

吴炳方,邢强. 遥感的科学推动作用与重点应用领域[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 751-762, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.07.0751.
[Wu Bingfang, Xing Qiang. Remote sensing roles on driving science and major applications[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 751-762, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.07.0751.]

遥感的科学推动作用与重点应用领域*

吴炳方, 邢强

(中国科学院遥感与数字地球研究所, 中国科学院数字地球重点实验室, 北京 100101)

摘要: 在调研国内外遥感案例的基础上, 论述了遥感在推动地球系统科学发展方面的作用, 及在我国的重点应用领域。遥感催生了全球变化研究, 使得人类得以从新的视角来探索地球上的生命未来; 遥感推动了地球科学从定性到定量、从描述到分析、从单站点到多时空尺度的变革, 诸多新兴交叉学科应运而生。遥感是应用驱动的, 一致性及可对比性是定量遥感的核心, 也是遥感深化应用的基础。遥感受用于众多领域, 但不同的国家基于各自的国情有不同的侧重点, 其中, 维护国家全球利益、灾害快速响应与灾后评估、第三方独立监督、保障国防安全是我国的应用重点。

关键词: 遥感; 全球变化; 地球科学; 全球利益; 国防安全

中图分类号: P23

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2015)07-0751-12

1 引言

遥感、对地观测作为20世纪60年代发展起来的一项重要空间探测技术, 已广泛应用于农业、气象、林业、环境、资源、生态、水利、海洋、大气、水文、灾害、全球变化等民用领域^[1~22], 以及情报侦查、导弹制导、战场监视、隐身等军用领域^[23~26]。世界各国都将遥感、对地观测技术作为国家层面的核心技术优先、重点发展, 如美国地球观测系统(Earth Observing System, EOS)计划的提出和实施带动了新一轮对地观测技术发展的浪潮, 21世纪初提出的地球科学事业(Earth Science Enterprise, ESE)战略计划着力于完成认识地球系统到预测地球系统未来变化的跨越, 主要回答地球系统是如何变化的, 以及地球系统的变化对地球上生命的后果是什么^[27]。欧洲的全球环境安全监测计划改名后为哥白尼计划, 预计发射27颗卫星, 实现环境与安全的实时动态监测, 对诸如自然灾害和人道主义危机等紧急状况作

出反应, 保证欧洲的可持续发展并提升国际竞争力^[28~31]。2006年中国启动了高分辨率对地观测系统重大专项, 计划在2020年前发射至少7颗卫星和其他观测平台, 形成时空协调、全天候、全天时的对地观测系统, 服务于国家经济建设和社会发展需要^[32, 33]。近年来, 美国和俄罗斯也陆续发布了最新的民用地球观测卫星计划, 旨在完善本国的卫星观测系统, 促进海量遥感数据服务于人类社会经济的科学可持续发展^[27]。国际科学联盟最近提出了“未来地球”研究计划(2014—2023年), 整合了现有四大国际研究计划(IGBP, IHDP, WCRP和DIVERSITAS), 成为应对全球环境变化、推动全球可持续发展的科学联盟, 重点围绕动态星球、全球发展和可持续性转变3个主题开展研究, 遥感作为获取全球信息的有力工具, 可以和大数据理念结合, 在其中扮演重要角色^[34~37]。

本文在充分调研国内外遥感实际应用案例的基础上, 从催生全球变化研究、推动空间地球信息科学

* 收稿日期: 2015-02-02; 修回日期: 2015-05-29.

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“空气动力学粗糙度多源数据协同反演模型研究”(编号: 41271424); 国家自然科学基金黑河流域生态—水文过程集成研究重大研究计划“干旱区陆表蒸散遥感估算的参数化方法研究”(编号: 91025007)资助。

作者简介: 吴炳方(1962—), 男, 江西玉县人, 研究员, 主要从事农业、水资源和生态遥感研究. E-mail: wubf@radi.ac.cn

形成、促进地球科学交叉学科出现、推动地球科学变革4个方面论述了遥感在推动地球系统科学发展方面的作用,从维护国家全球利益、灾害快速响应与灾后评估、第三方独立监督和保障国防安全4个方面论述了遥感在我国的重点应用领域,并指出了发挥遥感的能力需要克服的一些瓶颈问题。

2 遥感的科学推动作用

研究手段的出现与改变会催生新的学科产生。遥感作为获取全球像元尺度地表参数的新观测手段,催生了全球变化研究,与地球科学相互促进、共同发展,推动众多交叉学科的出现,并正在促成空间地球信息科学的形成。

2.1 遥感催生了全球变化研究

没有遥感就没有全球变化研究,中国遥感的奠基人陈述彭等^[2,3]曾经这样论述遥感和全球变化的关系。真正科学意义上的全球变化研究和对地球系统内外相互作用的整体认识是建立在空间对地观测、地球空间信息学和数字地球科学平台基础之上的^[4]。全球环境数据的获取是全球变化研究中的第一优先,遥感在全球变化研究中从过去的辅助手段变成主要手段,在某些专题研究中是唯一的手段,如全球尺度的土地覆盖及其变化的遥感监测研究,已从1990年代的全球1 km土地覆盖制图发展到300 m全球土地覆盖制图,近年中国和美国先后启动全球30 m的全球土地覆盖制图^[38~42];美国MODIS数据共有44种标准的长时间系列的数据产品,成为全球变化研究的重要数据源^[43,44];利用GPM全球降水测量平台组成的对地观测星座,实现对全球范围内每3个小时的降雨、降雪进行实时的观测和记录,分辨率提高到9 km^[45,46];利用AMSR-E, SMOS和SMAP主被动微波遥感数据可以开展全球地表表层5 cm,深度10~40 km尺度土壤湿度变化监测研究^[47~49],从而提高对全球气候变化、全球水循环、水资源管理与天气预报的认识^[18]。利用GMS-5和FY2静止气象卫星上地球辐射计的光学和热红外遥感信息,可获得地面吸收的太阳辐射能量,并进一步区分感热和潜热,从而构建地球能量收支模型,分析地球能量和水分收支状况^[50,51]。臭氧、CO₂、CH₄等大气痕量气体在全球变化中起着不可忽视的作用,卫星上的臭氧总量制图光谱仪自1978年开始对大气中臭氧进行卫星观测,积累了长期的卫星观测数据,分析臭氧的衰减规律;利用卫星上搭载的温室气体干涉监测仪,可提供全球大气中

的CO₂、N₂O、CH₄和CFCs等温室气体的遥感监测数据^[52]。

遥感在IPCC全球气候变化评估报告中的分量不断增加,目前已广泛应用于冰川变化、土壤湿度、气溶胶光学厚度、蒸散发、天气事件、降雨、温室气体含量、污染气体含量等参数的评估^[50]。基于我国目前全球变化科学卫星的观测能力比较薄弱以及我国全球变化研究的重大需求,同时考虑大气、陆地、海洋和人类活动等全球环境变化研究中各自关键因子的优先性和重要性,郭华东等^[53]提出了全球变化系列科学卫星构想方案,包括大气碳卫星、森林生物量卫星、夜间光卫星、气溶胶卫星、冰川卫星、海洋盐度卫星、全球变化月基对地观测系统7颗卫星,对于解决全球环境变化重大科学问题至关重要。

2.2 遥感与地球科学的相互促进

随着世界范围内遥感、对地观测技术的迅猛发展,已经使得传统地球科学对于地球上的时间和空间尺度认知发生了巨大的变化,促进地球科学对遥感进行重新定位和思考,遥感不仅仅为传统地球科学提供了辅助信息,实际上其本身也为重新观测地球表面提供了一种新视角和新手段,不能始终一味地从传统学科的角度来认知遥感,遥感有其自身的方法论和科学范式,这种认知过程的转变本身就体现了遥感推动地球科学的变革。

遥感获取的地表空气动力学粗糙度、感热、辐射、土壤热和潜热通量等辐射与能量参数,为区域或全球陆面过程模式研究、流域水资源规划管理、能量平衡研究提供了极其重要的数据支撑,并促进这些学科研究方法论的变革^[54~62]。利用LandSat,ASTER多光谱卫星数据开展冰川面积变化监测,利用航天飞机、星载干涉雷达与星载激光雷达、ASTER光学立体像对技术获取冰面现状高程,结合早期航空摄影地形图技术得到的DEM,开展冰量变化监测,极大地提升了依靠传统冰面调查为主要手段的冰圈科学的研究能力,为研究气候变化响应、海平面上升及其影响提供了重要甚至唯一的研究手段^[63]。利用中国风云系列、美国NOAA系列、欧洲METEOSAT系列气象卫星可以开展大气温湿廓线、云特性、气溶胶特性、降水反演和云迹风生成等方面的研究,由气象卫星遥感获取的地球大气信息已经广泛应用于大气科学的多个领域,在灾害性天气监测中发挥了重要作用。未来随着气象遥感仪器各项指标的进一步提升,如何利用这些气象遥感资料反演出可靠的各种大气和环境参数,并将其应用于天

气分析、数值天气预报等领域将是未来气象卫星遥感应用的重要研究方向^[64-66]。

利用雷达高度计可以反演全球大地水准面、重力场、海表面地形、海流、海浪、潮汐、海表面风等动力参数信息,还可获得海冰含量、湍流边界等海洋信息。中国 HY-2 卫星雷达高度计海面高度反演产品精度达到 5~8 cm,有效波高精度可达 0.4 m,风速精度 2 m/s;利用微波散射计可以反演 25 km 尺度全球 90% 海洋表面每天的风速、风向等风场信息, HY-2 微波散射计风速测量精度达到 1.5 m/s,风向精度 19.5°;利用微波辐射计可以反演大气垂直温度分布、大气垂直湿度分布、大气水汽含量、降雨量和海面温度等全球性空间气象和海洋资料。HY-2 微波辐射计对海面温度的观测精度达到 1.0 K,海面风速精度 1.5 m/s,水汽含量精度 1.2 mm^[67]。利用全球每天 1 km SPOT VEGETATION、全球每天 300 m、每 5 天 100 m PROBA-V、全球每天 250 m MODIS 数据开展从像元、生态系统到全球尺度的植被及其变化动态监测等,都是遥感促进地球系统科学研究手段变革的典型实例^[68-75]。

与此同时,传统地球科学学科的发展也对遥感不断提出新的要求,使得遥感卫星计划的概念设计不断优化,应用目标更加明确,从而促进遥感朝着一体化、全链路方向不断发展^[76]。例如,为了实现全球植被生长更加有效的动态监测,不仅需要载荷构成、重访周期、空间分辨率与幅宽、时间分辨率、星座飞行组网方式等卫星系统总体指标进行不断地优化设计和可行性协同论证,还要对后期的卫星数据接收、定标和处理、分发和备份、应用服务及其产业化全链路流程进行一体化设计,使得所发展的遥感卫星更加紧密的结合实际的应用需求,从而最大程度的发挥遥感的作用。

2.3 遥感推动众多交叉学科的出现

学科的交叉融合是原始创新的源泉,是催生新学科的重要成因^[77]。遥感、对地观测领域经过 50 多年发展,其应用已经渗透到地球科学、信息科学、空间科学的各个分支中。

遥感与气象学、生态学、地理学、环境科学等诸多学科的深度交叉,提供了大气、陆地、海洋等地球不同圈层复杂多变的物理、化学、生物学信息,刻画多尺度空间异质性和长时间动态变化过程,推动了这些学科从定性到定量、从描述到分析、从单一站点到多时空像元尺度观测的变革,气象遥感、生态遥感、环境遥感、流域遥感、农业遥感等诸多新兴的交

叉学科应运而生,不同的交叉学科有明确的研究对象和不同的研究方法,而且在信息提取、分析和应用方面有各自的独特性。

生态遥感是以生态系统为对象的遥感,是生态与遥感的交叉学科,一方面为生态系统研究与管理提供具有生态学意义的生态参量,即综合利用多平台、多传感器、多时相卫星遥感数据源和地面观测数据,通过遥感反演、数据同化和尺度转换获得时间上连续、空间尺度一致的生态参量;另一方面以这些生态参量为基础,与生态模型相结合,发展了许多新的生态系统监测、评估与管理方法,促使了生态遥感学科的形成。

农业遥感是农业和遥感的交叉学科,是遥感最早出现的交叉学科,研究内容涵盖农业资源与基础设施调查、农作物估产与农情监测、农业灾害监测与损失评估、精准农业生产等。农业遥感提供了众多定量的农业信息,而且有许多信息是原来没有或者非常缺乏的。作物种植面积估算、单产预测、长势监测和旱情监测是农情遥感监测中最主要的 4 个主题。长势监测使得农情监测具备了短期预测的功能,可以提前预测粮食生产形势,这是农情遥感监测的最大优势,也是有别于传统农业统计的关键所在。利用遥感监测长势的另一个优点是具有全局性,避免了地面调查以点代面、以偏盖全的现象。旱灾是影响农业生产最主要的农业灾害,而遥感是旱情监测最为有效的手段,尽管在监测作物长势中,能对旱情的影响有所反映,但旱情的监测仍然有其独特的地方,在作物不同生长阶段对作物产量的影响有所不同^[78]。利用遥感还可以制定作物播种、精准灌溉、作物施肥、收割等系列农耕活动的计划,了解收成。

2.4 遥感正在促成空间地球信息科学

多时空尺度的卫星遥感信息为地球系统科学研究提供了海量数据信息源泉和研究新手段,催生以阐明人地系统、全球变化、区域可持续发展中的物质流、能量流与信息流的全过程及其时空分布与变化规律为核心内容的空间地球信息科学的产生,通过对地球系统多圈层信息流的获取、传输、处理、分析、响应与反馈机制的深入研究,揭示复杂、开放的地球巨系统各圈层的相互作用与影响规律,从而全面提升人类对人口、资源、环境等重大问题做出科学系统分析、评估与预测^[79-80]。多源、立体协同遥观测的优点在于融合多平台、多尺度观测,全方位的获取空间信息,形成从空间平台对地球和环境的综合观

测能力,以满足全球空间信息研究中整体精确性、时空一致性和动态特征分析以及相关模型模式发展的科学需要,加深对地球系统和环境的理解,空间地球信息科学渐露雏形。

空间地球信息科学是一门综合性极强的新学科,涉及对地观测领域中的遥感、地理信息系统、导航等学科,地球科学领域中的大气、海洋、地理和地质等学科以及生态、环境、健康领域的诸多学科。空间地球信息科学理论就是研究地球空间数据的获取与聚合方法、表征模型、信息提取与知识发现机理。具体来说是指:包括对地观测数据在内的空间数据获取的机理模型、聚合模型与方法,包括图谱认知、稀疏表征、数据融合在内的数据表征理论,空间数据的分析模型与理论,以及数字地球中的信息流模型与信息场理论。将地球空间数据、地学高性能计算、地球要素表达和呈现等系统进行有机集成,构建数字地球科学平台系统,形成地球空间信息科学研究的基础数据管理、计算、服务和工具系统环境,建立完善空间地球信息科学理论体系,形成空间信息产品^[35,81]。

发展空间地球信息科学,建立我国自主对地观测体系,搭建从自主数据到自主信息服务的全产业链,推进我国空间地球信息科学快速发展,形成新时期空间地球信息产业群^[35,81]。

3 遥感的重点应用领域

遥感的应用领域非常之广,分门别类地分析很难做到面面俱到,本节从我国国情出发,分析遥感在我国的重点应用领域。维护国家的全球利益、灾害快速响应及灾后评估、第三方监督和保障国家安全是遥感的4个重点应用领域。

3.1 遥感有利于维护国家的全球利益

获取全球信息只能利用遥感^[82,83]。进入21世纪以来,经济全球化进程进一步加快,经济外交成为国际外交的核心。我国是后发展国家,历史上没有殖民地,与其他国家联系薄弱,在国际上的软实力影响较低,如今随着综合国力的提升,我国的国家利益已遍布全球。通过遥感进行全球资源动态监测,把握现势资料,充分利用国内国际2个市场、2种资源已成为主要策略。利用遥感开展全球粮食估产,对于提高全球粮食市场透明度,稳定国际粮价,维护国家粮食安全、贸易水平和经济利益起到重要有力支撑。美国利用遥感进行全球估产已有20余年历史,旨在提供可靠的全球农业产量信息,为全球粮食市

场提供信息服务^[82]。我国2013年进口农产品总价值1万亿元,其中从美国、巴西和阿根廷3个国家进口的大豆高达5000万t,价值2000亿元,利用遥感监测这3个国家的大豆产量,可以选择进口时机和进口国别,以便以有利的价格进口大豆。还可以利用遥感分析世界上的后备耕地资源和禀赋,为我国开发全球土地资源、推动进口来源国的竞争提供信息保障,以维护国家利益^[11,84,85]。通过遥感开展碳排放气体浓度和定量化的碳收支监测,为国际碳交易市场、政府间碳排放谈判提供重要基础数据^[86,87];利用遥感开展跨国流域的水资源监测有利于保障跨流域国家的水资源得到科学有效利用^[59,88,89]。在地质找矿领域,利用遥感技术可以对工作区的控矿因素、找矿标志及矿床的成矿规律进行研究,确定疑似靶区,同时紧密结合野外地质工作,实现准确找矿,如美国德克萨斯石油公司、皇家荷兰/石油壳牌公司也都有庞大的遥感队伍,专门为石油资源的寻找提供遥感支撑和信息服务,从而确保国家的石油资源得到有效开发、利用^[90,91]。中国神华地质勘查有限责任公司也利用遥感在蒙古国南戈壁省、印度尼西亚西伊里安查亚省宾图尼市找到了煤矿^[92]。

3.2 遥感具备灾害快速响应及灾后评估能力

当突发性自然灾害大面积发生时,航空遥感可以利用其机动灵活性,遥感卫星通过紧急编程、调整成像方式来实现对灾区的及时成像,将灾区的最新信息第一时间报送决策部门。

当前,全球面临多种自然灾害的威胁。在诸如地震、海啸、台风、旱灾、火灾、洪水等灾害应急响应中,遥感短期内可开展灾情快速监测、灾害全面评估以及灾害救援部署,长时间序列上可开展灾后重建科学规划、农田、生态环境恢复监测等工作,有效服务于政府决策^[93~98]。如在中国2008年汶川地震的抗震救灾工作中,中国利用航空遥感飞机获取的高分辨率数据和QuickBird, Ikonos, RapidEye, WorldView-2, RadarSat-2, TerraSAR等一系列航天光学与微波遥感数据及时对地震灾区进行道路交通、房屋和农田损毁、地质次生灾害等专题信息的监测,形成多期灾情专报,报送抗震救灾指挥部,确保及时科学施救^[99,100]。在汶川地震5周年之际,中国科学院再次利用航空遥感飞机队灾区进行飞行,获取灾后图像数据,来对灾区5年来的建设和农田、生态环境恢复进行监测评估,以确保灾区人民的生存环境得到改善^[101,102]。在2013年澳大利亚新南威尔士发生

严重山林火灾之际,中国科学院遥感与数字地球研究所迅速启动应急响应机制,以最快速度获取了火灾前后的国内外卫星数据,组织科研人员进行解译、评估,对火灾主要集中区域的火情走势、受灾面积、可疑火灾隐患等情况进行了持续的监测,为灾情监测、评估和灾后重建提供了重要信息^[103]。在1998年长江洪水灾害中,我国利用航天雷达影像和气象卫星、航空遥感影像对紧急水情、淹没面积进行了监测,为国家有关部门提供了重要科学数据^[104]。西班牙利用C波段多极化、多入射角ENVISAT ASAR影像对其西南部的湿地洪灾进行了有效监测^[105]。从20世纪80年代至今,遥感应用研究人员利用NOAA AVHRR,MODIS,TRMM和SPOT VEGETATION对全球火灾进行了监测,为政府部门提供了及时有效的火灾灾情信息^[106]。

3.3 遥感可以发挥第三方监督作用

遥感能够为客观评估各级政府落实国家各项宏观政策的效果和力度提供强有力的技术手段。当前,耕地红线、水资源红线、生态红线等是国家实施生态文明和美丽中国战略的重要举措,可以通过遥感在红线监测和评估方面发挥第三方监督作用。如利用遥感监测国家耕地资源、森林资源在质和量两方面的动态变化,监测水资源的消耗状况^[107-109]。在重大生态工程方面,遥感已经对包括三峡工程在内的多种国家大型水利工程在不同建设阶段、不同蓄水深度的生态与环境的影响开展全过程跟踪监测,及时预警预报,还监测了三北防护林、退耕还林、退耕还草、退耕还水等工程、政策的实施效果^[110,111]。在城市化进程、公安、公共健康、社会管理等领域,遥感都可以发挥第三方监督作用。利用遥感可以监测城市违规建筑,中国利用国产高分辨率遥感卫星数据结合GIS和GPS在北京六环以内建立了北京市违规建筑卫星监控系统,实现每个季度对违规建筑的监视和查处,为市政管理和规划部门提供了有力的技术保障^[112]。利用遥感可以发现毒品原种植疑点,有效提供监测的效率和准确性,降低一线民警的劳动强度,为国家主管部门提供一手的真实信息,防止瞒报虚报情况的发生^[113,114]。利用遥感还可以核定各省市种粮面积,为地方县市粮食补贴各项政策的制定提供有力依据^[115]。由此可见,遥感作为第三方客观有效的监督技术,可以切实为各级人民政府制定政策提供依据。

3.4 遥感是保障国防安全的基础

遥感起源于军事应用,通过遥感进行军事情报

收集、导弹预警、制导,有利于提升军事斗争信息化水平,实现“能打仗,打胜仗”的目标。据报道,目前世界上70%以上的军事情报信息都来自遥感^[23]。根据查阅到的公开报道,以美国为例,美国发射的锁眼系列(Key Hole)军用侦察卫星(1960-)其分辨率从1960年代最初的6 m提高到KH-42的0.1 m,并携带红外传感器^[116];军用雷达卫星长曲棍球系列(Lacrosse)最高空间分辨率为0.3 m^[117,118]。美国国防部国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency,NGA,其前身是美国国家影像与制图局(The National Imagery and Mapping Agency,NI-MA))其未来重点研究方向之一便是实现实时数据生成、处理和分发,缩短地理空间情报生成和分发的等待时间,提高地理空间情报的及时性^[26,119]。该机构有3000多人从事遥感专业,致力于让士兵在战场上近实时获取周边地区信息,最初是3小时,后续提高到1小时至15分钟^[25,120]。美国正在发展的“天基雷达”计划将于2020年前在太空部署20颗SAR卫星,组成天基雷达星座,提高星载合成孔径雷达的侦察能力。美国伊拉克战争的迅捷胜利以信息主导、精确打击、空地一体、快速机动等为特征,遥感空间信息的快速获取、处理、传输、分析以及快速决策能力起着核心和关键作用^[118]。通过遥感获取的全球范围内的云量、大气能见度、前海水色和能见度、海底水深、地形图等各种军事情报资料都是战备不可忽视的组成部分。遥感技术除了用于直接的军事侦察以外,还可用于导弹发射预警与制导^[121]。此外,太空安全也是未来国防安全的重要组成部分,遥感在太空安全方面也可以发挥重要作用,载人航天、探月工程、未来空间站计划、行星探测计划上都装有遥感探测器,来对月球、火星、太阳系、银河系等进行深空探测,为人类和平利用太空、维护我国的太空安全提供重要保障^[122]。

4 讨论

遥感的能力与作用,可以划分为推动科学发展和服务社会需求2个方面。

作为一项新型的全球观测手段,遥感直接催生了全球变化研究,使得人类可以将自己的目光放到数百、数千乃至数万公里的地球轨道,以新的视角来探索地球上的生命未来。遥感为全球变化研究提供全球覆盖、长时间序列、周期性、同步观测、量化的物理、化学、生物学的科学数据。遥感信息的参与为刻画陆地和大气相互作用的水循环、碳循环等生物

圈模型注入了新的活力,为解决全球环境的温室效应、臭氧层破坏、森林锐减、生物多样性破坏、土地退化、水资源短缺等系列全球性问题提供了新的思路和方法。

遥感与众多学科的结合形成了很多交叉学科,这些交叉学科长时期被看作是遥感的应用领域,实质上却是独立的交叉学科,有自身的学科内涵、研究对象、研究内容和需要解决的问题,而且不同的交叉学科有自身的方法论和独特性。如在农业遥感、水资源管理、生态系统的管理和保护方面有很多新的独特的方法^[123]。遥感与各学科交融与渗透的精细程度已经超出我们的想象。不是简单的遥感应用所能包含的,需要从交叉学科的角度给予更多的研究与凝练。

全球综合地球观测系统10年执行计划明确的遥感9个社会受益领域包括灾害、健康、能源、气候、水资源、天气、生态系统、农业和生物多样性^[124]。但不同的国家,基于不同的发展阶段和国情要求,在受益领域方面各有侧重点。在我国,灾害的快速应急响应、国家政策实施效果的第三方独立监督、维护国家的全球利益以及保障国防安全等属于当前的满足国家战略需求的主要应用领域,这是由我国国情决定的。

量化是遥感的核心,是遥感的基础。无论是科学发展还是服务社会受益领域,都要求量化遥感,而且随着需求的深化,对量化的要求越来越高。遥感量化包括几何、辐射、时间3个方面的量化。量化的特征是一致性和可对比性。高质量的对地观测数据需要满足一致性和可对比性的要求,否则变化检测、第三方监督无从说起;量化遥感应充分考虑传感器的一致性、几何和辐射特性、不同系列传感器数据间的互补性,从而最大限度地降低数据的不确定性。即便是NDVI数据,来自AVHRR、MODIS和SPOT VGT观测得到的NDVI仍存在差别,必须通过重叠观测、交叉定标来实现数据间的一致性。即便同一系列的传感器,也需要进行数据一致性分析和订正,如AVHRR和VGT数据。美国NOAA卫星上搭载的AVHRR系列传感器,其数据需要通过大气和传感器定标来去除非目标引起的信号异常,来确保AVHRR系列数据在长时间序列上的一致性和可对比性^[125]。与此类似,SPOT4、SPOT5、PROBA-V卫星上搭载的VGT传感器系列,相互之间也均通过保持一定的重复观测时间段来进行一致性定标,从而才能用于全球变化的量化分

析^[126]。目前这种量化遥感的核心问题国内还关注不够,期望我国的遥感也能从粗放式向精细化,从“看图识字”走向量化、精细化的综合分析。

遥感也有局限性。遥感主要利用的是光谱信息,不论分辨率是多少,像元仍然是其基本特征,应用过程中仍然面临诸如时间频度、空间尺度、云雾影响、识别不确定、参数反演精度等问题。这也是遥感不同于传统地球学科的地方,传统学科不能从传统学科的角度去理解和要求遥感。遥感能做什么,能做到什么程度,有其自身的能力、特点和局限。

5 结 语

综上所述,遥感不仅催生了全球变化研究,在推动地球科学发展和交叉学科的出现方面发挥了重要的作用,而且在维护国防安全和全球利益、面对灾害快速响应与灾后评估、第三方客观监督方面具有重要的服务价值,能够为各国和全球的可持续发展战略提供重要指导和咨询建议。以一致性和可对比性为特征的量化是遥感的基础,否则变化检测、第三方监督无从说起。

致 谢:感谢联合国粮农组织原副总干事何昌垂先生,中国科学院遥感与数字地球研究所张磊研究员、蒙继华研究员、曾红伟博士、张森博士、赵旦博士在本文成稿和修改过程中提供的宝贵意见和建议。

参考文献(References):

- [1] Leese J A. Remote sensing applications in the meteorology and operational hydrology programmes of WMO [J]. *Advances in Space Research*, 1987, 7(3): 49-57.
- [2] Chen Shupeng, Zeng Shan. Earth system science and Geo-informatics [J]. *Geographical Research*, 1996, 15(2): 1-11. [陈述彭, 曾杉. 地球系统科学与地球信息科学 [J]. 地理研究, 1996, 15(2): 1-11.]
- [3] Chen Shupeng, Shao Yubin. Global change and Geo-information System [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(Suppl.): 15-25. [陈述彭, 邵宇宾. 全球变化研究与地理信息系统 [J]. 地理学报, 1996, 51(增刊): 15-25.]
- [4] Gan Zhaoping. Remote sensing technology creates Digital Earth—An interview with Tong Qingxi, Academician of Chinese Academy of Sciences [J]. *Science Technology Innovations and Brands*, 2013, 8: 10-13. [甘招萍. 遥感技术造就数字地球——访中国科学院院士童庆禧 [J]. 科技创新与品牌, 2013, 8: 10-13.]
- [5] Feng Yun, Gao Feng, Sun Chengquan. Application of remote sensing technology in studies of global change [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2001, 16(4): 237-241. [冯筠,

- 高峰,孙成权. 遥感技术在全球变化研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(4): 237-241.]
- [6] Wang Changyao, Bu Heosier, Di Xiaochun. Application of remote sensing to global environment change research in China[J]. *Advances in Earth Science*, 1998, 13(3): 278-284. [王长耀, 布和敖斯尔, 狄小春. 遥感技术在全球环境变化研究中的作用[J]. 地球科学进展, 1998, 13(3): 278-284.]
- [7] Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, et al. Satellite-derived increases in net primary productivity across North America[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1 982-1 998.
- [8] Murphy R J, Underwood A J, Tolhurst T J, et al. Field-based remote sensing for experimental intertidal ecology: Case studies using hyperspatial and hyperspectral data for New South Wales (Australia) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3 353-3 365.
- [9] Harris A, Bryant R G. A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern peat land hydrology: Present possibilities and future challenges [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2 178-2 188.
- [10] White M A, de Beurs K, Didan K, et al. Intercomparison, interpretation and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15: 2 335-2 359.
- [11] Wu Bingfang, Meng Jihua, Li Qiangzi, et al. Latest development of "CropWatch"—An global crop monitoring system with remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(10): 1 013-1 022. [吴炳方, 蒙继华, 李强子, 等. "全球农情遥感速报系统(CropWatch)"新进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1 013-1 022.]
- [12] Wu Bingfang, Lu Shanlong. Watershed remote sensing: Methodology and a paradigm in Hai Basin [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 201-223. [吴炳方, 卢善龙. 流域遥感方法与实践[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 201-223.]
- [13] Tan Qulin, Hu Jiping. The use of imaging radars for ecological applications [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(3): 375-380. [谭衢霖, 胡吉平. 成像雷达遥感的生态学应用[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(3): 375-380.]
- [14] Yue Yuemin, Wang Kelin, Zhang Bing, et al. Applications of hyperspectral remote sensing in ecosystem: A review [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(4): 471-478. [岳跃民, 王克林, 张兵, 等. 高光谱遥感在生态系统研究中的应用进展[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 471-478.]
- [15] Lu Jingxuan. Review on 30 years' achievement of remote sensing application in water resources [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2008, 6(3): 224-230. [路京选. 水利遥感应用技术研究进展回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(3): 224-230.]
- [16] Li Jiren. Remote sensing applications in water conservancy field [J]. *Satellite Application*, 2012, 1: 61-64. [李纪人. 遥感在水利行业中的应用[J]. 卫星应用, 2012, 1: 61-64.]
- [17] Liang Hongyou, Gu Xingfa, Yu Tao. Analysis of the applications and demands of civil aeronautics remote sensing in coal industry of China [J]. *Coal Science and Technology*, 2007, 35(4): 104-107. [梁洪有, 顾行发, 余涛. 民用航天遥感在我国煤炭行业的应用与需求分析[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(4): 104-107.]
- [18] Sahoo A K, Pan M, Troy T J, et al. Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1 850-1 865.
- [19] Brown M E, Beurs K M, Marshall M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 174-183.
- [20] Aurin D A, Dierssen H M. Advantages and limitations of ocean color remote sensing in CDOM-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 181-197.
- [21] Chen J, Cui T, Ishizaka J, et al. A neural network model for remote sensing of diffuse attenuation coefficient in global oceanic and coastal waters: Exemplifying the applicability of the model to the coastal regions in Eastern China Seas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148: 168-177.
- [22] Luft L, Neumann C, Freude M, et al. Hyperspectral modeling of ecological indicators—A new approach for monitoring former military training areas [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 264-285.
- [23] Zhang Wanzeng. The current situation and development trend of the space-borne military remote sensing technology and equipment [J]. *Aerospace China*, 1992, 11: 20-22. [张万增. 航天军事遥感技术和设备的现状及发展趋势[J]. 中国航天, 1992, 11: 20-22.]
- [24] Chen Shengzhe, Chen Biao. Application of infrared technology in military [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Suppl.): 581-586. [陈胜哲, 陈彪. 红外技术在军事上的应用[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 581-586.]
- [25] Li Xin. The major research directions of American geospatial intelligence (GEOINT) [J]. *Abstracts of Surveying and Mapping*, 2008, 1: 1-5. [李欣. 美国地理空间情报(GEOINT)未来重点研究方向[J]. 测绘文摘, 2008, 1: 1-5.]
- [26] Sun Bijiao, Li Xin. A survey of the international cooperation of American National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) [J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2011, 13(4): 51-54. [孙碧娇, 李欣. 美国国家地理空间情报局(NGA)国际合作概况及启示[J]. 测绘技术装备, 2011, 13(4): 51-54.]
- [27] John P H. National strategy for civil Earth observations [EB/OL]. Wahington DC: Executive Office of the President and National Science and Technology Council, 2013 [2014-11-20]. <http://www.docin.com/p-716248923.html>.
- [28] Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, et al. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 37-57.
- [29] Drusch M, Bello U D, Carlier S, et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 25-36.

- [30] Giannopapa C. Securing Galileo's and GMES's place in European policy [J]. *Space Policy*, 2012, 28: 270-282.
- [31] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24.
- [32] Li Deren, Tong Qingxi, Li Rongxing, et al. Current issues in high-resolution Earth observation technology [J]. *Science in China (Series D)*, 2012, 42(6): 805-813. [李德仁, 童庆禧, 李荣兴, 等. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题 [J]. 中国科学: D 辑, 2012, 42(6): 805-813.]
- [33] Ge Bangjun, Qin Ying. High resolution earth observation system and its applications [J]. *Satellite Application*, 2012, 5: 24-28. [葛榜军, 靳颖. 高分辨率对地观测系统及应用 [J]. 卫星应用, 2012, 5: 24-28.]
- [34] Chen Yiyu. Future research trends of IGBP [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(1): 15-17. [陈宜瑜. IGBP 未来发展方向 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 15-17.]
- [35] Guo Huadong, Wang Lizhe, Chen Fang, et al. Scientific big data and digital Earth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59: 1 047-1 054. [郭华东, 王力哲, 陈方, 等. 科学大数据与数字地球 [J]. 科学通报, 2014, 59: 1 047-1 054.]
- [36] Chen Jun. The Speech on the Eighth Geographic Academic Forum for Graduate Students over Beijing District [EB/OL]. (2014-10-21) <http://news.3news.net/2014/0429/29991.html>. [陈军. 第八届京区地理学研究生学术论坛演讲稿 [EB/OL]. (2014-10-21) <http://news.3news.net/2014/0429/29991.html>.]
- [37] Wu Guoxiong, Lin Hai, Zou Xiaolei, et al. Research on global climate change and scientific data [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2014, 29(1): 15-22. [吴国雄, 林海, 邹晓蕾, 等. 全球气候变化研究与科学数据 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 15-22.]
- [38] Tatem A J, Lewis H G, Atkinson P M, et al. Increasing the spatial resolution of agricultural land cover maps using a Hopfield neural network [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17: 647-672.
- [39] Townshend J R, Masek J G, Huang C Q, et al. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: Opportunities and challenges [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(5): 373-397.
- [40] Gong P, Wang J, Yu L, et al. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2 607-2 654.
- [41] Wu Bingfang, Yuan Quanzhi, Yan Changzhen, et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010 [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 723-731. [吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化 [J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.]
- [42] Wu Bingfang, Zhang Lei, Yan Changzhen, et al. 2010 China land cover mapping based on HJ-1 satellite data and field Data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13), doi: 10.5846/stxb201310122452. [吴炳方, 张磊, 颜长珍, 等. 2010 年中国土地覆盖监测的方法与特色 [J]. 生态学报, 2015, 35(13), doi: 10.5846/stxb201310122452.]
- [43] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1 781-1 800.
- [44] Giglio L, Schroeder W. A global feasibility assessment of the bi-spectral fire temperature and area retrieval using MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 166-173.
- [45] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multi-satellite precipitation analysis: Quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 38-55.
- [46] Francisco J T, Turk F J, Walt P, et al. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 104/105: 70-97.
- [47] Al-Yaari A, Wigneron J P, Ducharme A, et al. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 181-195.
- [48] Andreas C, Steven C, Seung-bum K, et al. Long term analysis of PALS soil moisture campaign measurements for global soil moisture algorithm development [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 309-322.
- [49] Al Bitar A, Leroux D, Kerr Y H, et al. Evaluation of SMOS soil moisture products over continental U. S. using the SCAN/SNO-TEL network [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50: 1 572-1 586.
- [50] Working Group 1 Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2013.
- [51] Jiang Dong, Wang Naibin, Rosema A. Chinese energy and water balance monitoring system based on remote sensing technique [J]. *Remote Sensing Information*, 2002, 2: 7-10. [江东, 王乃斌, Rosema A. 中国能量与水平衡遥感监测系统 [J]. 遥感信息, 2002, 2: 7-10.]
- [52] François-Marie B, Philippe C. Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342: 412-424.
- [53] Guo Huadong, Fu Wenxue, Li Xinwu, et al. Research on global change scientific satellites [J]. *Science in China (Series D)*, 2014, 57: 204-215. [郭华东, 傅文学, 李新武, 等. 全球变化科学卫星概念研究 [J]. 中国科学: D 辑, 2014, 44: 49-60.]
- [54] Chen Hongping, Jia Gensuo, Feng Jinming, et al. Remote sensing estimates of key land surface vegetation variables used in climate model: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 56-67. [陈洪萍, 贾根锁, 冯锦明, 等. 气候模式中关键陆面植被参量遥感估算的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 56-67.]
- [55] Gao Feng, Wang Jiemin, Sun Chengquan et al. Advances in application of remote sensing technology to land surface processes research [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(3): 359-

366. [高峰, 王介民, 孙成权, 等. 遥感技术在陆面过程研究中的应用进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 359-366.]
- [56] Chen B Z, Chen J M, Ju W M. Remote sensing-based Ecosystem-Atmosphere Simulation Scheme (EASS)-Model formulation and test with multiple-year data [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 209: 277-300.
- [57] Fisher J B, Tu K, Baldocchi D D. Global estimates of the land atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at FLUXNET sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 901-919.
- [58] Komatsu H, Cho J, Matsumoto K, et al. Simple modeling of the global variation in annual forest evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420/421: 380-390.
- [59] Yan N N, Wu B F. Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 24-33.
- [60] Zhu W W, Wu B F, Yan N N, et al. A method to estimate diurnal surface soil heat flux from MODIS data for a sparse vegetation and bare soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 139-150.
- [61] Wu B F, Xing Q, Yan N N, et al. A linear relationship between temporal multiband MODIS BRDF and aerodynamic roughness in HIWATER Wind Gradient data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 507-511.
- [62] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, et al. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 581-595.
- [63] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 649-656. [秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649-656.]
- [64] Fang Zongyi, Xu Jianmin, Zhao Fengsheng. Progress and prospect of China meteorological satellite and satellite meteorology [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 550-561. [方宗义, 许健民, 赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展 [J]. 气象学报, 2004, 62(5): 550-561.]
- [65] Zhang Hongmei, Wu Bingfang, Yan Na'na. Remote sensing estimates of vapor pressure deficit: An overview [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 559-568. [张红梅, 吴炳方, 闫娜娜. 饱和水汽压差的卫星遥感研究综述 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 559-568.]
- [66] Zhang H M, Wu B F, Yan N N, et al. An improved satellite-based approach for estimating vapor pressure deficit from MODIS data [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmosphere*, 2014, 119: 12 256-12 271.
- [67] Zhang Huan, Wang Rui, Jia Xu, et al. HY-2 satellite and its application [J]. *Space International*, 2012, 9: 1-8. [张欢, 王睿, 贾旭, 等. 海洋-2 卫星及其应用 [J]. 国际太空, 2012, 9: 1-8.]
- [68] Pan Delu, Wang Difeng. Advances in the science of marine optical remote sensing application in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 506-512. [潘德炉, 王迪峰. 我国海洋光学遥感应用科学研究的新进展 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 506-512.]
- [69] Hirano A, Welch R, Lang H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment [J]. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, 57: 356-370.
- [70] Berry P A M, Garlick J D, Smith R G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 17-27.
- [71] Bruce R, Andreas K, Jeffrey S K, et al. Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project [J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33: 104-125.
- [72] Elena T, Sebastien G, Molly E B. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 535-549.
- [73] Gruber A, Wessel B, Huber M, et al. Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 39-49.
- [74] Niraula R R, Gilani H, Pokharel B K, et al. Measuring impacts of community forestry program through repeat photography and satellite remote sensing in the Dolakha district of Nepal [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 126: 20-29.
- [75] Yuan Wenping, Cai Wenwen, Liu Dan, et al. Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: An overview [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 541-550. [袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 541-550.]
- [76] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Fu Bojie, et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 431-437. [程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态-水文过程集成研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 431-437.]
- [77] Wang Xukun. Interdisciplinarity, interdisciplinary science and their position in the system of sciences [J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2000, 16(1): 43-47. [王续琨. 交叉学科、交叉科学及其在科学体系中的地位 [J]. 自然辩证法研究, 2000, 16(1): 43-47.]
- [78] Wu Bingfang, Meng Jihua, Li Qiangzi. Review of overseas crop monitoring systems with remote sensing [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(10): 1 003-1 012. [吴炳方, 蒙继华, 李强子. 国外农情遥感监测系统现状与启示 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1 003-1 012.]
- [79] Chen Shupeng. The Explorations of Earth Sciences, Volume 6, Geo-information Science [M]. Beijing: Science Press, 2003. [陈述彭. 地学的探索(第六卷): 地球信息科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [80] Liao Ke. Earth Information Science and its application in 21st century [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2001, 26(2): 1-6. [廖克. 21 世纪的地球信息科学及其应用 [J]. 测绘科

- 学 2001 26(2):1-6.]
- [81] Zhang Xuejian, Zhang Nan. Let Space Earth Information Science Entering into Thousands of Households Soon—Interviewing Guo Huadong, Director-General of the Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences [N/OL]. Science Times, 2007-11-28 [2014-11-19]. <http://news.sciencenet.cn/html/showsnews1.aspx?id=195270>. [王学健, 张楠. 早日让空间地球信息科学进入千家万户——访中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任郭华东 [N/OL]. 科学时报, 2007-11-28 [2014-11-19]. <http://news.sciencenet.cn/html/showsnews1.aspx?id=195270>.]
- [82] Becker-Reshef I, Justice C, Sullivan M, et al. Monitoring global croplands with coarse resolution Earth observations: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) Project [J]. Remote Sensing, 2010, 2(6): 1 589-1 609.
- [83] Shi Y, Ji S P, Shao X W, et al. Framework of SAGI agriculture remote sensing and its perspectives in supporting national food security [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1 443-1 450.
- [84] Wu B F, Meng J H, Li Q Z, et al. Remote sensing-based global crop monitoring: Experiences with China's CropWatch system [J]. International Journal of Digital Earth, 2014, 7(2): 113-137.
- [85] Zhang M, Wu B F, Yu M Z, et al. Crop condition assessment with adjusted NDVI using the uncropped arable land ratio [J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 5 774-5 794.
- [86] Paul V D, Zhang J Z, Wang J, et al. Assessment of the contribution of in-situ combustion of coal to greenhouse gas emission: Based on a comparison of Chinese mining information to previous remote sensing estimates [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86: 108-119.
- [87] Yu Guirui, Wang Qiufeng, Zhu Xianjin. Methods and uncertainties in evaluating the carbon budgets of regional terrestrial ecosystems [J]. Progress in Geography, 2011, 30(1): 103-113. [于贵瑞, 王秋凤, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 103-113.]
- [88] Wu B F, Yan N N, Xiong J, et al. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: A case study in Hai Basin of China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436/437: 67-80.
- [89] Wu B F, Jiang L P, Yan N N, et al. Basin-wide evapotranspiration management: Concept and practical application in Hai Basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2014, 145: 145-153.
- [90] Chen Shupeng. The deep development and application of the mineral resources and remote sensing information [C] // Chen Shupeng, Mao Dehua, eds. The Forum of Remote Sensing Science and Technology in 2007. Beijing: Earthquake Press, 2007: 373-380. [陈述彭. 矿产资源与遥感信息深度开发应用 [C] // 陈述彭, 毛德华, 著. 2007 遥感科技论坛. 北京: 地震出版社, 2007: 373-380.]
- [91] Liu Dechang, Li Zhizhong, Wang Junhu. The technology progress and developing future of remote sensing geological prospecting in China [J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(4): 431-438. [刘德长, 李志忠, 王俊虎. 我国遥感地质找矿的科技进步与发展前景 [J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 431-438.]
- [92] Shenhua Group Corporation Limited. Shenhua Geological Exploration Company Gained 6 National Invention Patents [DB/OL]. Beijing: State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, 2013 [2014-11-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n1180/n1226/n2410/n314319/15198325.html>. [神华集团有限责任公司. 神华地勘公司获 6 项国家发明专利 [DB/OL]. 北京: 国务院国有资产监督管理委员会, 2013 [2014-11-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n1180/n1226/n2410/n314319/15198325.html>.]
- [93] Shen Xuhui, Wu Yun, Shan Xinjian. Remote sensing application in earthquake science and general proposal for earthquake satellite project in China [J]. Recent Developments in World Seismology 2007, 344: 38-45. [申旭辉, 吴云, 单新建. 地震遥感应用趋势与中国地震卫星发展框架 [J]. 国际地震动态, 2007, 344: 38-45.]
- [94] Shi Juhua, Wu Shuren, Shi Ling. Remote sensing for landslide study: An overview [J]. Geological Review, 2008, 54(4): 505-514. [石菊松, 吴树仁, 石玲. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展 [J]. 地质论评, 2008, 54(4): 505-514.]
- [95] Lei Tianjie, Li Changchun, He Xiaoying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178-183. [雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178-183.]
- [96] Li Zhen, Liao Jingjuan, Zhang Ping, et al. SAR parameter selection in disaster monitoring with C-band spaceborne SAR [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(6): 103-109. [李震, 廖静娟, 张平, 等. C 波段星载 SAR 系统在减灾应用中的工作模式选取 [J]. 遥感信息, 2012, 27(6): 103-109.]
- [97] He Haixia, Fan Yida, Yang Siqun, et al. Review on application capability of space optical remote sensing for natural disaster management [J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(4): 117-122. [和海霞, 范一大, 杨思全, 等. 航天光学遥感在自然灾害管理中应用能力评述 [J]. 航天器工程, 2012, 21(4): 117-122.]
- [98] Dou M G, Chen J Y, Chen D, et al. Modeling and simulation for natural disaster contingency planning driven by high-resolution remote sensing images [J]. Future Generation Computer Systems, 2014, 37: 367-377.
- [99] Tao Heping, Liu Bintao, Liu Shuzhen, et al. Natural hazards monitoring using remote sensing—A case study of 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 276-279. [陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以 5·12 汶川地震为例 [J]. 山地学报, 2008, 26(3): 276-279.]
- [100] Li Qiangzi, Zhang Feifei, Du Xin, et al. Grain loss in main disaster area caused by Wenchuan earthquake [J]. Journal of

- Remote Sensing*, 2009, 13(5): 928-939. [李强子, 张飞飞, 杜鑫, 等. 汶川地震粮食受损遥感快速估算与分析[J]. 遥感学报, 2009, 13(5): 928-939.]
- [101] Zhao Dan, Zhang Miao, Yu Mingzhao, et al. Monitoring agriculture and forest recovery after the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 958-970. [赵旦, 张淼, 于名召, 等. 基于机载和星载遥感的汶川地震灾后农田和森林植被恢复监测[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 958-970.]
- [102] Yang Bin, Cao Chunxiang, Tian Rong, et al. Recovery evaluation of the eco-environmental quality after the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 946-957. [杨斌, 曹春香, 田蓉, 等. 汶川地震后5年生态环境质量恢复评价[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 946-957.]
- [103] Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences. RADI Carried Out Fire Disaster Monitoring and Evaluating in Australia Using Remote Sensing [DB/OL]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013 [2014-11-15]. http://www.cas.cn/xw/yxdt/201310/t20131022_3961033.shtml. [中国科学院遥感与数字地球研究所. 遥感地球所开展澳大利亚山林火灾遥感监测与灾情评估[DB/OL]. 北京: 中国科学院, 2013 [2014-11-15]. http://www.cas.cn/xw/yxdt/201310/t20131022_3961033.shtml.]
- [104] Tong Qingxi. Role of remote sensing in flood monitoring in 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1998, 3(4): 314-322. [童庆禧. 遥感在1998年洪水监测中的作用[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 314-322.]
- [105] Marti-Cardona B, Lopez-Martinez C, Dolz-Ripolles J, et al. ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Donana wetlands for flood extent monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2 802-2 815.
- [106] Florent M, Martin G S, Chao Y, et al. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing—A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 26: 64-79.
- [107] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. Lidar remote sensing technology and its application in forestry [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3): 129-136. [庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 129-136.]
- [108] Heinz G, Giuliana Z, Cert-Jan N, et al. EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260: 252-261.
- [109] Du Guoming, Li Yun, Yu Fengrong, et al. Change characteristics analysis of farmland in Northern Sanjiang Plain in 2000-2009 based on remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 225-229. [杜国明, 李昀, 于风荣, 等. 基于遥感的2000—2009年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 225-229.]
- [110] Lu S L, Wu B F, Wang H, et al. Hydro-ecological impact of water conservancy projects in the Haihe River Basin [J]. *Acta Oecologica*, 2012, 44: 67-74.
- [111] Zhang L, Wu B F, Zhu L, et al. Patterns and driving forces of cropland changes in the Three Gorges area, China [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(4): 765-776.
- [112] Li Deren, Wang Mi, Hu Fen. Monitoring illegal construction in Beijing using Chinese high resolution satellite image [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(3): 305-311. [李德仁, 王密, 胡芬. 利用我国高分辨率卫星影像监测北京市违章建筑[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 305-311.]
- [113] Huo Hongtao. Study on the monitoring of banning planting drug plants using satellite remote sensing technology [J]. *Journal of Chinese People's Public Security University*, 2003, 33: 26-29. [霍宏涛. 应用卫星遥感技术进行毒品原植物禁种监测的研究[J]. 公安大学学报: 自然科学版, 2003, 33: 26-29.]
- [114] Tian Y, Wu B F, Zhang L, et al. Opium poppy monitoring with remote sensing in North Myanmar [J]. *International Journal of Drug Policy*, 2011, 22(4): 278-284.
- [115] Wang Lixue. The Direct Food Subsidies and General Subsidies for Agriculture Supplies are 125 CNY Per mu This Year [DB/OL]. Zao Zhuang: Zao Zhuang Newsnet, 2014 [2014-11-10]. http://www.zaozhuang.gov.cn/art/2012/11/26/art_2271_483091.html. [王立雪. 今年粮食直补和农资综合补贴每亩125元[DB/OL]. 枣庄: 枣庄新闻网, 2014 [2014-11-10]. http://www.zaozhuang.gov.cn/art/2012/11/26/art_2271_483091.html.]
- [116] Qu Hongsong, Jin Guang, Zhang Ye. Next view program and progress in optical remote sensing satellites [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(6): 467-476. [曲宏松, 金光, 张叶. “Next View 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(6): 467-476.]
- [117] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. [许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.]
- [118] Tian Jinchang. The military application analysis of Synthetic Aperture Radar [J]. *Aerodynamic Missiles Journal*, 2010, 2: 2-8. [田锦昌. 合成孔径雷达在军事上的应用分析[J]. 飞航导弹, 2010, 2: 2-8.]
- [119] Fleming S, Jordan T, Madden M, et al. GIS applications for military operations in coastal zones [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64: 213-222.
- [120] Duan Chengli, Qi Wenjie. Development trend and countermeasure of military sensor [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, 22(11): 4-8. [段成丽, 齐文杰. 军用传感器的发展趋势与对策[J]. 传感器技术, 2003, 22(11): 4-8.]
- [121] Chen Shupeng. The Explorations of Earth Sciences. Volume 3, Remote Sensing Applications [M]. Beijing: Science Press, 1990. [陈述彭. 地学的探索. 第三卷, 遥感应用[M]. 北京:

- 科学出版社,1990.]
- [122] Ye Peijian, Huang Jiangchuan, Sun Zezhou, *et al.* The process and experience in the development of Chinese lunar probe [J]. *Science in China (Series E)*, 2014, 44(6): 543-558. [叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探 [J]. *中国科学: E 辑* 2014, 44(6): 543-558.]
- [123] Ren Xianshao, Wu Bingfang. The Method and Practice of Water Consumption Management over River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2014. [任宪韶, 吴炳方. 流域耗水管理方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [124] Li Mengxue. The ten year implementation plan and enlightenment of international cooperation in Earth observation field [J]. *Science & Technology Industry of China*, 2007, 7: 78-81. [李梦学. 地球观测领域国际合作十年执行计划及启示 [J]. *中国科技产业* 2007, 7: 78-81.]
- [125] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Deriving consistent long-term vegetation information from AVHRR reflectance data using a cover-triangle-based framework [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 2 938-2 949.
- [126] Sterckx S, Benhadj I, Duhoux G, *et al.* The PROBA-V mission: image processing and calibration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(7): 2 565-2 588.

Remote Sensing Roles on Driving Science and Major Applications

Wu Bingfang, Xing Qiang

(Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper aims at discussing the roles of remote sensing on driving the development of Earth System Science and the major application domains based on domestic and foreign remote sensing cases. Remote sensing has led to the development of the research on global change, making human beings being capable of exploring the future of the life on earth with a new perspective. Remote sensing has also driven the transformation of Earth Science from qualitative analysis to quantitative development, from description to further analysis, from single site to regional application with multiple temporal and spatial scales. As a result, it leads to the appearance of many emerging cross-disciplines. Remote sensing is an application-driven subject, with numerous application fields after many years of development. However, different countries in the world have different priorities, which are dependent on their own national conditions. For China, safeguarding national global interests, rapid response to disasters and assessment after disasters, independent supervision from the third party and safeguarding national defense security are the major applications. Remote Sensing data consistency is of crucial importance in order to allow for time series comparison analysis and anomaly detection, which is recognized as the core of quantitative remote sensing and also the basis for driving remote sensing applications to a deeper level continually.

Key words: Remote sensing; Global change; Earth science; Global interests; Defense security.