

地理信息科学发展与技术应用

周成虎^{1,2}, 孙九林^{1,2}, 苏奋振^{1,2}, 杨晓梅^{1,2}, 裴韬^{1,2}, 葛咏^{1,2},
杨雅萍^{1,2}, 张岸^{1,2}, 廖小罕^{1,2}, 陆锋^{1,2}, 高星^{1,2}, 付东杰^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100101)

摘要: 本文回顾了中国科学院地理科学与资源研究所在地理信息科学研究与技术应用方面的历史过程, 从早期的测量和制图的研究, 到开创中国地理信息学科, 建立资源与环境信息系统国家重点实验室的历史, 是中国特色原创地理信息理论发展的历史, 是中国具备自主研发世界级地理信息软件的历史, 是地理信息为国家重大战略提供坚实科技支撑的历史。本文主要从地图学、地学遥感、地理信息科学、地学数据共享、重大技术突破和国家战略支撑等方面进行概述, 最后从地学知识图谱、地理大数据分析、遥感人工智能、地理系统模拟和知识服务角度展望地理科学发展的新科学范式。

关键词: 地理信息科学; 地图学; 地学遥感; 数据共享; 地理智能

DOI: 10.11821/dlxb202012004

1 历史传承

中国科学院地理科学与资源研究所(简称地理资源所)及其前身, 在80年发展历程中, 对中国测量、地图、遥感和地理信息系统等学科的产生与发展具有开拓性贡献。80年间涌现出一大批著名学者, 曹谟、曾世英、方俊、夏坚白、陈永龄、王之卓、陈述彭、孙九林、徐冠华、周成虎、廖克、刘纪远、钟耳顺等是其中杰出代表。

1940年中国地理研究所在重庆成立, 设立自然地理、人文地理、大地测量和海洋学四个学科组, 曹谟任大地测量组长, 这是中国首次设立的测量研究单位, 组员有夏坚白、陈永龄、王之卓等, 开展了测量标准、仪器、方法与技术研究, 建立了600 km²的测量试验区, 1941年刊发了《测量》(季刊), 1943年方俊任副组长^[1]。1953年中国科学院地理研究所正式成立时, 设地理、地图和大地测量三个研究组, 分别由周立三、曾世英、方俊负责。1956年成立测量制图研究室, 方俊任主任, 1957年迁往武汉, 成立中国科学院武汉测量制图研究所, 后改名为中国科学院武汉测量与地球物理研究所。1958年建立地图研究室, 陈述彭任主任, 研究室建立了航空像片分析判读实验室和地图制印实验室。1978年地理研究所以航空像片判读利用研究室和地图研究室制图自动化组为基础成立地理研究所二部, 1979年成立中国科学院遥感应用研究所^[1]。

1984年国家15个部委相关机构联合编写的《资源与环境信息系统国家规范》发布, 开启了中国GIS研究的国家行动; 1985年组建中国第一个地学领域的国家重点实验室

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41421001) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41421001]

作者简介: 周成虎(1964-), 男, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事地理信息科学研究。E-mail: zhouch@lreis.ac.cn
2593-2609 页

——资源与环境信息系统国家重点实验室^[1]；2003年科技部地球系统科学数据共享网试点工作启动，2005年中国科学院资源环境科学数据中心开通，2019年地球系统科学数据国家数据中心获批，成为中国首批国家科学数据中心。资源与环境信息系统国家重点实验室成立以来，引领了中国地理信息科学、技术、软件和应用事业的发展，提出了地学图谱、全息地图和异质表面统计模拟等原始创新理论，研发了具有自主知识产权的国产GIS软件和高安全空间数据库软件，开拓了海洋地理信息系统、城市地理信息系统和灾害地理信息系统等新的研究领域，有力支撑了中国海洋战略和“一带一路”与人类命运共同体建设，为地理信息科学、国家和社会做出了巨大贡献，获国家级科技奖项达41项，省部级科技奖100余项。

2 地图学

地理资源所及其前身的地图学研究最早可追溯到1940年的大地测量组、1950年的大地测量组和地图组、1958年的地图研究室，长期以地图认知、传输和表达为核心，发展现代地图学，开展专题地图、计算机制图、地图分析、地学信息图谱等研究。早期重点开展专题与综合制图、遥感与自动化（计算机）制图及地图应用等方面的理论和实践^[2]。方俊、曾世英是地理研究所20世纪40年代、50年代大地测量和地图学研究的带头人，为地理研究所的大地测量与地图研究奠定了基础。

陈述彭在学科方向、组织任务、人才培养等方面做出重大贡献，开创性地提出了地学信息图谱理论方法，曾承担和完成国家自然地图集的设计与编制任务，推动全国与省区地图集的编制，率先开展航空像片综合分析 with 自动化制图方法技术的研究实验以及遥感制图与自动化制图的实践，使地理资源所成为国内外极具影响力的地图学研究力量。廖克、刘岳等继承开拓创新，领导完成一大批具有中国特色的地图学成果，发展了专题与综合制图、计算机制图和地图应用的理论、方法和技术^[2-4]。21世纪以来，周成虎、王英杰、齐清文、程维明和葛咏等在全息位置地图、自适应地图可视化等理论方法上取得了原创性突破，成功地推动和共同主持新时期国家大地图集的编研。

2.1 地图编制与计算机制图技术

1960年地理研究所建立普通地图学科组，以地图综合技术为基础，完成了《1:250万苏联地图》《1:150万中国全图》等的编制。1961年成立专题地图学科组，编制了第一版的《中华人民共和国自然地图集》。20世纪70年代末起，研究团队先后承担了《中国人口地图集》等编研工作，80年代开展1:100万地貌图规范化的研究和专题地图色谱的研究；90年代陆续完成了《中华人民共和国国家经济地图集》《中华人民共和国国家自然地图集》《中国第三产业地图集》等编制任务。21世纪初，主持完成了《中国人口、环境与可持续发展地图集》《中华人民共和国地貌图集》等编制。2010年以来，又陆续编制完成了《中华人民共和国经济地图集》《中华人民共和国区划地图集》《中华人民共和国影像地图集》《中华人民共和国水文水资源地图集》《中国近代地图志》《中国自然疫源性疾病预防病学地图集》《中华人民共和国行政区划变迁地图集（1949—2017）》等多部国家地图集编撰工作^[5]。

开创并引领了中国计算机制图研究。20世纪60年代，地理研究所成立地图自动化组，70年代组织全院力量，完成了样机研制并小批量投入生产。1973年从国外引进设备完成“京津唐地区地下水位变化监测自动制图”和“官厅水库水源环境监测自动制图”等，这是当时国内最早开展的计算机辅助制图实验研究。80年代开始制图自动化理论方

法研究实验,完成《中国人口地图集》。1995年引进美国 Intergraph 制图系统,经学习和开发,实现了从扫描到印刷全过程自动化,完成了《中华人民共和国经济地图集》《中华人民共和国国家自然地图集》《中华人民共和国国家历史地图集(第一卷)》等。1995年推出有自主知识产权的 EA-World 电子地图集软件系统,先后研制和出版了《国家经济地图集电子版》《北京市电子地图集》《中国工业电子地图集》《中国人口、环境与持续发展电子地图集》等。

2.2 现代地图学理论研究

20世纪50年代,陈述彭、郑威、吕人伟等开展中、小比例尺普通地图制图综合的研究,并据此编制了《1:400万中国地势图》。90年代以来,齐清文等提出了在GIS环境下面向地理特征的制图综合指标体系和知识法则的建立与应用。2000年以来,姜莉莉、齐清文等又提出并实现了水网数字地图智能化、知识化取舍和流域地图自动概括和更新的方法。

20世纪70年代初,国际上提出了地图信息论、地图传输论、地图模式论、地图认知论、地图感受论、地图符号学以及地图学的结构体系等新概念与新理论。1983年廖克发表了《试论现代地图学体系》一文,提出包括理论地图学、地图制图学、应用地图学的现代地图学体系,同时提出地图信息传输、地图信息载负、地图模拟、地图认知4项地图基本功能与地图传输的改进模式。90年代初期,陈述彭开始探讨信息时代的地图学概念及其发展动力需求。2000年后,王英杰等提出了自适应地图可视化的理论^[6],齐清文等提出数字地图的评价结构体系和数字地图产品系列的新框架^[7]。

2009年周成虎、程维明等联合国内60多家机构,历经8年,突破地貌遥感定量解析、综合制图等关键技术,提出了全国地貌五级分区指标与方案,构建了基于遥感等多源数据的数字地貌综合解析的技术方法体系,构建了全国第一套数字地貌数据库,编制出版了中国首部海陆一体化的《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》^[8],开拓了中国月球球形貌科学研究领域,构建了全月球撞击坑数据库。系列研究成果得到广泛应用,获国家科技进步二等奖1项,省部级一等奖4项。

2.3 地图分析利用研究

1963年陈述彭系统总结和论述地图编制和地图分析方法对自然区划工作的重要性及其成功经验,阐明利用地形图、土壤图、水文地质图、古地图、历史地理图等的分析,编制了黄河、淮河和长江中下游平原1:250万地貌图。70年代,地理研究所设立地图分析与利用学科组,系统研究利用地图资料编制具有数量特征的专题地图的方法。此后,廖克专门论述了地图评价、地图分析方法、地图使用效益等问题。2000年以来,基于地图分析方法和地学信息图谱空间规划理论方法,地理资源所承担了一系列跨国空间规划,在资源环境领域的重大应用方面,基于时空大数据制图理论方法,开展了大数据下人口分布与流动的量化分析与挖掘、矿业权布局调整识别与跟踪监测、环境监测地图服务、跨省界自然地理实体地名图谱研究与制图等一系列国家部委应用。特别是在精准扶贫方面,通过对连片贫困地区贫困现状、影响因素、扶贫绩效和贫困发生率等进行地图编研,地理资源所成为国家精准扶贫的重要科技支撑单位。

3 地学遥感

20世纪60年代初,航空摄影成为一门新兴技术,1972年美国发射第一颗陆地卫星,航天遥感时代到来。当前的遥感技术集中了空间、电子、光学、计算机通信和地学等学

科的最新成就,成为当代高新技术的一个重要组成部分。遥感技术从远距离采用非接触式的形式进行探测,包括多点位、多谱段、多时相和多机理成像的遥感数据获取及其多级产品处理制作,智能计算和参数反演的遥感信息提取,和围绕资源环境多专业领域的遥感综合应用。遥感技术提供综合系统性、瞬时性/同步性的大范围地表信息,在地球表层探测和监测应用中具有强大的优势^[9]。

地学遥感指遥感图像反映的是某一区域特定地理环境的综合信息,它综合反映了地球系统各要素的相关性。将地学知识和遥感分析融于一体,充分认识地理分布规律和地物间的相关性,指导开展遥感成像机理研究、多源信息融合、知识辅助下时空智能分析等。地学遥感从理论到技术方法到资源环境相关应用,始终贯穿于遥感几十年的发展历程中,使得中国遥感与地理信息系统发展成为支撑现代地理信息科学、甚至整个地球系统科学研究的重要支点。

3.1 启动中国地学遥感

陈述彭是中国遥感地学分析的先驱和遥感应用研究的奠基人。1975年陈述彭率先在中国引进陆地卫星影像,用于编制1:50万~1:400万比例尺全国影像地图,并彩色印刷1:50万分幅陆地卫星影像图集,在国内外推广,为中国遥感技术的应用起到示范带头作用。1977年陈述彭提出了积极开展遥感应用的观点,随后遥感应用被列为国家重大科技项目。1978—1985年陈述彭成功组织和实施了中国资源、环境和能源遥感应用的全国性大规模、综合性、跨学科、跨部门的遥感应用示范工程:云南腾冲遥感综合试验、天津城市环境遥感监测和四川二滩水电站遥感试验,开创了中国遥感应用的先河。上述这“三大战役”吸引和培养了大批的遥感人才,壮大了遥感队伍,拓展了应用领域,促进了遥感的学科化,并于20世纪70年代末在中国科学院地理研究所首建了以遥感为主要研究方向的二部,嗣后创办了中国第一个遥感应用研究所,奏响了遥感组织机构发展的建设乐章,遂使中国遥感应用研究蓬勃发展。

3.2 推动地学遥感发展

1990年陈述彭主编的《遥感大辞典》^[9]由科学出版社出版,这是中国第一部全面收录遥感及与遥感相关学科的词条,是一部多专业、跨学科的遥感基础性大型工具书。该书同年获得国家科技进步三等奖和全国优秀科技图书二等奖。同年,《遥感地学分析》^[10]一书由测绘出版社出版,该书为现代遥感教育提供了基本教材,富有启发性。遥感地学分析是建立在地学规律基础上的遥感处理分析模型,其结合物理手段、数学方法和地学分析等,获得能反映地球区域分异规律和地学发展过程的有效信息的理论方法。它标志地学遥感概念被首次明确提出。2000年由周成虎、骆剑承、杨晓梅等研究和撰写的《遥感影像地学理解与分析》^[11],进一步深化与发展了基于地理空间格局的遥感信息自动化与智能化提取建模和方法体系。1993—1994年陈述彭主持“遥感信息传输与成像机理研究”,组织对复杂自然环境条件下电磁波辐射及其传输机理研究,在大气订正与地表反射率的定量反演、高光谱与雷达成像机理、遥感信息模型、信息复合与时态分析等诸多方面取得可喜的成果。该研究成果获中国科学院自然科学一等奖。

1987年起,地理资源所围绕国家“七五”和“八五”攻关等重大任务,开展防汛遥感应用试验,针对永定河、黄河中下游、洞庭湖等区域建立了洪水遥感监测系统、灾情监测分析和防洪减灾辅助决策系统等。协助国家水利部遥感中心建立了洪水灾害监测与管理业务系统。1992年起,研究发展国家资源环境遥感宏观调查与动态评估,实现遥感与地理信息系统的结合。完成全国土地资源和环境背景的调查,取得典型区耕地变化、城市化、水体变化和土壤侵蚀等综合监测与评估。

3.3 深化地学遥感研究

近年来地理资源所从陆地表层系统科学研究的高度出发,进一步强化和深化遥感信息机理与定量遥感、遥感智能计算与信息提取的研究。一方面,紧密结合对地观测系统“三高(高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率)与综合观测”的发展态势,将地学分析与遥感机理相结合开展遥感智能计算研究;另一方面,以遥感辐射传输机理为基础,围绕“机理分析—方法创建—真实性检验”的研究主线,系统开展了地表关键特征参数定量遥感反演建模与验证的理论方法研究,并通过多领域的广泛应用,取得了丰硕成果。

(1) 遥感机理与地表参数定量反演。该研究重点突破了“大气效应校正、病态反演、全遥感建模”三大瓶颈问题,在土壤蒸发与植被蒸腾分离、地表温度高精度建模以及地表净辐射全遥感反演等方面取得了具有重大国际影响力的原创性突破,建立了一套完整的地表水热关键参数定量热红外遥感反演理论与方法,有效解决了高精度地表发射率和全天候地表温度的遥感反演难题,形成了普适性的遥感产品真实性检验框架,引领了地表水热关键参数热红外遥感反演研究的发展方向,推动了遥感科学的发展^[12]。研究成果获得2019年国家自然科学奖二等奖。在植被定量遥感研究中,生成了全球LAI不确定性产品,开发了新型土壤反射率GSV模型,达到了国际同类模型的最高水平,大大促进了土壤反射率模拟和植被参数反演研究^[13]。研发生产了长时间序列林下植被、林上林下分离、集聚指数,为植被生态机理研究形成长时间序列标准化数据集,在国际上产生广泛影响。

(2) 遥感地学分析与智能计算。研究提出和建立了以“像元—基元—目标”为核心的高空间分辨率遥感影像高性能计算理论,构建多分辨率影像从区域至目标的多尺度等级斑块分割方法,建立基于地学理解下视觉知识、环境知识协同遥感影像的地表特征智能提取方法体系模型。综合采用大区域复杂地理环境下分区分层思想,通过字典学习与低秩矩阵重建的遥感影像插补、多尺度等级斑块结构建模和对象化表达、多源信息协同的地学专题信息精准提取等关键技术和机器学习策略有效组合,实现高分辨率遥感影像智能计算方法体系,有效提高地表特征的提取精度,确保准确及时地获取土地覆盖及土地利用相关信息^[11, 14-15]。发展的土地利用/土地覆盖变化(LUCC)遥感监测方法,构建长时间序列的全国土地利用/覆盖变化时空数据集。有效揭示了全国及区域的LUCC格局的变化过程,定量评估了城市、农田、森林等主要土地利用类型变化的生态和气候效应。并综合集成基础地理信息、地形地貌、气象水文、土壤质地、社会经济等时空数据,开展自然资源、生态环境监测、利用、保护等广泛应用^[16-17]。

(3) 地貌遥感综合解析与海岸带海岛遥感综合应用。创新地建立了数字遥感地貌定量解析的理论与模型方法,提出和建立了具有严密等级体系的地貌数值分类系统和“定位、定量和定性”相统一的地貌实体综合解析模型,取得了理论上的突破;创建了地貌遥感定量解析技术规程和基于“六库”的地貌专题制图体系,在地貌遥感信息提取与专题制图技术上取得重要创新;出版的《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》填补了该领域国内外空白,建成的“中国地貌(世纪网络版)”已在全国土地调查、全国土壤环境质量调查等国家重大专项任务中得到推广应用^[8]。

构建涵盖全国、省级与区域三级的海岸带遥感综合数据库与应用系统,提出基于多源遥感数据“像素—对象—场景”多层级海岸带典型要素信息提取方法,就岸线开发利用、海水养殖、围填海、海洋灾害、生态保护等开展遥感动态监测,完成中国海岸带30年变化遥感评估工作^[18-19],相关成果获得海岸带国家科技进步奖二等奖;完成了南海岛礁及周边地区资源、环境遥感综合监测与分析应用,提出重大系列建议,为国家决策提供

了重要科技支撑,获得南海区域遥感综合监测国家科技进步二等奖;利用中高空间分辨率和长时间序列的遥感影像分图提取制作要素类型丰富、制图精度高的土地覆被产品数据集,建立的关键区域数据库,为中华人民共和国70周年庆典活动提供了信息保障。

4 地理信息科学

中国地理信息科学的研究是随着资源与环境信息国家重点实验室的建立从起步到壮大。“七五”和“八五”期间,地理研究所以项目带学科,进行地理空间分析与系统建模、地图制图与空间数据可视化等方面的研究。何建邦、颜松远、池天河、周心铁、林琿等开展二滩水电站水库淹没损失估算等中国重大自然灾害监测与评估方面的研究,在国内率先构建了中国自然灾害数据库和灾害区划系统。在解决国家重大需求的同时,发展了地理信息科学空间分析模型与技术。

20世纪90年代中后期,与国际同步,步入以空间分析核心模型研究的阶段。在周成虎、王劲峰、刘高焕等的努力下,开始开展地理格网系统及地理元胞自动机^[20]、黄河三角洲模拟分析^[21]、空间抽样与统计^[22]、生态环境模拟^[23-25]等方面的基本理论方法与应用研究,并针对生态环境监测、防灾减灾、全国土地利用变化等国家重大应用需求取得了一系列应用成果。

进入21世纪初,地理信息科学迎来全面发展,逐步形成了空间采样—空间估计—空间数据挖掘—空间模拟的研究空间,形成了空间异质性统计理论^[22]、高精度曲面建模模型^[24]、海洋地理信息系统基础理论^[18]、时空点过程挖掘理论^[26]、时空尺度转换与不确定性分析^[27]、地理环境相似性推理^[25]等标志性成果;并在《中国1:100万数字地貌图》编研、环境地质灾害过程模型、山地垂直地带图谱等应用领域取得突破性进展。

近年来,地理信息科学的研究进入大数据时代^[28]。在理论方法方面,建立了地理大数据的认知和挖掘框架,实现了从对地观测大数据与人类社交行为活动大数据结合的角度分析人地关系,进一步深化空间估计理论,提出地理探测器方法以及地理学第三定律等重要理论。在应用和技术方面,在生态环境与再生能源、环境污染与公共健康、全球变化与人类响应等方面取得了系列重要成果^[29]。经过多年的努力,地理资源所逐步形成“地理空间分析—地理要素估计—地理大数据挖掘—地理空间模拟”的研究体系,成为地理信息科学研究重要标志和特色。

4.1 地理空间分析与异质探测

地理空间分析的本质是对地理单元、地理要素、地理系统之间的空间关系进行挖掘和分析,旨在揭示地理现象的空间模式。在数字地形、格点数据两类数据的分析方法,以及空间分异性统计理论等方面取得了显著进展。针对数字高程模型的特征提取问题,秦承志等提出了区域地形属性新指数算法及地形描述误差的刻画方法,设计了栅格地理计算进行并行算子,将数字地形分析算法的准确性、运算效率等向前推进了一步,更重要的是实现了数字地形分析的易用性^[23]。格点数据的异常模式提取是空间统计学的经典问题,裴韬等针对时空扫描存在无法识别不规则异常区的缺陷,构建了提取任意形状和多个时空异常区域的蚁群优化方法^[26];宋辞等将地理OD流视为四维格点,创建了流模式的异常方法,有效解决了时空扫描存在的弱点^[30]。针对空间统计理论缺少普适性的空间分异性统计测度,王劲峰等创立了地理探测器 q 统计理论和空间分异归因方法,并研建了多因子空间交互作用的探测工具,摆脱了传统模型中的线性假设和自变量共线性难题^[31-32]。

4.2 地理要素空间估计与尺度转换

地理要素空间估计是指根据已知样本点的信息对未知点的要素值进行估计,从而还原地理要素的整体空间分布。王劲峰等针对异质性表面估计,提出了地物类型、抽样方案和统计推断三者关联的空间抽样 Trinity 原理,并建立了系列采样推估模型,初步形成了空间异质性的抽样理论体系,为空间分异地理要素的总量估计、分布估算和尺度转换等提供了解决方案^[33]。朱阿兴等针对环境变量与地理要素之间的制约关系,提出了地理学第三定律,即“两处之间的地理环境越相似,则两处的地理目标变量值或过程越相似”,使地理要素空间估计摆脱了地理学第一和第二定律要求样点集整体代表性的束缚^[34]。葛咏等定义和描述了空间异质性特征和分类,按照不同异质性对现有尺度转换方法进行了分类,创建了空间异质区域“点到面”“面到面”和“面到点”的尺度转换方法,解决了现有方法在进行空间估计时会出现全局、局部平稳性假设失效和估计有偏的问题^[27, 35]。

4.3 地理大数据挖掘

地理大数据的研究重点是时空大数据挖掘方法研究,主要研究包括点集的分解、流模式提取、文本数据挖掘及人地关系发现等。裴韬等建立了任意复杂点过程分解为多个均匀点过程的理论和方法^[26]。由于借鉴了傅立叶变换中“可将任意函数视为基函数叠加”的思想,该理论可视为时空点过程的“傅立叶变换”;杜云艳等提出了以流为基础的地学场时空过程建模及模式提取理论^[36];陆锋等提出了基于复杂网络理论的地理空间网络结构评价方法,并验证了能够有效地揭示复杂流动的场过程对象演化模式和评估交通网络健壮性^[37-38]。海量文本数据中提取隐含大量的地理信息,基于自然语言处理技术,陆锋与裴韬等提出了网络文本蕴含地理语义关系抽取的方法和地理知识图谱自动构建的方法^[26, 39-40],在信息抽取可靠性、地理实体和地理关系填补精度方面明显优于已有方法,为将传统地理信息服务拓展到地理知识服务提供了理论方法和技术支撑。马廷等从理解人地关系角度,采用大数据分析方法,探究了地理环境对人群活动日—夜节律性的影响,发现了中国陆水水质变好趋势^[41];裴韬与许珺等基于人群活动和人群迁移模式,对城市地块功能和城市化水平进行了反演。

4.4 地理模拟与预测

地理模拟与预测通过自下而上的虚拟模拟实验,对复杂地理现象进行表达重现,从而探索和分析地理现象的格局形成、演变过程,推断其未来状况和趋势。其研究内容主要是发展地理模拟与预测理论方法,构建各类原创性地理过程应用模型(如生态模型、气候变化模型、城市动力模型等)。

地表要素的高精度曲面建模是地理模拟与预测的重要方向,岳天祥研究团队建立了以全局性近似数据为驱动场、以局部高精度数据为优化控制条件的高精度曲面建模(HASM)方法,有效地解决了半个世纪以来困扰曲面建模的误差问题和尺度问题,被国际《生态学大百科全书》收录,并被命名为YUE-HASM方法^[24]。

针对复杂地理系统演化模拟,周成虎团队以元胞自动机模型原理为基础,首次在国际上提出了基于元胞自动机空间扩展的地理元胞自动机概念,创建了城市动态演化模型 GeoCA-Urban,并出版了《地理元胞自动机研究》^[20],为“可计算城市”研究开拓了新途径,成为国际城市演化模拟的三大元胞自动机模型之一。林琿、闫国年和龚建华等发起并推动虚拟地理环境的研究,利用虚拟现实、仿真等信息技术对地理系统状态与过程进行多感知表达、协同分析计算与虚拟体验,提出了虚拟地理实验与虚拟地理实验室,以及融入“人地关系”的虚拟地理环境的概念,实现了人为交互下的地理过程真实再现,可为智慧城市等建设提供“人”与“地”在数据、信息、知识与智慧等层面的交互工具与平台^[42-43]。

5 地学数据共享

地球科学数据共享是促进地球科学技术发展的重要驱动力,也是开展地球系统科学与全球变化创新研究、支撑区域社会经济发展决策的重要基础。长期以来,中国缺乏可真正运行的地球系统科学数据共享平台,缺乏科学研究数据共享的法律政策,未能建立起持续的数据共享机制,数据共享权益难以保障^[44]。

孙九林、何建邦、杨雅萍等在分散科学数据共享机制与立法、标准规范、数据集成方法与核心数据产品、基于云服务的数据共享技术与软件系统等方面取得重要进展,孙九林等建成并运行中国唯一的国家地球系统科学数据共享平台,该平台以陆地表层系统数据为核心,涉及5大圈层18个学科的地球系统科学数据库,数据量2.0 TB。该平台已成为时间上涵盖“地质年代—古代—现代—未来”,空间上覆盖“日地系统—全球—全国—典型区域”的中国规模最大、学科面最广的地球系统科学数据库^[45],获得2014年国家科技进步二等奖,并于2019年通过国家认定成为20个国家科学数据中心之一,实现了中国地球系统科学数据共享从无到有,由国内走向国际的重大跨越。

5.1 积累与准备

1982年中国科学院率先提出建设“科学数据库及其信息工程”专项,1987年中国科学院—国家计划委员会自然资源综合考察委员会(简称“综考会”)加入中国科学院科学数据库与信息系统工程专项建设。1988年中国科学院联合有关部门和科研机构,组建了世界数据中心中国中心(WDC-D),下设海洋、气象、地震、地质、地球物理、空间、天文、冰川冻土、可再生资源与环境(挂靠在综考会)9个学科中心,以“数据共享”作为发展理念开展领域科学数据的采集、整理、分发和服务工作。1994年中国科学院地学部首次提出了“关于进一步做好我国地球科学、资源与环境科学研究基础资料与数据共享的建议”,呼吁实现数据共享。1999年科技部开始实施国家科技基础性工作专项计划,陆续启动了一批有基础、有特色的数据资源建设,同时还就数据共享中的若干技术问题委托WDC-D开展研究^[46-47]。

5.2 规划与体系

2001年在科技基础性工作专项中实施了重大滚动项目“中国地球科学数据中心完善与服务”,全面支撑了WDC-D的9个学科中心的建设,初步形成了由主体数据库、数据中心、网站构成的分布式地球科学数据共享运行服务体系。同年,科技部组织“科学数据共享调研组”完成了“国家科技基础数据库建设与发展的研究报告”,提出了《实施科学数据共享工程,增强国家科技创新能力》的建议和《科学数据工程发展规划》。2001年12月科技部会同中国气象局率先启动气象科学数据共享试点,从而在国家层面上翻开了科学数据共享新的一页。

2002年6月科技部提出把建立科学数据共享机制作为增强原始性创新能力的重要环节,并实施科学数据共享工程的战略部署^[48]。同年12月,科技部又启动8个科学数据共享试点,其中包括地学领域的中国地球系统科学数据共享试点和地震科学数据共享试点。2003年,作为首批科学数据共享工程3个数据网之一的“地球系统科学数据共享网”试点工作全面启动,隶属于中国科学院的WDC-D天文、空间、地球物理、冰川冻土、可再生资源与环境学科中心整体上加入地球系统科学数据共享网,开始探索研究分散科学数据共享机制、规范及技术。2005年科技部联合财政部设立国家科技基础条件平台建设专项,地球系统科学数据共享网作为“基础与前沿领域”的重要组成部分纳入平台体系建设。

5.3 推进与建设

2006年起,地球系统科学数据共享网进入全面建设阶段,遵循“共建、共享”的原则,组织国内40多家单位以及WDC-D、国际山地中心等国际组织机构共同参与,从用户需求、组织管理、数据资源、共享政策以及共享技术五方面开展研究与建设,建成“总中心—分中心—数据资源点”三级的跨部门、跨地区、跨学科、多层次、分布式的地球系统科学数据共享网络体系,并于2010年开展对外共享服务。同时,地球系统科学数据共享网创新性提出的多种数据共享服务模式,间接推动了国家“973”计划“资源环境领域项目数据汇交与管理暂行办法”的制定及落实,2008年科技部依托地理资源所建立“973”计划“资源环境领域项目数据汇交管理中心”,在国内率先开展项目数据的接收、保存、管理和服务工作,保存整理了一批宝贵的数据资源,并在地球系统科学数据共享网上对外发布共享。

5.4 运行与服务

2011年地球系统科学数据共享网成为首批通过科技部和财政部的认定的23家国家科技基础条件平台之一——国家地球系统科学数据共享平台,由地理资源所作为牵头单位持续开展地球系统科学数据共享服务工作。2019年2月,地理资源所主持的WDS-可再生资源与环境数据中心正式成为亚洲地学领域通过CoreTrustSeal认证的第一个世界数据中心。同年6月,国家地球系统科学数据共享平台通过科技部、财政部的平台优化调整认定,成为首批20个国家数据中心之一,即国家地球系统科学数据中心;同时,参与国家地球系统科学数据中心建设的原天文、空间、冰川冻土、青藏高原和极地5家分中心,在优化整合之后分别被遴选为相应的国家科学数据中心,此外还有地学领域的地震、气象、海洋、生态、对地观测等国家科学数据中心,地学数据共享从此进入新纪元。同年8月,依托国家地球系统科学数据中心,科技部正式建立“科技基础性工作专项项目数据汇交管理中心”,在持续推动科技计划项目数据汇交的同时,带动数据共享理念的传播,促进国家科学数据共享的发展。

6 重大技术突破与国家战略支撑

地理资源所坚持把握国家重大需求和技术前沿,在地理信息软件技术、空间数据库技术、城市与交通地理信息系统、灾害地理信息系统和海洋空间信息系统等方面具有开拓性工作,如1992年前就开始研制黄土高原资源清查与宏观规划、三北防护林典型地区防护林生态效益动态监测等软件系统,为国家地理信息产业发展、减灾救灾、城市与交通管理、国家海洋战略重大行动的信息保障等方面做出了巨大贡献。

6.1 地理信息软件与空间数据库技术

钟耳顺与宋关福等研制成功中国第一品牌、自主可控的国产GIS软件SuperMap,打破了国际垄断。SuperMap(2005)软件产品包括全组件式开发平台、网络平台、嵌入式开发平台、桌面系统、轻型软件、专业测量软件、专业土地管理软件和表单制作软件等系列产品。目前,超图公司已发展成为亚洲最大的地理信息系统软件厂商,国内市场份额排名第一,是国内唯一一家GIS平台软件上市公司。近年来又率先提出了跨平台GIS、云原生GIS、新一代三维GIS、大数据GIS、人工智能GIS等五大技术体系,并在2019年发布了集成五大技术体系的SuperMap GIS 10i版本,同时研究并编制了GIS基础软件技术序列图谱,在总结中国GIS基础软件近20年来技术发展的基础上,指明了GIS基础软件未来的技术发展方向,完成了《大数据地理信息系统原理、技术与应用》,从理论及应用上推动大数据GIS的发展。

针对中国空间信息基础设施建设与管理、电子政务等领域的高安全、高性能空间数据管理与处理的重大需求,陈荣国等成功研制出国内首款具有自主知识产权、企业级、跨平台、分布式、高安全的地理空间数据库管理系统软件平台BeyonDB,在分布式海量空间数据管理、多源无缝集成和跨平台空间数据库引擎三方面具有重要创新,支撑了多项国家级和行业级的重大应用,显著提高了中国地学空间信息系统软件的创新能力和中国空间数据管理与处理核心技术受制于人的被动局面,并为发展中国网格地理信息系统平台奠定了坚实的技术基础。

6.2 灾害地理信息系统研究

从1986年起,地理研究所推动了中国以遥感和地理信息系统为基础支撑的防灾减灾新技术体系的建立与推广应用,先后开展了江河洪水险情预报信息系统、防汛遥感应用试验、重大洪涝灾害监测评估系统、重大自然灾害遥感监测与评估、中国自然灾害危险度分区与评价等重大项目的研究。工作初期,以洪涝这一中国最为严重的自然灾害为突破口,在黄河中下游、黄河三角洲和洞庭湖堤垸区建立了包括淹没监测、避险撤退、河道洪水过程、湖泊冲淤分析等专题信息系统。同时联合水利部等单位开发了以机载合成孔径雷达为主体的洪水灾害(准)实时监测、实时传输、数据快速处理的“机—星—地”技术系统,第一次实现了对洪水灾害淹没情况的(准)实时监测。上述信息系统和洪水(准)实时监测系统的集成应用,开创了中国洪涝灾害遥感应急监测与评估的先河。

后期,兰恒星等对环境地质灾害地理信息系统模型进行了深入研究,创建了集成GIS的三维分布式环境地质灾害动力学过程模型及模拟工具体系,实现了崩塌和滑坡等典型地质灾害的动力学过程的准确计算和风险科学评估。模型在全球近40个国家的学术界和工程界得到成功应用,成为国际主流模型。在此基础上,面向国家防灾减灾的重大需求和川藏铁路等重大工程实际问题,完成了一系列应用研究,完成了芦山、玉树、舟曲、鲁甸等灾后恢复重建资源环境承载力评价等国家级专项规划4份,获得国务院批准执行,10余份科学研究报告被国家采纳实施。

联合行业研究机构 and 高校,针对森林草原火灾、病虫害、雪灾、地震、滑坡泥石流等灾害,围绕灾害现场信息快速获取、实时传输、灾情快速评估等减灾需求,研究开发了相应的技术系统,为中国后来全面推广建立自然灾害遥感监测评估应急系统打下了坚实的基础。针对多灾种综合研究,建立了具有(相对)精准空间定位与灾情属性的长时间序列的灾害数据库,开展了中国自然灾害危险程度分区与评价,为中国综合减灾与区域可持续发展战略规划服务。以上成果分别获得国家科技进步奖一等奖及省部级科技奖5次。

自然灾害信息系统的研究工作涌现了周成虎、闫国年、李满春、万庆、王劲峰、池天河、陈子丹、兰恒星、裴涛、陈德清、黄诗峰、刘舒、万洪涛等一批著名学者,开创了中国以遥感、地理信息系统为核心基础的自然灾害应急监测与评估技术系统研究方向,为中国建立现代化的防灾减灾技术体系做出了重大的贡献。

6.3 城市与交通地理信息系统

地理资源所是中国最早系统开展城市地理信息系统的研究单位,傅肃性、曹桂发、池天河、苏亚芳等在城市规划、城市生态、城市辐射和城市空间潜力等方面具有重要贡献。陆锋等则围绕城市交通系统数据表达方法、交通系统时空自相关与异质性刻画、交通网络健壮性建模、短时交通预测方法、多模式多标准动态导航算法、交通污染过程细粒度监测等开展了系统研究。系列研究成果先后获得2015年北京市科学技术一等奖、2016年湖北省科技进步一等奖、2017年地理信息科技进步一等奖、2018年福建省科技进步一等奖。

主要贡献包括:①提出了城市多模式动态路网空间数据模型,实现了多模式特征要素联通关系自动化处理与维护,大幅度提高系统的数据更新效率;②提出了多种海量低频机动车轨迹地图匹配模型,显著提升了精度及鲁棒性,为大范围实时服务奠定了技术基础;③研究了不同表达粒度对城市道路网络健壮性度量的影响,揭示了城市道路网络形态结构对交通流的作用特征;④将移动对象轨迹数据挖掘与自然语言处理方法引入,将交通系统要素关联关系挖掘过渡到因果关系挖掘,刻画了城市交通状态的空间异质性和时间非平稳性,填补了交通领域空间自相关分析空白;⑤顾及交通状况时序相关性、空间异质性、时间非平稳性,构建自适应的时空参数,提高了短时交通预测精度和泛化能力,提高了实时导航系统的可靠性;⑥实现了基于路网等级启发式策略的路径搜索算法、时间依赖的动态最优路径算法、多模式多标准动态路径规划算法等,为动态导航系统升级换代奠定了技术基础;⑦基于车辆网大数据和时空关联分析方法,实现了PM、SO₂、NO_x、VOCs等交通空气污染的协同计算和路段级监测。

6.4 海洋空间信息系统

1996年起,周成虎、邵全琴和苏奋振等先后承担了海洋渔业地理信息的研究项目,核心骨干有杜云艳、张甲申、王文字等。研究团队提出了海洋场对象的概念和描述方法、海洋数据组织结构与栅格分析方法、海洋渔场的案例分析等,发展了海洋渔业信息系统设计、构建和分析等体系方法,并联合张明金与季民等研发了东海和太平洋鱿鱼的海洋渔业地理信息系统。

2001年苏奋振首次提出以海洋过程为核心的海洋地理信息系统框架体系,发展了栅格场特征提取与关联系列分析方法,仇天宇构建了海洋栅格场组织模型,薛存金构建了海洋时空过程数据结构,并发展了时空过程异常与关联系列方法,杜云艳与易嘉伟等发展了涡旋提取系列方法,平博发展了大数据海洋场融合方法。以苏奋振提出的海洋过程为基础理论,与浙江大学刘仁义团队合作,组织研发了中国首套海洋地理信息系统软件。面向全球海洋渔业资源开发与拓展、中国海岸带综合管理、东海钓鱼岛综合信息需求、南海空间博弈与合作路径探寻、全球关键节点布设规划需求等,构建了系列国家重大战略应用系统,为中国海洋战略实施和海外利益保障提供了坚实的地理信息支撑。

针对区域博弈与合作,地理资源所采用空间分析技术和情景模拟手段,构建了岛礁区位价值、航道安全、历史演化情势等海洋战略空间分析模型,提出了国家重大工程建设与空间管控能力加强的系列建议得以实施;完成了中国第一套南海岛礁高精度遥感地貌图和第一套全南海油气平台分布图等,持续提供南海各岛礁他国侵占现势与动态分析报告,综合计算了岛礁生长速率,掌握了南海岛礁地理性质;构建了礁体形态描述模型和曲面变化计算模型,为国家相关工作奠定了关键科学技术基础。研究成果为国家决策和业务部门提供了上千次地理信息服务,被广泛应用。

6.5 无人机低空公共航路与组网监测

针对无人机应用带来的低空安全管控和低空空域资源有效利用问题,廖小罕等在国际上率先提出构建无人机低空公共航路网作积极管控和有序应用的方法和手段^[49],并率先形成了基于遥感数据和地理信息技术规划构建技术体系。初步成果及应用示范得到中国民用航空局认可并被纳入2019年5月颁布的《促进民用无人驾驶航空发展的指导意见》;获得IEEE立项支持构建一套基于低空航路的无人机运行低空结构化框架规范。在低空领域运用地理学方法构建无人机航路网,是地理学研究范畴的新突破,成为地理学研究新方向^[50]。

2019年习近平总书记提出加快无人机等科技在安全预警监测体系建设中的发展。面向无人机综合管理,地理资源所基于全息地球和云计算技术构建了“中科天网”无人机云端管控系统,并得到民航局认证和实现常态化运营;基于该系统发展了组网遥感观测技术,在2020年7月江西鄱阳湖抗洪减灾中发挥了重大作用。国家防汛抗旱总指挥部秘书长兼应急管理部副部长对团队开展抗洪减灾支撑工作给予了高度赞赏,肯定了无人机组网遥感监测技术在迅捷监测方面的优势。

7 地理信息科学展望

物联网、互联网、智能传感、大数据、人工智能和自动控制等现代技术迅猛发展,地理学和测绘学及其分支日渐深度融合,中国社会经济和科技事业的发展及全球命运共同体的建设等也对地理信息提出了新需求,地理信息科学的发展正迈入一个全新的时代。

智能传感器附着在移动于地球自然和社会空间中,从36000 km的高空到万米深的海洋,构建了针对地球各圈层的立体的、多角度的、多层次的、多要素的观测传感网络,快速、准确、细致地获取地球的高维动态信息;融入互联网、大数据、云计算、人工智能等技术,海量异构的实时动态信息有序进入人类构建的信息空间,进行高效、精准和按需的管理,正催生以数据驱动为特征的地球科学研究新范式发展,推动地球空间大数据理论方法体系构建,牵引自然和社会理解及决策生成迈向智能时代;融合现代通讯、万物互联和自动控制等技术,自然环境管理和社会运转的人力将被机器或装置所替代,地表管理和环境改变,以及人类社会物质、能量和信息流控制的无人化特征日益显现。

7.1 地学图谱与全息地图

陈述彭提出的地学信息图谱被学术界认为是独具东方思维特色的地理科学方法论,开启了地图知识挖掘和图形思维的尝试,丰富了现代地图学研究的时空分析理论与方法。2001年由陈述彭主编的《地学信息图谱探索研究》一书,在国内掀起了研究地学信息图谱的热潮。此后,基于地学信息图谱又陆续开展了黄土高原形态图谱、城市形态变迁图谱、贫困图谱、黄河变迁图谱和山地垂直带谱等研究。随着地球系统科学的发展与未来地球计划的推动,要求地学信息图谱不仅要反映地学现象的时空分布,而且要揭示地学现象的空间格局、演化过程,以及要素间的相互作用机制,要能够用于地理环境的过去重建、现状评估和未来预测。

全息地图是周成虎依据新的技术时代和社会运转形态提出的地图学全新理论,主要以全要素、全信息、全内容、全视角来开展制图对象的描述、表达、分析和服 务,在制图对象、制图主体、制图模式以及制图语言表达等方面发生变化。周成虎、闫国年等突破了传统地图学的局限,提升地图对地理空间格局、演化过程以及要素相互作用等地理规律的组织、管理、表达与分析能力,从而拓展地图的外延与内涵,增强地图作为地理学核心语言的支撑能力,引领地图学发展并提升地图学的学科地位。余卓渊等在此基础上进一步提出了全息高精度导航地图概念和理论模型,可应用于在无人驾驶。全息地图从理论、方法和技术实现原始创新,奠定了“羲和计划”的三大理论基础之一,研制的系统支持了APEC会议和中华人民共和国70周年阅兵保障任务等。通过传感器网络进行感知识别,并通过泛在网互联进行智能计算、信息处理和知识挖掘,全息地图将可实现人和人、人和物、物和物之间的任何时间、任何地点、任何人、任何物、使用任何设备之间的信息无缝链接与交互,实现对物理世界实时监测、管理和决策。

7.2 地学遥感与遥感智能

脱离地学的遥感难以突破对复杂地表系统的认知, 大规模遥感数据中获取有效信息与地理信息应用之间的鸿沟始终难以逾越。随着高分遥感时代的到来, 实现了对地表空间场景的精细化捕捉和快速高效的全覆盖更新, 通过微宏观相结合对复杂地表系统进行分层次解构, 综合地理分析与机器学习技术, 以实现遥感影像空间向地理信息空间的有序转化。需要从空间、时间和属性逐步实现对遥感影像视觉理解、定量反演与模式挖掘, 从而建立一套从定性到定量、人机协同的遥感大数据智能计算模型是未来发展目标。

当前智能遥感的两个主要途径, 一是基于地物空间分布的先验、辅助信息, 选择较少但具代表性的样本, 利用机器学习的方法; 二是伴随着训练数据不断扩大, 计算性能不断提升和网络结构的不断优化, 自动地从图像中学习地物的高级空间特征的深度学习方法, 解决地学遥感的智能化技术, 就需将遥感地学分析与AI技术紧密融合的智能遥感应用新模式。

传统研究是对已知地学问题进行的遥感求解。大数据时代的信息的挖掘与整合将实现对未知问题的发现与求解。地学遥感的发展涉及理论方法、技术平台开发、应用系统建设、产业化发展四位一体, 并贯穿海量遥感数据从处理、智能分析、长时序地表要素精确反演到共享应用的全链条组合。遥感大数据智能时代带来诸多挑战, 但也为遥感信息与多源异构数据相聚合, 实现地理大数据的挖掘与知识发现, 辅助智慧城市、生态文明、环境健康和灾害评估带来了更全面、深入的应用前景。

7.3 地理大数据与系统模拟

随着大数据时代的来临, 地理信息作为开展多学科综合研究的媒介, 成为现实, 地理系统的综合模拟拥有了地理信息这一横断学科的利器。地理信息系统过去的发展基于精确测量和采样数据, 缺乏面向大数据的处理和分析方法。因此, 未来地理信息的发展将更加关注新技术形态下的地理信息表达、综合模拟、虚拟再现和人地耦合研究。

在多元地理信息建模方面, 将基于对地理信息生成、传输、转化的机理认识, 建立地理大数据支持下的地理信息表达模型、定量评价模型、尺度转换模型、应用分析模型等, 将是地理信息科学在大数据和人工智能双轮驱动的结果。在智能化的地理系统综合模拟和分析方面, 将关注在地理智能理论与技术的推动下, 通过对相关专业领域的模型成果和建模知识(尤其是对专业模型正确理解和合理使用具有决定作用的专家经验及建模知识)进行计算机可识别的表达、集成和推理应用, 最终实现可根据复杂应用场景智能化实现地理建模, 高保真地实现地理系统综合模拟和分析。

地理系统的虚拟数字再现及交互方面, 将重点突破对多元地理要素、地理模式、地理过程以图层为基本单位的传统地图可视化方式, 基于虚拟地理环境与数字孪生技术, 从地理系统的角度对地理环境中复杂时空演化过程进行实时有效的数字再现及交互, 从而支持研究者对地理系统的准确理解和探索性分析。在地理大数据支持下的自然—人文过程耦合的虚拟地理实验方面, 将对未来地理学研究起到重要的支撑作用, 极大促进对地理系统中各地理要素及其相互作用的理解和模式发现。

7.4 地学数据共享与知识服务

科学数据的重要性已被国家和基层等充分认识, 在国家层面也得到了最高认可, 未来将充分发挥数据作为新型生产要素的价值, 在数据要素市场的传播和流通中, 把“珍珠串成项链”, 在保证数据安全的基础上开放共享和开发利用, 特别应当大力发展知识图谱驱动的共享服务, 关注并推进数据共享与知识服务的全球化、标准化、多样化、大数据化和公众社会化发展。

地学数据的学科交叉性、综合集成性、时空多源性、海量异构型等特点,使得数据密集型地学研究必须依赖于全球范围的多学科数据共享来为用户提供全球覆盖的数据服务和决策支持;标准化是全球化的基础,支持国际通用标准是将数据及其工具向全球推广的基础,按照国际通用的FAIR原则,更加关注数据全生命周期技术标准化,实现地学数据的安全、标准化共享;数据汇交和数据出版既是快速、持续汇聚科学数据资源的利器,又是有效保护数据版权、保障数据安全的重要手段,科技计划项目数据汇交、论文关联数据汇交、数据期刊出版、数据仓储出版、数据和论文联合出版等,逐渐成为大数据时代数据共享的一种创新模式。

围绕数据密集型科研的发展需求,地学数据共享在传统的静态提供数据共享的同时,应充分利用物联网、人工智能、区块链、云计算等先进技术构建“数据—模型—计算”一体化共享的科研信息化环境,采取动静结合的方式为跨区域、跨学科的现代地学协同研究提供更加全面的支撑。用户既是数据的使用者也是数据资源的提供者,通过建立数据资源可持续集成与共享机制,吸引和激励科学家个人或社会公众“贡献—共享—再利用”数据,形成“人人都是数据的提供者,人人都是数据的使用者”的健康、稳定地学数据共享服务环境。

随着地球系统科学的发展,数据资源类型越来越多,应用场景越来越复杂,将对现有数据收集、管理和挖掘再利用等共享关键技术提出新的机遇和挑战。在大数据时代,顺应国家科技创新和经济社会可持续发展需求,建设“产、学、研、用”相结合的地学数据智能化共享应用平台也势在必行。同时,数据驱动型科学研究的发展,强化了基于地学数据发现和挖掘知识、规律以及产生新科学问题的需求,“数据+知识”的共享服务模式逐渐成为主流趋势。

8 结语

80年来,地理资源所创建了地学信息图谱、全空间信息系统等原创新性理论,成为具有重大国际影响力的GIS理论研究中心;研制成功中国第一品牌、自主可控的国产GIS软件SuperMap和空间数据库系统软件,打破了国际垄断,成为中国GIS技术的创新战略高地;建成中国最具影响力的地球系统科学共享平台,成为首批国家科学数据中心;主持中国脱贫攻坚第三方评估的信息系统,开拓海洋空间信息新领域,支撑了国家重大战略,成为国家区域发展与全球战略的重要智库。

现实世界中的地理系统,因其动态性质和人类活动的目的性及其调节、控制能力等,惯常采用分要素或综合的描述方法开展研究,也曾尝试用严格的数理方程或计量方法开展研究,产生了理论地理学、计量地理学等分支或方向,试图实现对地理系统的整体研究。而地理信息系统科学与技术的发展却相对顺利与蓬勃,其利用计算机刻画地理系统,从结构或特征上对地理系统进行不同角度的抽象,以数字方式将客观地理系统映射到计算机信息世界中,并通过数字操作、计算、分析和可视化,探究地理特征和因果关系,推测过去与预测演化等,回答用户问题,提供人们认识地表或改造地表的知识或方案。

随着万物互联、大数据、人工智能与云计算时代的来临,地理信息科学与技术又一次迎来了发展和突破换代的新契机,为地理学研究提供了数据驱动发现知识的新范式研究平台,特别是为人地关系的综合研究和系统模拟研究提供了广阔的发展空间。

参考文献(References)

- [1] Editorial Group of Chronicles of Institute of Geography, CAS. History of the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS (1940-2000). Beijing: Science Press, 2016. [中国科学院地理研究所志编写小组. 中国科学院地理科学与资源研究所志(1940—2000年). 北京: 科学出版社, 2016.]
- [2] Chen Shupeng. The Exploration of Earth Science, Volume 2, Cartography. Beijing: Science Press, 1990. [陈述彭. 地学的探索(第二卷: 地图学). 北京: 科学出版社, 1990.]
- [3] Chen Shupeng. Challenges and opportunities cartography faces. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(1): 1-8. [陈述彭. 地图学面临的挑战与机遇. 地理学报, 1994, 49(1): 1-8.]
- [4] Chen Shupeng. Prospects of new map products. Journal of Geo-Information Science, 2005, 7(2): 8-10. [陈述彭. 新型地图产品前瞻. 地球信息科学学报, 2005, 7(2): 8-10.]
- [5] Liao Ke. Milestone of the development of Chinese modern cartography: The compilation and press of China national atlas. Journal of Geo-Information Science, 2001, 3(3): 7-12. [廖克. 中国现代地图学发展的里程碑: 中国国家地图集的编纂与出版. 地球信息科学学报, 2001, 3(3): 7-12.]
- [6] Wang Yingjie, Chen Yufen, Yu Zhuoyuan, et al. Principles and Methods of Adaptive Map Visualization. Beijing: Science Press, 2012. [王英杰, 陈毓芬, 余卓渊, 等. 自适应地图可视化原理与方法. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [7] Qi Qingwen, Jiang Lili, Zhang An. Discussion on the theoretic, methodological and technological system of digital map. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(6): 727-734. [齐清文, 姜莉莉, 张岸. 数字地图的研究进展和应用新方向. 地球信息科学学报, 2011, 13(6): 727-734.]
- [8] Li Jijun, Zhou Chenghu, Cheng Weiming, et al. The Atlas of Geomorphology of the People's Republic of China (1:1 million). Beijing: Science Press, 2009. [李吉均, 周成虎, 程维明, 等. 中华人民共和国地貌图集(1:100万). 北京: 科学出版社, 2009.]
- [9] Chen Shupeng. Remote Sensing Dictionary. Beijing: Science Press, 1990. [陈述彭. 遥感大辞典. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [10] Chen Shupeng, Zhao Yingshi. Remote Sensing Geoscience Analysis. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990. [陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1990.]
- [11] Zhou Chenghu, Luo Jiancheng, Yang Xiaomei, et al. Remote Sensing Image Geoscience Understanding and Analysis. Beijing: Science Press, 2000. [周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. 遥感影像地学理解与分析. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [12] Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14-37.
- [13] Fang H L, Baret F, Plummer S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 739-799.
- [14] Zhou, C H, Luo, J C, Yang, C J, et al. Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and RADARSAT imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66: 633-638.
- [15] Li, Z, Zhou, C H, Yang, X M, et al. Urban landscape extraction and analysis in the mega-city of China's coastal regions using high-resolution satellite imagery: A case of Shanghai, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 72: 140-150.
- [16] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 442-456.
- [17] Liu J Y, Tian H Q, Liu, M L, et al. China's changing landscape during the 1990s: Large-scale land transformations estimated with satellite data. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L02405. Doi: 10.1029/2004GL021649.
- [18] Su Fenzhen, et al. Marine Geographic Information System: Principles, Technology and Application. Beijing: Ocean Press, 2005. [苏奋振, 等. 海洋地理信息系统: 原理、技术与应用. 北京: 海洋出版社, 2005.]
- [19] Su Fenzhen, et al. Coastal Zone Remote Sensing Evaluation. Beijing: China Ocean Press, 2013. [苏奋振, 等. 海岸带遥感评估. 北京: 海洋出版社, 2013.]
- [20] Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. Research on Geographical Cellular Automata. Beijing: Science Press, 1999. [周成虎, 孙占利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [21] Liu Gaohuan, Liu Qingsheng, Ye Qinghua, et al. Monitoring ecosystem change and land resources utilization in the Yellow River Delta. Resources Science, 2006, 28(5): 171-175. [刘高焕, 刘庆生, 叶庆华, 等. 黄河三角洲土地利用动态监测与海岸带综合管理. 资源科学, 2006, 28(5): 171-175.]
- [22] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010,

- 24(1): 107-127.
- [23] Qin C, Zhu A X, Pei T, et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(4): 443-458.
- [24] Yue T X. *Surface Modeling: High Accuracy and High Speed Methods*. New York: CRC Press, 2011.
- [25] Zhu A X, Zhang G M, Wang W, et al. A citizen data-based approach to predictive mapping of spatial variation of natural phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(10): 1864-1886.
- [26] Pei T, Sobolevsky S, Ratti C, et al. A new insight into land use classification based on aggregated mobile phone data. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(9): 1988-2007.
- [27] Ge Y, Jin Y, Stein A, et al. Principles and methods of scaling geospatial Earth science data. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102897. Doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102897.
- [28] Zhou C H, Su F Z, Harvey F, et al. Spatial data handling in big data era//Select Papers from the 17th IGU Spatial Data Handling Symposium, Beijing, 2016.
- [29] Zhou C, Su F, Pei T, et al. COVID-19: Challenges to GIS with big data. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 77-87.
- [30] Song C, Pei T, Ma T, et al. Detecting arbitrarily shaped clusters in origin-destination flows using ant colony optimization. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(1): 134-154.
- [31] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors: Based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24: 107-127.
- [32] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [33] Wang J F, Stein A, Gao B B, et al. A review of spatial sampling. *Spatial Statistics*, 2012, 2: 1-14.
- [34] Zhu Axing, Lv Guonian, Zhou Chenghu, et al. Geographic similarity: Third law of geography? *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 673-679. [朱阿兴, 闫国年, 周成虎, 等. 地理相似性: 地理学的第三定律? *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 673-679.]
- [35] Ge Y, Wang J H, Heuvelink G B M. et al. Sampling design optimization of a wireless sensor network for monitoring ecohydrological processes in the Babao River basin, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29: 1, 92-110.
- [36] Du Y Y, Wu D, Liang F Y, et al. Major migration corridors of mesoscale ocean eddies in the South China Sea from 1992 to 2012. *Journal of Marine Systems*, 2016, 158: 173-181.
- [37] Duan Y Y, Lu F. Structural robustness of city road networks based on community. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, 41: 75-87.
- [38] Lu F, Liu K, Duan Y Y, et al. Modeling the heterogeneous traffic correlations in urban road systems using traffic-enhanced community detection approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 501: 227-237.
- [39] Lu Feng, Yu Li, Qiu Peiyuan. On geographic knowledge graph. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(6): 723-734. [陆锋, 余丽, 仇培元. 论地理知识图谱. *地球信息科学学报*, 2017, 19(6): 723-734.]
- [40] Yu L, Qiu P Y, Gao J L, et al. A knowledge-based filtering method for open geo-entity relations, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(2): 59. Doi: 10.3390/ijgi8020059.
- [41] Ma T, Sun S A, Fu G T, et al. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 650. Doi: 10.1038/s41467-020-14532-5.
- [42] Lin Hui, Lv Guonian, Song Zhiyao, et al. Study on modeling the tide wave system of east China sea with GIS. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(S1): 161-169. [林晖, 闫国年, 宋志尧, 等. 地理信息系统支持下东中国海潮波系统的模拟研究. *地理学报*, 1997, 52(S1): 161-169.]
- [43] Gong Jianhua, Lin Hui. *Virtual Geographical Environment: A Geographical Perspective of Online Virtual Reality*. Beijing: Higher Education Press, 2001. [龚建华, 林晖. 虚拟地理环境: 在线虚拟现实的地理学透视. 北京: 高等教育出版社, 2001.]
- [44] Sun Jiulin, Shi Huizhong. *Scientific Data Management and Sharing*. Beijing: China Science and Technology Press, 2002. [孙九林, 施慧中. 科学数据管理与共享. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.]
- [45] Sun Jiulin, Lin Hai. *Earth System Research and Scientific Data*. Beijing: Science Press, 2009. [孙九林, 林海. 地球系统研究与科学数据. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [46] Wang Juanle, Sun Jiulin. Review, reform and prospect analysis of world data center. *Advances in Earth Science*, 2009,

- 24(6): 612-620. [王卷乐, 孙九林. 世界数据中心(WDC)回顾、变革与展望. 地球科学进展, 2009, 24(6): 612-620.]
- [47] World Data Center China Center Coordination Office. World Data Center China Center and Earth System Science Data. Beijing: Science Press, 1995. [世界数据中心中国中心协调办公室. 世界数据中心中国中心与地球系统科学数据. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [48] Huang Dingcheng, Guo Zengyan. Research on Scientific Data Sharing Management. Beijing: China Science and Technology Press, 2002. [黄鼎成, 郭增艳. 科学数据共享管理研究. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.]
- [49] Liao Xiaohan, Xu Hao. Development and Application of UAV Operation Supervision Technology. Beijing: Science Press, 2020. [廖小罕, 许浩. 无人机运行监管技术发展与应用. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [50] Liao Xiaohan, Zhou Chenghu. Remote Sensing Development Report for Light and Small UAVs. Beijing: Science Press, 2016. [廖小罕, 周成虎. 轻小型无人机遥感发展报告. 北京: 科学出版社, 2016.]

Geographic information science development and technological application

ZHOU Chenghu^{1,2}, SUN Jiulin^{1,2}, SU Fenzhen^{1,2}, YANG Xiaomei^{1,2}, PEI Tao^{1,2}, GE Yong^{1,2},
YANG Yaping^{1,2}, ZHANG An^{1,2}, LIAO Xiaohan^{1,2}, LU Feng^{1,2}, GAO Xing^{1,2}, FU Dongjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences
and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study reviews the historical process of the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research of the Chinese Academy of Sciences in the field of geographic information science. From the early survey and cartography research, to the creation of China's geographic information discipline and the establishment of the State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, the development of the institute represents the history of (i) the development of original geographic information theory with Chinese characteristics, (ii) independent research and development of world-class geographic information software, and (iii) geographic information providing solid scientific and technological support for major national strategies. Generally, the development of geographic information discipline was summarized from the aspects of cartography, geoscience remote sensing, geographic information science, geodata sharing, major technological breakthroughs and national strategic support. Finally, from the perspectives of geoscience knowledge graphs, geographic big data analysis, remote sensing artificial intelligence, geographic system simulation and knowledge services, we look forward to the development of new scientific paradigms in geographic science.

Keywords: geographic information science; cartography, geoscience remote sensing; data sharing; geographic intelligence