度场的共同作用，可以减小个别站点误差对模型精度的影响。

站点分布密度是影响多尺度分析的主要因素，对速度场模型的精度也有影响。另外，当计算范围大、已知站点较多时，将出现计算速度慢、占用内存大的情况，会对使用造成不便，此时区域分解算法可以有效地解决这类问题。

参考文献：

[1] 程鹏飞，文汉江，成英燕，等．2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和 WGS-84 的比较 [J]．测绘学报，2009，38(3)：189-194.
[2] 程鹏飞，成英燕，文汉江，等．2000 国家大地坐标系实用宝典 [M]．北京：测绘出版社，2008.
[3] 程鹏飞，程英燕，秘金钟，等．CGCS2000 板块模型

构建 [J]．测绘学报，2013，42(2)：159-167.
[4] 李强，游新兆，杨少敏，等．中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测——现今速度场 [J]．中国科学：地球科学，2012，42(5)：629-632.
[5] CHENG Pengfei, WANG Hua, CHENG Yingyan, et al. The Trend of the APRGP Velocity Field and Plates Movement Derived from GPS Data[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 53(4): 767-772.
[6] 牛之俊，马宗晋，陈鑫连，等．中国地壳运动观测网络 [J]．大地测量与地球动力学，2002，22(3)：88-93.
[7] 魏子卿，刘光明，吴富梅．2000 中国大地坐标系——中国大陆速度场 [J]．测绘学报，2011，40(4)：403-410.
[8] 杨元喜，曾安敏，吴富梅．基于欧拉矢量的中国大陆地壳水平运动自适应拟合推估模型 [J]．中国科学：地球科学，2011，41(8)：1116-1125.
[9] 刘经南，姚宜斌，施闯．中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究 [J]．武汉大学学报：信息科学版，2002，27(4)：331-336.)
[10] 蒋志浩，张鹏，秘金钟，等．基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究 [J]．测绘学报，2009，38(6)：471-476.
[11] 吴富梅，刘光明，魏子卿．利用局域欧拉矢量法建立 CGCS2000 速度场模型 [J]．武汉大学学报：信息科学版，2012，37(4)：432-435.
[12] CHAMBODUT A, PANET I, MANDEA M, et al. Wavelet Frames: An Alternative to Spherical Harmonic Representation of Potential Fields[J]. Geophysical Journal International, 2005, 163(3): 875-899.
[13] PANET I, KUROISHI Y, HOLSCHNEIDER M. Wavelet Modelling of the Gravity Field by Domain Decomposition Methods: An Example over Japan[J]. Geophysical Journal International, 2011, 184(1): 203-219.

[14] OH H S, KIM D. SpherWave: An R Package for Analyzing Scattered Spherical Data by Spherical Wavelets[J]. R News, 2007, 7(3): 2-7.
[15] TAPE C, MUSÉ P, SIMONS M, et al. Multiscale Estimation of GPS Velocity Fields[J]. Geophysical Journal International, 2009, 179(2): 945-971.
[16] BOGDANOVA I, VANDERGHEYNST P, ANTOINE J P, et al. Stereographic Wavelet Frames on the Sphere[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(2): 223-252.
[17] 海斯卡涅，莫里斯．物理大地测量学 [M]．卢福康，胡国理，译．北京：测绘出版社，1979.
[18] 张胜茂，吴健平，周科松．基于正多面体的球面三角剖分与分析 [J]．计算机工程与应用，2008，44(9)：16-19.
[19] HANSEN P C. Rank-deficient and Discrete Ill-posed Problems[M]. Philadelphia: SIAM, 1998.
[20] SHAO Jun. Linear Model Selection by Cross-validation[J]. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(422): 486-494.
[21] SHAO Jun. An Asymptotic Theory for Linear Model Selection[J]. Statistica Sinica, 1997, 7(2): 221-264.
[22] GOLUB G H, HEATH M, WAHBA G. Generalized Cross-validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 215-223.
[23] WEISBERG S. Applied Linear Regression[M]. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2005.
[24] TARANTOLA A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation[M]. Philadelphia: SIAM, 2005.

—— 摘自《测绘学报》——

姿态模式切换期间 QZSS 卫星轨道及其钟差产品特性分析

周佩元，杜兰，方善传，路余，张中凯，李夫鹏
信息工程大学导航与空天目标工程学院，河南郑州 450001

【摘要】 导航卫星姿态控制模式切换对精密定轨解算得到的轨道和钟差均有较大影响。本文首先从理论上分析了卫星偏航姿态及其对精密定轨的影响，然后分别以卫星激光测距检核和钟差多项式拟合的方法对 IGS MGEX 分析中心的 QZSS 卫星轨道和钟差产品精度进行评价，最后以谱分析方法和改进阿伦方差揭示了卫星钟差的周期特性。基于 2014 年全年的 QZSS 卫星轨道和钟差产品的研究表明，一年内有两次长约 20 d 的地影季，太阳角呈现半年周期的波动；QZSS 卫星在低太阳角时有零偏保护，其卫星轨道和钟差精度都与太阳角有显著相关性；卫星钟差具有与轨道周期相近的周期项，且周期项振幅与太阳角的大小也具有相关性，表明现有的定轨策略存在不足。考虑到 QZSS 与目前北斗星座中 IGS0 和 MEO 卫星姿态控制模式的相似性，该结论对于研究我国 BDS 姿态切换期间的精密定轨有一定参考价值。

【关键词】 准天顶星系统；姿态误差；精密定轨；地影季；卫星激光测距

准天顶星系统 (quasi-zenith satellite system, QZSS) 是日本在 2000 年提出的一套兼具导航定位、移动通信和广播功能的 GPS 辅助增强系统，其计划以 4 颗 IGS0 卫星保持任意时段都有一颗卫星处于日本上空顶点位置，其第 1 颗卫星 QZS-1 (Michibiki) 已于 2010 年 9 月发射^[1, 2, 3]。QZSS 能够实现与 GPS 高度的兼容互操作，因此它既是对 GPS 的增强，也是一种补充。

根据文献^[4-9]，QZS-1 采用的卫星姿态控制模型与现行的北斗 IGS0 和 MEO 卫星类似，QZS-1 在太阳与轨道面夹角 $|\beta|$ 约为 20° 并且卫星偏航姿态最为接近于零偏置或动态偏置名义姿态时开始姿态转换，偏航姿态由动态偏置转为零偏置，而北斗 IGS0 和 MEO 相应的动转零条件 $|\beta|$ 约为 4° 。

卫星姿态变化对于精密定轨解算得到的轨道和钟差产品有较大影响。相较北斗 IGS0 和 MEO 卫星而言，QZS-1 在 $|\beta|$ 约为 20° 时开始姿态切换，其姿态切换的 $|\beta|$ 阈值大于北斗 IGS0 和 MEO 卫星，对于轨道和钟差的影响更为明显，因此也更容易发现卫星姿态与卫星轨道和钟差产品相关性的规律。此外，由于

QZSS 与 GPS 很好的互操作性，国际上对于 QZSS 的数据处理更为成熟，为研究这一规律提供了较好的数据产品。因此，分析 QZSS 卫星姿态变化对轨道和钟差特性的影响对于研究我国 BDS 姿控模型有一定参考价值。目前，文献 [10-12] 等对 GPS 和 GLONASS 的姿态变化做了大量研究，构建了导航卫星姿态模型的理论基础。文献 [4] 对 GNSS 的姿态切换模型及其影响做了深入研究，得出了很多有意义的结论，但并未直接给出姿态切换对 QZSS 精密定轨产品影响的分析，且未考虑姿态切换对卫星钟差特性的影响。

基于 IGS 组织 (International GNSS Service) 的 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 和欧洲 CONGO (Cooperative Network for GLOVE Observation) 等地基观测网^[13]，慕尼黑工业大学 (TUM) 利用 CODE 五参数光压模型对 QZS-1 光压进行建模，开展了基于非差处理的“两步法”GPS 和 QZSS 精密轨道和钟差解算，并发布 QZSS 事后精密星历，详细解算策略参考文献 [14]。本文首先从理论上分析了 QZSS 卫星姿态模型切换及其影响，而后通过卫星激光测距 (SLR) 进行了轨道精度检核并分析了 SLR 残差与

太阳角的相关性，最后从卫星钟差拟合精度和周期特性两个方面分析了卫星姿态模式切换对钟差产品的影响。结果表明，目前精密定轨所使用的非保守力模型在卫星零偏置时期的建模存在缺陷，导致零偏置期的轨道以及钟差精度显著降低，需要在数据处理中予以慎重考虑。

1 QZSS 卫星偏航姿态模式切换

导航卫星在轨运行期间，为了确保地面用户能够有效接收卫星信号并且保证卫星有充足的能量供给 [15]，姿态控制系统需要根据太阳、地球和卫星位置计算和调动态整导航卫星偏航姿态。

QZS-1 卫星的星固系定义如下：z 轴沿卫星信号发射天线方向指向地心，y 轴为太阳帆板旋转轴并垂直于太阳、地球和卫星所构成的平面，x 轴垂直于 y 轴和 z 轴构成右手坐标系并背离太阳光入射方向。从而卫星偏航角 ψ_n 的名义值为^[10]

$$\Psi_n = \text{ATAN2}(\tan \beta, -\sin \mu) \quad (1)$$

式中， β 为太阳与导航卫星轨道面的夹角（太阳角）。 μ 为轨道面内卫星与地心连线和“远日点”夹角（轨道角）。太阳、地球和卫星三者空间关系如图 1 所示。

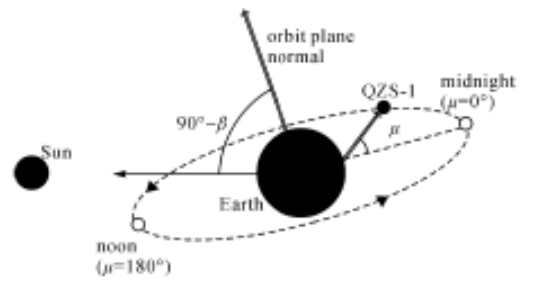


图 1 太阳、地球和卫星空间关系

卫星在轨期间受到多种因素的影响，实际姿态常常会偏离式 (1) 所确定的名义姿态。这种非名义偏航姿态主要有 3 种情况：

①低太阳角下卫星动量轮速率过大并超过硬件限

值而导致的卫星正午机动和午夜机动；

②地影期内由于星敏传感器无法正常工作导致的地影机动；

③由于卫星本身设计所致的低太阳角下的动偏-零偏-动偏模式切换。

显然，太阳角是卫星姿态控制系统计算和调整偏航姿态的关键参数。对于 QZS-1 卫星而言，其本身设计具有动偏和零偏两种姿态模式，在太阳角 $|\beta|$ 约为 20° 且卫星动态偏置或零偏置姿态最为接近于名义姿态时开始姿态切换。由于动偏-零偏-动偏切换的太阳角临界值大于地影期太阳角临界值，地影期包含在零偏期内，因此该卫星不会发生地影机动；当 $|\beta| \leq 20^\circ$ 时，卫星偏航姿态固定为零偏置模式，卫星不会出现低太阳角条件下动量轮速率超过硬件限值的情况，不需要正午机动和午夜机动。因此，QZS-1 卫星一年中大部分时间处于动态偏航模式（即保持名义姿态），短期处于零偏模式（一年两次）。

目前来说，并不是所有的精密定轨数据处理流程都考虑了非名义姿态。通常是针对动偏期间的卫星偏航姿态和受力情况进行建模。以 TUM 精密定轨中所采用的 CODE 光压模型为例，分析姿态模式切换对精密定轨的影响。若定义 D 为卫星指向太阳方向，Y 为卫星星固系 y 轴方向，B 垂直于 D 和 Y 构成右手坐标系，则精密定轨解算采用的 CODE 五参数光压模型可以表示为^[16]

$$\mathbf{a}_{\text{RPR}} = D(u)\mathbf{e}_D + Y(u)\mathbf{e}_Y + B(u)\mathbf{e}_B \quad (2)$$

式中， \mathbf{a}_{RPR} 为光压导致的加速度； \mathbf{e}_D 、 \mathbf{e}_Y 、 \mathbf{e}_B 分别为三轴方向的单位向量；u 为卫星在轨道面上与升交点间角度。且有

$$\left. \begin{aligned} D(u) &= D_0 \\ Y(u) &= Y_0 \\ B(u) &= B_0 + B_s \sin(u) + B_c \cos(u) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从式 (3) 可以看出，CODE 模型中的 B 轴并非固定于卫星星体某一方向，而是在 +z、+x 和 -z 向变化，并且 B 方向力的级数展开式为卫星相对于升交点角度

的函数，因此该值并不具有清晰的物理意义，仅能表示光压摄动力呈周期变化，而没有考虑不同姿态模式下光压受力的差异。因此，姿态切换对太阳光压建模的影响主要表现为 CODE 光压模型无法满足零偏置期对光压的建模要求，即：

(1) 当卫星处于动偏模式时，CODE 光压模型中的 Y 轴定义为星固系 y 轴且与太阳入射方向即 D 轴方向垂直，卫星星体 -x 板持续受照而 +z 和 -z 板轮流受照，此种模式下 CODE 模型能很好地对卫星的光压进行建模。

(2) 在其他姿态模式下，星固系 y 轴并不一定垂直于太阳入射方向，卫星星体受照面发生变化，除卫星 ±x 和 ±z 板轮流受照外，±y 板也将分别受照。由于在太阳入射光线并不与太阳面板垂直而存在小角度夹角，该角度随太阳与轨道面夹角 β 变化而变化，此时 CODE 光压模型存在显著的误差。

由于卫星会随着太阳角的周年变化进行一年两次的动偏 - 零偏 - 动偏模式切换，若在定轨中全部采用动偏期间的受力模型则必然会导致零偏期间定轨精度的显著下降。需要指出的是，导航卫星定轨精度受到多种因素影响，本文仅从太阳光压建模误差出发对零偏置期间的卫星定轨精度进行了分析。除此之外，零偏期间的卫星天线相位中心改正误差也会对定轨精度造成一定影响。限于篇幅，本文不再展开探讨。

2 卫星轨道和钟差精度分析方法

2.1 卫星激光测距

卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 是一种独立的轨道径向精度检核方法 [16, 17, 18]。通过安置在地面上的卫星激光测距系统所发射的激光脉冲，跟踪装有激光反射棱镜 (laser retro-reflector array, LRA) 的人造地球卫星，以测定测站到卫星之间的距离。利用 ILRS 组织 (International Laser Ranging Service) 提供的 QZS-1 的 SLR 标准点数据，可以对 TUM 的 QZS-1 卫星轨道产品进行精度检核。

2014 年内进行 QZS-1 观测的激光站主要有 6

个，分别为 Yarragadee(7090)、Changchun(7237)、Beijing(7249)、Koganei(7308)、Shanghai(7821)、Mount Stromlo(7825)。

在对轨道进行 SLR 检核前，需要对激光观测值进行潮汐改正、大气折射改正、对流层改正等。此外，还需要利用 ILRS 提供的 SLR 反射棱镜相对于卫星质心的仪器偏差进行改正。在改正时假定卫星具有标称的偏航姿态，QZS-1 卫星的 LRA 偏差参数如表 1 所示 [16]。

表 1 卫星 LRA 相位中心相对于质心偏差

卫星	x	y	z
QZS-1	-1149.1	-552.9	+2685.4

2.2 谱分析方法

由于卫星轨道与钟差相互耦合等原因，通过精密定轨解算的卫星钟差精度与轨道视向精度强相关，从而也含有周期性波动变化 [19]。卫星钟差的周期项一方面反映了卫星轨道特性，另一方面也对导航卫星原子钟预报和性能评价有较大影响。基于快速傅里叶变换 (FFT) 的谱分析方法可以用于提取和分析卫星钟差的主周期项，谱分析方法的步骤如下：

(1) 卫星钟差数据预处理。主要进行数据提取以及粗差剔除等。

(2) 计算逐日拟合残差。考虑到铷钟的频漂特性，以二次多项式拟合每天的卫星钟差，得到拟合残差。

(3) 傅里叶变换。将逐日拟合残差进行拼接，进行傅里叶变换，分析和提取卫星钟差的主周期。

使用谱分析方法提取卫星钟差主周期后，为了进一步的研究卫星姿态切换对周期特性的影响，采用附加周期项改正的多项式模型对卫星钟差进行拟合 [20, 21]，分析周期项振幅与 β 角的相关性。

针对卫星钟差序列 {x}，其卫星钟差二次多项式模型为

$$x=a_0+a_1t+a_2t^2+\varepsilon$$

式中，a₀、a₁、a₂ 分别为钟差、钟速以及钟加速；ε 为残差。

对于卫星钟差序列 {x}，其附加周期项改正的多项式模型为

$$x=a_0+a_1t+a_2t^2+\sum_{i=1}^N(s_i\sin(2\pi f_it)+c_i\cos(2\pi f_it))+\varepsilon$$

$$A_i=\sqrt{(s_i^2+c_i^2)}$$

式中，f_i 为卫星钟差序列的第 i 主频项；s_i 和 c_i 为该主频项所对应的系数；A_i 为周期项 f_i 对应的振幅。

3 结果与分析

3.1 太阳角变化与地影季

本文使用德国 TUM 发布的 2014 年全年的 QZSS 卫星精密轨道和钟差产品，数据采样间隔为 5 min。首先进行坐标系转换并采用数值差分的方法计算出卫星速度，然后计算出 2014 年内 QZS-1 卫星太阳角 β 的变化情况及地影季，如图 2 所示，图中阴影部分为地影季，直线内为零偏期。

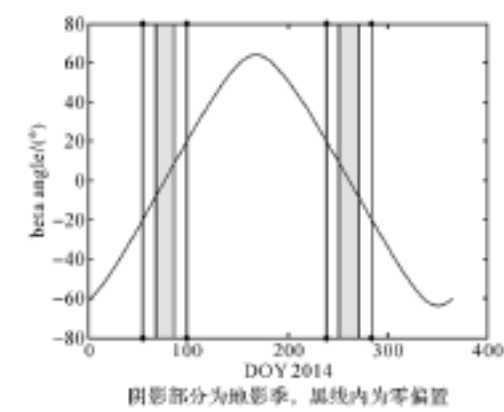


图 2 2014 年 QZS-1 太阳角变化及地影季

由图 2 可知，卫星太阳角 β 呈现以半年为周期的正弦波动，变化范围约为 [-60° , +60°]，而卫星进出地影的临界角为 ±8.6° 左右。2014 年内 QZS-1 有两次地影季，分别为 DOY 67—DOY 87 和 DOY 251—DOY 271，每次长约为 20 d；而其零偏置分别为 DOY

54—DOY 100 和 DOY 238—DOY 284，每次长约 47 d。可以发现，QZS-1 卫星具有较长的零偏置和地影季，有利于分析姿态切换对卫星定轨产品的影响。

3.2 卫星轨道 SLR 检核残差

采用 SLR 作为独立检核手段，可以对卫星轨道的外符精度进行评价。2014 年内总共有 6 个站进行 QZS-1 的卫星激光测距，共计 1650 个标准点，可见激光观测的数据十分稀少。利用 ILRS 提供的标准点数据对 TUM 提供的卫星轨道产品进行了精度检核，对 SLR 残差进行了粗差剔除，结果如图 3 所示。从图中可以看出：

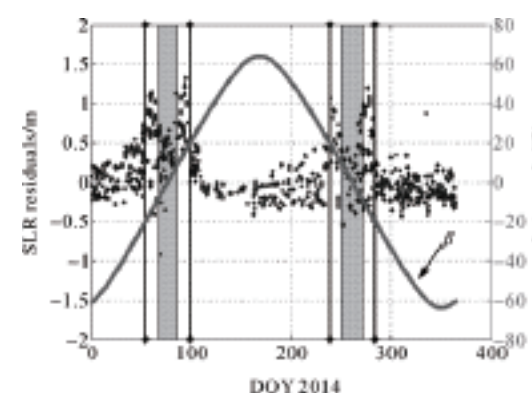


图 3 TUM 卫星轨道产品的 SLR 检核残差 (6 站)

(1) SLR 残差存在一定的均值偏差，其大小为 -0.10 m 左右。这种偏差的出现与其他导航卫星 (GPS、GLONASS) 等出现的偏差现象类似，可能的原因有星上 LRA 的坐标不准确以及卫星轨道产品中系统误差等。

(2) SLR 残差存在半年周期的变化规律，且与太阳角 β 变化有很大的相关性。这说明由于太阳光压等非保守力模型的不完善，导致 QZS-1 卫星轨道产品精度与太阳角 β 有明显的相关性。由于 QZS-1 卫星姿态调整导致定轨精度降低，零偏置状态下卫星轨道中仍有较大的未被充分建模的误差项。此外，SLR 测站坐标的建模也可能导致 SLR 残差序列中半年周期的变化。需要说明的是，本文中所使用的 SLR 仪器偏差改正为标称偏航姿态下进行的改正，并未随卫星姿态的变化进行调整，因此可能也会引入部分误差，下一

步将探讨建立文献 [22] 所提出的卫星质心概率模型以进一步提高 SLR 轨道检核的精度。

此外，注意到在 QZS-1 卫星零偏置期内，地影季内的 SLR 残差反而小于地影季外的 SLR 残差，其原因可能为地影季期间光压摄动力为零，因而不受光压模型误差的影响。

3.3 卫星钟差拟合残差

由非差处理法进行精密定轨解算的卫星钟差与定轨误差存在一定程度的耦合，因此卫星钟差的精度也能部分反映出轨道模型的精度。由于缺乏独立的外部精度评价手段，且在卫星钟差中二次项占主导，因此一般以二次多项式拟合残差作为钟差精度的评价标准。在解算过程中，经常会出现数据缺失、粗差等异常情况，需要对钟差数据进行预处理。对经过数据预处理后的卫星钟差进行逐日二次多项式拟合，对其每日拟合残差进行统计，结果如图 4 所示。

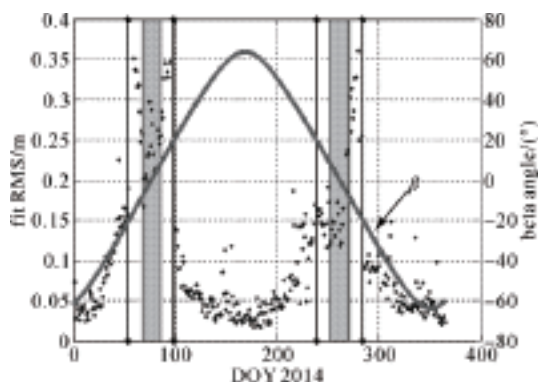


图 4 2014 年 QZS-1 卫星钟差拟合精度

由图 4 可以看出：

(1) TUM 的 QZS-1 卫星钟差的精度在 0.3 m 以内，在动态偏置期（即 $|\beta| \geq 20^\circ$ ），钟差精度基本上在 0.1 m 以内。从图中可以看出，零偏置期间的卫星钟差拟合精度要低于地影季内的钟差精度，这与轨道 SLR 残差的分布相似，需要进一步研究其原因。

(2) 卫星钟差的精度变化情况与轨道精度相似，都随着 $|\beta|$ 的变化而波动，且与太阳角 $|\beta|$ 呈负相关。2014 年 QZS-1 的拟合均方根误差 (RMS) 随着太阳角 $|\beta|$ 有明显的波动变化，当 $|\beta|$ 开始满足

$|\beta| \leq 20^\circ$ 的条件时，卫星钟差拟合精度开始逐渐降低，进入地影期后精度最低，在 0.3 m 左右。卫星拟合精度与太阳角 $|\beta|$ 有显著的相关性，卫星拟合精度也存在半年周期的波动规律，这进一步验证了精密定轨过程中姿态误差对轨道和钟差产品的误差影响有一定程度的耦合。

3.4 卫星钟差周期特性

周期性变化是卫星钟差的重要特性，可以反映卫星定轨过程中的力模型精度。由于卫星姿态模型切换和地影期间，卫星受力发生变化，将对卫星钟差的周期特性产生影响。采用谱分析方法对卫星钟差 24 h 以内的周期项进行提取并分析其振幅随 β 的变化情况。利用 2014 年 TUM 提供的卫星钟差进行二次多项式逐日拟合，将其拟合残差进行拼接，结果如图 5 所示。从图中可以看出，其残差均值基本上为 0，且在零偏置期的拟合残差明显增大，随着 β 的变化有明显波动。图 6 为对 2014 年 QZS-1 卫星钟差进行谱分析的结果。

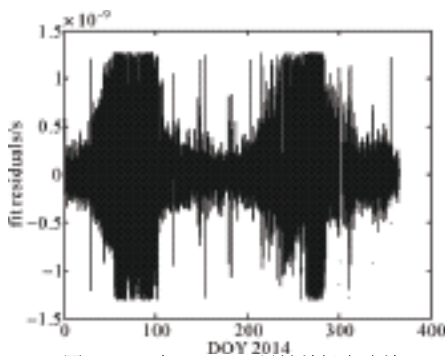


图 5 2014 年 QZS-1 卫星钟差拟合残差

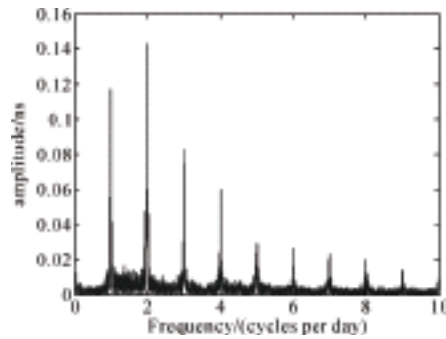
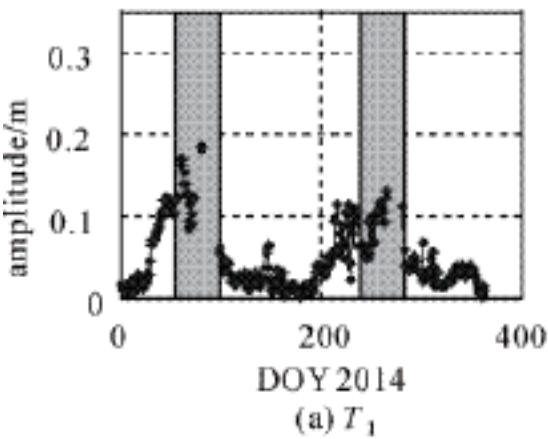


图 6 QZS-1 卫星钟差谱分析结果

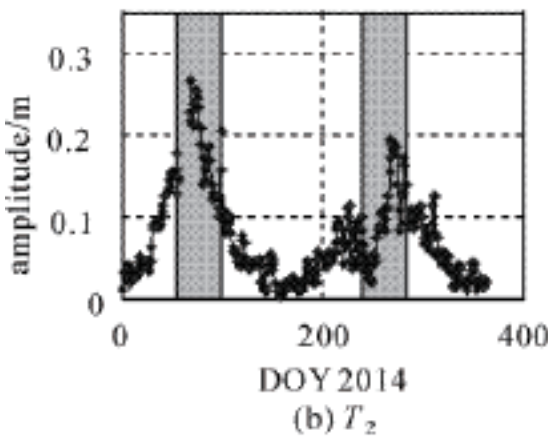
从图 6 可以看出，QZS-1 卫星钟差的前 4 个主周期分别为： $T_1=23\text{ h }54\text{ min}$ 、 $T_2=11\text{ h }58\text{ min}$ 、 $T_3=7\text{ h }59\text{ min}$ 、 $T_4=5\text{ h }59\text{ min}$ 。卫星钟差中存在着与轨道周期相近或者呈倍数关系的周期项，这表明 QZS-1 卫星钟差误差与轨道误差相耦合。QZS-1 卫星钟差周期性波动的原因可能为：

①卫星受力建模不准确，尤其是光压摄动力；

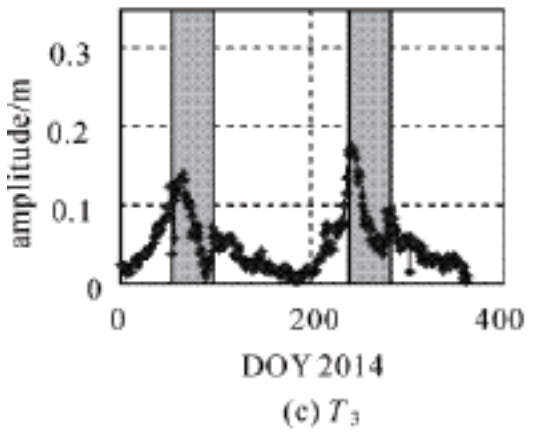
②精密定轨解算过程中，卫星轨道与钟差部分误差耦合在一起，两者的周期性误差无法全部分离。为了进一步研究卫星钟差周期特性与卫星姿态切换的关系，选取谱分析得出的 4 个主周期，建立周期模型。考虑到卫星钟差的天跳变以及消除单天拟合的误差，采用了连续 3d 的卫星钟差多项式残差进行周期模型拟合，依次分析 4 个主周期项的振幅变化情况，如图 7 所示。



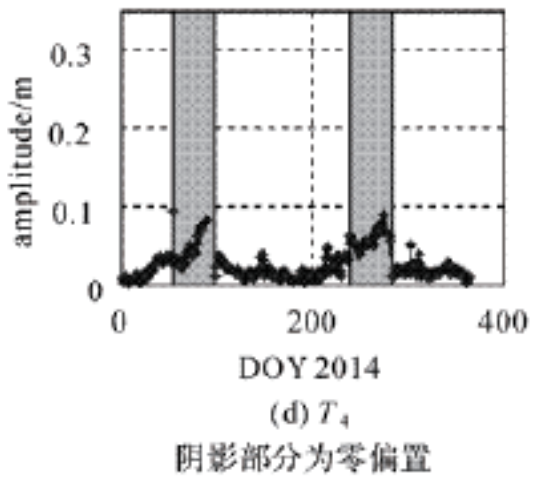
(a) T_1



(b) T_2



(c) T_3



(d) T_4
阴影部分为零偏置

图 7 周期项振幅的变化规律

从图 7 中可以看出：

(1) 卫星钟差各周期的振幅随时间变化，且与太阳角 $|\beta|$ 具有明显的相关性。卫星进入零偏置期间（ $|\beta| \leq 20^\circ$ ）后，各个周期项的振幅明显增大，而主周期项 T_2 振幅的增大尤为明显。推断可能的原因一方面为零偏期间，轨道建模较差导致定轨误差增大，且反映在拟合残差的周期项振幅上；另一方面为姿态转换后天线相位中心建模精度降低，部分误差表现出周期性且被卫星钟差吸收，导致钟差周期项振幅增大。

(2) 周期项 T_4 的振幅明显小于前 3 个主周期项。这说明在对卫星钟差进行建模时，除了在零偏置期间必须考虑其影响外，其他情况下可以不用考虑。

需要说明的是，通过对比图 6 和图 7 中卫星钟

差周期项的振幅发现,周期项振幅的大小关系并不完全一致,这说明拟合天数长度对周期项振幅的相对大小会有一些影响,需要做进一步的研究。

为了验证谱分析的结果并进一步评价非差定轨方法的轨道误差对钟差周期特性的影响,采用改进阿伦方差^[20]对姿态模式切换前47d、零偏期间47d以及切换后47d共计3个时段内的原子钟稳定度及其噪声变化情况进行了分析。图8给出了计算的改进阿伦方差及其噪声变化情况,统计结果分别对应2014年内的DOY 191—DOY 237、DOY 238—DOY 284以及DOY 285—DOY 331共3个时间段。

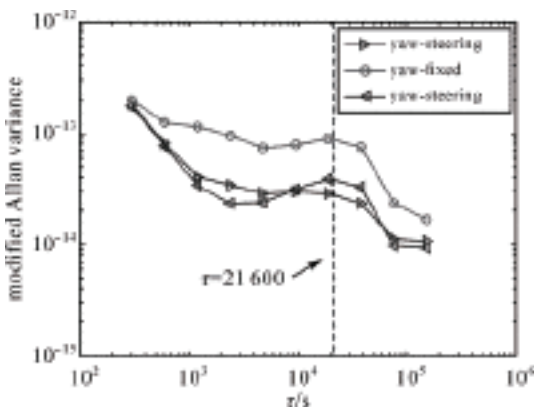


图8 零偏与动偏期间的改进阿伦方差比较

由图8可知:

(1) 3个时段内的卫星钟差均有以0.5 d为周期的显著周期项。从图中曲线可以看出,3条曲线在采用间隔 $\tau \approx 21\ 600\text{ s}$ 附近达到最大值。根据时频域的转换关系^[23],可知该“鼓包”对应的卫星钟差周期为 $T=2\tau \approx 43\ 200\text{ s}$,这与谱分析的结果一致,且该周期项对应为谱分析中的周期项T2。说明该周期性变化与姿态调整没有关系,而是与精密定轨本身所采用的策略有关,因此定轨解算策略仍有待优化。

(2) 3个时段的噪声类型基本一致,但是零偏期间噪声的量级显著增大。由于改进阿伦方差的斜率可以用来大致表征卫星钟差的噪声类型,因此可以通过图8对卫星钟差的噪声类型及其大小进行分析。从图8可以看出,3个时间段内的主要噪声类型均为调频闪变噪声、调频白噪声和调频随机游走噪声(对应斜率分别为0、-1和1),但是噪声的量级显著增大,这

说明零偏期间的定轨误差增大对卫星钟差的噪声特性也会有所影响。

4 结束语

(1) 以光压模型为例,从理论上分析了偏航姿态切换对精密定轨的影响,并以实测数据分析了卫星姿态切换至零偏置模式后轨道和钟差精度的变化。结果表明光压建模误差在精密定轨的过程中会被卫星轨道和钟差吸收,零偏置期的轨道和钟差精度显著降低。卫星轨道和钟差精度呈现半年周期的波动变化且与太阳角 β 有明显的相关性,现有的卫星非保守力建模仍需改善。

(2) 以谱分析方法提取了QZS-1卫星钟差中的主要周期项并分析了一年内其振幅的变化情况,并采用改进阿伦方差对谱分析的结果进行了验证。卫星钟差中存在与轨道周期耦合的周期项,这些周期项的振幅与太阳角 β 也有明显相关性。在高太阳角 β 的情况下,仅考虑前3个主周期项即可,但是在低太阳角 β 的情况下,前4个周期项都不能忽略。

本文研究的QZS-1卫星与我国BDS星座中的IGSO/MEO卫星姿态控制模型基本一致,因此该结论对提高BDS IGSO/MEO轨道和钟差精度也有一定的参考价值。当然,卫星姿态与很多因素有关,本文仅考虑了卫星轨道和钟差与地影季及太阳角 β 的相关性,下一步将重点研究优化导航卫星姿态建模以提高零偏期间精密定轨精度。

致谢:感谢TUM分析中心提供的数据支持。特别感谢武汉大学郭靖博士和王彬博士提供的指导与帮助。

参考文献:

[1] KISHIMOTO M, HASE H, MATSUMOTO A, et al. QZSS System Design and Its Performance[C]// Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego, California:NTM, 2007:405-410.
[2] SAWAMURA T, TAKAHASHI T, MORIGUCHI T, et al.

Performance of QZSS(Quasi-zenith Satellite System) & L-band Navigation Payload[C]// Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Newport Beach, CA:[s.n.], 2012:1228-1254.
[3] 孙宏伟, 李玉莉, 袁海波. 日本准天顶卫星系统概要[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(8):1004-1007.
[4] 郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014.
[5] GUO Jing, ZHAO Qile, GENG Tao, et al. Precise Orbit Determination for COMPASS IGSO Satellites during Yaw Maneuvers[C]//China Satellite Navigation Conference(CSNC) 2013 Proceedings. Berlin:Springer, 2013:41-53.
[6] HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P, RODRIGUEZ-SOLANO C. Signal, Orbit and Attitude Analysis of Japan's First QZSS Satellite Michibiki[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1):127-133.
[7] HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P, RODRIGUEZ-SOLANO C. QZS-1 Yaw Attitude Estimation Based on Measurements from the CONGO Network[J]. Navigation, 2012, 59(3):237-248.
[8] DAI Xiaolei, GE Maorong, LOU Yidong, et al. Estimating the Yaw-attitude of BDS IGSO and MEO Satellites[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(10):1005-1018.
[9] 毛悦, 宋小勇, 王维, 等. IGSO姿态控制模式切换期间定轨策略研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(11):1352-1356.
[10] BAR-SEVER Y E. A New Model for GPS Yaw Attitude[J]. Journal of Geodesy, 1996, 70(11):714-723.
[11] KOUBA J. A Simplified Yaw-attitude Model for Eclipsing GPS Satellites[J]. GPS Solutions, 2009, 13(1):1-12.
[12] DILSSNER F, SPRINGER T, GIENGER G, et al. The GLONASS-M Satellite Yaw-attitude Model[J].

Advances in Space Research, 2011, 47(1):160-171.
[13] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, KHACHIKYAN R, et al. IGS-MGEX:Preparing the Ground for Multi-constellation GNSS Science[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1):42-49.
[14] STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, et al. Orbit and Clock Determination of QZS-1 Based on the CONGO Network[J]. Navigation, 2013, 60(1):31-40.
[15] 毛悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 北斗导航卫星地影状态分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(4):353-359. DOI:10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0053.
[16] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLER G, et al. CODE's New Solar Radiation Pressure Model for GNSS Orbit Determination[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(8):775-791.
[17] PEARLMAN M R, DEGNAN J J, BOSWORTH J M. The International Laser Ranging Service[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2):135-143.
[18] URSCHL C, GURTNER W, HUGENTOBLE U, et al. Validation of GNSS Orbits Using SLR Observations[J]. Advances in Space Research, 2005, 36(3):412-417.
[19] SENIOR K L, RAY J R, BEARD R L. Characterization of Periodic Variations in the GPS Satellite Clocks[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3):211-225.
[20] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2006.
[21] 黄观文, 张勤, 许国昌, 等. 基于频谱分析的IGS精密星历卫星钟差精度分析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(5):496-499.
[22] 赵群河, 王小亚, 何冰, 等. 卫星激光反射器质心改正的概率模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(4):370-376. DOI:10.11947/j.AGCS.2015.20130338.

—— 摘自《测绘学报》——

GNSS 互操作若干问题

杨元喜¹, 陆明泉², 韩春好³

(1. 西安测绘研究所地理空间工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 3. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

【摘要】GNSS 兼容与互操作是国际卫星导航领域的热点议题，也是用户实现多系统融合导航必须具备的条件。本文首先介绍了兼容与互操作的基本概念；简要分析了多 GNSS 系统互操作的基本趋势及 GNSS 4 大核心系统信号互操作的现状；分析了现有北斗卫星导航系统 (BDS) 在信号互操作方面存在的问题，指出其对用户接收机制造商和多 GNSS 用户的影响；分析了坐标基准和坐标框架在互操作方面存在的问题及其可能带来的影响，指出坐标系统的实现、维持甚至更新策略带来的误差都可能给多 GNSS 互操作及导航定位结果带来影响；讨论了时间基准互操作存在的问题，以及可能的解决措施。最后归纳了本文的主要结论。

【关键词】北斗；兼容与互操作；频率；坐标系统；时间基准

兼容与互操作是近十几年来全球导航卫星系统 (GNSS) 领域的一个研究热点，对卫星导航的理论研究、系统建设和应用推广都具有重要意义，受到了国内外学术界、工业界、政府主管部门乃至相关国际组织的高度重视。目前，兼容与互操作已经成为国际卫星导航委员会 (International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG) 的核心议题，并专门成立了相应的工作组，兼容与互操作也是全球 GNSS 核心供应商双边谈判与多边协调的重要内容，国内外学术刊物和学术会议已发表了大量有关兼容与互操作的理论分析文章^[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]。

兼容与互操作是随着 GPS 和 GLONASS 的现代化、BDS 和 Galileo 的兴起而面临的新问题，虽然迄今为止尚未给出明确的定义，但概念比较清晰^[1, 2, 8]：兼容性是指分别或综合使用多个 GNSS 及增强系统，不会引起不可接受的干扰，也不会伤害其他单一卫星导航系统的操作与服务；互操作是指综合利用多个 GNSS 及其增强系统，能够在用户层面比单独使用一个系统获得更好的服务，并且不会给接收机生产厂商和用户带来额外的负担和成本。兼容与互操作已经成为 GNSS 的发展趋势^[1, 9]。

目前，兼容性的分析主要集中在不同系统间信号

的相互干扰方面，国际电联 2007 年提出的干扰估计方法 (ITU-RM. 1831) 已经成为各 GNSS 兼容性评估的基本准则^[10]。与兼容性有所不同，互操作涉及面更广，不但与各 GNSS 的信号密切相关，而且与 GNSS 采用的空间和时间基准有关，对多系统 GNSS 用户的影响也更为直接，研究工作更为复杂。

首先，互操作不仅与 GNSS 信号有关，也与坐标系统、时间基准的定义及实现这些定义的方法有关。更进一步，也与信号、坐标、运行时间偏差有关。可以认为，互操作概念对不同 GNSS 供应商的影响是不同的，对不同的用户影响也是不同的，不同的互操作要素对接收机厂商的影响也是不同的。

不得不承认，互操作设计对业已建成的 GPS 几乎没有任何影响。因为：① GPS 系统发展历史比较悠久，技术相对成熟，用户极其广泛，已经在世界范围内树立起了行业领导者的地位；② GPS 用户涉及的领域非常广泛，已经嵌入到飞机、舰船与武器平台、陆地车辆等各类移动载体，并已渗透到了交通运输、电力系统、移动通信、互联网以及其他穿戴设备，改变 GPS 的互操作设计困难太大；③国际民用航空组织和国际海事组织已经以 GPS 和 GLONASS 导航信号为飞机和舰船活动的标准导航蓝本；④以 GPS 为主建立的广

域和局域差分增强系统 (WAAS and LAAS) 已经广泛用于航空精密进近，而且这些增强系统之间大多数已经实现了互操作，为民用航空提供了近于无缝的精密导航服务；⑤全球所有 GNSS 接收机芯片和天线厂商都搭建了 GPS 接收机生产线，排斥或改建这种产品生产架构都将付出代价；⑥ GPS 坐标参考系 WGS-84 尽管与国际大地测量协会 (IAG) 确定的国际地球参考框架 (ITRF) 有差别，但是差别较小，而且，近几年 GPS 所用的 WGS-84 不断更新，对于大多数用户可以忽略不计，于是不影响 GPS 在卫星导航定位中的主导地位；⑦ GPS 的时间系统虽然与国际计量局确定的世界协调时 (UTC) 有差别，但是美国海军天文台控制的钟组在 UTC 中具有绝对主导地位，而由美国海军天文台确定的时间系统也是 GPS 时间的基础。

可以说，尽管卫星导航定位进入 GNSS 百花齐放时代，但不得不承认 GPS 已经被广大用户接受，已经占据全球卫星导航市场的主导地位，也已经占据各类导航标准政策的主导地位。于是，其他 GNSS 不得不与 GPS 实施兼容与互操作。而且 GPS 和 Galileo 已先行一步，已就兼容和互操作达成一致^[11]，这给 BDS 带来了更多的挑战。

任何其他 GNSS 供应商要想占领部分市场，就必须具备如下条件：①提供更高质量的定位、导航和授时 (PNT) 服务（包括精度、可靠性、操作便捷性、价格等）；②必须与 GPS 实行兼容与互操作；③提供与 GPS 不同的特色服务。

即使其他 GNSS 供应商具备这些条件，用户依然会十分挑剔地审视使用其他 GNSS 导航信号带来的成本和效益；如果使用多 GNSS 信号给用户增加过多额外成本，用户仍然会放弃与 GPS 不能实施互操作的卫星导航系统。

1 GNSS 信号不一致性的影响

互操作对 GNSS 的基本要求是，不同系统的信号应该尽可能相似，特别是与信号频率相关的特征应该高度相似。导航信号的中心频点不一致和带宽不一致，

不仅影响系统间的兼容性，实际上对互操作性的影响更大。

卫星导航信号的主要特征包括载波频率、调制方式、信号带宽、信号功率、极化方式、多址方式、扩频码、电文格式、电文纠错码等。从用户终端的角度看，为了研制性能好、功耗低、体积小、成本低的多系统接收设备，总是希望上述参数尽可能相似，以便更多地共享接收机中的硬件和软件。特别是载波频率、信号带宽、调制方式、多址方式等与信号频谱特征密切相关的主要特性，最好应该完全一致，这也是 ICG 所倡导的发展方向，即 GNSS 的互操作。

典型的，以 GPS L1 C/A 信号和 BDS B1 I 信号为例，由于这两个信号在载波、带宽（扩频码速率）、扩频码、电文格式、纠错编码等方面的差异，目前 L1 C/A 和 B1 I 双系统接收机实际上就是安装在同一机箱内的两台不同的接收机（当然，供电、晶振等外围部件是共用的），基本上等同于体制完全不同的双系统接收机，难以开发出低成本、低功耗的接收机产品（包括芯片和整机）。

不同的信号特征给接收机带来的主要影响有：

(1) 由于频点不同，不利于天线的小型化和低成本。如 GPS 的 L1 C/A 和 BDS 的 B1 I 双系统接收机需要宽带接收天线来覆盖两个频点，显然减小天线的尺寸变得相当困难，而且也不利于提高驻波比、增益等关键指标。如果这两个信号还需要与其他信号（如 L2、B2 I 等）一起构成双频或者多频高精度测量接收机，则更不利于天线相位中心等重要指标的提高。

(2) 由于频点和带宽的不同，射频部分通常需要双通道接收，实际上等同于需要两个不同的射频单元。当然，考虑到 L1 C/A 和 B1 I 频点比较接近，也可以采用一个宽带射频来同时接收这两个信号，但是不利于接收机的抗干扰性能，且信噪比也有损失。于是，在民用低成本接收机中基本都不采用这种方案。如果这两个信号还需要与其他信号（如 L2、B2 I 等）一起构成双频或者多频高精度测量型接收机，则更不利于射频通道时延一致性等指标的提高，增加了设计制造高精度测量型接收机的难度。

(3) 由于频点不同，需要两片模数转换芯片(ADC)，或者一片高速ADC，于是，必然导致接收机功耗和体积的增大，很难降低成本。

(4) 这两个信号的不同带宽(扩频码速率)、扩频码码型、电文格式等，需要设计两套不同的基带信号处理算法，显然需要占用更多的计算和存储资源。当然，由于数字信号处理技术已经非常成熟，嵌入式处理器的性能已经很强，对基带信号处理带来的影响有一定程度的降低。

(5) 对导航解算和自主完好性监测等方面带来的影响不大，基本可以忽略。

由此可见，不同的信号特征(频点、带宽等)对天线、射频、ADC等接收机前端和基带信号处理影响很大，而对导航信息处理的影响相对较小^[12]。

当然，L1 C/A和B1 I不同的载波频率给多系统接收机也带来一些额外的好处，主要有：

(1) 信号间的射频干扰较小，有利于信号的接收处理。

(2) 两个频点同时被无意干扰造成多系统接收机无法工作的概率较低，或者有意干扰方要同时对两个频点实施干扰而付出的代价较大，从这个角度来说，这样的多系统接收机具有更好的抗干扰能力。

从上面的分析可以看到，由于历史原因，BDS区域系统的信号与GPS信号的差异很大，特别是载波频率和带宽等频域特性的显著差异，两者之间的互操作性很差，导致了BDS和GPS双系统接收机设计上的困难，也不利于双系统接收机性能的提高和功耗、体积、成本的降低，严重制约BDS的应用推广和产业化。

上述分析结果对我们的启发是，正在建设中的BDS全球系统信号设计应在兼容性的基础上特别重视互操作的设计，需要在保持信号自身特色和独立性的同时，采用与GPS和Galileo相同的频点、类似的调制、相近的带宽，在频域特性上尽可能与GPS和Galileo保持一致，以增强其互操作性^[13, 14]。当然，GPS未来的核心信号是L1C，BDS全球信号的互操作设计应面向未来，重点实现与L1C的高度互操作。

2 GNSS 坐标系不一致的影响

从4大GNSS相应坐标系定义看，目前各导航卫星系统的坐标系统的定义基本一致。但与IERS定义的参数均有差异。各GNSS地心引力常数和地球自转角速度见表1，参考椭球的几何常数见表2。

表 1 GNSS 使用的地心引力场数和地球自转角速度

系统	geocentric gravitational constants/(m ³ /s ²)	rotation rate/(rad/s)
GPS	3.986 005×10 ⁻¹⁴	7.292 115 0×10 ⁻⁵
GLONASS	3.986 004 418×10 ⁻¹⁴	7.292 115 0×10 ⁻⁵
Galileo	3.986 004 415×10 ⁻¹⁴	7.292 115 146 7×10 ⁻⁵
BDS	3.986 004 418×10 ⁻¹⁴	7.292 115 0×10 ⁻⁵
IERS	3.986 004 418×10 ⁻¹⁴	7.292 115 0×10 ⁻⁵

表 2 参考椭球常数

系统	semi-major axis/m	flattening
GPS	6 378 137.0	298.257 223 563
GLONASS	6 378 136.0	298.257 84
Galileo	6 378 136.5	298.257 69
BDS	6 378 137.0	298.257 222 101
IERS	6 378 137.0	298.257 222 100 882 7

从GPS、GLONASS、BDS和Galileo所使用的参考椭球常数看，使用多GNSS融合导航定位存在如下影响：

(1) 早期GPS地面控制系统曾经采用地心引力常数 $3.986\ 005\times10^{-14}$ ，该值与其他GNSS系统存在差异，用户接收机普遍采用了这一数值。1994年后，GPS地面控制系统在计算卫星轨道时采用的地心引力常数GM为 $3.986\ 004\ 418\times10^{-14}$ ，该值与IERS推荐值相同。地心引力常数的这一改变消除了地面控制系统轨道1.2 m的径向偏差。为了避免GPS接收机软件的改动，同时确保GPS卫星的定轨精度，GPS系统在广播星历参数拟合时仍采用原值 $3.986\ 005\times10^{-14}$ ^[15]。注意到，由于地心引力常数的差异，可导致卫星广播星历近2 m的误差^[16]。

(2) GPS卫星星历采用的地球自转角速度 ω 与IERS推荐值相同，为 $7\ 292\ 115.0\times10^{-11}$ rad/s，由于地球自转角速度随时间变化，考虑到赤经岁差的影响，国际天文学联合会最新的推荐的 ω 值为 $7\ 292\ 115.146\ 7\times10^{-11}$ rad/s^[15]。为了与卫星应用保持一致性，GPS地面控制系统在进行广播星历参数拟合时采用 $7292\ 115.146\ 7\times10^{-11}$ rad/s。如果误用列出的地球自转速率的差异可引起广播星历数十米误差^[16]。

(3) 各GNSS坐标系采用的参考椭球长半轴几乎都不相同，而且均与IERS推荐值存在差异，相对于IERS推荐的参考椭球长半轴a=6 378 136.6 m，GPS和BDS参考椭球差了0.4 m，GLONASS参考椭球差了-0.6 m，Galileo参考椭球差了-1.1 m，GPS和BDS与Galileo参考椭球差了1.5 m。但是参考椭球的长半轴和扁率的差异一般不会影响用户的定位结果。因为用户由卫星广播星历计算卫星坐标时，不涉及参考椭球的几何参数。

(4) BDS、GPS、GLONASS采用的地球椭球扁率也与IERS规定值不同，但这些常数差对卫星星历影响不大。对地图投影的影响一般在毫米量级，不影响用户使用^[17]。

(5) 特别强调，尽管各GNSS坐标系统的定义差不明显影响融合导航定位结果，但是，各坐标系实现的差别对导航定位结果影响明显。因为GNSS坐标系实现和维持所带来的误差直接影响卫星轨道精度，而卫星轨道误差对用户单点定位结果的影响是系统性的。

(6) 此外，现有BDS跟踪站利用GPS进行坐标联测，容易带来联测误差；而且仅采用GPS观测进行BDS坐标系统的更新，不利于BDS与其他GNSS坐标系互操作参数的测定与预报。

(7) BDS坐标系更新周期与GPS有相当大的差距。为保持卫星轨道及用户坐标参数反映实际地球动力学效应，GPS控制系统每年更新一次坐标框架的坐标值；而北斗系统的跟踪站坐标数年更新一次，其板块运动及其他系统误差将影响跟踪站的坐标精度，进而影响

卫星轨道的测定精度和卫星星历的精度。

为了控制坐标基准差异对多GNSS融合导航定位互操作的影响，可采用如下措施：

(1) 由于现有4大核心卫星导航系统采用了不同的坐标框架，于是坐标框架的相对偏差将影响各卫星星座的互操作。解决这类互操作有两种策略：对于单点定位和实时导航，可以在观测模型中设置互操作参数，并在融合定位时估计这类参数^[18]；对于事后处理的高精度定位用户，可以采用相对定位方式削弱这类互操作参数的影响。但是必须注意，各GNSS系统必须选择各自的参考卫星进行差分，才能消除坐标互操作参数的影响。

(2) 利用多GNSS进行融合定位时，用户一般由卫星广播星历计算卫星坐标，于是只使用参考椭球常数中的地心引力常数GM和地球自转角速度 ω ，这两个参数必须保持与相应卫星导航系统提供的ICD文件中的数值一致，由此得到的地面站位置即为相应卫星导航系统坐标系下的位置。

(3) 实践中，应该采用多GNSS接收机同时接收GPS、GLONASS、BDS和Galileo等卫星信号，综合测定跟踪站的地心坐标，计算各GNSS系统存在的坐标系误差，并发播给用户作为先验参数，供用户在多模融合导航定位时参考。

(4) 采用多模GNSS跟踪信息，并联合ITRF跟踪站和IGS跟踪站板块运动信息，可以求解BDS各卫星监测站或跟踪站地壳运动参数，为每年北斗跟踪站的坐标更新提供基础，同样也为测定各卫星坐标系的互操作参数提供基础数据。

(5) 必须注意，如果将不同GNSS测定的地面点三维坐标转换成大地经纬度和大地高，则使用不同的参考椭球参数会产生明显差异。所以在我国若要求将多GNSS测定的点位坐标转换成大地坐标时，则一定要采用CGCS 2000椭球参数，而不是使用各GNSS所对应的其他参考椭球参数，如此才能确保不同卫星系统定位结果的坐标系统一致性。

(6) 如果各GNSS均采用相同的坐标系定义，采

用相同的跟踪站进行卫星轨道测定和卫星星历拟合，采用相同的 ICD 文件格式，则 4 大核心供应商的卫星星座将是一个整体星座，用户将不再需要考虑坐标系统的互操作问题。实时单点定位也将不再需要互操作参数，差分定位将不再需要各 GNSS 系统分别选用各自的参考星组成差分观测方程，但是，实现这一步十分艰难，基本不可行。

3 GNSS 时间系统不一致的影响

GPS、GLONASS、BDS、Galileo 4 大系统对应的时间系统定义差别较大，具体情况的比较分析见表 3。

表 3 GNSS 系统时间系统参数						
系统	时间系统	时间原点	参考方法	是否闰秒	系统偏差	与 UTC 偏差参数
GPS	GPST	1980.01.06 UTC 0h & 00m 00s (T ₀)+10	国际原子时	否	UTC-0000s	经过修正量 (GPST-UTC)
GLONASS	GLNT	与 UTC 0h & 00m 00s (T ₀)+38.2001s	国际原子时	无	UTC+0000s	无
北斗	BDT	2000.01.06 UTC 0h & 00m 00s (T ₀)+32	国际原子时	否	UTC+0000s	无
Galileo	GalT	1980.01.06 UTC 0h & 00m 00s (T ₀)+10	国际原子时	否	UTC+0000s	经过修正量 (GalT-UTC)

表 3 所列的各 GNSS 系统时间参数定义差异，将直接影响用户采用多 GNSS 联合导航定位授时的结果 [21, 22]。

(1) GPS、Galileo、BDS3 大系统都采用连续的原子时标，无闰秒，系统间的偏差包括两部分：①各系统在不同的 UTC 时间定义起点时间，而导致整秒偏差，BDT 与 GPST、GST 的整秒差为 14 秒，而 GST 与 GPST 不存在整秒差 [20]；②由于各系统时间由各自的原子钟组生成，在长期的运行过程中会产生微小的偏差，一般称之为“秒内偏差”，通常为几十纳秒量级。这里仅给出 2015 年 11 月 BDT 与 GPST 之间的秒内偏差，见图 1。BDT 与 GPST 之间的秒内偏差达十多纳秒甚至更大，会将直接影响授时和导航定位，也会影响卫星轨道测定。

(2) GLONASS 系统的基准时间 (GLNT) 与 UTC(SU)+3h 同步，而且与 UTC 一起进行动态闰秒，因此，GLONASS 系统与其他系统时间的偏差存在 3 方面的影响，即：①由于 GLNT 与 UTC 同步，而且考虑

俄罗斯与 UTC 的时差，于是产生整小时偏差，GLNT 与 GPST、GST 和 BDT 系统时间的整小时偏差为 3h；②整秒偏差部分：由于 GLNT 与 UTC 同步闰秒，而且整秒偏差不是一个固定常数，需根据 BIPM 发布的闰秒公告具体计算，截至 2015 年，GLNT 包含的闰秒数为 36，与 BDT 的整秒差为 3s，与 GPST、GST 的整秒差为 17 s；③秒内偏差部分，GLNT 系统钟组运行产生的误差，该偏差需要通过动态监测链路来实时获取。这 3 类偏差有的直接影响授时，有的影响时间同步，有的影响多 GNSS 联合导航定位 [23, 24]。

(3) 在多系统兼容互操作中，系统时差将直接影响定位、测速和授时 (PVT) 结果。对于秒以下偏差部分，对定位误差的影响可达 10 m 乃至数十米，对授时的影响可达数 10 ns。在进行系统时差精确测定和修正后，定位误差的影响一般可优于 1 m，授时误差可小于 3 ns。

(4) 对于标准时间用户，需使用系统时间与 UTC(k) 之间的偏差修正参数来获取用户所在国家的标准时间。应注意，通过不同系统所获取的标准时间是不同的，如：通过 GPS 获得的标准时间是 UTC (USNO)，通过 BDS 获得的是 UTC (BSNC)。

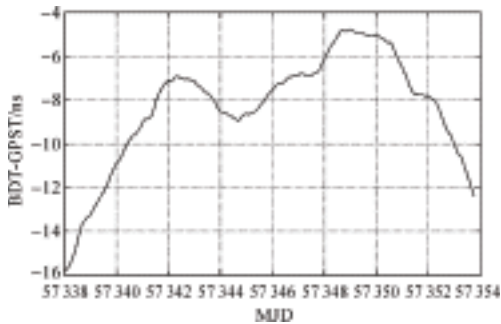


图 8 零偏与动偏期间的改进阿伦方差比较

对于时间系统互操作参数的影响可根据误差性质和来源分别进行处理：

- (1) 整秒偏差在授时时可以直接消除。
- (2) 对于秒内偏差，通过系统内差分可减弱秒内偏差的影响，但在多 GNSS 数据融合时，必须顾及这类误差的影响。特别需要注意的是，秒内偏差随时间变化，需要通过实时监测才可获取。

(3) 为保障多系统兼容与互操作，需要获取精确的秒内偏差参数，该偏差参数的获取主要有两种途径：从系统发播的导航电文中获取，或由用户自身解算。由系统发播的时差参数精度和可靠性一般较高，建议优先使用；如果由用户自行解算，则在双系统时差解算中，至少需要增加 1 个关于时差的未知参数，相当于需要额外增加一颗星的观测量，且观测误差、观测模型会影响解算结果精度。当然，采用序贯平差或 Kalman 滤波解算，则在多历元数据处理后模型中增加少数待定时间参数，不会明显影响导航定位参数的解算效率 [18]。

(4) GPS 和 Galileo 已经协商建立双方的监测链路并通过导航电文发播。BDS、GLONASS 导航电文中均有系统时差参数设计，但目前 GNSS 时差参数尚未正式发播。也可通过 UTC/UTCr、IGS 等数据实现系统时差的间接换算或解算，但应注意加强不确定度分析，特别是 B 类不确定度的评估与分析。

4 结论

本文讨论了信号、坐标系和时间系统的不一致对 GNSS 互操作的影响。可以看到，在信号的不一致方面，特别是其频域特性的差异给多系统接收机的设计带来了很大的困难，不利于多系统接收机性能的提高，也不利于功耗、体积、成本的降低。

在坐标系的不一致方面，多 GNSS 坐标基准定义相近，但选用的参考椭球常数存在差异，坐标基准的实现途径和更新周期均存在较大差异。多 GNSS 参考椭球的地心引力常数差异及地球的自传角速率差异将导致卫星广播星历 2 至数十米偏差，而坐标基准的实现误差、更新周期等差异将首先影响卫星轨道，进而对多 GNSS 用户产生影响。于是，未来可采用多 GNSS 接收机监测各 GNSS 的坐标互操作参数，并将 BDS 跟踪站的坐标更新周期改为每年一次，以便减小地壳形变误差对坐标基准互操作参数的影响。

时间系统的不一致直接影响多 GNSS 导航定位和授时结果。对于整数时差可以按照系统时间的基本定

义直接改正；对时间系统运行误差，则可以在函数模型中增加待定参数进行补偿，或采用系统内差分减弱其影响；也可以通过地面监测站实时进行监测、评估，并向用户发播改正信息。

多 GNSS 系统的兼容与互操作是未来 GNSS 发展的主要方向，在 BDS 全球系统的设计和建设 中，应进一步重视信号的互操作设计，尽可能采用与 GPS 和 Gaileo 相同的频点、类似的调制、相近的带宽等频域参数，达到与 GPS 和 Galileo 系统的高度互操作；坐标系统应尽可能一致，尤其是地面跟踪站尽量保持一致，否则应采用多模 GNSS 接收机监测其坐标系统偏差，并发播给用户进行改正，或作为用户导航定位参数估计的先验信息；时间系统的不一致，可采用多 GNSS 跟踪站进行监测和发播，也可通过增加模型参数进行实时估计。

参考文献：

[1] HEIN G. GNSS Interoperability: Achieving a Global System of System or Does Everything Have to Be the Same? [J]. Inside GNSS, 2006, 1(1): 57-60.

[2] STUPAK G. The Russian Federation View on GNSS Compatibility and Interoperability [C] // Proceedings of the 3rd Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG). Pasadena: [s.n.], 2008.

[3] GIBBONS G. GNSS Interoperability [J]. Inside GNSS, 2011, 6(1): 28-31.

[4] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战 [J], 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.

[5] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献 [J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.

地图大数据的理论与实践

——大数据大地图相得益彰 推进 IT 像 DT 时代演进

孙世友 教授级高工 中科宇图科技股份有限公司副总裁

1 引言

随着测绘地理信息技术的发展，特别是大数据处理技术的发展和广泛应用，中国智慧城市的建设中大数据已经无处不在，对空间大数据的支撑需求也极其迫切。在城市里面将平面的地图应用在大数据模式下进行了综合整合，实现了立体化分析。例如在环保行业里面对污染源的监测、天气预报等等，已经实现了地图和大数据的深层次融合。利用融合后的“大数据”我们可以快速掌握空气质量的变化情况，空气中气体的变化及空气质量对我们健康状况的影响等等，辅助我们实现智慧化的决策分析。

2 地图大数据的概念

随着 IT（Information Technology）向 DT(Data Technology) 发展，如何利用大数据思维来挖掘空间数据的现象本质，探索地图海量数据价值，让时空数据价值回归理性，在社会经济发展中体现地图信息与技术的价值，实现社会知识协同发展，这些问题成为了所有从事空间信息技术工作者必须要面对的课题。

2008 年，中国遥感地学之父，我国遥感应用和地理信息系统科学的创建者和奠基人陈述彭院士亲笔题词“大地图”（如图 1 所示），提出了地图整合理念，指出地图行业发展的未来走向。随后，李小文院士发博文提出“大数据时代的大地图：遥感可以先行”，强调大地图是整合向综合发展，并致力于大地图建设，实现地图综合应用模式。

两位院士都指出了地图的发展与行业应用融合的重要性，而大地图的核心是打造空间数据的“智”与“慧”问题。强调智在“智管地图”，管采集模式、

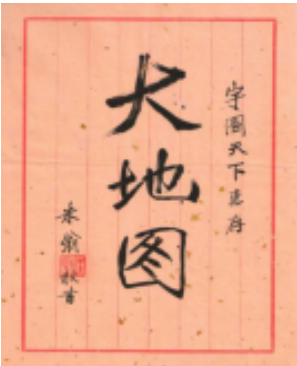


图 1 陈述彭院士亲笔题词

管传输过程、管服务共享；强调“慧在应用”要让空间数据应用模型（科学评价模型、预测模型、协同决策模型等）真正用在地图中。

3 大地图的定义与发展阶段

“大地图”是融合了大数据分析与应用模式地图的深层应用阶段代名词。强调空间信息智与慧的融合，空间信息与行业应用深度融合，强调空间位置和时间序列动态演变的地理信息行业“大数据”模式，是地图行业从整合向综合发展的体现。

纵观地图的发展，可把地图的发展分成以下三个阶段：

第一个阶段是“会说话”的阶段，在 2000 年以前，这个阶段主要以地图展示、综合信息为主，人属于被动接受阶段。在这个阶段体现的是分层、地图信息的展示阶段。这个阶段地图还属于贵族阶段，是一个高层技术和高端应用时期。

第二阶段是“会表达”阶段，互联网、物联网的技术和思维模式引入地图领域，GIS 服务模式取得了较大的发展，如图 2 所示。在互联网、物联网感知技术的不断发展中，地图信息实时采集和网络的传输与服务，加强了物联网空间感知数据的互动，使人与地图实现了实时互动，此阶段地图能够主动展示各类动态、可分析的专题信息，这就是“会表达”阶段，是地图和人的实时互动阶段，使人和图形整合起来，真正在行业应用中发挥了作用。

[6] LU Xiaochun, LU Jun, WANG Xue, et al. Interoperability Feasibility Analysis between BeiDou and GPS[C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference(CSNC 2012). Berlin:Springer, 2012:15-26.

[7] HAN Tao, LU Xiaochun, WANG Xue, et al. Differential Equation Dynamical System Based Assessment Model in GNSS Interoperability[J]. Science China, Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54(6):996-1003.

[8] U.S. Space-based PNT Policy[EB/OL]. (2012-08-15) [2015-12-03]. <http://www.pnt.gov/>.

[9] BETZ J. Something Old, Something New-Signal Structures for Satellite-based Navigation:Past, Present, and Future[J]. Inside GNSS, 2013, 8(4):34-42.

[10] ITU-R. ITU R M 1831-2007 a Coordination Methodology for RNSS Inter-system Interference Estimation[S]. ITU Recommendation, 2007.

[11] The GPS-galileo Agreement Working Groups. Agreement on the Promotion, Provision and Use of Galileo and GPS Satellite Based Navigation Systems and Related Applications[R]. Stockholm:[s.n.], 2004.

[12] HUANG Bin, YAO Zheng, GUO Fu, et al. Reaching for the STARx:a Software-defined All-GNSS Solution[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1):50-60.

[13] YAO Z, LU M, FENG Z. Quadrature Multiplexed BOC Modulation for Interoperable GNSS Signals[J]. Electronics Letters, 2010, 46(17):1234-1236.

[14] YAO Zheng, LU Mingquan. ACED Multiplexing and Its Application on BeiDou B2 Band[C]//SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin:Springer, 2013, 244:25-34.

[15] National Imagery and Mapping Agency. Department of Defense World Geodetic System 1984:Its Definition and Relationships with Local

Geodetic Systems[R]. 3rd ed. National Imagery and Mapping Agency Technical Report 8350.2, [S.l.]:NIMA, 2000.

[16] 秦显平，杨元喜，崔先强．椭圆参数对北斗与 GPS 广播星历计算互操作性的影响 [J]．武汉大学学报（信息科学版），2015，40(9):1237-1241.

[17] 魏子卿．2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较 [J]．大地测量与地球动力学，2008，28(5):1-5.

[18] YANG Yuanxi, LI Jinlong, XU Junyi, et al. Generalised DOPs with Consideration of the Influence Function of Signal-in-space Errors[J]. Journal of Navigation, 2011, 64(S3):S3-S18.

[19] HAN Chunhao, YANG Yuanxi, CAI Zhiwu. BeiDou Navigation Satellite System and Its Time Scales[J]. Metrologia, 2011, 48(4):S213-S218.

[20] DELPORTE J. The Definition and Implementation of Galileo System Time(GST)[R]. ICG-4 WG-D on GNSS Time Scales, [S.l.]:French Space Agency, 2009.

[21] PÍRIZ R, MOZO GARCÍAÁ, TOBÍAS G, et al. GNSS Interoperability:Offset between Reference Time Scales and Timing Biases[J]. Metrologia, 2008, 45(6):87-102.

[22] 张清华，隋立芬，贾小林，等．利用高精度 PPS 测量进行 GPS-GLONASS 时差监测 [J]．武汉大学学报（信息科学版），2014，39(11):1347-1351.

[23] JOO J M, CHO J H, HEO M B. Analysis of GPS Galileo Time Offset Effects on Positioning[J]. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2012, 37C(12):1310-1317.

[24] 张小红，陈兴汉，郭斐．高性能原子钟钟差建模及其在精密单点定位中的应用 [J]．测绘学报，2015，44(4):392-398. DOI:10.11947/j. AGCS. 2015. 20140287.

—— 摘自《测绘学报》——

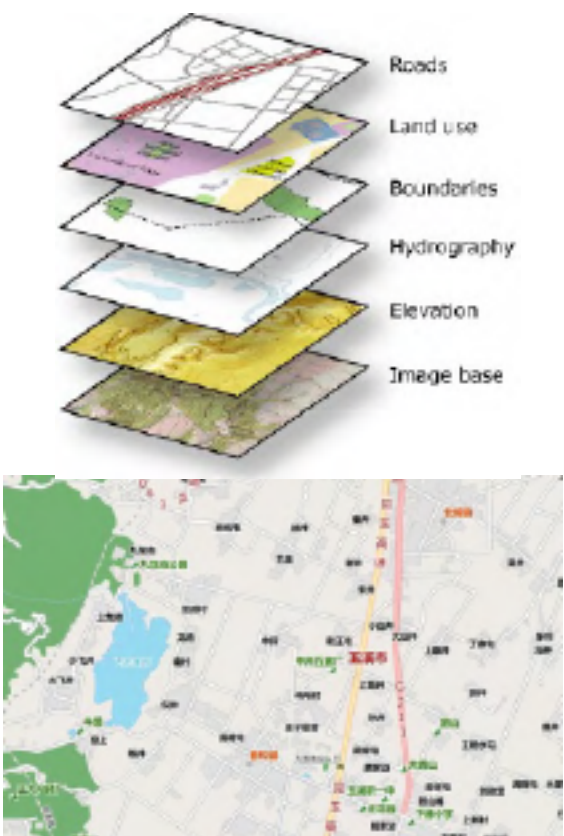


图2 地图的分层表达

第三个阶段为“会决策”阶段，大数据思维模式与方法的引入，使地图服务模式发生巨大变化，跨行业、跨学科、数据相关性、数据挖掘等大数据特性融入了地图领域，让地图与科学决策模型实现整合，实现“会决策”，地图与人、模型相融合，如图3所示。本阶段主要围绕各种专家决策模型与时空地图数据真正融合的阶段，并能够形成可供决策的动态交互应用！这个阶段实现了“地图+”模式，“地图+”移动互联思维，“地图+”大数据思维，“地图+”业务模型思维，“地图+”行业应用，从而实现了地图会科学决策，真正在地图数据生产、管理、应用、服务等不同阶段带来变革，并形成地图行业的大发展阶段态势，也为地图行业真正与社会经济发展互为促进，成为社会生产力的重要因素奠定了基础。

4 大地图的特征与作用

大地图将多源、多比例尺的基础地理信息进行高效整合，强调了地图的深层应用价值的挖掘。随着我们不同阶段对数据需求的变化，大地图的设计具有不断创新的能力，它实现了从整合向综合的发展，不再单纯从测绘角度看测绘地理信息系统，而是跳出测绘地理信息行业，用局外的思维审视大地图在智慧城市发展中的重大作用，在整个经济发展中的价值所在，从而赋予大地图新的价值，新的使命。

当前大地图为智慧决策分析提供了强有力的数据支持，大地图的主要作用包括以下几方面：

- 1) 大地图解决了地图专业技术壁垒问题。使GIS从专业用户向非专业用户方向拓展，将地图真正融合到大众的生活中。
- 2) 大地图解决了地图经费高的问题。通过创建大地图综合服务模式，使人们可以用较少的经费得到更精准的GIS服务。
- 3) 大地图解决了地图数据使用保密的问题，让用户在脱密情况下放心使用地图的数据。
- 4) 大地图解决了地图行业的共享问题。让用户更方便的跨行业应用，利用大地图的融合技术真正使不同的数据融合在一起。
- 5) 大地图解决了地图与大数据的融合技术。大数据必然冲击行业发展，我们测绘地理信息行业要发挥大地图的价值解决智慧决策的问题。

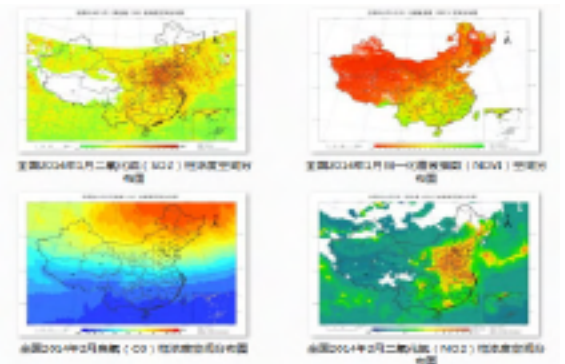


图3 融合大数据形成的决策专题图

5 如何构建地图大数据

构建地图大数据首先要进行的理念创新，在理念

创新中有三个方面需要特别指出。一是融合思维，测绘地理信息需要与大数据、大模型技术相结合，才能真正达到智慧应用。二是解放思想，打破旧思想的禁锢和束缚，树立局外思维，以局外人的身份重新来看测绘。三是跨界思维，重视行业应用、发挥跨界融合作用。

其次，在技术层面，地图大数据需要融合八项核心技术：物联网技术、云计算技术、大数据技术（数据挖掘）、空间信息技术、互联网+技术理念（移动）、智能化管理技术、智慧化应用技术、大模型技术。如图4所示：

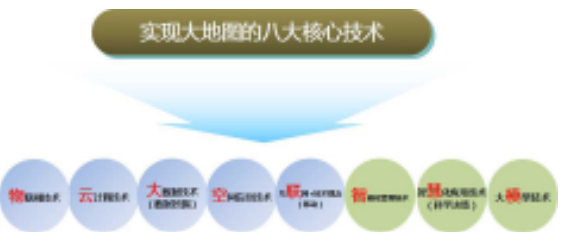


图4 实现大地图的八大核心技术

再次，在构建过程中，实现大地图还要从七大体系考虑：技术应用、标准规范、科学决策、业务应用、资源建设、数据采集、硬件支撑体系。如图5所示：



图5 实现大地图的七大体系

最后，在阶段目标上，实现大地图可以分五个阶段，来梳理测绘应用：一是智能化阶段，基于一个网的感知阶段（时空数据智能获取与更新层）；二是数字化阶段，基于一张图的时空大数据云中心阶段；三是信息化阶段，基于一时空平台的社会公众及行业云服务阶段；四是智慧化阶段，基于时空模型、行业业务模型协同驱动的科学决策阶段；五是现代化阶段，

基于互联网+大数据+大地图+大模型+跨行业的多学科联动阶段。如图6所示：



图6 实现大地图的五个阶段

6 大地图与大数据的关系

“大地图”是具有空间位置和动态演变的地理信息行业“大数据”。大地图是大数据的空间展示入口，而大数据是大地图形成的基础，新时代的大地图将错综复杂、繁琐的大数据以地图的形式给予表达，以会说话、会表达、会决策的方式展示出来。大数据发展必将促进地图行业发展，大数据是地图行业真正发挥价值的基础。同时，大地图是融入了大数据空间数据挖掘的模式，大数据和大地图是互为补充的，密不可分的，大数据的发展更离不开大地图的支撑。

大地图与大数据都是社会应用需求发展到一定阶段，根据科学技术发展的进展而形成了当前阶段最优解决方案的代名词。他们有共同的六大属性，如图7所示：强调数据的相关属性；强调数据的挖掘属性；强调数据决策属性；强调成果行业应用属性；强调成果公众服务属性；强调发展阶段代名词。



图7 大数据与大地图相互属性

“大数据”核心信息属性之一是具有空间、时间属性。大数据是一场革命，给各行各业带来深刻影响，是未来提高竞争力的关键要素之一。在大数据时代，决策将日益基于数据和分析而做出，而并非基于经验和直觉。目前，在智慧城市建设中，基于对大地图、大数据的解读来提供决策分析方案的服务模型已经开始出现并得到广泛的应用。

7 大地图的产品服务模式

大地图的产品服务模式将采用互联网思维,基于数据、平台与服务的方式,提供服务模式解决方案。为此,需要建立一个基于大地图技术的资源中心和一个综合的管理服务中心,利用各种服务模式,高性能的计算技术、服务的技术等建立一个服务平台。同时需要采用科学的顶层设计提供一系列面向公众的、科研的、企业的、行业的不同的专业的地图产品,并提供面向多行业的,面向公众的、科研的、企业的、政府的服务,具体服务模式见图8所示。



图 8 大地图产品服务模式

8 大地图的服务内容

随着科学技术的发展，在不同时代我们对地图数据有着不同的需求，经过研究大量的智慧环保、智慧公安、智慧水利、智慧国土等智慧城市建设项目中的地图服务，大地图的服务内容主要包括动态的专题图定制服务、定制化主题应用、专业的数据服务等几方面内容。

1) 大地图应用模式可提供动态的专题图定制服务

为环保、水利、电力、通信等不同行业提供所需要的动态专题图定制服务,如图9所示,按需求进行

二维、三维以及其他地图的专题服务定制。



图9 专题图定制服务

2) 大地图应用模式可提供定制化主题应用

定制化主题应用强调的是对一些专业型客户, 针对自己的科研的项目, 进行专题定制化的服务, 可以按照他的区域进行各类专题图的制作, 生成各类专题报告, 以大数据为核心、跨行业、跨专业的, 形成各类的测绘专题报告, 支持专题应用。如图 10 所示:

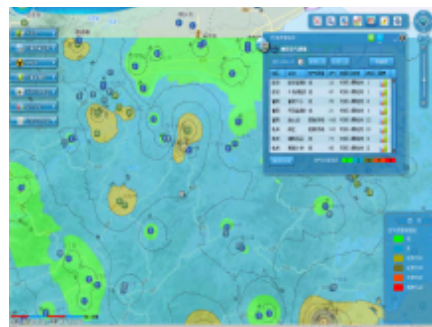
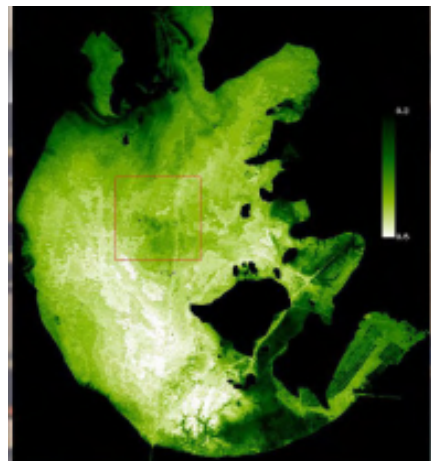


图 10 定制化主题应用

3) 大地图应用模式可提供智慧城市建设时空数据专业的数据服务专业的数据服务可以提供多行业、

长时间序列、高精度、多比例尺的数据服务平台,利用不同模式的二维、三维、实景的专题图为相关用户服务。如图 11 所示:



图 11 时空数据专业的数据服务

9 大地图促进地理信息行业服务模式变革

在大数据、“互联网+”时代，利用大地图技术将实现大地图+行业数据+数据算法+物联网+决策模型进行真正融合，促进了地理信息行业服务模式的变革。

首先，大地图可以促进空间数据加入时空序列，使我们获得不同层面、不同节点的实时数据、交通数据、个人生活数据、环境质量数据、经济指标等各类数据。如图 12 所示，不同时间点所获取的日提供定位请求服务最高次数超过 100 亿次请求的分布图，将这些数据通过不同的传感器融入到地图应用中，并对大数据进行分析，为我们提供智慧的决策分析服务，并以大地图的形式直观展现。



图 12 提供服务次数分析图

其次,大地图+大数据+传感器,解决了前期的基础数据问题,最关键的是随着整个行业在测绘地理信息技术中的应用发展,使角色模拟技术越来越多的融入到测绘行业应用中,如图 13 所示。大数据业务模型的高度融合,真正使数据从平面走向立体,从不同的二、三维向多维发展,角色性越来越强,人工智能技术、数据挖掘检索技术、各种多元数据整合技术,这些都促使地理信息行业发生变化。



图 13 大地图+大数据+传感器服务模式

10 结论

新时代的大地图服务方式，使地理信息技术进入了智慧化阶段。在这个阶段，把其它行业分析数据与地图深度融合，实现地图的科学价值所在。地图技术使大数据的分析方法发生了重大变化，使在生活中利用大数据进行科学决策的宏观分析模式，走向了真正微观定量的分析方法，为我们建立智慧城市，精细化城市的发展提供了强有力的技术支持。

综上所述，大地图的分析模式，使我们整个产业向一个更智能、智慧化的角度发展。同时，大数据时代地图服务模式创新是发展的必经之路，新的发展还有待整个地理信息行业共同发展，尤其是在跨界整合中，将测绘技术真正用在各行业的应用模式进行探索，为地图技术真正做到会说话、会表达、会决策而努力，实现智慧化的大地图技术服务。

基于大数据技术的水利信息现代化框架探讨

孙世友，李淼泉，杨剑英
（中科宇图科技股份有限公司，北京 100085）

【摘 要】 本研究充分利用了大数据、物联网、3S 以及云计算等先进技术，同时依据“十二五”水利信息化的发展方向，明确了水利现代化总体建设思路，对水利现代化框架进行了总体设计，提出了水利信息建设的包括现代化、智慧化、信息化、数字化以及智能化在内的“五化”建设思想。为进一步完善与水利改革发展相适应的水利信息化综合体系，全面提升信息技术对水利日常工作及应急处理的支撑与服务能力，为实现水利现代化建设作出了巨大贡献。

【关键词】 大数据；智能化；数字化；信息化；智慧化；现代化

1 引言

目前，水利信息化在“十一五”期间得到了快速推进，取得了显著成就，初步形成了由基础设施、业务应用和保障环境组成的水利信息化综合体系，满足了水利现代化对水资源、水生态、水环境、节水以及用水等的基本要求。但是，随着云计算、物联网、大

数据以及 3S 等技术的不断发展，对水利信息化的建设又提出了更高的要求，在解决先进技术满足水利行业的业务需求，以及运用信息手段来促进水资源的开发、利用、治理、保护等方面效率的提升等问题上，亟需对水利信息规划架构进行总体设计研究，从而实现水资源的优化配置，达到水利现代化的建设需求。

研究将大数据应用于水利信息化规划中，深入开

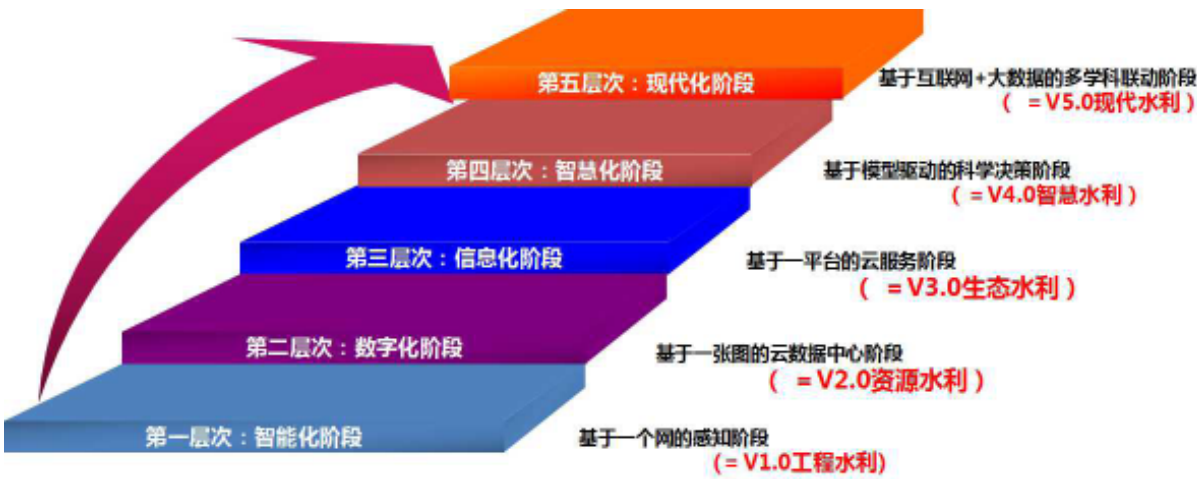


图1 水利现代化建设进程

发和广泛利用信息资源，促进信息交流和资源共享，对水利现代化框架进行了总体设计，从而全面提升了水利为国民经济和社会发展服务的能力和水平

2 研究目标

依据全国“十二五”水利信息化的发展方向，提出水利信息建设的包括现代化、智慧化、信息化、数字化以及智能化在内的“五化”建设思想，建立完善的水利信息标准规范体系，促进水利信息的标准化与现代化；建立完备的水利业务应用体系，实现水利业务服务与管理的信息化；建立水利信息综合决策支持体系，实现辅助决策与综合调度智慧化；建立水利信息现代化大数据中心，实现水利监测信息传输智能化。从而满足国家、流域、区域经济持续发展提供有力的水利信息支撑，从而全面提升信息技术对水利日常工作及应急处理的支撑与服务能力，进而提升水利现代化的水平，如图1所示。

3 总体架构

充分利用大数据、物联网、3S 以及云计算等先进技术，建成具备分级管理功能的国家级水利统一门户和业务应用协同平台，整合并提升现有水利业务应用系统，提高水利信息应用与服务水平；建立比较完善的水利信息化保障环境，提升信息采集、传输、存储的现代化水平。实现水利信息的互联互通、数据挖掘与多源信息的集成；制定并发布全国统一的水利信息化技术标准体系，建立信息共享与安全机制；实现“统一技术标准、统一运行环境、统一安全保障、统一数据中心和统一门户”。

数字水利现代化应用系统组成数字水利应用系统主要由数据源层、监测与传输层、数据中心层、应用层、决策层以及门户层六个部分组成，数字水利现代化基础构架，如图2所示。



图2 数字水利现代化基础构架

4 建设内容

4.1 数据源层

建设数据源层，通过对数据源进行业务流、数据流、工作流等分析，实现水资源各类专题数据的源头化采集，从而建立水利资源目录，借助统一的数据标准，对水利各类数据建立逻辑关系，形成统一的数据字典体系，如图3所示。

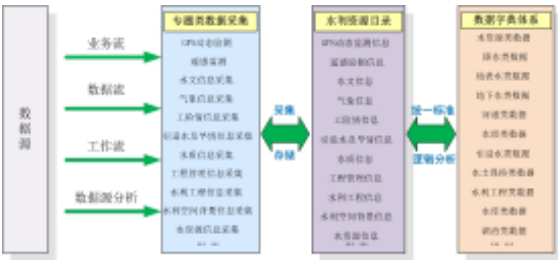


图3 数据源层工作流程

4.2 智能化传输层

建设监测与传输层，完善调整现有监测站网，充分利用遥感、物联网等新技术、新方法，及时获取水质、水量、水位等信息。整合完善现有视频监控资源，实现对水库、闸门、长距离输水等重点水利工程的现代化管理。逐步完善水利信息网络，实现水利信息网络与相关行业和各级政府网络互联互通，基本满足水利行业业务应用需求，进而实现水利监测信息传输智能化，如图4所示。

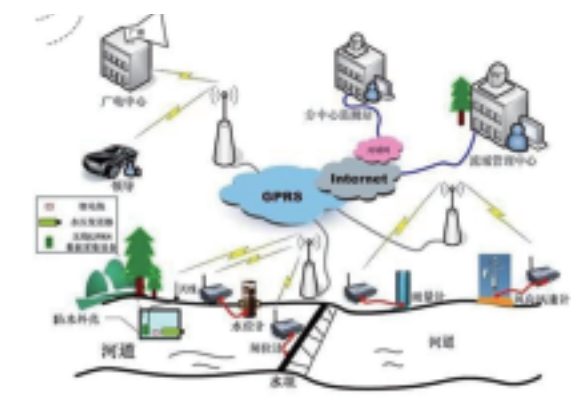


图4 智能化采集传输体系

4.3 大数据中心层

建设水利大数据中心，对数据资源进行统一规划和建设，整合现有数据资源，利用先进的软件技术进行应用系统整合与开发，完善通信和计算机网络，建成“先进实用、安全可靠”，集数据存储、管理、交换、发布与应用服务等功能为一体的水利大数据中心，形成持续稳定的数据更新机制，从而实现数据资源的共享和软件的功能复用，以及数据的良好共享与分发，避免重复开发和资源浪费；进而满足相关业务数据共享及进行水利综合决策的需要，提供水利信息的社会化服务，如图5所示。

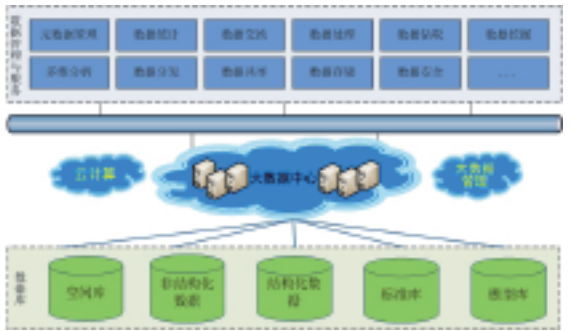


图5 大数据中心

4.4 应用层

以应用服务平台和数据中心为依托，在基础数据库、面向主题的数据仓库和模型库、知识库的基础上，采用系统分析、模型耦合、模拟仿真等技术，形成以防汛抗旱、水土保持、水利规划、水资源保护、水文化、水文、水利工程、水务、水资源管理以及农村水利等业务系统为骨架的专业应用系统，各系统在GIS和虚

拟现实技术的支持下，实现对水利主要业务的专业决策支持和日常运行管理，进而实现水利建设的信息化，如图1所示。



图6 业务应用体系

4.5 决策层

以各类应用系统为中心，在基础信息系统和模型库的支持下，应用专业决策模块和综合决策支持模块，通过决策支持中心协调运行，从不同角度处理水利业务问题，以实现治理水、开发水、利用水和保护水的能动作用。决策支持体系包括宏观与战略决策、各专业系统冲突协调决策、重大突发事件决策、防汛指挥决策、水资源调度决策、水资源保护决策、防汛与防凌规划、水利工程建设决策、水资源利用规划、水利工程规划、水土保持规划、水资源保护规划以及虚拟旅游与旅游规划等，从而实现综合决策和宏观战略规划的智慧化，如图7所示。



图7 智慧决策支撑体系

4.6 门户层

建设公众服务门户、水利现代化综合应用门户、移动门户、个性化定制门户、水利政务内网以及水利

政务外网门户，对水利业务系统针对不同的用户进行个性化定制，实现建设上有系统，应用上无系统，从而建成比较完善的水利信息基础设施体系，最终实现水利现代化建设，如图8所示。



图8 水利业务个性化定制

4.7 标准化

在《水利技术标准体系》的框架下，用系统工程和结构化思想，从分析水利信息特征、处理技术、应用服务入手，构建水利信息化建设与发展相适应的信息化标准体系。依托水利网络与信息安全保障系统专项建设，根据国家信息系统安全等级保护相关要求及《水利网络与信息安全体系建设基本技术要求》，逐步完善全国各级水利部门信息安全防护体系。完善各级水利部门信息系统运行维护机构，逐步落实运行维护经费，制定和完善运行维护标准和规范，全面应用信息系统运行保障技术措施，形成较为完善的信息系统运行维护体系，如图9所示。

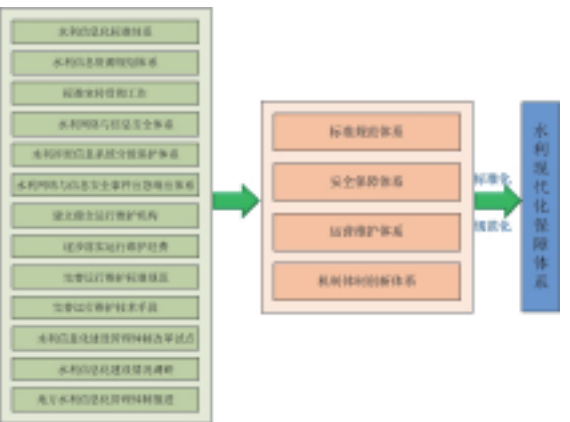


图9 水利现代化保障体系

5 总结与展望

本研究根据国家现代化的战略要求，针对水利信息化发展存在的薄弱环节，以新理念、新思路、新技术、新途径推进了水利信息化建设，通过密切联系水利现代化的战略任务，以需求为导向，以应用促发展，提出了水利信息建设的包括现代化、智慧化、信息化、数字化以及智能化在内的“五化”建设思想，建设了集“全方位数据采集与信息存储、大数据融合与知识发现、智能辅助决策与综合调度”为一体的水利现代化框架，实现了水利业务的“高效感知、互联互通、资源共享、业务协同、数字仿真、智在管理，慧在应用”，全面提升了水利信息采集、传输、存储的现代化水平，满足了水利信息的互联互通、数据挖掘与多源信息的集成，进而推动水利信息现代化建设。

参考文献：

[1] 成静静，喻朝新．基于云计算的大数据统一分析平台研究与设计[J]．广东通信技术．2013(01)

[2] 李国杰，程学旗．大数据研究：未来科技及经济社会发展的重大战略领域——大数据的研究现状与科学思考[J]．中国科学院院刊．2012(06)

[3] 杨艳，翟建锋，许晓龙，马荣．关于水利信息化发展的思考[J]．现代农业科技．2010(22)

[4] 莫荣强，艾萍，吴礼福，岳兆新，冯鹏．一种支持大数据的水利数据中心基础框架[J]．水利信息化．2013(03)

[5] 陈雷．水利信息化要实现五转变[J]．中国计算机用户．2009(09)

[6] 王祖印，王树海．关于水利信息化管理平台的设计与研究[J]．水利天地．2009(03)

[7] 成建国，钱峰，艾萍．国家水利数据中心建设方案研究[J]．中国水利．2008(19)

基于 GlobeLand 3 0 的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析

陈军¹, 陈利军¹, 李然¹, 廖安平¹, 彭舒¹, 鲁楠^{1,2}, 张宇硕^{1,3}
(1. 国家基础地理信息中心, 北京 100830; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756; 3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

【摘 要】城乡建设用地分布与变化是人类活动的直观标志和生态足迹, 在环境变化研究、地理国（世）情监测和可持续发展研究等方面发挥着重要作用。以往人们对一些城市、区域或国家的城乡建设用地分布与变化进行过较为深入系统的研究, 但在全球尺度上, 这方面研究尚为空白。本文是利用我国自主研制的世界上首套 30m 空间分辨率全球地表覆盖数据集 GlobeLand30 的人造地表数据层, 首次开展了全球城乡建设用地的空间分布及变化的统计分析。它采用用地面积、构成占比和增量占比等主要指标, 统计全球范围内城乡建设用地的空间分布及 2000 年至 2010 年 10 年间的变化, 重点分析了 2010 年全球、各大洲及主要国家的城乡建设用地分布现状与地域差异, 2000 年至 2010 年全球、主要国家的建设用地变化以及其主要土地来源。研究表明, 2010 年全球城乡建设用地总面积为 118.75×104km², 占全球陆表面积的 0.88%; 2000 年至 2010 年全球城乡建设用地面积增加了 5.74×104 km², 变化率为 5.08%, 其中, 中国和美国新增城乡建设用地约占全球的一半; 新增城乡建设用地占用最多的是耕地, 占总量的 50.26%。这些为研究全球陆表人类活动的空间分布特征与变化趋势提供了翔实的信息和知识。

1 引言

为了满足生活与生产之需, 人类不断地修建居所、构筑道路、开发能源, 形成了以居住、交通、工矿设施等为主体, 分布城乡的建设用地, 成为人类活动的直观标志和生态足迹^[1-2]。这不仅改变了地球表面覆盖与形态, 而且直接影响着局部、区域乃至全球的气候、生物化学、水文过程^[3-6]。全面摸清和分析建设用地的空间分布、时空扩展, 对于环境变化研究、生态环境保护、地理国（世）情监测、可持续发展规划等具有重要意义^[7-14]。

自 20 世纪 80 年代以来, 人们开始利用航空航天遥感手段进行建设用地的调查、监测与分析。早期主要集中对单个城市或大城市连绵区的建成区

空间分布进行测定^[15-17], 以后逐步将研究区域扩展到一个国家或其他较大区域的建设用地, 如基于 Landsat 卫星影像的美国不透水层研究^[18-19]、中国人工建设不透水地表研究^[20-22]。在全球尺度的调查分析方面, 近几年曾有学者利用空间分辨率为 500m 的 MODIS 影像资料生成了反映全球城市用地分布的 MOD500 数据产品^[23], 从中统计出 2000 年全球 3646 个大城市连绵区和人口超过 10 万城镇的建设用地面积, 分别为 34×104km² 和 26.6×104 km²^[24]。文献[2]利用 DMSP OLS(defense meteorologicalsatelliteprogram’soperationallinescansystem)的夜间灯光数据, 近似地估算出全球人工不透水层(conGstructedimpervioussurface)的总面积为 57.9×104km², 约占全球面积的 0.43%。但其仅给出了

粗空间分辨率的主要城镇以上建设用地, 没有顾及乡村建设用地。此外, 美国和欧洲研制的 6 套空间分辨率 300m 或 1km 的全球地表覆盖数据产品均包含了城市用地这一类型, 但其总面积从 0.27×105km² 至 3.52×105km² 不等, 呈数量级的差异^[25]。这是至今无人对全球城乡建设用地宏观格局与变化进行深入分析的重要原因。

2014 年, 我国成功研制出世界上首套 30m 全球地表覆盖数据 GlobeLand30, 包括水体、耕地、林地、人造地表等 10 大类型, 将同类全球产品的空间分辨率提高了 10 倍以上, 且具有 2000 年和 2010 年两个时相(DOI10.11769/GlobeLand30)。

2010.db,www.globeland30.org)^[26-27], 全球总体分类精度达 80% 以上^[28-29]。这为研究全球性问题提供了重要科学数据^[30]。本文利用 GlobeLand30 的人造地表(artificialsurfaces)数据层, 开展了全球城乡建设用地空间分布及 2000—2010 年变化的统计分析, 力图为全球生态环境监测、环境变化研究、地理世情监测和可持续发展研究等提供第一手信息和依据。

2 基础数据与分析方法

2.1 采用的基础数据

GlobeLand30 是以 2000 年和 2010 年两个基准年的陆地卫星 LandsatTM、ETM+ 为主, 中国环境减灾卫星(HJ-1)影像数据和局部地区的北京一号(BJ-1)影像数据为辅, 采用基于像素分类 G 对象提取 G 知识检核的 POK 方法研制而成[27-28]。其人造地表层是指人为活动形成的由沥青、混凝土、沙石、砖瓦以及其他建材覆盖的地表覆盖类型, 包括居民区(城市、乡镇、村庄)、交通、通讯以及工矿等设施等类型, 不包括下垫面为土壤的城市绿地(如公园、高尔夫球场)和水体, 与国土和规划部门对城乡建设用地的定义不完全相同。考虑到城市绿地及水体所占比例较小, 故用该人造地表数据去近似地替代城乡建设用地。本文使用的国外 GDP 和人口统计资料分别来自“世界银行

WDI 数据库”和“国际统计年鉴”; 中国部分的 GDP 和人口资料取自“中国统计年鉴”。其他还有全球基础地理底图数据(1:100 万)、全球 SRTM DEM 和柯本—盖格气候带分区数据等。

2.2 统计分析指标与思路

本文主要采用城乡建设用地面积、构成占比以及增量占比为主要分析指标, 其中增量占比定义为单位增量占总体增量的比例。为了分析全球城乡建设用地的空间分布及格局, 先是以经纬度、气候区、高程带等为单元, 统计建设用地面积、地均人口、人均占地、地均 GDP 等指标, 从自然的角度分析 2010 年全球、各大洲及主要国家的城乡建设用地分布现状与地域差异; 其次是采用面积变化、增量占比变化等指标, 分析 2000—2010 年全球、主要国家的建设用地变化以及其主要土地来源。图 1 给出了基本统计分析方法。

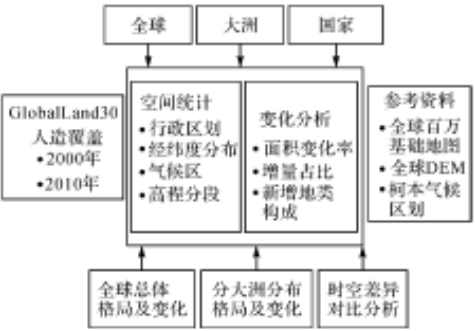


图 1 全球城乡建设用地统计分析的基本思路

2.3 微分迭代的面积改正

基于 GlobeLand30 的地表覆盖面积估算, 是按矢量形式表达的空间统计区域(如行政界线、生态分区范围等), 对栅格形式存储的地表覆盖类型数据进行像素统计(counting pixels)^[31], 需考虑地球球面面积与平面投影面积之间的转换及误差影响。为确保统计结果的精度和可靠性, 分别在等角投影和等面积投影下计算统计区域和地表覆盖类型面积, 并利用微分迭代方法, 进行面积改正, 如图 2 所示。为此, 先将

待统计区域的矢量数据（经纬度坐标值）的弧段进行线性内插，保证其在投影转换的过程中不至于产生过大的形变误差；随后，再将矢量数据投影至 UTM 等角投影坐标系（同时也是 GlobeLand30 数据的空间参照系）确定待计算的地表覆盖数据范围；同时还需将矢量范围投影至等积投影坐标系下，计算其统计区域的理论参考面积。此时，比较地表覆盖数据面积值与等积投影下的参考面积值，如果两类投影的面积差超出统计的精度要求，则对统计区域进行平面上的格网剖分，再解算出每一个面元上两类投影的面积差的改正系数；继而根据求解的改正系数对统计区域内每一处剖分的面元进行面积改正，再次比较剖分后矢量数据的两种投影方式的面积差，直至面积差满足需求为止。

3 全球城乡建设用地的空间分布统计

表 1 给出了 2010 年全球及各大洲城乡建设用地的面积及所占比例。2010 年全球城乡建设用地总面积为 $118.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全球陆表总面积的 0.88%。而各大洲占全球城乡建设用地面积比例依次为：亚洲（34.87%）、欧洲（27.30%）、北美洲（24.66%）、非洲（6.59%）、南美洲（5.09%）和大洋洲（1.50%）。其中，亚洲、欧洲和北美洲 3 个大洲的城乡建设用地面积总和占全球的 86.83%。



图2 地表覆盖地类面积统计流程

表 1 2010 年全球城乡建设用地面积总量		
区域	面积/km ²	比例/(%)
全球	118.75×10 ⁴	100.00
亚洲	41.41×10 ⁴	34.87
欧洲	32.42×10 ⁴	27.30
非洲	7.82×10 ⁴	6.59
北美洲	29.28×10 ⁴	24.66
南美洲	6.04×10 ⁴	5.09
大洋洲	1.78×10 ⁴	1.50

注：不包含南极洲。

从图 3 可见，全球城乡建设用地的空间分布很不均匀。从纬向看，北半球的城乡建设用地面积占全球的 90.69%，其中 82.28% 分布于 20° N—60° N 之间的中纬度地区，一些城乡建设用地面积较大的国家如美国、加拿大、中国、俄罗斯和印度等均分布于此；南半球的城乡建设用地面积仅占全球的 9.31%，其中 97.39% 分布于 0° S—40° S 之间的中纬度地区。从经向上看，呈现出西多（67.66%）东少（32.34%）的特征，主要分布于大陆的东岸和西岸，其中在北美洲东海岸、欧亚大陆西海岸和东海岸集聚程度较高，其中东半球主要分布于东经 60° E—140° E，占东半球总量的 84.04%；西半球主要分布在西经 50° W—80° W 和 120° W—180° W 之间，占西半球总量的 80.43%。

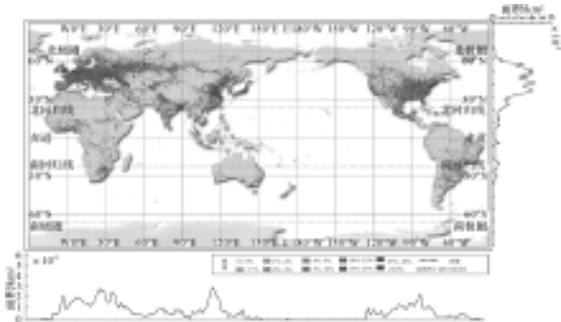


图3 2010 年全球城乡建设用地分布密度图

按高程分布统计，2010 年全球 70% 以上的城乡建设用地分布于海拔 0~500m 之间，而介于海拔 0~1000m 之间的高达 85% 以上，海拔 0~2000m 之间的占 95% 以上（如表 2 所示）。这是因为海拔较低、相

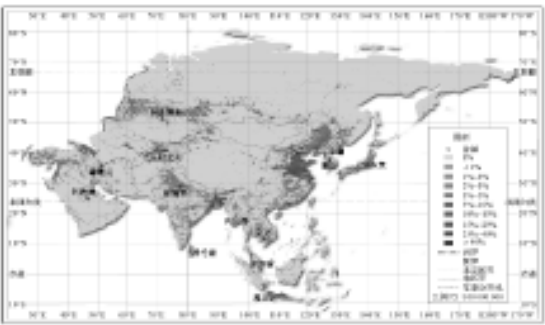
对平坦地区土地开发建设相对容易，而海拔较高的地区往往地势起伏较大，开发成本较高；另一方面，海拔大于 4000m 的城乡建设用地仅占总量的 0.65%，主要零星分布在亚洲青藏高原地区、南美洲安第斯山脉；而低于海平面的城乡建设用地仅占总量的 0.61%，主要分布在亚洲吐鲁番盆地、里海周边区域以及东非大裂谷北段等区域。同理，可以进行各大洲城乡建设用地分布特征的统计分析。例如，2010 年亚洲城乡建设用地面积为 $41.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全球的 34.87%，居各大洲第一位，其分布不均匀、空间差异较大，主要集中在 20° N —50° N 的中纬度地区，位于东亚沿海地带、印度洋孟加拉湾以及伊塞克湖和里海附近（图 4(a)）。其中东亚的城乡建设用地规模最大，占亚洲的 46.28%；中亚城乡建设用地规模最小，仅占亚洲的 7.31%。按主要国家统计，中国、印度、俄罗斯（亚）、日本、孟加拉国、印度尼西亚、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、土耳其（亚）和伊朗等城乡建设用地面积居前 10 位，占亚洲的 82.61%，而中国居亚洲之首，占 38.87%。俄罗斯、哈萨克斯坦和土耳其横跨欧亚大陆，在统计时，仅计算其在亚洲的部分。再如，非洲城乡建设用地面积为 $7.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全球的 6.59%，居全球第 4 位，其特点为中部多，南部次之，北部最少（图 4(b)）。

表 2 2010 年全球不同高程范围城乡建设用地面积分布

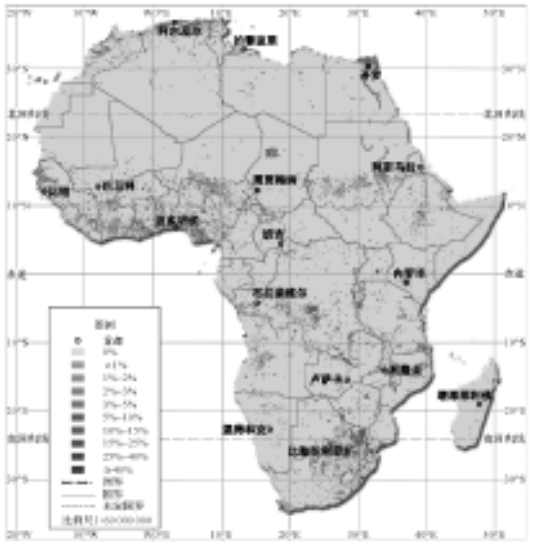
高程/m	面积/km ²	比例/(%)
[—∞,0)	0.72×10 ⁴	0.61
[0,10)	12.10×10 ⁴	10.19
[10,60)	23.78×10 ⁴	20.02
[60,100)	12.15×10 ⁴	10.23
[100,200)	23.12×10 ⁴	19.47
[200,500)	24.33×10 ⁴	20.37
[500,1000)	16.39×10 ⁴	13.80
[1000,2000)	12.18×10 ⁴	10.26
[2000,3000)	2.89×10 ⁴	2.43
[3000,4000)	0.89×10 ⁴	0.75
[4000,+∞]	0.78×10 ⁴	0.65
合计	118.75×10 ⁴	100.00

南北纬 15° 之间的区域，城乡建设用地面积占

非洲城乡建设用地总面积的 53.66%；20° S 以南的区域占 22.84%；而约占非洲面积 1/3 的撒哈拉地区，沙漠广布，人居稀少，仅占不到 15%。按分区统计，城乡建设用地面积从大到小依次为南非、西非、北非、中非和东非。其中，南非地区是非洲城乡建设用地规模最大的地区，占非洲的 33.09%；而东非最小，占 8.20%。按主要国家统计，南非、尼日利亚、苏丹、刚果（金）、埃及、阿尔及利亚、加纳、安哥拉、坦桑尼亚和摩洛哥等城乡建设用地面积居前 10 位，占非洲的 63.17%。其中南非的城乡建设用地面积最大，为 $1.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占非洲的 19.05%。



(a) 亚洲



(b) 非洲

图4 2010 年大洲城乡建设用地分布示例（亚洲和非洲）

4 2000 年至 2010 年的时空变化

4.1 总体变化

表 3 给出了 2000 年和 2010 年全球城乡建设用地面积及变化。从 2000 年至 2010 年的 10 年间，全球城乡建设用地总面积增加了 $5.74\times10^4\text{km}^2$ ，变化率为 5.08%。各大洲的城乡建设用地面积的变化率依次为：非洲（12.30%）、亚洲（6.41%）、北美洲（5.38%）、大洋洲（5.06%）、南美洲（4.12%）和欧洲（1.80%）。其中，非洲、亚洲和北美洲的变化率高于全球平均水平，非洲变化率最高，为 12.3%。但从增量占比看，亚洲对全球城乡建设用地增量的贡献率最大，达 43.44%；其次是北美洲，为 26.03%。

表 3 2000 年和 2010 年全球城乡建设用地面积及变化

区域	2000 年面 积/ km^2	2010 年面 积/ km^2	增量 / km^2	变化率 /(%)	增量占比 /(%)
全球	113.01×10^4	118.75×10^4	5.74×10^4	5.08	100.00
亚洲	38.91×10^4	41.41×10^4	2.50×10^4	6.41	43.44
欧洲	31.85×10^4	32.42×10^4	0.57×10^4	1.80	9.96
非洲	6.97×10^4	7.82×10^4	0.85×10^4	12.30	14.92
北美洲	27.79×10^4	29.28×10^4	1.49×10^4	5.38	26.03
南美洲	5.80×10^4	6.04×10^4	0.24×10^4	4.12	4.16
大洋洲	1.70×10^4	1.78×10^4	0.08×10^4	5.06	1.50
注：数据计算过程保留小数点后 8 位，计算结果保留小数点后 2 位，下同。					

4.2 主要国家的面积变化

美国、中国、俄罗斯、印度、乌克兰、巴西、德国、法国、日本和墨西哥是城乡建设用地面积居前的主要国家，占全球总量的 61.26%（表 4）。从 2000 年至 2010 年，中国城乡建设用地增加 $1.61\times10^4\text{km}^2$ ，变化率为 11.17%，反映出中国经济快速发展对土地资源的大量需求；而美国增量为 $1.18\times10^4\text{km}^2$ ，变化率为 5.26%，主要是住宅用地增加显著。中美两国新增城乡建设用地分别占全球的 28.17% 和 20.48%，之和接近全球新增总量的一半。其他国家中，除墨西哥的变化率高于全球平均水平外，其他均低于 4%，德国和乌克兰基本没有发生变化。

表 4 2000 年和 2010 年典型国家城乡建设用地面积及变化

国家 (地区)	2000 年面 积/ km^2	2010 年面 积/ km^2	增量 / km^2	变化率 /(%)	增量占比 /(%)
美国	22.38×10^4	23.56×10^4	1.18×10^4	5.26	20.48
中国	14.49×10^4	16.10×10^4	1.61×10^4	11.17	28.17
俄罗斯	9.50×10^4	9.83×10^4	0.33×10^4	3.46	5.73
印度	4.90×10^4	4.99×10^4	0.09×10^4	1.79	1.53
乌克兰	4.09×10^4	4.09×10^4	$<0.01\times10^4$	<0.01	<0.01
巴西	3.18×10^4	3.24×10^4	0.06×10^4	1.83	1.01
德国	3.02×10^4	3.02×10^4	$<0.01\times10^4$	0.03	0.01
法国	2.86×10^4	2.90×10^4	0.04×10^4	1.29	0.64
日本	2.50×10^4	2.54×10^4	0.04×10^4	1.55	0.67
墨西哥	2.32×10^4	2.50×10^4	0.18×10^4	7.87	3.18

4.3 新增城乡建设用地的主要土地来源分析

就占有土地来源而言，2000 年至 2010 年全球新增城乡建设用地占用最多的是耕地，为 $2.89\times10^4\text{km}^2$ ，占总量的 50.26%；其次是草地，为 $1.21\times10^4\text{km}^2$ ，占总量的 21.01%；其他依次为林地（13.46%）、灌丛（6.81%）、裸地（5.13%）、湿地（1.69%）和水体（1.64%），如表 5 所示。其中亚洲占用耕地的比例最高，占 72.01%，欧洲其次，为 60.43%。非洲建设用地占用最多的是草地（40.59%）和耕地（29.47%），这是因为非洲原本耕地面积较少。

表 5 新增城乡建设用地主要来源类型用地面积统计表						
	全球	亚洲	欧洲	非洲	北美洲	大洋洲
耕地	面积/ km^2 27952.04 25.04	12322.04 46.40	2322.04 6.81	2322.04 6.81	2322.04 6.81	2322.04 6.81
草地	面积/ km^2 12100.04 10.44	8622.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44
林地	面积/ km^2 13460.04 11.60	8622.04 11.60	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44
灌丛	面积/ km^2 6810.04 6.02	4622.04 6.02	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44
裸地	面积/ km^2 5130.04 4.52	3422.04 4.52	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44	1322.04 3.44
湿地	面积/ km^2 1690.04 1.48	1090.04 1.48	169.04 0.48	169.04 0.48	169.04 0.48	169.04 0.48
水体	面积/ km^2 1640.04 1.44	1090.04 1.44	169.04 0.48	169.04 0.48	169.04 0.48	169.04 0.48
合计	面积/ km^2 57400.04 50.80	37700.04 50.80	4770.04 13.46	4770.04 13.46	4770.04 13.46	4770.04 13.46

5 结 论

通过对全球 30m 地表覆盖数据集 GlobeLand30 的统计分析，获得了有关全球城乡建设用地空间格局与变化的翔实信息和知识，为研究全球陆表人类活动

的空间分布特征与变化趋势提供了重要依据。其中主要结论有：

(1)2010 年全球陆表城乡建设用地总面积为 $118.75\times10^4\text{km}^2$ ，占全球陆表面积的 0.88%。全球各大洲城乡建设用地面积从大到小依次为亚洲（34.87%）、欧洲（27.30%）、北美洲（24.66%）、非洲（6.59%）、南美洲（5.09%）和大洋洲（1.50%）。城乡建设用地面积最大的 10 个国家为美国、中国、俄罗斯、印度、乌克兰、巴西、德国、法国、日本和墨西哥。

(2)2000 年至 2010 年全球城乡建设用地面积增加了 $5.74\times10^4\text{km}^2$ ，变化率为 5.08%。变化率由高到低依次为，非洲（12.30%）、亚洲（6.41%）、北美洲（5.38%）、大洋洲（5.06%）、南美洲（4.12%）和欧洲（1.80%）。10 年间，城乡建设用地面积规模居前的主要国家中，中国变化率最大，为 11.17%，居主要国家之首。从增量占比看，中国和美国新增城乡建设用地占全球的比重分别为 28.17% 和 20.48%，两国之和占全球新增总量近一半。

(3) 全球新增的 $5.74\times10^4\text{km}^2$ 城乡建设用地中，占用最多的是耕地，占总量的 50.26%；其次是草地，占总量的 21.01%；其他依次为林地（13.46%）、灌丛地（6.81%）、裸地（5.13%）。今后还将进一步加强对其数据类型的细化与完善，按特大城市、大中城市和乡村等进行空间格局和变化分析，并进一步开展对全球城乡建设用地的持续监测，深化其在全球环境变化中的应用。

致谢：本项研究工作得到中科院地理所刘纪远研究员、刘闯研究员、国家遥感中心全球生态环境遥感监测专家组有关专家的指导和帮助。在论文撰写过程中，武汉大学詹庆明教授、中国城市规划设计院翟健高工、北京师范大学葛岳静教授、地理所匡文慧研究员等提出了宝贵建议与意见；西南交通大学研究生刘吉羽等参与了资料收集整理，在此一并感谢。

参考文献：

[1] KAREIVAP, WATTSS, MCDONALDR, et al. Domesticated Nature: Shaping Landscapes and Ecosystems for Human Welfare[J]. Science, 2007, 316(5833): 1866-1869.

[2] ELVIDGECD, TUTTLEBT, SUTTONPC, et al. Global Distribution and Density of Constructed Impervious Surfaces[J]. Sensors, 2007, 7(9): 1962-1979.

[3] VITOUSEKPM, MOONEYHA, LUBCHENCOJ, et al. Human Domination of Earths Ecosystems[J]. Science, 1997, 277(5325): 494-499.

[4] FOLEYJA, DEFRIESR, ASNER G P, et al. Global Consequences of Land Use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.

[5] SETO K C, GÜNERALPB, HUTYRALR. Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(40): 16083-16088.

[6] SUTTONPC, ANDERSONSJ, ELVIDGECD, et al. Paving the Planet: Impervious Surfaces as Proxy Measure of the Human Ecological Footprint[J]. Progress in Physical Geography, 2009, 33(4): 510-527.

[7] VERBURGPH, NEUMANNK, NOLL. Challenges in Using Land Use and Land cover Data for Global Change Studies[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 974-989.

[8] HECHTAD, FIKSELJ, FULTONSC, et al. Creating the Future We Want[J]. Sustainability: Science, Practice, & Policy, 2012, 8(2): 62-75.

[9] PEREIRA H M, FERRIERS, WALTERS M, et al. Essential Biodiversity Variables[J]. Science, 2013, 339(6117): 277-278.

[10] HOYMANNJ. Quantifying Demand for Built-up Area—a Comparison of Approaches and Application to Regions with Stagnating Population[J]. Journal of

Land UseScience, 2012, 7(1):67–87.

[11] 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策 [J]. 科学通报, 2013, 58(21):2100–2106.

[12] 陈俊勇. 地理国情监测的学习札记 [J]. 测绘学报, 2012, 41(5):633–635.

[13] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘 [J]. 测绘学报, 2014, 43(12):1211–1216.

[14] 王家耀, 成毅. 论地图学的属性和地图的价值 [J]. 测绘学报, 2015, 44(3):237–241.

[15] 杨凯, 陈军, 关泽群, 等. 用多时域遥感影像测定城市演变的方法 [J]. 经济地理, 1986, 6(3):191–195.

[16] 陈军, 陆惠文, 关泽群, 等. 利用多时相航空影像分析随州城市变迁状况 [J]. 环境遥感, 1987, 2(4):265–274.

[17] WENG Qihao. Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117:34–49.

[18] HOMERC, HUANG Cheng quan, YANG Limin, et al. Development of a 2001 National Land Cover Database for the United States [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(7):829–840.

[19] XIAN G, HOMERC. Updating the 2001 National Land Cover Database Impervious Surface Products to 2006 Using Landsat Imagery Change Detection Methods [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8):1676–1686.

[20] HUANG Jikun, ZHULifen, DENG Xiangzheng. Regional Differences and Determinants of Built-up Area Expansion in China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(12):1835–1843.

[21] 匡文慧, 刘纪远, 张增祥, 等. 21 世纪初中国人工建设不透水地表遥感监测与时空分析 [J]. 科学通报, 2013, 58(5):465–478.

[22] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局 [J]. 地理学报, 2014, 69(1):3–14.

[23] SCHNEIDER A, FRIEDL M A, POTERED. A New Map of Global Urban Extent from MODIS Satellite Data [J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4):044003.

[24] ANGELS, PARENT J, CIVCODL, et al. The Dimensions of Global Urban Expansion: Estimates and Projections for All Countries, 2000–2050 [J]. Progress in Planning, 2011, 75(2):53–107.

[25] POTERE D, SCHNEIDER A. A Critical Look at Representations of Urban Areas in Global Maps [J]. Geo Journal, 2007, 69(1–2):55–80.

[26] CHEN Jun, BAN Yifang, LISongnian. China: Open Access to Earth Land Cover Map [J]. Nature, 2014, 514(7523):434–434.

[27] 陈军, 陈晋, 廖安平, 等. 全球 30m 地表覆盖遥感制图的总体技术 [J]. 测绘学报, 2014, 43(6):551–557.

[28] CHEN Jun, CHEN Jin, LIAO Anping, et al. Global Land Cover Mapping at 30m Resolution: A POKG-based Operational Approach [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103:7–27.

[29] BROVELLIM A, MOLINARIME, HUSSEINE, et al. The First Comprehensive Accuracy Assessment of Global Land 30 at a National Level: Methodology and Results [J]. Remote Sensing, 2015, 7(4):4191–4212.

[30] CAO Xin, CHEN Jun, CHEN Lijun, et al. Preliminary Analysis of Spatiotemporal Pattern of Global Land Surface Water [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(10):2330–2339.

[31] GALLEGOF J. Remote Sensing and Land Cover Area Estimation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(15):3019–3047.

—— 摘自《测绘学报》——

基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法

姚宜斌^{1,2}, 赵庆志¹, 何亚东¹, 李祖锋³
(1. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079; 2. 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北武汉 430079; 3. 中国电建西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065)

【摘要】针对传统水汽密度层析方法的缺点, 设计并实现了一种基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法, 提高了观测数据的利用率。利用香港 CORS 网的实测 GPS 和气象数据, 并结合研究区域内 45004 探空站的探空数据, 验证了该算法用于实测数据的可行性及精度, 并分析了不同天气对层析新算法的影响。试验结果表明: 该算法在观测数据的利用率上远大于传统层析方法, 以探空数据为参考基准, RMS、水汽廓线相关系数和误差分布均优于传统方法。此外, 降水天气对层析结果影响要比无降水天气的影响大。

水汽是大气中重要的组成部分之一, 虽然在大气中的含量非常少^[1], 但对天气的变化具有重要作用。传统水汽探测方法有无线电探空技术、地基微波辐射计、激光雷达和太阳光谱分析仪等, 但这些方法受精度低、成本高、天气条件等多方面的限制。利用地基 GNSS 层析技术探测大气水汽具有全天候、高精度、高时空分辨率的特点^[2], 获得的水汽分布信息对暴雨等降水天气的研究具有重要意义。

文献[3]首先提出利用 GNSS 反演大气水汽信息, 并证明了其可行性。此后, 地基 GNSS 反演大气水汽的方法日益成熟^[4–12]。但目前在大多数研究中, 针对观测值的选取都是利用穿过整个研究区域的射线, 这大大限制了已有观测数据的使用。文献[13]利用降低层析区域高度和移动整体层析网格的方法来尽可能多地利用已有数据, 但受网格边长的影响, 对已有数据的利用有很大的限制。

针对水汽层析中观测数据利用率低的局限性, 本文提出一种基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法, 该方法不仅可以使使用穿过整个研究区域的观测值, 还可以利用从研究区域侧面穿出的信号, 大大提高了观测数据的利用率。

1.1 层析方程建立

利用 GAMIT 数据处理软件^[14], 结合 GNSS 观测站相应的气象文件进行解算, 得到卫星和测站所在连线上的 SWV (slant water vapor), 其表达式为

$$SWV = 10^{-6} \int_{\rho} \rho_v ds \tag{1}$$

式中, s 表示卫星信号的射线路径; ρ_v 表示水汽密度, 单位为 g/m³。

将式(1)离散化后可得到线性方程



式中, SWV^{ρ} 表示完整穿过层析区域的第 ρ 条射线路径上的水汽含量; a_{ijk}^{ρ} 为射线 ρ 在网格 (i, j, k) 内的截距, 单位为 km; a_{ijk}^k 为 (i, j, k) 网格内的水汽密度。将线性方程(2)写成矩阵形式

$$\mathbf{Y}_{n \times 1} = \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} \tag{3}$$

式中, \mathbf{Y} 表示观测值, 通常指 SWV; m 表示 SWV 的个数; \mathbf{A} 表示信号穿过每个网格的截距组成的系数矩阵; n 表示研究区域内网格的个数 \mathbf{x} 是要求的未知量, 这里指水汽密度 ρ_v 。

1.2 约束条件

对层析方程求解实质就是求反问题的研究。由于卫星星座和测站几何位置分布的影响, 观测方程在多数情况下是不适定的。矩阵 \mathbf{A} 是维数较大的稀疏矩阵, 直接求逆会导致严重的数值问题^[15]。通常, 需要加入额外约束解决该问题^[16–19]。本文附加两种约束条件, 在水平方向上, 利用高斯加权函数方法进行约束^[10], 垂直方向上则利用指数分布建立网格间的函数关系进行约束^[20]。因此, 可以得到传统方法的层析模型

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{m \times n} \\ \mathbf{H}_{m \times n} \\ \mathbf{V}_{m \times n} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{m \times n} \\ \mathbf{0}_{m \times n} \\ \mathbf{0}_{m \times n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中，H>和V分别表示水平约束和垂直约束的系数矩阵。对于式(4)，可利用奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)计算矩阵的广义逆^[21]。

1.3 基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法

针对传统水汽层析方法的缺点，本文提出一种基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法，该方法的优点是充分利用所有穿过研究区域的射线，即传统层析方法中被剔除的在研究区域侧面穿出的射线也可以被利用。假定每条射线在所穿过的网格内都有一个水汽密度比例因子，定义为网格内倾斜路径上的单位水汽密度，用于反映网格内水汽密度的大小，计算公式为

$$\rho_s = \int_s r_{ijk} \, d\text{SWV}^p \quad (5)$$

式中， r_{ijk} 表示(i, j, k)网格内的水汽密度比例因子；dSWV^p表示SWV^p对距离的导数。


本文层析算法的具体计算过程如下：

(1) 建立水汽密度比例因子模型。水汽密度比例因子计算公式为

$$r_{ijk} = \frac{\rho_{ijk}^{\text{actual}}}{\text{SWV}^p} \quad (6)$$

式中， $\rho_{ijk}^{\text{actual}}$ 表示利用试验前3 d的探空数据估计出的(i, j, k)网格内的水汽密度。由式(6)可知，水汽密度比例因子与SWV成反比，而SWV的大小受高度角的影响。此外，射线在不同网格内的截距也不同，因此，通过分析可以建立以下经验模型

$$\gamma^k = a_1^k + a_2^k \sin(\text{ele}) + a_3^k (1/\text{SWV}^p) + a_4^k (1/d_{ijk}^p) \quad (7)$$

式中，ele表示卫星高度角；表示第p条射线在(i, j, k)网格内的截距； a_1^k 、 a_2^k 、 a_3^k 和 a_4^k 表示第k层水汽密度比例因子模型对应的系数，k表示第几层。

通过式(6)可以计算出有地面实测探空资料的网格内每条射线所对应的水汽密度比例因子，然后利用这些水汽密度比例因子根据式(7)通过最小二乘方法即可求出经验模型所对应的各个系数。

(2) 计算虚拟水汽密度。利用所建立的水汽密度比例因子模型以及观测到的所有SWV即可求出有射线穿过的网格内的虚拟水汽密度值，计算公式为

$$\rho_{xyz}^{\text{virtual}} = (\sum_{p=1}^{n_{xyz}} \gamma^k \text{SWV}^p) / n_{xyz} \quad (8)$$

式中， $\rho_{ijk}^{\text{actual}}$ 表示利用穿过网格的SWV虚拟出的该网格内的水汽密度；n_{xyz}表示穿过(x, y, z)网格的SWV条数。

将式(8)计算的虚拟水汽密度作为初始约束值，写成矩阵的形式为

$$\mathbf{I}_{n_1 \times n_1} \mathbf{x}_{n_1 \times 1} = \rho_{sw_1}^{\text{initial}} \quad (9)$$

式中，n1表示层析区域内有射线穿过的网格个数。此时联立方程(4)和方程(9)，即可得到本文提出方法的层析模型。

2 层析策略

2.1 试验数据选取

选取香港卫星定位参考站网12个测站(图1)2014-03-25—04-25共32 d的数据进行层析试验，研究区域范围：22.19°N—22.54°N, 113.87°E—114.35°E；网格划分：水平分辨率经度方向为0.06°(约6.6 km)，纬度方向为0.05°(约5.9 km)，垂直分辨率为0.8 km，研究区域共有8×7×13个网格。其中，试验区域在King’s Park有一个无线电探空仪站(图1)。探空气球每天在UTC 00:00和UTC 12:00发射，本文将探空数据作为检核层析结果的标准。

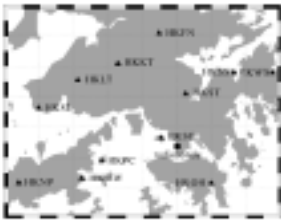


图1 测站分布图

试验中采用两种层析方法获得水汽密度信息，分别为：方法1，利用传统层析方法，即利用方程(4)建立的层析模型；方法2采用本文提出的层析方法，将方程(4)和(9)联合作为层析模型。

2.2 研究区域射线穿过条数分析

本文首先统计了2014-03-25—2014-04-25共32

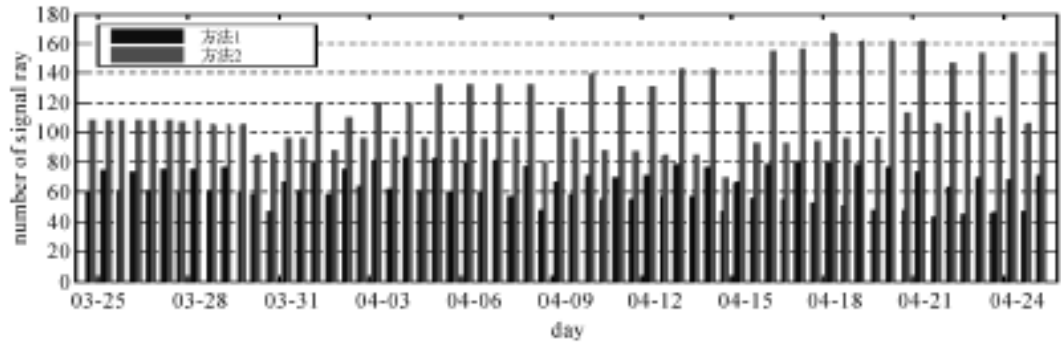


图2 两种方法信号使用条数对比图

d每天在UTC 00:00和12:00时刻，两种方法在研究区域内信号条数的使用情况，如图2所示。此外，表1给出32 d内两种方法射线条数使用情况的具体统计结果。

表1 两种方法信号使用情况具体统计结果			
方法	mean	max	min
方法1	65	83	43
方法2	114	167	70

由图2和表1可以看出，方法2通过利用从研究区域侧面穿出的射线后，使用的射线条数远大于方法1。通过对32 d的信号使用情况计算得出，方法2将观测数据的利用率由传统方法的51%左右提高到

91%左右，大大提高了已有数据的利用率。

2.3 水汽密度比例因子模型可靠性检验

为检验建立的水汽密度比例因子模型的可靠性，利用2014-03-25—2014-04-25共32 d的探空数据计算每天UTC00:00和12:00时刻的水汽密度比例因子，并与模型计算的结果进行对比。表2给出了利用模型和探空数据计算结果的具体误差统计。

表2 模型与探空数据对比统计结果

参数	kg/m ³		
	mean	max	min
RMS	0.004 0	0.006 3	0.002 1

由表2可以看出，利用模型计算的水汽密度比

例因子的平均RMS为0.004 kg/m³，假设SWV为200 mm，则利用该模型计算水汽密度的误差在0.8 g/m³左右，这说明建立的模型具有很高的精度。

3 算例分析

本文利用2014-03-25—2014-04-25共32 d的数据进行层析水汽精度检验，并选取2014年3月25日和3月30日King’s Park探空站对水汽层析结果进行评估。King’s Park探空站位于层析区域内，因此，将该探空站所在网格对应的层析垂直廓线与探空数据进行对比。由香港天文台提供的天气信息可知：3月25日为无雨天气，3月30日为大到暴雨天气。因此，单独选取3月25日和3月30日两天的数据分析不同天气对层析结果的影响。

3.1 层析结果精度检验

无线电探空仪能够提供垂直方向上精确的水汽密度廓线图，通常将其作为检验其他方法得到水汽密度廓线信息的一个标准^[22, 23, 24]。本文采用平均绝对偏差 (MAE) 和均方根误差 (RMS) 作为评定该方法的指标。

为了对层析重构结果和探空数据计算结果做一个直接对比，本文分别统计了 2014-03-25—2014-04-25 共 32 d 每天两个历元时刻 (UTC 00:00 和 12:00) 两种方法的层析结果。首先利用每个历元层析重构的结果计算出无线电探空站所在位置的水汽密度，再分别与无线电探空仪数据计算的结果进行对比。表 3 给出了两种方法与探空数据对比的统计结果，图 3 给出了两种方法统计的每天的 RMS 和 MAE。

表 3 两种方法 32 d 层析结果与无线电探空仪对比误差统计

方法	RMS			MAE		
	mean	max	min	mean	max	min
方法 1	1.69	3.70	0.57	1.16	2.29	0.43
方法 2	1.45	3.32	0.51	1.02	2.05	0.36

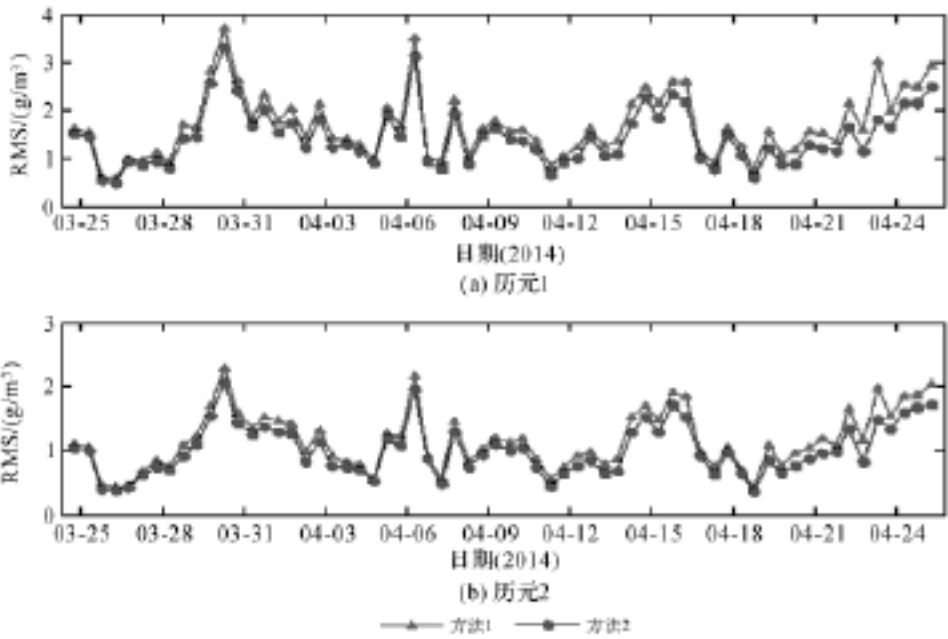


图 3 两种方法的统计结果

由表 3 可以看出，方法 2 的平均 RMS 和 MAE 比方法 1 的要小。由图 3 可以看出，方法 2 每天层析结果的 RMS 和 MAE 也均小于方法 1 的层析结果。这说明，本文提出的基于水汽密度比例因子的三维水汽层析算法比传统层析方法精度要高。

3.2 不同天气影响分析

3.2.1 与探空数据对比

2014 年 3 月 25 日和 3 月 30 日对应两种不同的天气状况，为了检验层析方法在不同天气下的层析精度，表 4 和表 5 分别给出了 2014 年 3 月 25 日和 3 月 30 日每天两个历元时刻 (UTC 00:00 和 12:00) 两种方法的 RMS 和 MAE。

表 5 两天不同方法与无线电探空仪对比 MAE 统计

方法	MAE			
	25 日		30 日	
方法 1	1.10	1.05	1.71	2.29
方法 2	1.04	1.00	1.55	2.05

由表 4 和表 5 可以看出，方法 2 的 RMS 和 MAE 比方法 1 的小。这说明，与传统的层析方法相比，本文提出的层析方法其结果与探空数据结果具有更好的一致性，层析重构质量得到了很大的改善。两种方法

在 3 月 30 日的 RMS 和 MAE 均比 3 月 25 日的大，其可能的原因是 3 月 25 日对应无雨天气，水汽的空间结构较稳定，而 3 月 30 日为大到暴雨天气，水汽的空间分布变化较大、空间结构不稳定，故其 RMS 和 MAE 较大。

3.2.2 层析水汽廓线对比

为了更加直观地对比两种方法的层析效果，进行以下对比：分别统计了 3 月 25 日和 3 月 30 日两天两种方法在 UTC 00:00 不同高度上的水汽密度，并分别与无线电探空仪计算的水汽密度对比。图 4、图 5 分别给出了两种方法与无线电探空仪对比的廓线结果。

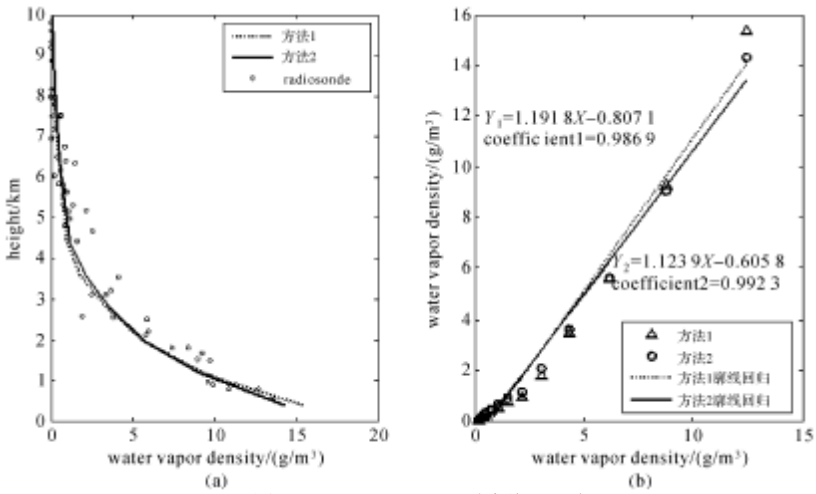


图 4 3 月 25 日 00: 00 时廓线对比结果

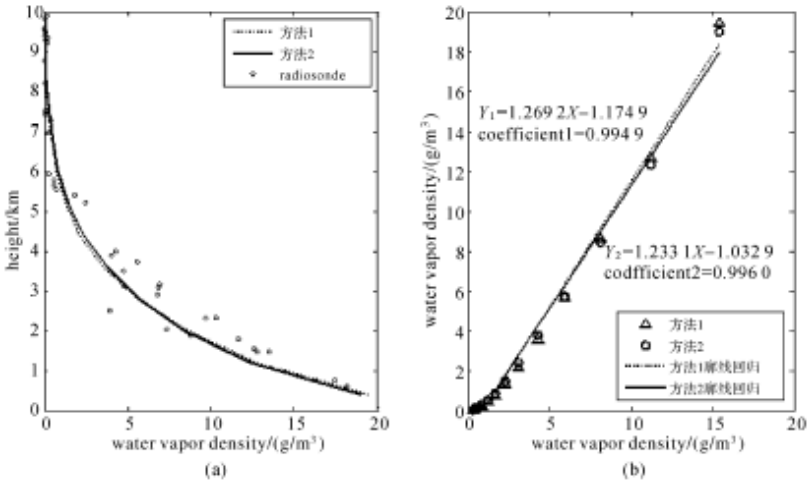


图 5 3 月 30 日 00 时廓线对比结果

由图 4(a)、图 5(a) 可以看出, 整体上两种方法层析廓线与探空数据廓线都具有很好的一致性。图 4(b) 为 3 月 25 日不同方法层析廓线对探空廓线的回归, 由该图可以看出, 方法 1 的回归相关系数达到了 0.986 9, 利用本文提出的层析算法后, 方法 2 将其提高到 0.992 3。同时, 方法 2 将截距由初始的 0.807 1 降至 0.605 8。根据图 5(b) 回归结果, 3 月 30 日方法 1 的回归相关系数为 0.994 9, 但截距达到了 1.174 9; 通过方法改进, 方法 2 的回归系数增加至 0.996 0, 同时截距下降至 1.032 9。

综合图 4、图 5 可以得出, 两种方法对探空廓线的回归均具有很高的相关系数, 说明本文水汽层析结果的精度很高, 可用于天气研究。通过对比两次廓线发现, 考虑了在研究区域侧面穿出的射线后, 层析结果精度得到了不同程度的提高, 也证明了本文建立和使用该层析方法的有效性。

3.3 误差分布统计

以层析时段 (2014-03-25—2014-04-25) 内每天 2 次 (UTC 00:00 和 12:00) 共 64 次探空结果为真值, 统计两种层析方法的误差分布情况。图 6 给出了 32 d 两种方法误差分布统计结果。由图 6 可以看出, 两种方法层析结果的误差在 -3~2 g/m3 之间分布最为集中。通过计算可得, 方法 1 和方法 2 分别有 91.11% 和 91.95% 的误差在此范围内, 由此可以得出, 基于水汽密度比例因子的层析算法的层析结果在误差分布上也优于传统方法的层析结果。

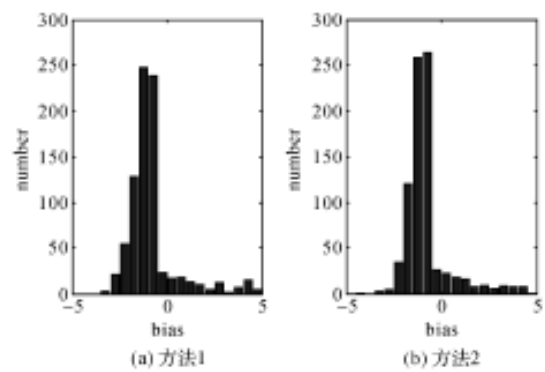


图 6 2014-03-25—2014-04-25 共 32 d 误差统计分布图

4 结论

利用香港 CORS 网 2014-03-25—2014-04-25 共 32 d 的实测 GPS 和气象数据, 验证本文提出的三维水汽层析算法的有效性及其精度。

试验结果表明: 本文提出的算法大大提高了观测数据的利用率, 能够充分利用已有观测信息; 以探空数据为基准通过计算发现, 该算法计算的结果在 RMS、相关系数和误差分布等方面均优于传统方法。此外, 降水天气对层析结果的影响要比无降水天气影响大, 但无论在何种天气下, 本文提出的算法均优于传统方法。

致谢: 感谢 IGRA 提供的无线电探空数据, 感谢香港天文台提供的试验数据及降水量信息。

参考文献:

[1] 万蓉. 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用[J]. 气象科技进展, 2014, 4(2):24-35.

[2] 王久珂, 韩素芹, 边海, 等. 一次暴雨过程中 GPS 三维层析水汽场的变化特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6):1053-1064.

[3] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS Meteorology:Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research,1992, 97(D14):15787-15801.

[4] ROCKEN C, WARE R, HOVE T V, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23):2631-2634.

[5] DUAN Jingping, BEVIS M, FANG Peng, et al. GPS Meteorology:Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water[J]. Journal of

Applied Meteorology,1996, 35(6):830-838.

[6] 毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 1993, 21(4):45-49.

[7] 陈洪滨, 吕达仁. GPS 测量中的大气路径延迟订正[J]. 测绘学报, 1996, 25(2):127-132.

[8] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. 测绘学报, 1998, 27(2):113-118.

[9] 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4):470-477.

[10] 于胜杰, 柳林涛, 梁星辉. 约束条件对 GPS 水汽层析解算的影响分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(5):491-496.

[11] 叶世榕, 江鹏, 刘炎炎. 地基 GPS 网层析水汽三维分布数值积分方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(5):654-660.

[12] 何林, 柳林涛, 苏晓庆, 等. 水汽层析代数重构算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1):32-38.

[13] CHEN Biyan, LIU Zhizhao. Voxel-optimized Regional Water Vapor Tomography and Comparison with Radiosonde and Numerical Weather Model[J]. Journal of Geodesy, 2014, 88(7):691-703.

[14] HERRING T A, KING R W, FLOYD M A, et al. Introduction to GAMIT/GLOBK[EB/OL]. Release 10.4.Boston:Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science. (2010-10-04)[2013-05-15].http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Intro_GG.pdf.

[15] BENDER M, STOSIUS R, ZUS F, et al. GNSS Water Vapour Tomography-expected Improvements by Combining GPS, GLONASS and Galileo Observations[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5):886-897.

[16] FLORES A, RUFFINI G, RIUS A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays[J]. Annales Geophysicae, 2000, 18(2):223-234.

[17] TROLLER M, BVRKI B, COCARD M, et al.3-D Refractivity Field from GPS Double Difference

Tomography[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(24):2-1-2-4.

[18] ROHM W, BOSY J. Local Tomography Troposphere Model over Mountains Area[J]. Atmospheric Research, 2009, 93(4):777-783.

[19] BENDER M, DICK G, GE M R, et al. Development of a GNSS Water Vapour Tomography System Using Algebraic Reconstruction Techniques[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(10):1704-1720.

[20] ELÓSEGUI P, RUIS A, DAVIS J L, et al. An Experiment for Estimation of the Spatial and Temporal Variations of Water Vapor Using GPS Data[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23(1):125-130.

[21] RUAN Baiyao, GE Weizhong.Singular Value Decomposition Method Compared with Damping Least Square Method[J]. Computing Techniques for Giophysical and Geochemical Exploration, 1997, 19(1):46-49.

[22] NIELLA E, COSTER A J, SOLHEIM F S, et al. Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Rdiometer, GPS, and VLBI[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 200118(6):830-850.

[23] ADEYEMI B, JOERG S. Analysis of Water Vapor over Nigeria Using Radiosonde and Satellite Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(10):1855-1866.

[24] LIU Z Z, WONG M S, NICHOL J, et al. A Multi-sensor Study of Water Vapour from Radiosonde, MODIS and AERONET:A Case Study of Hong Kong[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(1):109-120.

卫星摄影姿态测定系统低频误差补偿

王任享^{1,2}，王建荣^{1,2}，胡莘^{1,2}

(1. 地理信息工程国家重点实验室，陕西西安 710054; 2. 西安测绘研究所，陕西西安 710054)

【摘要】姿态测定系统不仅存在高频误差，还存在与卫星轨道纬度及时间有关低频误差，严重影响无地面控制点测量精度。本文分析了产生低频误差的因素及相关解决措施，并在天绘一号（TH-1）卫星工程中，利用光束法平差实现低频误差的自动检测与补偿处理，消除低频误差对定位精度的影响，最后进行了试验验证。试验结果表明：低频误差补偿技术，很好地解决了无地面控制定位系统误差问题，为实现天绘一号卫星全球定位精度的一致性发挥了重要作用。

【关键词】卫星摄影测量；光束法平差；低频误差补偿；外方位元素；定位精度

姿态测定系统是高分辨率卫星工程中的重要组成部分，通常有效载荷为星敏感器或星相机以及陀螺等设备。卫星在轨运行中，通过对恒星摄影成像，利用恒星位置等数据计算摄影时刻卫星的姿态。姿态测定数据不仅用于卫星的姿态控制，还可转换为摄影测量处理所需的外方位角元素，用于实现无地面控制点或少量控制点卫星摄影测量，提高卫星影像的定位精度及应用效能。美国 MapSat 卫星计划在卫星摄影中精确测定外方位元素，实现无地面控制点条件下 1：5 万比例尺地形图的测制，并给出了其相应的测绘标准：水平位置精度 12 m，垂直高程精度 6 m，等高线间距为 20 m(首次给出的卫星影像立体制图标准，本文称之为“MapSat 工程标准”)^[1, 2]。但由于 MapSat 卫星工程对姿态稳定度要求过高导致工程未能立项，但为无地面控制点摄影测量提出了新的途径^[3]。之后，德国、法国、日本及印度等相继研制了“全球连续覆盖模式”光学摄影测量卫星系统，也进行了无地面控制定位方面的相关研究^[4, 5, 6]。但通过全球范围的定位精度检测后，无地面控制定位精度都未达到“MapSat 工程标准”。其中 CARTOSAT-1、ALOS 工程目标是无地面控制点条件下测制 1：2.5 万比例尺地形图，这

也未满足 1：5 万比例尺“MapSat 工程标准”，特别是水平位置有很大的系统误差^[7, 8]。对该系统误差，既没有提出解决措施，也没有深入分析其误差来源。国外学者在 SPOT-5 卫星工程中研究发现^[9]，姿态测定系统误差与卫星纬度、摄影时相机受热有关，导致姿态测定的角元素有低频误差，影响无地面控制定位精度。对于有地面控制点卫星摄影测量而言，可以利用地面控制点对姿态测定系统的低频误差影响进行控制，但在无地面控制点卫星摄影测量中，低频误差处理是必须解决的技术问题。

天绘一号（TH-1）卫星是我国首颗传输型立体测绘卫星，01 星于 2010 年 8 月 24 日成功发射，目前仍在轨正常运行，其工程目标是无地面控制点条件下测制 1：5 万比例尺测绘产品^[10]。在天绘一号 01 星发射后，由于星敏感器坐标系输出模式错误，使无控定位精度随时间越变越差，促使笔者对当时所谓的“慢变误差”进行分析，提出“慢变误差”的补偿理论^[11]。该理论的提出，不仅解决了当时影像的高精度定位问题，也为后期全三线交会光束法平差中低频误差补偿提供了理论依据和数学基础。有关全三线交会光束法平差软件的相关功能已在公开刊物中发表^[12, 13, 14]，

本文仅对姿态测定系统中的低频误差问题作进一步讨论分析，并利用天绘一号卫星影像数据进行试验分析。

1 姿态测定系统低频误差源分析及表现

卫星影像后期处理所使用的外方位角元素，是从卫星本体根据安装参数经过一系列矩阵转换至相机的姿态数据。在这一复杂转换过程中，任何一个安装参数的变化及转换误差的出现，都将导致姿态测定系统含有系统误差，该系统误差可以通过相机参数在轨标定予以处理。与这类系统误差不同，姿态测定系统的低频误差是随时间及纬度的变化而变化，造成在水平位置方向有明显的系统误差，相机参数在轨标定无法全部消除该误差。

SPOT-5 卫星工程中的姿态测定系统存在与时间、纬度有关低频误差，文献 [15] 对 SPOT-5 影像几何质量进行分析时提出纬度模型 (latitudinal model)，基于全球分布的 21 个地面场控制数据，解算与时间、纬度相关的多项式系数，从而实现姿态数据的改正，提高影像的定位精度。SPOT-5 卫星是以单星敏感器为主进行姿态测定，存在低频误差现象，对于两个或三个星敏感器为主的姿态测定系统，其低频误差存在也是毋庸置疑的。

天绘一号卫星工程采用 3 个星敏感器进行姿态测定，实际处理中主要采用双星敏感器联合定姿。相关学者利用夹角法对长时间星敏感器数据分析发现^[16]，星敏感器主光轴夹角存在与太阳位置有关的变化，变化量级在 60″，且具有明显的周期性，周期约 1.5 h(一个轨道周期)，该变化主要表现在卫星俯仰和偏航方向。这将使最终的姿态测定结果中含有不可忽视的低频误差，这一现象也是双星敏感器联合定姿进行无控定位所面临的难题。

2 姿态测定系统低频误差改正

无地面控制定位的技术本身就是一个系统工程，

单一功能的光束法平差，不能解决全球覆盖模式光学摄影测量卫星无控定位问题。文献 [11] 中对“慢变误差”引起上下视差的机理进行分析，并提出改正模型。当时主要针对星敏感器坐标系输出模式错误而进行研究。在后期的研究中发现，姿态测定系统还存在与卫星轨道纬度有关的低频误差，导致用于摄影测量处理的角元素含有低频误差，影响无地面控制定位精度及其全球精度的一致性。笔者在文献 [11] 的理论基础上，提出在全三线交会光束法平差中自动实现对其低频误差的改正。

在全三线交会光束法平差中，同名点的上下视差既源于姿态测定系统低频误差所产生的系统值，又来源于外方位元素随机误差所产生的偶然值^[17, 18]。在实际低频误差补偿处理中，根据卫星俯仰及偏航方向角度变化对上下视差的影响机理，建立改正的数学模型。利用参与平差计算所有点的上下视差为依据，在光束法平差处理中实现对外方位角元素低频误差的补偿改正。

3 低频误差补偿试验与分析

测绘卫星进行相机参数在轨标定，其所需的地面试验场通常选择在国内^[19, 20]。进行相机参数在轨标定时，标定区轨道纬度可以看作是姿态测定系统低频误差“零”起点处，使含有较大低频误差的测绘航线在国内很难出现，国外摄影航线中部分姿态测定系统中可能存在 60″的低频误差。为了全面验证全三线交会光束法平差中低频误差补偿原理的正确性和可行性，利用天绘一号卫星摄影的国内外影像进行试验。

3.1 低频误差自动检测

EFP 全三线交会光束法平差软件能够自动检测出沿飞行方向外方位角元素的低频误差，对长度约 300 km 的航线进行低频误差（含残留随机误差）自动检测，其检测结果见表 1，其误差分布如图 1—图 4 所示，其中图 3、图 4 为归零后的显示。

表 1 俯仰和偏航方向低频误差统计

参数	统计结果																		
$\Delta\varphi$	2	-4	-4	1	3	5	2	0	-1	-1	2	2	4	7	11	11	8	5	4
$\Delta\theta$	39	38	38	39	41	38	38	40	41	41	40	39	42	44	43	40	40	41	40

注：表中每隔 15 km 统计。

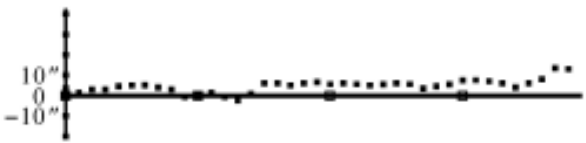


图 1 俯仰方向低频误差分布

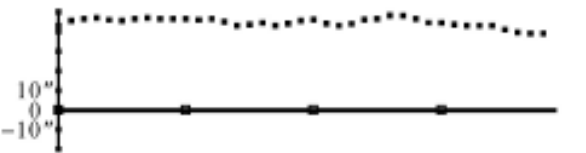


图 2 偏航方向低频误差分布

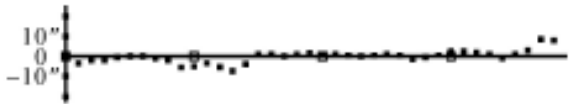


图 3 俯仰方向低频误差归零后误差分布

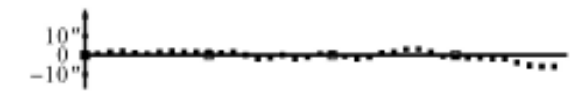


图 4 偏航方向低频误差归零后误差分布

从表 1 及图 1—图 4 中看出，外方位角元素低频误差走势平缓，因此在全三线交会光束法平差中，取其均值参与平差计算即可。

3.2 低频误差补偿试验

相机参数标定经过正确的参数配置后，标定区域就成为外方位角元素低频误差的“零”起点，含有最大量级外方位角元素低频误差值的测绘航线在国内

不易出现，但从全球范围考虑，其存在不可避免。笔者对 1000 多条实际测绘航线统计，有低频误差约占 15%，低频误差大于 8″ 约占 8%。因此，对于全球无控定位而言，姿态测定系统的低频误差不容小视。利用海外地区的航线影像进行低频误差补偿试验，需要一定数量且可靠的地面检查点，航线影像又要满足全三线交会光束法平差的基本条件。因此，进行低频误差补偿试验的数据资料有限^[21]。笔者在文献 [21] 中对低频误差补偿值及其对定位精度的影像进行了统计，使全三线交会光束法平差低频误差补偿功能在实际卫星影像中也得到验证，同时也证实了外方位角元素低频误差对无控定位的严重影响。

4 结论

天绘一号卫星工程目标的实现，得益于先前进行无地面控制点卫星摄影测量的诸多卫星工程。无论这些卫星工程是否立项或实现无控定位目标，其工程提出实现无控定位的思路及探索性的研究，对后续卫星的研制提供了宝贵的经验，使笔者在天绘一号卫星工程中，首先解决无地面控制定位垂直高程误差之后，又对姿态测定系统的低频误差进行补偿处理，实现了不依靠地面控制点，能自动检测并消除其对摄影测量结果的影响，很好地解决了水平位置系统误差问题。天绘一号卫星利用光束法平差途径，使全球连续覆盖模式光学摄影测量卫星实现了“MapSat 工程标准”以及以三线阵 CCD 相机为基础的无地面控制点卫星摄影测量目标，使得“全球连续覆盖模式”光学摄影测量卫星无控定位向前迈出了重要一步。

参考文献：

[1] ITEK Corporation. Conceptual Design of an Automated Mapping Satellite System(Mapsat) [R]. Lexington:National Technology Information Server, 1981.

[2] COLVOCORESSES A P.An Automated Mapping Satellite System (Mapsat) [J]. PRES, 1982, 48(10):1585-1591.

[3] 王任享. 天绘一号卫星无地面控制点摄影测量关键历程 [J]. 测绘科学, 2013, 42(1):1-5.

[4] EBNER H, KORNUS W, KORNUS T,et al. Orientation of MOMS-02/D2 and MOMS-2P/Priroda Imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54:332-341.

[5] BRETON E. Pre-flight and In-flight Geometric Calibration of SPOT5 HRG and HRS Images [C]// Proceedings of ISPRS Comm. Denver:ISPRS, 2002.

[6] SRINIVASAN T P, ISLAM B. In-flight Geometric Calibration--an Experience With Cartosat-1 and Cartosat-1 [C]//Proceedings of ISPRS XXI Congress. Beijing:ISPRS, 2008.

[7] GRUEN A, KOCAMAN S, WOLFF K. Calibration and Validation of Early ALOS/PRISM Images [J]. The Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 46 (1): 24-38.

[8] SRINIVASAN T P . Long Strip Modelling For CARTOSAT-1 with Minimum Control Point [C]// Proceedings of ISPRS Volume XXXVII Part BI. Beijing:ISPRS, 2008.

[9] BOUILLON A. SPOT5 HRG and HRS First In-flight Geometric Quality Results [C]//Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing. Aghia Pelagia:[s.n.], 2002: 212-223.

[10] 王任享, 胡莘, 王建荣. 天绘一号无地面控制点摄影测量 [J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 1-5.

[11] 王任享, 王建荣, 胡莘. 在轨卫星无地面控制点摄影测量探讨 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, 36(11):1261-1264.

[12] 王建荣, 王任享. 天绘一号卫星无地面控制点 EFP 多功能光束法平差 [J]. 遥感学报, 2013, 16(Sup1):112-115.

[13] 王任享, 王建荣, 胡莘. EFP 全三线交会光束法平差 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2014, 39(7):757-761.

[14] 王建荣, 王任享, 胡莘. 卫星摄影测量中偏流角修正余差改正技术 [J]. 测绘学报, 2014, 43(9):954-959.

[15] BOUILLON A. SPOT5 Geometric Image Quality [C]// Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE, 2003: 303-305.

[16] 王兴涛, 李迎春, 李晓燕. “天绘一号”卫星星敏感器精度分析 [J]. 遥感学报, 2012, 16(Sup1):90-93.

[17] 王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京:测绘出版社, 1990.

[18] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理 [M]. 北京:测绘出版社, 2006.

[19] 李德仁, 王密. “资源三号”卫星在轨几何定标及精度评估 [J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3):1-5.

[20] 蒋永华, 张过. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校 [J]. 测绘学报, 2013, 42(4):523-529.

[21] 王任享, 王建荣. 无地面控制点卫星摄影测量探讨 [J]. 测绘科学, 2015, 40(2):3-12.

—— 摘自《测绘学报》——

智慧城市建设中的地理平台

任志峰 Esri 中国信息技术有限公司

2008 年 IBM 公司正式提出了“智慧地球”概念至今，全球约有 200 多个智慧城市的项目正在实施，并在一些试点工程中取得较好效果。据预测，到 2020 年全世界智慧城市服务业规模将到达每年 4000 亿美元。2011 年，智慧城市被写入住房和城乡建设部、国家测绘地理信息局、工业和信息化部的相关政策法规。2014 年 8 月，发改委、住建部等八部委联合印发《关于促进智慧城市健康发展的指导意见》提出要“加强地理信息等技术的集成应用，确保智慧城市健康有序地推进”。

同时，在智慧城市的建设中，地理信息技术的定位也在发生着变化，《关于促进智慧城市健康发展的指导意见》明确提出要“以城市统一的地理空间框架和人口、法人等信息资源为基础，叠加各部门、各行业相关业务信息，加快促进跨部门协同应用”。地理空间框架，不再是传统意义上的专业化信息系统，这标志着地理信息技术在智慧城市中由系统向平台的方向转变：一方面，各专业应用都需要地理信息，地图成为支持各行业智慧化运营的空间基础设施；另一方面，智慧城市面向大众、服务与更广泛的非信息化专业人员，他们更习惯于互联网地图的各种应用，而非专业化的地理信息系统。回顾历史，地理信息技术走过了一开始的以文件为中心的应用时代，也走过了以数据库为中心的系统建设时代，最近也走过了以服务器为中心的应用服务时代，接下来迎接智慧城市的将是地理平台时代。

Esri 公司成立于 1969 年，总部设在美国加州 Redlands 市，是世界最大的地理信息系统技术及服务提供商。Esri 在世界主要国家和地区均设有分公司或代理机构，商业合作伙伴遍布全球。在全球 2000 多个领域的开发商、咨询服务商、增值代理以及数据提

供商以及在 80 个国家的国际代理一起，构成了 Esri 公司强大的技术支持与服务网络。多年来，Esri 公司始终将 GIS 视为一门科学，并坚持运用独特的科学思维和方法，开发出丰富而完整的产品线。公司所提供的 ArcGIS 解决方案已经成为提高政府部门和企业服务水平的重要工具。全球超过百万用户单位使用 Esri 公司的 GIS 技术，包括 200 多个国家和地区的各级政府部门、超过 2/3 的世界 500 强企业以及 7,000 多所高校。在智慧城市领域，Esri 公司采用 ArcGIS 软件应用技术服务于智慧城市的各个行业，如智慧水利、智慧交通、智慧环保、智慧应急等，同时 Esri 公司还提供智慧城市完整的地理空间框架解决方案，其中住建部首批试点之一中新天津生态城采用 ArcGIS 软件技术，搭建了天津生态城智慧城市公共服务支撑平台。目前天津生态城已经在该地理平台的基础上搭建了多种应用系统。

1 智慧城市中的地理平台的价值

智慧城市建设的方法没有绝对的定义和模式，因地制宜是各地建设智慧城市的重要标准。因此，智慧城市信息化建设的模式也不再采用过去单一的行业信息系统的建设思路，而是在模块化、可复用的信息化平台基础上再建其特色的应用来实现，以取得更好的灵活性和更多的经济效益。从地理信息行业的角度，智慧城市是数字城市建设的“升级”，是建立在数字城市的基础框架上，通过无所不在的传感网将其与现实的城市关联，将海量数据存储、计算、分析和决策交付云计算平台处理，并按照分析决策结果对各种设施进行自动化的控制。城市中的海量数据在数量、种类、异构性和复杂性不同于以往的传统模式，而传统上以“属性关系”为基本逻辑组织梳理信息的方式也

会让智慧城市信息模型变得复杂和难以维护，也会天然地形成行业壁垒和信息孤岛。而利用地图为基础组织信息只要信息本身具有空间位置属性即可集成，能够避免以上难题，同时地图兼容已有数据和实时数据，并保留对未来未知数据的扩展，另外，基于统一的地理平台应用系统建设能够有效降低系统引入空间信息支撑的成本，帮助人员低成本地在非传统 GIS 领域使用理信息服务。而不同行业、不同部门与部门之间的异构数据信息联动，实现在共享和协同，推动信息化和智慧化之间的相互促进，以达到建设智慧城市的真正目的。

地理平台是智慧城市的重要组成部分。一方面，地理平台要承载并发布城市信息化建设，尤其是数字城市建设所积累的大量空间信息资源，供各行业信息化系统调用；另一方面，地理平台还需要能整合各种通用 IT 资源，尤其是云计算、物联网等智慧城市特征 IT 资源，通过“地图”真正发挥其智慧之处。因此，智慧城市地理平台作用主要表现为三个部分：资源共享，泛在信息支撑，以及协同管理。

（1）地理平台空间信息资源共享作用

空间信息资源共享是数字城市走向智慧城市的基础支撑。多年的数字城市建设，为城市信息化提供了大量通用或专业的空间数据。这些空间数据，通过可控的、精细的共享，成为其它信息沟通的桥梁。地理信息在机构和用户之间的共享和流通，不仅有利于促进交流合作，而且减少了数据的重复建设，有助于保证信息的一致性。地理平台延续地理信息系统空间信息共享价值，能够帮助用户达成以下目标：1）建设完善的公共地理信息数据体系（包括基础地理地图数据及行业专业空间资源数据）；2）建立“一站式”在线地理信息服务平台，提供一站式地理信息综合服务，建成分布式的地理信息共享与应用开发环境，提供信息浏览、标图制图、导航定位、信息加载、系统搭建等地理信息服务功能，为各应用系统提供权威高效的地理信息服务；3）形成公共服务平台业务化运行维护与管理机制：建立健全地理资源共享平台运行维护有关规定和管理办法，建成共享平台服务管理、

运行调度等系统。

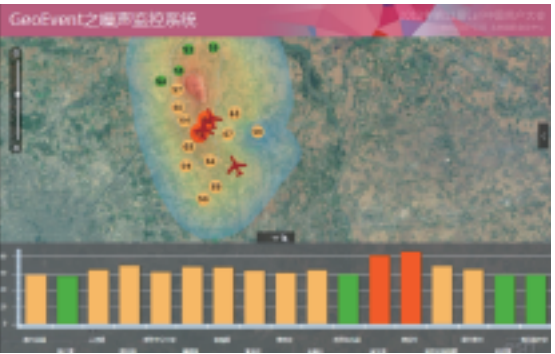
随着云计算在智慧城市建设的落地，其弹性计算的特性可以让地理平台的资源共享价值更好的发挥。基于 IaaS 层建设的地理平台不仅能够“一站式”运维、调配空间信息资源，还能够对底层云资源池的管理，将资源池中的底层资源自动快速地整合为云 GIS 站点提供给用户，并提供云 GIS 站点管理、资源弹性调整、资源度量等功能，从而提供 PaaS 及 SaaS 模式的地理信息云服务。可以说，地理平台资源共享价值的发挥，是将云平台转化为云 GIS 平台的关键。

（2）地理平台泛在信息支撑作用

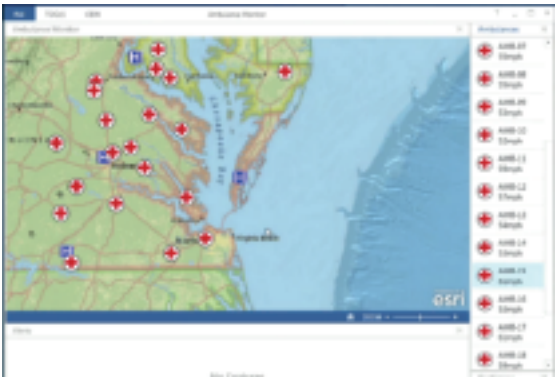
地理平台的资源共享价值搭建了数字城市的空间基础设施。智慧城市要通过无所不在的物联网将现实城市与数字城市连在一起，并发挥着泛在信息的价值。智慧城市定位于“更透彻的感知、更全面的互联互通和更深入的智能化”，其基础是传感网、物联网和因特网在各行各业的高效融合与综合应用。这种能够实现人与人、人与物乃至物与物之间随时随地沟通的全新网络环境的泛在网络，将成为智慧城市的重要特征。传统行业中地理信息系统对实时信息的支撑往往是垂直的，同一系统中不同种类的实时监测数据需要单独实现其接入、分析和可视化。这种缺少集成和融合的实时数据会形成多个微观实时数据孤岛。采用这种方式进行整个城市的信息化建设将会使物联网对智慧城市失去意义——物与物之间无法在信息空间形成任何关联和交互。地理平台作为泛在信息的统一支撑平台能够有效避免了上述问题。

首先，地理平台提供给城市各种多源异构数据流的接入和融合，如对车辆、人员、设备等动态目标跟踪，对 PM2.5 污染、交通拥堵、降水监控以及各种社交媒体的实时监控等，其中地理平台接入实时信息的连接器应当是可定制的，以应对更多新类型的实时设备。其次，地理平台还应当提供处理模型构建和实时分析泛在信息的能力。尤其是当地理平台引入地理围栏等空间分析条件时，即可充分发挥地理位置这一泛在信息通用属性，在城市级传感器设备群中提取有价值的物联网信息或进行地理控制。此外，在输出和显示方

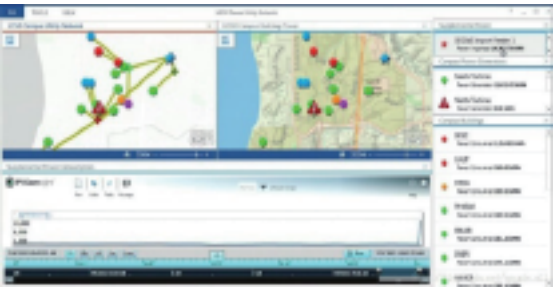
面，地理平台对信息的处理结果更加丰富，除 GIS 可视化以外，还提供了诸如 SMS 短信、Email、社交软件等多种消息形式，以适应当前移动智能设备的应用趋势。从应用角度来看，地理平台的信息支撑应用场景不仅包括物联网实时态势感知场景，还包括移动目标监控、企业级数据整合以及众包大数据分析等（如下图）。



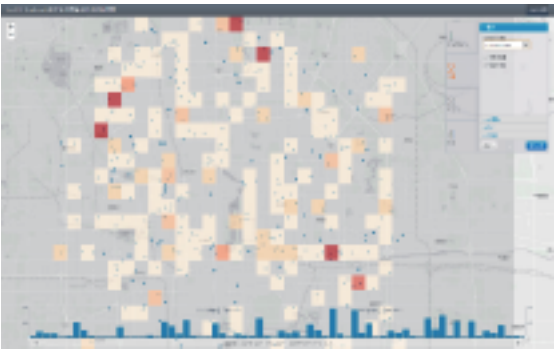
物联网实时态势感知场景



移动目标监控场景



企业级数据整合场景



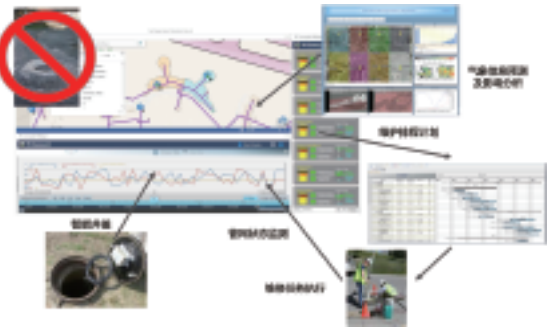
众包大数据分析场景

（3）地理平台协同管理作用

空间信息资源共享是数字城市走向智慧城市的基础支撑。不同业务部门之间协同信息资源管理、协同创新是全面提升智慧城市信息化建设能力的重要途径。不同部门不同专业背景的人员协同工作，共同决策，这也是地理平台在智慧城市中的核心价值。随着城市信息化互联互通程度的提升，地理信息作为承载各类专题信息统一和唯一平台的特点愈加突出。智慧城市之所以智慧，并非信息化本身能生产智慧，而是利用信息化连接整个城市管理者、建设者和市民，把人类的知识充分应用到信息化条件下的城市规划、设计、建设、管理、运营和发展当中，是让数字城市走向智慧城市的思考。因此智慧城市的信息化平台一定是人人都能使用的平台。足够易用的地理平台才能方便地将各种异构信息空间化，将各企事业单位现有的非空间信息，如各种办公文档、企业资源规划、商业智能、客户关系管理等，通过带有的地址或空间坐标在不改变已有信息系统的前提下导入地图，从而引入地理平台，使人人都能使用地理信息。

智慧城市是多个垂直行业智能系统的联动而形成的智慧大系统。在地理平台上工作的不再仅仅是 GIS 专业人员或开发者。基于地理平台，用户不仅能够获得地图，而且还能够与不同专业不同单位的人士协同工作。例如，在智慧水务的应用中：城市暴雨导致下水道堵塞而造成城市内涝现象，气象部门在地理平台上分享未来降雨量预测专题图；交通部门提供实时路况信息专题图；排水集团工作人员在地理平台获得各

监测点的最新管网状态监测数据图层，叠加上述降雨量预测和实时路况专题图层，通过空间分析得到合理的维修维护计划和内涝风险预警专题信息；内涝风险预警专题信息被定向分享给了应急部门以便其公开发布为城市内涝预警系统供市民访问（如下图）。



多部门协同的智慧水务应用场景

2 多部门协同的智慧水务应用场景

基于 ArcGIS 的智慧城市地理平台建设案例——中新天津生态城

中新天津生态城作为国家住建部首批“智慧城市”项目试点，是中国、新加坡两国政府战略合作性合作项目。中国、新加坡两国政府通过建设天津生态城来实践应对全球气候变化、加强环境保护、节约资源和能源、建设资源节约型、环境友好型社会的全新理念。天津生态城智慧城市地理空间框架的建设整合来现有政务空间数据资源、平台资源、硬件资源，搭建了智慧城市门户网站，并依托该门户创建了一系列智慧应用模板，营造了多方共建、多方受益的智慧城市建设环境，是生态城智慧城市建设的典型案例。

2012 年，天津生态城智慧城市地理空间框架完成一期建设，内容基本地理资源共享平台的内容，完成了中新天津生态城地理资源共享服务平台，并制作完成了一系列配套完整的精细化管理制图地图底图（如下图）。平台接入能源、交通、环保等各类专题数据服务，形成了统一的数据更新机制。同时，资源共享平台已被其它部门和单位调用，成为各应用系统的地图支撑平台。

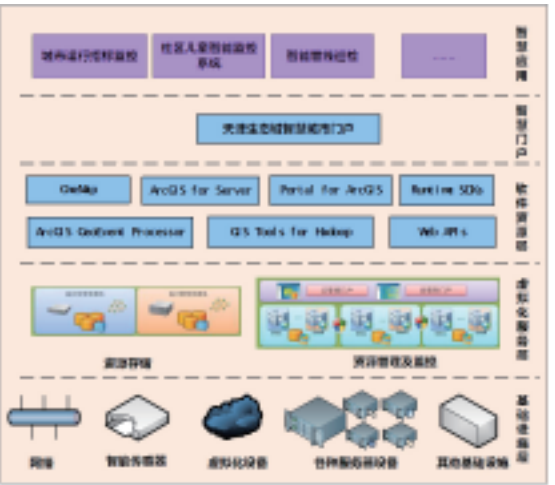


中新天津生态城地理信息资源共享服务平台



天津生态城电子地图

2013 年至今，天津生态城智慧城市公共服务支撑平台项目陆续完成了协同管理平台和泛在信息支撑平台建设，形成了完整的基于 ArcGIS 的智慧城市地理空间框架建设，其构架图如下。



基于 ArcGIS 的智慧城市地理空间框架建设

在此地理空间框架的基础上，生态城形成了一系列的地图应用，包括：天津生态城公用事业运行维护系统、基于 Android 和微信公众平台的智能公交查询系统、儿童安全监控系统、城市管线数据采编系统等。



天津生态城公用事业运行维护系统



基于 Android 和微信公众平台的智能公交查询系统



儿童安全监控系统



城市管线数据采编系统

上述应用种种，均基于智慧城市地理空间框架建设，不同单位部门的专题成果能够被快速共享和使用，如生态城能源公司通过更新管线地图数据服务的形式向其母公司生态城投资公司定期上报更新的管线数据，若投资公司发现问题能够及时将以专题地图的形式在地图协同管理平台上共享给能源公司，提醒其改正；又比如设备设施实时状态、公交实时信息和安全监控儿童实时位置，均被接入基于地图的泛在信息支撑平台，即使设备发生变更，也只需更改平台内部配置，应用系统更加完全和透明，方便和高效。

活动首页

活动介绍

答题入口

组织奖预申报

参赛统计

评奖规则

获奖名单

媒体报道

中国知网

www.cnki.net

中国知网基础设施工程

生态文明，我知我行

创新驱动，我们先行

——第二届资源环境与生命科技创新知识网络大赛

知识大赛

主题征文

知识汇编

目前已有25687人参赛

扫一扫手机答题

· 活动内容 ·

（一）网络答题竞赛

在中国知网知识服务平台上学习资源环境与生命科技相关知识，并通过网络在线答题，参加网络知识竞赛活动。

（二）主题征文竞赛

为本行业、本单位的科技创新和战略管理提供精准的信息服务，并总结工作经验和过程，投稿参加主题征文活动。

（三）创新知识遴选汇编竞赛

利用内容选编平台，进行创新知识点选题设计，并遴选相关知识内容进行汇编，形成服务和支撑资源环境与生命科技创新和行业战略管理的数字化内容作品。

· 奖项设置 ·

★优秀组织奖 ★网络竞赛优胜奖 ★优秀主题征文奖 ★创新知识遴选汇编优秀成果奖

Kindle、移动硬盘、《保健时报》…… 丰富奖品，等你来拿！

· 活动网址 ·

www.stwm.cnki.net 登录

主办单位：中国水利学会、中国土地学会、中国环境科学学会、中国气象学会、中国海洋学会、中国测绘地理信息学会、中华预防医学会、中国药学会……

技术支持：同方知网（北京）技术有限公司

同方知网（北京）技术有限公司
电话：010-62969002-8195
地址：北京市海淀区西小口路66号东升科技园北领地A2楼

71

杰克：为时不晚 GIS 尚能提供可持续发展方案

编者按：Esri 公司创始人杰克·丹杰蒙德是一位不折不扣的环保人士，他在各大场合都积极倡导以 GIS 系统平台来为全世界提供可持续发展的解决方案。这一次，他毫无例外地再次谈起了环保与 GIS。

前不久，在位于加利福尼亚举行的世界事务理事会 50 周年晚宴上，Esri 公司创始人杰克·丹杰蒙德 (Jack Dangermond) 表示，使用地理信息系统或者 GIS 技术，可以帮助人类有意识地创造未来，可以帮助解决一些全球目前最棘手的问题。

“世界正面临着严峻的现状，如气候变化，生物多样性减少和逐渐萎缩的自然环境所导致的社会矛盾以及和谐社会的缺失。而地理是一门具有整体框架的学科，它可以创造我们的未来并为我们的世界提供可持续发展的解决方案。目前 Esri 为全球范围内约 350000 个政府机构、非政府组织、企业以及公用事业部门共同来开展数字化制图系统平台的科学技术以及与之相关的支持服务。客户通过使用该系统平台来监控空气质量和森林碳储量，管理森林和海洋保护等计划，引导农业发展和业务扩展，监测疾病暴发和开发自然能源。” 杰克·丹杰蒙德说道。

“当地球人口变得越来越稠密，人们就必须肩负起建造未来的责任，而不是继续“无意识”地塑造未来。” 杰克·丹杰蒙德利用会议屏幕上的地图，表示人们可以通过利用地理平台推进城市发展计划的制定和落实，协助犯罪监测、预测地震和火灾，并支持和维护人道主义救援任务。

GIS 系统平台可以预测结果并为人类的行为提供一个基础，以帮助和满足全球可持续发展目标中的性别平等、饥饿、贫困和气候变化等问题，如今，通过地理信息系统平台在 PC 端及移动端中软件的应用，对每个人来说更加普及和便捷。

目前，越来越多的研究报告选择网上发布，科学家，机构甚至民众和政府之间也会有越来越多的交流、分享和沟通。但问题是，当民众真正认识到问题所在，并愿意改变的时候，是否已为时已晚？ 杰克·丹杰蒙德表示“我们还有机会，我们可以影响未来，这也就是我们在这里的原因！”

预测：地理空间分析市场规模 2020 年将达到 722 亿美元 年增长率 21.4%

据研究机构 MarketsandMarkets 公司一份最新的研究报告显示，到 2020 年，地理空间分析市场市值 722.1 亿美元，2015 到 2020 年期间，年复合增长率将达到 21.4%。

GIS 技术在地理空间分析市场中扮演关键角色

当前，诸如智能手机端、GPS 设备、社交媒体以及其它渠道采集的地理空间数据资源激增，数据的精准度日益提升。在这样趋势下，GIS 技术很大程度上推动了地理空间市场的发展，而硬件技术的提升则成为影响 GIS 技术市场需求的一大关键要素。

商业领域将占据地理空间分析市场的最大份额

在众多领域中，商业领域将占据了地理空间市场中最大的份额，这也是得益于地理空间技术再垂直领域得到了越来越多的应用，诸如零售业、制造业、房地产业、保健业等，GIS 技术被用来进行商业选址。

在地理空间服务的应用部署方面，欧洲将走到前列。2015 年，欧洲在全球地理空间分析市场中占据了最大的市场份额，主要是因为地理空间领域的几大玩家都在欧洲市场进行了大规模投入。

市场重要参与者

地理空间分析市场竞争激烈，排名靠前的参与者包括天宝、海克斯康、通用、RMSI、奔特力、Esri、MDA 集团、辉固、Harris Corporation、WS Atkins Plc、TomTom、DigitalGlobe、Critigen、AAM 以及诺基亚等。

丰田与密歇根大学合作或打造车联网实验基地之全球之最

有外媒报道，最近丰田公司与密歇根大学交通运输研究所 (UMTRI) 合作，计划将该校的安娜堡 (Ann Arbor) 校区打造成全球最大的车联网实验基地。 丰田与 UMTRI 联合成立了一家名为 Ann Arbor Connected Vehicle Test Environment (AACVTE) 的合资企业，致力于解决目前所车联网实验中所面临的问题。

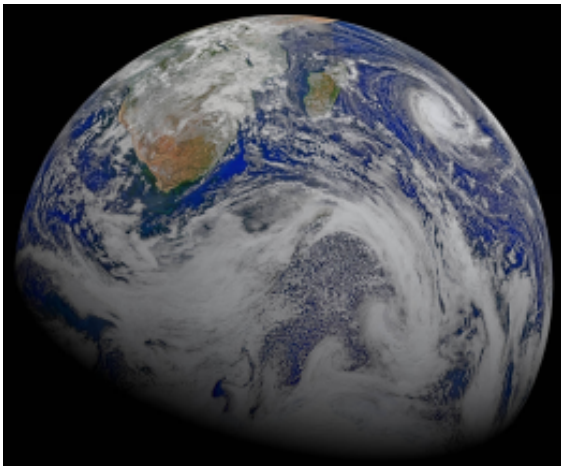
在进行的相关实验中， 丰田将首先邀请旗下员工及其家属参与。他们的车辆将配备一个“意识装置”，收集包括车辆对车辆间、车辆对基础设施通信

的所有工作情况。 所有联网车辆之间将会相互传输速度或位置信息，同时将数据发送到一个研究接收器中。 AACVTE 的目标是在未来实现 5000 辆汽车间的数据传输。

4 月初，丰田便与密歇根大学开始合作研究开发自动驾驶技术，丰田研究院院长吉尔·普拉特 (Gill Pratt) 之前便表示，部门将将集中精力与高校建立密切关系，与学术界共同促进汽车、交通行业的发展。

—— 文章摘自 3sNews 网站 ——

地球到底是什么样子，人类是怎样认识它的？



在科学技术高速发展的今天，人类对自己居住的地球面貌已愈来愈清楚明白。但是，人们对地球到底是什么样子的认识，是经历了相当漫长的过程的。

古代，由于科学技术不发达，对地球的样子曾流传过许多传说和神话，人类只能通过简单的观察和想象来认识地球。例如，中国的古人观察到“天似穹隆”，就提出了“天圆地方”的说法。西方的古人按照自己所居住的陆地为大海所包围，就认为“地如盘状，浮于无垠海洋之上”。大约从公元前8世纪开始，希腊学者们试图通过自然哲学来认识地球。到公元前6世纪后半叶，毕达哥拉斯提出了地为圆球的说法。又过了两个世纪之后，亚里士多德根据月食等自然现象也认识到大地是球形，并接受其老师柏拉图的观点，发表了“地球”的概念，但都没有得到可靠的证明。

直到公元前3世纪，亚历山大学者埃拉托色尼首创子午圈弧度测量法，实际测量纬度差来估测地圆半径，最早证实了“地圆说”。稍后，我国东汉时期的天文学家张衡在《浑仪图注》中对“浑天说”作了完整的阐述，也认识到大地是一个球体。但在其天文著作《灵宪》中又说天圆地平。这些都说明当时人们对地球形状的认识还是很不明晰的。

从公元6世纪开始，西方在宗教桎梏之下，人们不但不继续沿着认识物质世界的道路迈步前进，反而倒退了。相反，中国的科学技术这时却在迅速发展。公元8世纪的20年代，唐朝高僧一行派太史监南宫说在河南平原进行了弧度测量，其距离和纬差都是实地测量的，这在世界尚属首次。并由此得出地球子午线1度弧长为132.3公里，比现代精确值大21公里。之后，阿拉伯也于9世纪进行了富有成果的弧度测量。由此确认大地是球形的。但由于那时人类的活动范围很有限，其真实形状都没有得到实践检验。直到400多年前的1522年，航海家麦哲伦率领船队从西班牙出发，一直向西航行，经过大西洋、太平洋和印度洋，最后又回到了西班牙，才得以事实证明，地球确实是一个球体。

但是，人类对地球的认识并未就此结束。随着科学技术的发展和大地测量学科的形成与丰富，人们观测和认识地球形状的方法和手段越来越多。三角测量、重力测量、天文测量等等都是重要手段。近代科学家牛顿曾仔细研究了地球的自转，得出地球是赤道凸起，两极扁平的椭球体，形状像个桔子。到20世纪50年代末期，人造地球卫星发射成功，通过卫星观测发现，南北两个半球是不对称的。南极离地心的距离比北极短40米。因此，又有人把地球描绘成梨形。

以上，对地球的认识，仍是根据局部资料和间接手段得来的。如果人们能远远地站在地球之外看地球那该多好！1969年7月20日，美国登月宇宙飞船“阿波罗”11号的宇航员登上月球的时候，就看到了带蓝色的浑圆的地球，有如在地球上观月亮一样。科学家们根据以往资料和宇航员拍下的像片，认为最好把地球看作是一个“不规则的球体”。

至此，人类对地球形状的认识是否完成了呢？还没有。这是因为地球实在太大了！而且无时无刻都在不停地运转着、变化着。

唐代一行高僧对测绘科学的贡献



中国古代的天文测量学自汉代以后已有很大发展，到唐代中期达到了一个新的阶段，其中一行高僧作出了杰出贡献。

一行高僧原名张遂，是唐代著名的天文学家和测量学家。武则天的后人武三思为争夺皇权极力拉拢张遂，张不甘作其帮凶，参与朝政，剃发出家当了僧人。唐玄宗在经历了武则天之后的政局动荡，为励精图治，开创了开元之治。当时沿用了五六十年的天文历法《麟德历》因未顾及岁差以致预报日蚀几次不准，唐玄宗于是召回出家多年的一行，令他负责改历。

一行在接受任务以后，便要求太史监“测候星度”。但是太史监所存的仪器已不适应双历的需要。当时有个率府兵曹参军梁令瓚设计了一个黄道游仪，并已经制成了该仪器的木头模型。在一行的支持和领导下，于开元十一年（公元723年），用铜铸造成此仪器。

这台仪器既可以用来测定每天太阳在天空中的位置，也可以用来测定月亮和星宿的位置。同年，一行和梁令瓚等人在继承张衡“水运浑象”理论的基础上又设计制造了“水运浑天仪”。水运浑天仪上刻有二十八宿，注水激轮，每天一周，恰恰与天体周日视运动一致。水运浑天仪一半在水柜里，柜的上框，有如地平，“立二米人于地平之上，前置鼓以候辰刻，每一刻自然击鼓，每辰则自然撞钟”。整个水运浑天仪既能演示日、月、星辰的视运动，又能自动报时。一行等人的成就又超过了张衡。

一行根据修改旧历的需要，于公元724年，又组织领导了我国古代第一次天文大地测量，也是一次史无前例、世界罕见的全国天文大地测量工作。在一行的统一指挥下，由太史监南宫说率领，向全国各地进发。一行坐镇国都长安，指挥这一伟大工程。

这次测量工作的范围是非常广阔的，以河南平原为中心，北达现今蒙古的乌兰巴托，南达今湖南省的常德，他们在这些地方，分别测量了冬至、夏至的日影长及北极高度，同时还把测量成果绘制成图。他们实测中得出的子午线的长度，是世界上第一次测量子午线长度，在世界科学史上有重大意义。这次测量除了为修改历法提供可靠数据之外，更重要的就是为了求出同一时刻日影差一寸和北极高差一度在地球上的相差距离，以实测的资料否定了古人传统的“日影一寸，地差千里”的错误结论，提供了地球子午线一度弧长相当精确的数值，为人类正确认识地球做出了巨大贡献，开创了人们通过实测认识地球形状和大小的道路，这是世界测绘史上一项辉煌的成果。

—— 文章摘自国家测绘地理信息局网站 ——

★ “国际摄影测量与遥感发展动态”专题学术报告会在京举行

1月8日,“国际摄影测量与遥感发展动态”专题学术报告会在中国测绘创新基地举行。报告会由国家测绘地理信息局科技与国际合作司、国家基础地理信息中心、中国测绘地理信息学会、基础地理信息建设及应用国家测绘地理信息局工程技术研究中心联合举办,是国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)执行局2016年度工作会议的一项重要活动。

ISPRS主席陈军主持报告会,介绍了学会的研究方向和今年7月即将在布拉格召开的大会情况。会上,ISPRS秘书长Christian Heipke、第一副主席Orhan Altan、第二副主席Marguerite Madden、司库Jon Mills和来自非洲、拉丁美洲区域代表针对“在摄影测量与遥感研究和发展方面的挑战”“灾害管理的最新科技进展”“在人与环境互动的历史景观中的地理空间分析”“利用现代测绘技术进行滑坡观测”“地理信息在国家(东非)发展中的应用案例研究”“未来地球—从遥感与摄影的方面支持可持续发展目标”六个专题,分别做了精彩的报告。

来自国家测绘地理信息局在京直属单位、相关院所、在京高校及公司的专家学者、技术人员和研究生约160余人参加了报告会。参会人员表示受益匪浅,本次报告会为国内业界同行开阔了视野、拓展了思路。

★ 测绘工程专业教育认证自评工作研讨会召开

2月27日,测绘工程专业教育认证自评工作研讨会在江西省南昌市召开。会议由试点工作副组长、中国工程院院士李建成主持,试点工作副组长、中国测绘地理信息学会副理事长兼秘书长彭震中,高等教育教学评估中心专业认证处处长张勇,东华理工大学副校长孙占学、郭福生、陈晓勇等领导出席会议。

彭震中秘书长在讲话中指出,召开本次研讨会的目的是为了认真贯彻好工程教育专业认证协会2015认证通用标准,提高测绘地理信息类认证工作的质量。他强调,我们举办研讨会的这个时间,也正是今年申请专业认证的学校开展自评工作、撰写自评报告的关键时段。自评工作是做好工程教育专业认证的基础,在自评基础上撰写的自评报告是工程教育专业认证的第一手资料,也是进校开展现场考查工作、专业类认证委员会审议和做出认证结论的重要依据。自评自建工作是否到位,自评报告的质量高低,直接影响到认证各环节的进展和认证结论。他对研讨会的开法和与会的代表提出了要求,鼓励大家为切实提高测绘地理信息类专业认证质量,提升测绘地理信息类专业的教学质量做出贡献。

张勇处长介绍了我国当前工程教育专业认证的发展形势、对认证工作的核心要求和专业自评的工作重点作了深入指导,同时结合工作实际对专家工作提出了要求。解放军信息工程大学的翟翊教授作了测绘工程教育专业认证标准解读和自评报告的撰写的报告。同济大学的程效军副院长介绍了同济大学测绘工程专业工程教育专业认证的相关情况和经验。在讨论交流环节,今年受理认证的中南大学、华东理工大学等校的代表对校本自评工作进展的情况进行了介绍,并对当前自评工作和自评报告的撰写所遇到的一些问题进行了提问,与各位认证专家进行了交流。大家还对自评报告常出现的一些问题进行测验和评判。大家一致认为,这次研讨会开得很好,不仅对申请认证的学校是必要的,对于我们的认证专家也是一次再学习,再提高。研讨会对贯彻执行2015版新标准,进一步推进自评工作,切实提高测绘地理信息类专业认证质量将起到重要的作用。

今年受理认证的与拟申请认证的12所高校的院、系负责人与教师,以及测绘工程专业的认证专家共50多人参加了研讨会。

★ 中国测绘地理信息学会企业家会员单位领导座谈会举行

1月20日,中国测绘地理信息学会在中国测绘创新基地召开部分团体会员及理事单位座谈会。国家测绘地理信息局副局长、中国测绘地理信息学会理事长李维森出席会议并讲话。50余家团体会员及理事单位负责人参加会议。

李维森对近几年学会工作取得的显著成绩表示肯定,对做好学会工作提出新要求。一要与企业会员单位共同发展,齐心协力做好学会工作。加强学会与政府的紧密联系,承接好相应政府转移职能,为会员单位做好服务,提供行业信息,组织开展活动,提供施展舞台,树立学会的良好形象。二是要通过多种形式加强与企业的沟通与联系,让企业积极参与学会活动,做好企业间的信息沟通,发挥企业作用。三要提升能力,加强日常管理工作,做好宣传,搭好服务平台。四是支持企业创新发展,为企业提供科技创新平台,在国际合作方面为企业“走出去”开拓空间。

会议回顾了2015年学会工作成绩,对2016年重点工作作出部署。与会团体会员及理事单位负责人对学会工作提出了宝贵意见,希望学会在今后工作中多了解和关注企业生存发展,推动行业自律,为团体会员及理事单位“走出去”和参与“一带一路”建设打通渠道、搭建平台。

★ 中国智慧城市创新大会举办

2016中国智慧城市(国际)创新大会3月24日在山东济南召开。欧盟、东盟、印度、日本、韩国、香港等国家及地区相关机构派出代表团,全国31个省、自治区、直辖市、计划单列市及相关部委派出代表参加会议。国家测绘地理信息局副局长李维森在主论坛作主题发言。

国家发展改革委、公安部、国家测绘地理信息局等8部门为本次大会的指导单位,济南市政府、中国城市与小城镇改革发展中心、智慧城市发展联盟为主办单位。李维森在讲话中指出,建立城市权威、统一的地理空间框架,应当成为智慧城市建设的基础性、前驱性工作。测绘地理信息作为各种信息的载体,担负着与空间位置有关信息的集成、处理、可视、分析与决策的重任,是不可或缺的空间信息基础设施,扮演着支撑经济社会发展的重要角色。国家测绘地理信息局高度重视智慧城市建设工作,2006年启动数字城市地理空间框架建设,经过10年努力,取得了令人瞩目的成绩。2016年,测绘地理信息部门将重点做好5方面工作:一是强化技术创新,进一步推动测绘地理信息高新技术的研发和应用;二是加强与各部门、各省市的沟通协调,积极推动试点建设;三是做好地理信息服务,助力新型城镇化建设和城市绿色发展;四是强化成果应用,打造开放性智慧城市基础平台;五是不断完善合作机制,强化建设经验与成果的共享交流。

国家局国土测绘司有关负责人出席本次论坛的政策说明会,对智慧城市时空信息云平台发展历程和建设内容、测绘地理信息发挥的作用及定位等作了全方位解读。通过参与本次智慧城市创新大会,对智慧城市时空信息云平台建设发展及测绘地理信息的定位与作用进行解读和宣传,进一步提升了测绘地理信息在全国智慧城市建设中的地位和影响力。

3月25日,由国家局作为指导单位、中国测绘地理信息学会主办的中国智慧城市(国际)创新大会智慧时空信息分论坛召开。李维森和中国城市与小城镇改革发展中心主任李铁出席论坛并致辞,李德仁院士等做主题报告。与会代表交流了智慧城市时空信息云平台建设、管理、运用、维护方面的先进经验。

★ 南宁市获批建设国家航空应急测绘保障基地

日前，国家发改委批复国家应急测绘保障能力建设项目可行性研究报告，根据报告，国家测绘地理信息局将在广西壮族自治区南宁市建设国家航空应急测绘保障基地。

届时，国家测绘地理信息局将在南宁市部署一套长航时固定翼无人机航空应急测绘系统，负责保障广西、广东、海南3省区和南海部分海域应急测绘工作。系统主要载荷包括：固定翼无人机1架，机长6米，翼展10米，机高2.4米，巡航速度160—180千米/小时，续航时间12个小时，实用升限7500米；此外，还有光学面阵传感器、轻小型SAR、热红外传感器、光学视频传感器、定位定姿系统等设备，以及成像处理软硬件。其中，仅固定翼无人机价值就超过千万元。航空应急测绘系统的日常运维由自治区测绘地理信息局负责。

据悉，“十三五”期间，全国将建设12个国家航空应急测绘保障基地，以提升航空应急测绘保障能力。南宁基地的建设，将显著提升自治区测绘地理信息局应对应急突发事件的保障能力，以及地理信息数据快速获取、处理与传输能力。

目前，广西壮族自治区测绘地理信息局正在对接有关部门，研究制定基地建设方案，争取发挥基地最大价值，更好的服务于广西改革发展和对外开放。

★ 云南开展“十三五”基础测绘项目试生产

为顺利编制云南省“十三五”基础测绘1:1万3D地图更新技术方案和技术规程，针对云南省测绘地理信息局下达的景东测区1:1万3D地图数据资源更新生产项目，云南省航测遥感信息院选取其中128幅试验图幅进行试生产。

日前，该院安排了对试验图幅的外业调绘过程检查。试验片区大部分位于景谷县内，目前试验片区已经完成104幅的控制测量、空三加密、立体测图、外业调绘等试验作业。检查人员抽取了试验区内19幅图进行内、外业作业的过程检查，对立体测图、DOM生产、外业调绘、资料收集等方面存在的问题提出了意见和建议，外业调查成果经后期检查后将开展下一步的数据编辑建库工作。

★ 测绘学科发展白皮书发布

由中国科学技术协会主编，中国测绘地理信息学会编著的测绘学科发展白皮书《2014-2015测绘科学与技术学科发展报告》在4月6日举办的2016中国科协学术建设发布会上与读者见面。该报告作为中国科协推出的33卷我国学科发展系列报告之一，凝聚了全国测绘地理信息领域104位专家学者的心血与智慧。

报告通过综合报告、专题报告、索引与英文摘要3方面内容，结合当前测绘学科转型升级内涵，回顾了传统测绘学演变为包括全球导航卫星系统、航天航空遥感等多种科技手段的新兴学科——地球空间信息科学的历程，阐述了2014至2015年我国测绘地理信息学科在新理论与技术研究、重大应用与服务两个方面的进展。其中，专题报告涵盖了大地测量与导航、摄影测量与遥感技术、地图学与地理信息系统、工程测量、矿山测量、地籍与房产测绘、海洋测绘、地理国情监测、测绘仪器装备等9个专业领域的丰富研究与深度探讨。

此前，中国测绘地理信息学会已组织编撰过3部测绘学科发展白皮书。

★ 北京市测绘设计研究院启动“新型基础测绘建设研究”项目

4月1日，北京市测绘设计研究院召开“新型基础测绘建设研究”项目启动会。院领导班子成员以及相关职能处室、生产部门负责同志参加会议。

会上，介绍了国家测绘地理信息局所提出的传统基础测绘向新型基础测绘转变的基本思路，回顾了院承担的北京市基础测绘工作的发展历程，分析并剖析了当前所面临的问题，着重强调了院开展新型基础测绘研究的可行性和必要性。相关部门就《院新型基础测绘研究项目实施方案》进行了汇报。与会人员针对项目的任务分解等内容展开了深入的讨论。

会议最后明确了“新型基础测绘建设研究”项目研究的目的、内容、组织形式和具体计划，要求会后各相关部门积极配合开展工作，确保项目按期完成。项目研究成果将作为“十三五”时期北京市开展基础测绘工作的重要依据和参考，对提高基础测绘更新效率，推进基础测绘成果应用，实现北京市基础测绘的跨越式发展具有重要的战略意义。

★ 黑龙江测绘局首次现场协助国外科考站完成测绘工作

近日，受智利南极“空军”站的邀请，黑龙江省测绘局执行长城站度夏科考任务的科考队员朱李忠协助智利南极“空军”站，完成相关测绘工作。

据了解，本次实施的“空军”站倾斜摄影测量是黑龙江省测绘局首次现场协助国外科考站完成测绘工作，共飞行4个架次，获取的航空摄影测量数据覆盖了“空军”站，实现了“空军”站与长城站之间的交通道路全覆盖。

据了解，此前黑龙江省测绘局科考队员在执行长城站周边倾斜摄影测量任务的过程中，得到了智利南极“空军”站开放空域的大力协助。智利南极“空军”站对我国倾斜摄影测量技术和成果形式表现出浓厚兴趣，因此提出了利用我国技术和设备来协助“空军”站测绘工作的邀请。

本次测绘工作加深了中、智两国科学考察站之间的感情，强化了双方的交流合作，同时提升了国外同行对我国测绘地理信息水平的认知度。

★ 2015年新增无人机驾驶员2142个，较2014年增长近9倍

近日，中国民用航空局发布2015年《中国民航驾驶员发展年度报告》。

报告中值得关注的是，2015年无人机驾驶员数量出现了跨越式的增长。截至2015年12月31日，中国无人机驾驶员合格证总数为2142个，较2014年增长近9倍，主要分布在各民用无人机生产研发企业、相关应用单位以及大专院校。80后和90后是无人机驾驶员的主体，目前共57家无人机驾驶员训练机构具备培训资质。

此外，截至2015年底，国内运输航空公司可用机长为12460名，可用副驾驶为15476名，中国民航驾驶员有效执照总数为45523本，同比增长14.1%。其中，女性驾驶员比例增长明显，数量达到599人，外籍驾驶员所占比例有所下降。

数据显示，从2011年到2015年，中国民航驾驶员执照的数量增幅连续5年均超过12%，高于近5年来我国民航运输机队规模的平均增速。民航局飞标司相关负责人表示，数据表明中国民航驾驶员的数量不仅基本满足了当前行业发展的需求，而且后备力量充足。

★ WJ-III 地图工作站技术交流会在京召开

4月15日，WJ-III地图工作站技术交流会在国家测绘创新基地召开。国家测绘地理信息局副局长李维森出席会议并讲话。中国测绘科学研究院相关科研人员介绍了WJ-III地图工作站的相关情况。

会议介绍了WJ-III地图工作站自动化综合制图和成图技术，展示了WJ-III地图工作站地理国情制图及地形图综合典型应用案例，通过标准规范、技术研发、成果应用、推广服务等多个层面的交流，加深参会人员对于国产自动化制图综合与成图技术的理解，提高大家以技术创新促进转型发展、深入实施创新驱动发展的认识。

李维森指出，WJ地图工作站作为我国地理信息领域关键技术和装备的重大创新，从核心技术到成果应用都取得了重要突破，特别是近两年来在多个地方的试验取得了满意效果，是一项具有重大价值的科研成果，可以为国家节省大量财政支出。李维森强调，要充分认识到国产自动化制图综合与成图技术在推动全国地理国情普查、新型基础测绘以及国家基础测绘中长期规划实施等方面具有重要意义和广阔前景，今年全国各地要陆续编制地理国情普查图，有些省份的制图任务工作量大，时间紧，任务重，研究院举办本次交流会，非常及时，我们要利用创新科技支撑和保障第一次全国地理国情普查的顺利实施和按期完成。

来自全国27个省(区、市)和军队相关部门的57家测绘地理信息单位负责人和技术骨干共计120余人参加了会议。

★ 湖南省地理信息产业协会成立

4月6日，湖南省地理信息产业协会在长沙举行成立仪式并召开第一次会员代表大会，会议选举产生了第一届会长。中国地理信息产业协会、湖南省国土资源厅相关负责人出席会议并讲话。

2011年以来，湖南省地理信息产业产值规模以每年25%以上增幅增长，2015年总产值达到120亿元。根据湖南省政府出台的促进地理信息产业发展的实施意见，到2020年，湖南地理信息产业总产值将超过1000亿元，年均增长率超过30%，带动就业超过10万人，形成以航空航天遥感、卫星导航定位与位置服务、软件开发等为主导的成熟地理信息产业链。测绘地理信息产业的迅猛发展，为省委省政府重大决策和重大战略、重大工程提供了有力的保障服务，为促进经济增长、调结构和保持社会稳定做出了重要贡献。

★ 云南省地理信息产业园将落户呈贡

近日，记者在呈贡信息产业园区招商推介会上获悉，云南省地理信息产业园将落户呈贡信息产业园区。

推介会上，云南省测绘地理信息局与昆明呈贡信息产业园区管委会签订战略框架合作协议。根据协议，双方将立足优势，在呈贡建设云南地理信息大数据服务中心和服务云南、辐射南亚东南亚地理信息产业发展的高地和核心园区，同时积极拓展、覆盖南亚东南亚市场的地理信息数据加工市场，开展地理信息数据加工服务。此外，还将建设面向东南亚和南亚区域遥感影像服务中心和建设我国测绘仪器出口东南亚和南亚的集散地和服务基地。

据悉，云南省地理信息产业园将引进地理信息企业50余家，培育亿元企业，扶持一批主要面向东南亚和南亚市场出口地理信息产品和服务的外向型企业，目前已有10余家地理信息产业龙头企业计划进驻。

★ 黑龙江依托大数据建设“北斗+智慧城市”

3月31日，黑龙江省计算中心与黑龙江鸿运伟业电子科技有限公司签署战略联盟合作框架协议，双方将强强联手在黑龙江“北斗位置服务平台”“城市数字一体化”“公共安全应急信息平台”“突发公共事件防范与快速处置”“重大自然灾害监测、防御与应急处理”等主题上展开合作。据悉，此次合作双方将协作开发、资源共享，携手建设“北斗+智慧城市”。

据介绍，黑龙江省计算中心是省属重点科研院所，主要开展信息技术领域的基础技术理论研究和技术服务，其中下属科技数据中心机房占地面积900平方米，辅助设施占地面积1000平方米，设计服务器总数600台，可扩展服务器数量2000台，设计存储容量为2p，可扩展存储容量50p，可通过集成、整合、引进、交换方式汇集国内外科技数据资源。该中心主任刘春燕在签约仪式上表示，此次合作，黑龙江省计算中心将充分发挥大数据与云计算优势，与鸿运伟业公司自主研发的“北斗应急指挥管理平台”“北斗平安关爱管理平台”两款平台软、硬件产品展开战略合作，共同致力于建设“北斗+智慧城市”。

★ 2016年“天地图·新疆”项目全面启动

为深入贯彻国家测绘地理信息局加快各级各类地理信息数据融合、确立天地图战略地位的精神，全面升级“天地图·新疆”服务能力和用户体验，自治区测绘档案资料馆全面启动2016年“天地图·新疆”项目。

2016年“天地图·新疆”项目利用“天地图”国家主节点数据与新疆1：1万基础地理信息数据、地理国情普查数据进行数据融合，完成新疆绿洲核心区8万平方公里主要经济区范围内的矢量数据融合以及数据更新，并在“天地图·新疆”网站发布上线。与此同时，依托“数字城市”项目，将塔城市1：500基础地理信息数据、博乐市1：1000基础地理信息数据与“天地图·新疆”自治区级节点数据进行融合，进行数据加工处理、服务发布上线。

与2015年“天地图·新疆”项目相比，2016年将开展基于“天地图·新疆”的社会化应用工作，将“天地图·新疆”与自治区其他部门的专业信息平台进行数据标准对接，更新平台数据，服务于业务管理、信息共享和决策支持，在反恐维稳、应急处突、抢险救灾的安排部署以及各级领导的指挥调度等方面发挥作用，为自治区维护社会稳定和长治久安提供地理信息保障，为群众查询信息、规划线路等提供便捷的地图在线服务。

★ 海南省测绘学会更名为海南省测绘地理信息学会

日前，经海南省科协和海南省民政厅批准，海南省测绘学会更名为海南省测绘地理信息学会。

学会的更名，是新时期海南测绘地理信息工作发展和职能拓展的需要，更好地体现了学会的行业职能和学科特点。根据《海南省测绘地理信息学会工作章程》，海南省测绘地理信息学会将进一步拓展业务范围和加强职责，更好的发挥桥梁作用，为全省测绘地理信息行业工作者提供交流思想、研究问题的平台，积极承接政府职能转移，推动海南省测绘地理信息科技进步，为推动全省测绘地理信息事业改革发展提供服务。

《测绘大地图》征稿启事

《测绘大地图》是由中国测绘地理信息学会主办，中国测绘地理信息学会地图大数据创新工作委员会承办的致力于整合与测绘地理信息相关的科研成果、成功应用案例，并积极探索测绘地理信息行业的新产品、新技术、新思路、新方向的内部刊物，办刊宗旨为关注热点、前瞻行业、引领发展。

栏目设有业界要闻、特约访谈、深度观察、跨界应用、国际瞭望、学会动态等。现为丰富内容和提高办刊水平，特面向测绘地理信息领域的广大科技工作者征稿，欢迎大家积极踊跃投稿。

投稿须知：

1. 投稿作品应具有创新性、科学性和可读性，数据可靠、条理清晰、文字精炼、逻辑性强；
2. 投稿字数在 8000 字以内，并配图片；
3. 稿件提供者须提供真实姓名 / 单位 / 职称 / 详细通讯地址及联系方式，优秀的稿件编辑部将免费推送至核心期刊发表；
4. 投稿邮箱：cehuidaditu@mapuni.com 联系人：周露 联系方式：010-51286880

——《测绘大地图》编辑部

《测绘大地图》期刊读者意见反馈表

为了更好地提高《测绘大地图》的办刊水平，展现测绘地理信息行业学术成果，欢迎大家多提宝贵建议。您可以填写下方意见反馈表，打印后邮寄至《测绘大地图》编辑部：

《测绘大地图》编辑部收

邮寄地址：北京市朝阳区安翔北里甲 11 号创业大厦 B 座 2 层（100101）

或者直发送您的宝贵建议至邮箱：cehuidaditu@mapuni.com；

编辑部将认真阅读您的意见，意见一经采纳，将免费赠阅 2016 年全年刊物，欢迎大家积极参与。

1. 您觉得在哪些方面还需要改进？

☐ 版式设计 ☐ 内容深度 ☐ 专题策划 ☐ 图片样式 ☐ 推广方式
其他（请注明）：

2. 您对哪些栏目比较感兴趣？

☐ 业界要闻 ☐ 特约访谈 ☐ 深度观察 ☐ 跨界应用 ☐ 国际瞭望 ☐ 科普天地
☐ 学会动态 ☐ 行业快讯
希望增加的栏目（请注明方向）：

3. 您对《测绘大地图》还有哪些宝贵建议？

个人信息：

姓 名：

职 位：

工作单位：

通信地址：

联系方式：

中国测绘地理信息学会2016年学术年会

举办地点：广西·南宁 时间：2016年11月10-11日



2011年 福建·福州



2012年 陕西·西安



2013年 中国·北京



2014年 湖北·武汉



2015年 江西·南昌

测绘地理信息行业最重要的学术会议之一
广大测绘地理信息科技工作者齐聚的学术盛宴
内容丰富、规模空前