0254-6124/2021/41(1)-095–23 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SHI Jiancheng, GUO Huadong, DONG Xiaolong, LIANG Shunlin, CHEN Jingming, GONG Peng, YANG Xiaofeng, CHENG Jie, LIN Mingsen, ZHANG Peng, ZHANG Wei, JU Weimin, LIU Yi, LI Zengyuan, ZHAO Tianjie. Developments and future strategies of Earth science from space in China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 95-117. DOI:10.11728/cjss2021.01.095

中国空间地球科学发展现状及未来策略 *

施建成[1] 郭华东[2] 董晓龙[1] 梁顺林[3] 陈镜明[4]
宫 鹏[5] 杨晓峰[2] 程 洁[6] 林明森[7] 张 鹏[8]
张 伟[9] 居为民[10] 刘 毅[11] 李增元[12] 赵天杰[2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

3(马里兰大学地理科学系 马里兰 20742)

4(福建师范大学地理科学学院 福州 350007)

5(清华大学地球系统科学系 北京 100084)

6(北京师范大学地理科学学部 北京 100875)

7(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

8(国家卫星气象中心 北京 100081)

9(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

10(南京大学国际地球系统科学研究所 南京 210023)

11(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

12(中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091)

摘 要 空间地球科学是以空间对地观测为主要信息获取手段, 研究地球系统的各圈层及之间的相互作用、过程与演变, 对地球进行系统研究的综合性交叉学科. 为纪念空间科学学会成立 40 周年, 本文系统回顾了中国空间地球科学的发展历程, 分析当前面临的机遇与挑战, 进而提出中国空间地球科学未来发展的建议.

关键词 空间地球科学, 空间对地观测, 气候变化, 水循环, 碳循环, 辐射平衡, 人类活动

中图分类号 TP 391

Developments and Future Strategies of Earth Science from Space in China

SHI Jiancheng[1] GUO Huadong[2] DONG Xiaolong[1] LIANG Shunlin[3]
CHEN Jingming[4] GONG Peng[5] YANG Xiaofeng[2] CHENG Jie[6]

* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 项目 “地球大数据科学工程” 资助 (XDA19000000)

2020-12-22 收到原稿

E-mail: shijiancheng@nssc.ac.cn. 通信作者 郭华东, E-mail: hdguo@radi.ac.cn

LIN Mingsen[7] ZHANG Peng[8] ZHANG Wei[9] JU Weimin[10]
LIU Yi[11] LI Zengyuan[12] ZHAO Tianjie[2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

3(*Department of Geographical Sciences, College Park MD* 20742)

4(*School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007)

5(*Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing* 100084)

6(*Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875)

7(*National Satellite Ocean Application Service, Beijing* 100081)

8(*National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100081)

9(*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

10(*International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing* 210023)

11(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

12(*Institute of Forest Resource Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091)

Abstract The Earth Science from Space is a comprehensive interdisciplinary science to study the interaction, process and evolution of different spheres in the Earth system based on the information observed from the satellite observations. In order to commemorate the 40th anniversary of the establishment of the Chinese Society of Space Research, this paper will systematically review the achievements of the Earth Science from Space in China, the current challenges, and put forward suggestions for future developments.

Key words Earth science from space, Earth observation, Climate change, Water cycle, Carbon cycle, Energy balance, Human activity

0 引言

地球科学是实践性很强的基础学科, 实验和观测在推动学科发展的进程中起到非常重要的作用. 长期以来, 对于地球的观测只能局限在若干点或小区域范围, 这对于全面、综合、整体研究地球具有很强的局限性, 小尺度的结论通常不能机械性地外推到大尺度. 卫星对地观测技术的发展, 首次将地球以一个完整的形态展现, 使得对地球的认识和理解上升到整体和系统的尺度, 地球科学研究在深度和广度上都得到了巨大的推进.

1988 年美国国家航空航天局 (NASA) 顾问委员会在其 “地球系统科学–近距观察” 报告中率先提出了地球系统科学的概念, 定义了地球系统科学的目标和任务, 被视为空间地球科学的起步 [1]. 1991 年 NASA 开始实施行星地球使命计划 (MTPE) 和相应的地球观测科学卫星系统计划 (EOS), 提出了一批先进的对地观测载荷项目, 是最成功的空间地球科学卫星计划 [2]. 欧洲空间局 (ESA) 于 1992 年成立了其主管空间地球科学发展的部门 (Earth Sciences Division), 并牵头论证实施了一批面向地球科学的卫星计划, 例如地球遥感卫星 (ERS-1/2)、环境卫星 (ENVISAT)、土壤湿度与海洋盐度卫星 (SMOS) 等 [3]. 1998 年 ESA 正式发起了活力星球计划 (Living Planet Programme) 促进空间地球科学的发展, 通过地球系统大气、冰雪、地壳、重力、地表生态、海洋环境、风场等要素的空间观测, 加深对地球现状的认识, 理解全球变化背景下地球系统及其变化规律 [4].

此后, 国际科学界先后发起并组织实施了以地球系统和全球变化为对象的研究计划. 20 世纪 90 年代地球系统科学联盟 (ESSP) 组织了世界气候研究计划 (WCRP)、国际地圈生物圈计划 (IGBP)、全球环境变化人文因素计划 (IHDP)、生物多样性计划 (DIVERSITAS). 2001 年又设立了 4 项联合计划: 全球碳计划 (GCP)、全球水系统计划 (GWSP)、全球环境变化与食物系统计划 (GECAFS) 和全球环境变化与人类健康计划 (GECHH)[5]. 2005 年成立的政府间国际地球观测组织 (GEO) 同样制定了 “全球综合地球观测系统 (GEOSS) 十年执行计划”[6], 国际科联于 2012 年发布了 “未来地球” 十年计划和宣言 [7]. 在国际组织对卫星计划和研究工作协调和卫星数据进一步开放共享的基础上, 空间地球科学得到了进一步推动.

中国空间对地观测技术和空间地球科学起步较晚, 经历了从无到有的高速发展过程, 取得了一系列举世瞩目的成就.

1 中国空间对地观测卫星发展历程

中国空间对地观测计划起始于 20 世纪 80 年代. 30 多年来, 中国运载火箭技术、卫星平台和遥感器技术得到了大幅度提升, 对地球观测系列卫星已经初步建成了包括气象、海洋、资源、环境和减灾、高分等较为完善的对地遥感器和卫星系统及应用系列卫星体系. 同时载人航天工程搭载了多台对地遥感器, 为中国遥感技术起到了引导和技术验证作用.

根据 2015 年公布的 “国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015−2025)”, 中国在 “十三五” 期间计划发射约 40 颗遥感卫星, 分为陆地、海洋和大气三大系列, 高分辨率光学、中分辨率光学、合成孔径雷达、海洋水色、海洋动力、天气观测、气候观测七个星座以及地球物理场探测、海洋环境监测、大气成分探测三类专题卫星. 将形成高中低分辨率结合、成像、探测和监测等多种方式有效组合的较为完备的空间对地观测系统. 这将为中国的空间地球科学, 尤其是基于自主数据的空间地球科学研究提供有力支撑.

1.1 风云系列气象卫星

中国从 20 世纪 70 年代末开始自主研制气象卫星, 目前已形成了风云极轨和静止两个卫星系列 [8].

在极轨气象卫星方面, 中国第一颗极轨气象卫星风云一号 (FY-1A) 在 1988 年 9 月发射成功, 卫星搭载 5 通道扫描辐射计, 成功获取了高质量的可见光图像; 1990−2002 年又陆续发射了 FY-1B, FY-1C, FY-1D 卫星, 初步建成了达到科研和应用要求的极轨气象卫星. 中国在 2008 年、2010 年发射了第二代气象卫星第一批次 (FY-3(01) 批) 的 FY-3A 和 FY-3B, 形成了双星组网, 有效提高了全球气象资料获取能力, 提高了对云区和地表特征的遥感能力, 能够获得全球、全天候、三维多光谱的大气、地面和海洋特征参数. FY-3(02) 批由 FY-3C 和 FY-3D 卫星组成, 进一步提升了微波大气探测能力, 增加了 GNSS 大气掩星探测器, 卫星整体技术状态和性能水平与欧洲 METOP 卫星相当. FY-3(03) 批规划了 4 颗卫星, 按照晨昏星、上午星、下午星三颗近极地太阳同步轨道卫星和一颗倾斜轨道降水测量卫星进行组网布局, 形成了完整的低轨气象卫星业务综合观测能力, 显著提升了中国全球数值天气预报模式中卫星观测数据的更新时效性和对灾害性天气过程的动态监测能力.

在静止气象卫星方面, 1997 年 6 月和 2000 年 6 月分别发射了中国首批实验静止气象卫星 FY-2A 和 FY-2B, 卫星主要搭载了多通道可见光和红外扫描辐射仪器. 2004−2012 年陆续发射了 FY-2C, FY-2D, FY-2E, FY-2F 静止轨道气象卫星, 保证了中国静止气象卫星观测业务的连续稳定运行, 2014 年 12 月发射了 FY-2G, 用于替换 FY-2E. 2016 年第二代静止轨道气象卫星 FY-4A 成功发射, 卫星搭载了微波探测载荷、闪电成像仪和空间环境监测仪器包. 其中干涉式大气垂直探测仪, 覆盖了可见光、短波红外、中波红外和长波红外等波段, 国际首次实现了上千谱段的高光谱剖面和三维气象参数探测, 大幅提升了中国静止轨道气象卫星探测水平.

1.2 海洋系列卫星

中国海洋卫星经过多年建设, 目前已初步建成了海洋水色、海洋动力环境和海洋监视监测系列卫星体系, 具备了多源、多维、多尺度、多时相的海洋环境参数获取能力 [9].

在海洋水色卫星方面, 2002 年发射了第一颗海洋水色水温实验型卫星海洋一号 A 星 (HY-1A); 2007 年发射了 HY-1B 卫星, 提升了中国对近海的水色环境进行实时监测的能力. 2018 年和 2020 年又分

别发射了 HY-1C/D 卫星, 未来将和 “十四五” 发射的 HY-1E/F 双星一起, 按上午星、下午星组网运行, 保持连续的全球海洋水色观测.

在海洋动力环境卫星方面, 2011 年 8 月发射了首颗海洋动力卫星 HY-2A, 主载荷为雷达高度计、微波散射计和微波辐射计, 以获取海面风场、有效波高和海面高度, 用于台风监测、灾害性海浪监测、风暴潮监测、全球海平面变化监测、海啸预警、大洋渔场探测. 2018 年和 2020 年又分别发射了 HY-2B 和 HY-2C 卫星, 其中 HY-2C 运行在 66° 倾角倾斜轨道, 增强了对全球洋面的快速重访能力. 此外, 中国首颗海洋盐度卫星也已正式立项, 未来将形成对海洋温、盐、流、海浪和风场等动力环境的多要素精细观测.

在海洋监视监测卫星方面, 海洋合成孔径雷达卫星 GF-3 已于 2016 年 8 月发射, 未来将与二颗 HY-3 业务卫星和一颗高轨合成孔径雷达卫星一道, 形成对海上目标和海洋要素的监视监测.

1.3 资源、环境与测绘系列卫星

中国发展了资源卫星、环境和减灾卫星等陆地遥感卫星, 提升了遥感卫星影像的自主供给能力和获取全球地理信息的能力.

中国与巴西联合研制的中巴地球资源卫星 (CBERS-01) 于 1999 年 10 月发射, 2003−2019 年分别发射了 02, 02B, 02C, 04, 04A 共 6 颗卫星 [10].

环境和减灾小卫星 (HJ) 星座共三颗小卫星, 其中 HJ-1A 和 HJ-1B 于 2008 年以一箭双星发射升空, 卫星搭载了多光谱相机和干涉超光谱成像仪. HJ-1C 星于 2012 年发射, 为中国首颗 S 波段合成孔径雷达卫星 [11].

2012 年 1 月发射的资源三号 01 星 (ZY3-01) 是中国第一颗自主开发的民用高分辨率立体测绘卫星, 能够提供高精度的立体影像和高分辨率多光谱图像, 填补了中国空间立体测图领域的空白. ZY3-02/03 星分别于 2016 年 5 月和 2020 年 7 月发射, 其与 01 号星组成高分辨率立体测图组网卫星, 满足了 1∶5 万立体测图精度、1∶2.5 万地图修测更新精度要求, 支撑了 2 m 数字正射影像库和 15 m 格网数字表面模型库的建设 [12].

1.4 高分专项卫星系列

2010 年批准实施的高分辨率对地观测重大专项是发展中国空间对地观测领域的重大举措. 2013−2020 年, 已成功发射高分一号光学宽覆盖、高分二号亚米全色、高分三号 1 m 多极化合成孔径雷达、高分四号高轨同步凝视、高分五号高光谱观测、高分六号陆地应急监测、高分七号亚米立体测绘等 7 颗民用高分卫星, 初步构建起了稳定运行的中国高分卫星遥感系统, 实现了高分辨率对地观测资料的国产替代, 极大推动了遥感卫星资料的行业和区域应用 [13].

1.5 载人航天工程中的空间对地观测

地球科学与对地观测是中国载人航天工程的重要应用方向, 大量对地观测的前沿技术和探测手段在载人航天中得到试验验证.

2001 年发射的神舟三号飞船搭载的中分辨率成像光谱仪包括了中国首台中分辨率成像光谱仪、卷云探测仪、地球辐射收支仪、大气紫外光谱仪等对地观测新型载荷 [14]. 2002 年发射的神舟四号飞船搭载的多模态微波遥感器包括 6 通道微波辐射计, 微波高度计和微波散射计, 在中国首次实现了海面风场测量、海面高度测量和大范围海陆辐射亮度温度测量 [15].

在空间实验室阶段, 空间地球科学任务有了进一步发展. 2011 年发射的天宫一号飞船搭载的综合对地观测系统在国内首次实现了高分辨率可见光、热红外和高光谱的同步观测 [16,17].

2016 年发射的天宫二号搭载了国际首创的三维成像雷达高度计, 采用短基线干涉、孔径合成等技术, 实现了三维海陆形态测量, 成为新一代海洋动力环境主载荷; 多角度宽波段成像光谱仪在国内首次实现了航天多角度偏振成像; 多波段紫外临边光谱成像仪包括 360° 环形和前向 (1.4 nm) 光谱仪, 首次实现了对全球中层大气的分层探测. 这些先进仪器的研制和在轨应用, 不仅支持了空间地球科学研究, 而且直接为新一代气象卫星、海洋卫星的载荷发展奠定了基础 [18].

1.6 空间地球科学实验卫星

中国空间地球科学卫星起步较晚, 目前主要依靠业务卫星和国外卫星数据. 近年开始发展专用科学卫星和空间实验平台. 空间地球科学研究快速发展, 逐步形成了较为坚实的空间地球科学和应用的研究能力. 空间地球科学的各个分支呈现齐头并进、紧跟国际先进水平的态势, 在部分研究领域具备了从跟跑到并跑乃至领跑的良好趋势. 这些发展为实施空间地球科学计划打下了坚实基础. 培育了较为有力的研

究队伍, 学科布局和学科交叉逐步完善, 人才培养初步呈现系统性和规模性.

1.6.1 碳卫星

全球二氧化碳监测科学实验卫星 (简称碳卫星, TanSat) 是中国自主研制的首颗用于监测全球大气二氧化碳含量的科学实验卫星, 于 2016 年 12 月发射, 是世界上第三颗碳监测卫星, 其搭载了一体化设计的两台科学载荷, 分别是高光谱二氧化碳探测仪以及起辅助作用的多谱段云与气溶胶探测仪 [19]. 碳卫星能够对二氧化碳、甲烷、云和气溶胶进行探测, 可获取精度优于 1.5×10^{-6} 的全球二氧化碳体积浓度分布 [20]. 此外, 利用碳卫星氧气 A 吸收带太阳谱线观测能力, 还可以开展全球植被叶绿素荧光 (SIF) 监测, 对全球植被生态系统生产力随季节和地区的时空变化特征进行研究 [21].

1.6.2 中法海洋卫星

中法海洋卫星 (Chinese-French Ocean SATellite, CFOSAT) 是由中国和法国联合研制的一颗海洋动力环境卫星, 于 2018 年 10 月发射 [22]. CFOSAT 搭载两台有效载荷: 法国国家空间中心研制的真实孔径雷达波谱仪 SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring from satellite) 和中国科学院国家空间科学中心研制的扇形波束旋转扫描散射计 SCAT[23,24]. 中法双方载荷均为国际首次在轨飞行的新体制载荷, 通过全球海浪谱、有效波高、海面风场等海洋动力参数的联合观测, 可更好地了解、认识和掌握海洋动力过程及变化规律. CFOSAT 在轨运行期间获取的全球海面风场、海浪谱数据在台风、飓风、海浪、南北极海冰监测示范应用中效果显著, 可为海洋预报提供多参量的海洋动力学初始场信息, 改进海况预报及同化模型, 提高对巨浪、热带风暴、风暴潮等灾害性海况预报的精度与时效, 并实现海浪、海面风场两种重要海洋参数的大面积同步监测, 为海洋科学研究、全球气候变化提供实测数据和积累长时间序列历史数据.

1.6.3 广目地球科学卫星

广目地球科学卫星 (CASEarth) 是中国科学院第一颗空间地球科学卫星, 于 2018 年 7 月批复立项纳入空间科学卫星工程管理体系, 预计 2021 年发射. 为满足人类活动痕迹探测研究的科学目标与应用需求, CASEarth 小卫星设计搭载热红外成像仪和微光多谱段成像仪, 主要用于地表热辐射空间分布、夜间不同等级城市与乡村灯光、夜间城市气溶胶、海岸带与近海环境探测. 通过两个载荷对地球系统科学参数进行协同探测, 可以获取精细的 “人类活动痕迹” 探测数据, 为社会经济、城市发展以及近海环境等人类活动强烈区域, 提供包括热辐射、光特征和反射特征在内的综合信息, 有效弥补目前人类活动区域单一探测的不足, 为开展地球系统科学研究和人类活动精细刻画研究提供数据支持.

1.6.4 电磁监测试验卫星

电磁监测试验卫星 (张衡一号) 是中国地震立体监测体系的首个天基电磁平台, 是中国地球物理场探测卫星计划首发星. 该星共搭载三类 8 种科学载荷: 第一类是用于电离层电磁场探测的载荷, 包括高精度磁强计、感应式磁力仪和电场探测仪; 第二类是用于原位等离子体参数探测的载荷, 包括朗缪尔探针、等离子体分析仪和高能粒子探测器; 第三类是用于电离层结构探测的载荷, 包括 GNSS 掩星接收机和三频信标发射机. 这些载荷用于获取地球磁场、空间电磁波场、电离层等离子体原位和结构参数及其变化信息, 为探索地震前兆信息、空间环境监测预报和地球系统科学研究提供新的技术手段, 为未来建立地震前兆电磁监测卫星业务化系统进行技术准备 [25].

1.6.5 陆地碳卫星

陆地生态系统碳监测卫星 (简称陆地碳卫星) 是国家林业和草原局为牵头主用户的首颗卫星, 于 2017 年 1 月批复卫星工程立项. 目前已完成卫星工程转正样阶段评审, 预计 2022 年 3 月出厂, 择机发射.

陆地碳卫星是中国第一颗以多波束激光雷达为主载荷、利用主被动相结合方式对以森林为主体的陆地生态系统开展探测的卫星. 其目标是评估森林生物量, 测量大气中的气溶胶含量并探测植被光合荧光. 卫星载荷包括了多波束植被探测激光雷达、多角度多光谱相机、超光谱成像仪、大气探测激光管雷达、多角度偏振成像仪 5 个载荷, 其中针对森林应用的 4 个载荷参见文献 [26].

与现有美国激光雷达卫星传感器相比, 中国森林碳卫星的一个显著特点是其带有一个多角度多光谱相机和多角度偏振成像仪. 多角度多光谱的观测可获取植冠结构信息 [27], 这些信息有助于在激光雷达观测点之间进行内插以获取空间连续的植被高度和生物量影像 [28].

1.6.6 中法水卫星

中法水循环监测卫星 (China-France Water Cycle SATellite, CFWSAT) 是中国国家航天局与法国国家空间研究中心继 CFOSAT 以来, 双方又一次在航空航天领域的深入合作. 2019 年 11 月中法两国共同签署了航空航天领域合作文件, 明确双方将致力于推动水卫星的合作, 以提高全球气候变化与水循环相互作用的认识.

水卫星将二维综合孔径技术共同应用于 L, X, Ka 三个波段, 打破多频真实孔径或单频合成孔径的常规发展路线, 同时实现多频多角度卫星观测, 代表了下一代水循环空间观测卫星的发展趋势. 在全球变化的影响下, 水卫星通过前所未有的多频率、多角度协同观测能力, 实现全球地表水循环土壤水分、海洋盐度、雪水当量以及冻融状态 4 大关键要素的高精度测量, 实现全球地表水循环系统时空分布特征及其变化特征的认识突破, 探索地表水循环系统的变化对地球系统的响应与反馈作用, 以研究和回答全球气候变化影响下水循环系统是否正在加速变化这一国际重大前沿科学问题, 并为水资源、洪涝灾害、农业应用等一系列国家重大需求和人类社会可持续发展提供关键支撑.

2 空间地球科学研究主要进展

2.1 能量平衡

地球能量平衡指的是从大气层顶进入地球系统的能量与地球系统向外损失的能量处于平衡状态 [29]. 20 世纪 60 年代, 卫星遥感技术已应用于估算大气层顶和地表的能量平衡. 除了传统上使用的宽波段传感器用于监控地球的能量平衡, 极轨和静止卫星的窄波段传感器也被广泛应用于估算能量平衡. 在气候不发生变化的情况下, 大气层顶的能量可以达到平衡状态. 然而近几十年来, 气候系统的自然变化和人为温室气体效应的加剧以及土地覆盖的变化导致大气层顶辐射通量的广泛变化, 进而导致大气层顶能量不平衡.

2.1.1 大气层顶能量平衡

大气层顶能量平衡包括 4 个分量: 太阳入射辐射、行星反照率、射出长波辐射和能量不平衡.

联合国气候变化框架公约 (UNFCCC) 和政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 对长时间序列太阳入射辐射观测具有强烈的需求. Kopp[30] 综述了监测太阳入射辐射的传感器及其监测结果. 国际天文学会推荐的太阳常数 $S = 1361\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. 国际空间站 (ISS) 测量太阳辐射照度 (165~3088 nm) 仪器 SOLSPEC 已经开展了多年的连续观测, 积分后的太阳常数为 $1372.3\pm16.9\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 比国际天文学会建议值大 $11\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 但更接近于早期传感器的观测值. Gueymard[31] 最近计算的太阳常数为 $1361.1\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 标准差为 $0.5\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. 值得高兴的是, 新的试图提供更好的太阳入射辐射观测的任务正在进行中. 例如, 总的太阳入射辐射和光谱太阳辐照度传感器 (TSIS) 于 2017 年 12 月 15 日发射到国际空间站, 并于 2018 年 3 月启动观测, 成功扩展了太阳光谱测量的长期记录.

行星反照率是控制地球气候和气候变化幅度、分布和变率过程的一个基本组成部分 [32]. 在没有气候反馈的情况下, 当前值为 0.3, 这意味着太阳入射辐射的 30% 被反射回深空, 70% 被大气层吸收, 用于提供维持地球生命所需的能量. 假定入射太阳辐射为 $340.25\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 行星反照率 0.01 的变化产生的影响与大气中二氧化碳倍增的效果相同 [33]. 卫星遥感是直接监测全球行星反照率时空变化的唯一手段. 宽波段和多光谱卫星观测数据已用于估算行星反照率. 通常有两种计算方法: 第一种是经验的角度转换和辐射传输计算. CERES 科学团队使用这两种方法来估计行星反照率/反射辐射通量 [34]. 因为宽波段传感器在某一特定方向观测地球, 所以需要开发角度分布模型, 将方向观测转换为通量 [35]. 第二种方法是使用辐射传输模型计算行星反照率, 输入的大气和地表参数主要来自其他高级遥感数据和再分析数据, 并受卫星直接观测的约束. 与宽波段传感器相比, 窄波段传感器提供的数据信息更为丰富, 并且具有更高的空间分辨率, 能够用于产生长期和高分辨率的卫星数据 [36]. 行星反照率数据可用于更好地了解行星反照率的时空变化. 根据 CERES 能量平衡数据 [37], 年均全天空反射通量为 $99.1\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ (相当于全球反照率为 0.291), 晴空反射通量为 $53.3\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ (反照率为 0.154). 两个通量之间的差 ($45.8\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$) 被视为云对反射辐射通量影响的度量. Loeb 等 [37] 评估了气候变暖停滞的影响, 发现, 与全球变暖停滞 (2000−2014) 期间相比, 由于低云量变化的影响, 大气层顶全球反射短波通量在 2000−2007 年间明显

下降了 0.83±0.41 W·m^{-2}.

射出长波辐射广泛用于气候敏感性和诊断、天气和气候预测、季风变化和赤道波研究. 遥感射出长波数据通常由宽波段传感器和多光谱传感器数据生成. 例如, Kim 等 [38] 从 Himawari-8 AHI 的一个窗口通道 (12.4 μm) 和两个通道 (6.2 和 12.4 μm) 分别估算了射出长波辐射, 估算结果与 CERES 射出长波辐射数据具有很好的一致性. CERES 射出的长波辐射数据 [37] 由辐射传输模型计算, 输入的地表和大气参数由其他高级卫星数据以及再分析数据提供, 受 CERES 观测值约束. Loeb 等 [37] 由 CERES 数据计算的年均全天射出长波辐射为 240.1 W·m^{-2}, 而晴空射出长波辐射为 268.1 W·m^{-2}. 云阻挡了 27.9 W·m^{-2} 的射出长波辐射. Zhou 等 [39] 比较分析了 5 种遥感射出长波辐射数据 (AVHRR, HIRS, GEWEX-SRB, AIRS, CM-SAF) 与 CERES 射出长波辐射数据, 发现这五种数据的气候值在冬季和夏季与 CERES 非常接近, 绝对偏差和均方根偏差 (RMSD) 小于 5 W·m^{-2}, 陆表偏差随季节变化, 海洋偏差相对稳定. Susskind 等 [40] 发现全球和热带射出长波辐射距平的时间序列与厄尔尼诺/拉尼娜的变化相关. Su 等 [41] 利用 2003−2013 年 CERES 和 AIRS 射出长波辐射数据, 得到了热带 (30°N−30°S) 白天和黑夜射出长波辐射的平均趋势, 发现由该时段初期的厄尔尼诺现象和后期的拉尼娜现象导致的下降趋势, 白天下降速度远快于夜间, 且下降速度不同的原因尚不清楚.

遥感数据的局限性在于其无法提供满足大气顶净辐射不平衡量准确计算所需的观测数据, 因为净辐射不平衡量是进出辐射通量之间的差值, 比辐射通量小两个数量级. 例如, 使用 2005 年 7 月至 2015 年 6 月 CERES 分量数据计算的大气层顶全天平均全球净辐射量约为 4.3 W·m^{-2}, 远大于预期 [37]. 因此, 使用其他数据标定遥感数据非常必要. 海洋的能量变化, 比大气、陆地和冰冻圈小得多 [42,43], 其中 90% 以上的地球能量不平衡被存储在海洋之中, 最准确的能量不平衡确定方法是测量海洋温度的升高, 以及陆地温度的升高、海冰质量的减少、大气温度、湿度的增加. 对海洋热容趋势的观察可用于标定遥感观测, 从而获得热量吸收的绝对值 [44], 并提供大气层顶净辐射变化的独立估计.

还有其他方法也可以估算大气层顶辐射不平衡. 例如 Resplandy 等 [45] 通过确定大气中的氧气 (O_2) 和二氧化碳 (CO_2) 含量, 量化了海洋吸收的热量以及大气层顶能量不平衡. 当海洋变暖时, 可溶解的 O_2 和 CO_2 浓度降低, 海洋中损失的气体量可以通过在大气中观察到的互补变化来量化. 据估计, 海洋每年获得的热量为 1.33±0.20×1022 J, 相当于 1991−2016 年大气层顶净辐射不平衡量为 0.83±0.11 W·m^{-2}.

2.1.2 地表能量平衡

地表能量平衡估算方法, 大致可分为两大类型 [29]. (1) 依靠卫星遥感反演和其他来源的大气及地表参数的估算方法. 例如辐射传输模拟和基于辐射传输模拟发展的参数化方法. 模型输入参数的不确定性会影响模拟的地表能量平衡精度, 输入数据的缺失会导致模拟/反演结果的缺失. (2) 遥感直接反演, 建立大气层顶观测与地表辐射能量平衡参量之间的关联, 也叫混合方法, 其具有易实施且精度可靠的特点.

下行短波辐射是陆面模式的输入参数, 也是高级遥感数据蒸散发和植被生产力的输入. 除了宽波段辐射计 (例如 CERES) 外, 极轨或静止卫星上的多光谱传感器观测数据也已用于产生下行短波辐射数据, 例如 MSG/SEVIRI[46], GOES[47], GMS5[48], MTSAT[49], ABI[50], MODIS[51] 和 AVHRR[52]. 已有研究提出了许多下行短波辐射的估算方法 [53]. 第一种方法是使用从其他来源中获取的云和大气参数输入到辐射传输模型, 模型可具有多种复杂度, 即从简单的分析公式到复杂的机理模型 [54]. CERES[55], ISCCP[56], GEWEX[57] 和 SEVIRI[58] 下行短波辐射数据基于这种方法生成. 第二种方法是混合算法, GLASS 第一版辐射数据使用该算法生成 [59]. 此外, 还有其他类型的方法, 例如优化方法 [60] 和机器学习方法 [61]. CMIP5 模型模拟的下行短波辐射相互之间具有比较大的差异. 遥感数据估算的全球平均下行短波辐射各不相同. 下行短波辐射具有明显的年际变化 [62], 影响其长期变化的因素包括云、气溶胶和辐射活性气体 [63]. 显然, 当前对下行太阳辐射的认知仍然具有很大的不确定性.

短波反照率是地表半球反射率在太阳光谱 (0.2~5.0 μm) 上的积分. 准确的短波反照率可以显著改善天气和气候模式的模拟精度 [64]. 已有研究开发了许多利用极轨和静止卫星观测数据反演短波反照率的算法 [65]. 常规方法包括三个基本步骤:

大气校正、二向反射建模, 光谱转换 [66]. 这种方法被用于生成 MODIS 陆地反照率数据 [67]. 一个替代方法是直接估算算法, 其将这三个步骤合并为一个步骤, 通过回归方法直接得到宽波段反照率的最佳估计 [68,69]. 该算法已应用于生成 GLASS 反照率数据 [59], 以及用于 VIIRS 数据 [70]、中国 HJ 数据 [71] 和 MISR 数据 [72]. MODIS 和 GLASS 反照率数据应该是最精确的全球地表反照率数据, 由此计算的全球年平均值分别为 0.2417 (GLASS) 和 0.2319 (MODIS). 基于 CMIP5 模式模拟结果的年平均反照率为 0.2542±0.0188.

下行长波辐射是大气加热地表的直接度量, 主要由云和大气温/湿度廓线决定. 如果具备精确的大气参数, 输入辐射传输模型, 是获得下行长波辐射最有效的方法 [73]. 参数化是早期常用的下行长波辐射反演方法, 核心是使用云盖、近地面温湿度信息计算下行长波辐射, 具有简单易用的特点, 尤其是在局地尺度 [70]. 晴天的下行长波辐射还可以使用混合方法估算, 即建立大气层顶辐亮度和下行长波辐射的经验关系 [74]. 云天的下行长波辐射反演, 主要使用基于云温度的方法 [75]. 因光学传感器不能穿透云, 早期的研究使用云顶温度 [76], 实际上直接影响下行长波辐射的应该是云底温度 [77]. 主流的下行长波辐射数据主要有 ISCCP-FD、GEWEX、CERES, 其空间分辨率在 100 km 量级. 此外还有 EUMETSAT CM-SAF[78] 和 GLASS, 其中 GLASS 的空间分辨率为 1 km, 是目前空间分辨率最高的全球长波数据 [79,80].

上行长波辐射由地表温度和地表宽波段发射率直接决定. 大尺度上地表温度主要由遥感获取 [81]. 热红外和被动微波是遥感获取地表温度的两种方式. 其中热红外获取地表温度具有空间分辨率高及精度高的优势, 但因受云的影响, 数据缺失严重; 被动微波获取地表温度具有全天候特征, 但分辨率和精度相对较低. 迄今为止, 热红外获取地表温度数据发展趋于完善, 已被广泛使用 [82−84], 微波获取地表温度的报道尚少. 为了实现大尺度地表能量平衡的计算, 融合微波和热红外获取地表温度是一个有效途径, Xu 等 [85] 提出一种融合策略, 获得了长时间序列、中国区域 1 km 无缝地表温度的数据. 陆面模式通常将地表宽波段发射率设置为常数, 研究发现这种方式会给陆面温度和通量模拟带来很大误差 [86]. 通过分类赋值以及光谱发射率数据光谱转换得到的地表宽波段发射率, 在精度、空间完整性、时效性上存在明显缺陷 [87−89], 有研究提出了新的地表宽波段发射率反演方法, 生成了 GLASS 地表发射率数据, 具有 1 km 的空间分辨率, 8 天的时间分辨率, 40 年的时间跨度 [79].

2.1.3 面临的问题

在过去的半个世纪中, 通过卫星遥感观测估算地球能量平衡取得了重大进展, 但是估算结果仍存在很大的不确定性. 例如, 最近研究估算的大气层顶能量不平衡在 0.5∼1 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 之内. 遥感估算地球能量不平衡是基于估算的三个独立分量, 他们的量级约为数百 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$, 因他们的差异 (表征能量不平衡) 太小而无法准确估算, 故 GCOS 要求的 0.1 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 精度 (GCOS 2016) 将难以达到. 卫星传感器的辐射校准误差也会使得大气层顶能量不平衡无法准确估计. 海洋热容数据已用于校正卫星遥感估算值. 未来需要付出更多的努力以提高估算地球能量平衡分量的准确性及总体能量的不平衡. 此外, 应继续寻找其他独立的方法, 包括测量辐射压力或大气中的氧气 (O_2) 和二氧化碳 (CO_2).

现有的卫星由不同的机构或国家运营, 通过加强国际合作来进行更好的计划和协调, 对于改善监控全球能量平衡的精度和一致性至关重要. 卫星星座可能是提高地球能量平衡估算精度的一种方法. 基于理想化的模拟, Gristey 等 [90] 研究结果表明, 需要 36 个卫星的基准星座来估计全球日均反射太阳辐射和射出长波辐射, 误差为 0.16 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 和 -0.13 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$. 实际上, 近来已经提出了针对地球能量平衡的小型卫星星座 [91], 但是需要针对虚拟星座开展更有针对性的研究.

经过可靠标定的遥感数据是准确估算地球能量平衡的先决条件. 但早期的卫星传感器没有机载定标设备. 气候绝对辐射和折射观测平台 (CLARREO)[92] 旨在为其他卫星传感器提供一个在轨参考校准标准, 寄希望于 CLARREO 改善现有传感器的绝对辐射校正精度和稳定性. 但 CLARREO 仅适用于短波部分, 长波部分还需要类似的校准系统. 多光谱波段传感器的相互校正是个替代方案.

现有的反演算法都是针对特定的卫星数据和特定的变量. 通过算法集合或融合单一变量的多种算法估算结果, 取得了较好的进展 [93]. 例如, 整合多个

卫星观测数据 [94], 通过数据同化方法, 同时估算一组变量已经取得了进展 [94,95]. 在构建虚拟星座条件下, 集成来自多光谱和宽波段传感器的多个卫星数据需要进一步探索.

简而言之, 目前直接从卫星遥感观测得到的大气层顶和地面能量通量的估计值仍无法满足精度要求. 但是, 基于宽波段以及众多的多光谱传感器获取了大量的观测数据并不断提出了许多新的反演方法, 能量通量的估算精度将得到显著提高. 地表的能量收支, 尤其是热通量 (潜热和显热) 具有较大的不确定性, 这需要从加强地面测量、卫星数据反演以及模式模拟集成等方面进行改善. 目前对大气层顶能源不平衡的估计主要依赖于经过海洋热容标定的 CERES 数据. 多光谱观测数据和其他方法具有提供独立估计的潜力.

2.2 水循环

陆地水循环系统包括降水、蒸散发、径流、土壤水、冰与积雪、地表水、地下水等诸多过程与要素, 是驱动地球系统中各种物质能量传输与转化的核心动力之一, 也是影响地球系统演化、气候和环境变化等地球科学前沿性和基础性科学问题 [96,97]. 在气候变化和人类活动影响下, 陆地水循环过程发生了显著改变, 并导致了一系列资源和环境问题. 陆地水循环的特征变化是全球变化的重要表征和驱动因素, 进而关系到水资源与粮食安全、减小干旱与洪涝灾害影响、控制水土流失与生态退化等一系列有关国家重大战略需求的热点问题. 近年来中国在空间地球观测领域迅速发展, 特别是气象、海洋、高分等业务卫星以及相关专题卫星的战略性部署, 已经逐步达到国际先进水平.

目前遥感手段可以提供许多陆地水循环关键参量的定量信息, 包括国内外航天机构发射的一系列对地观测卫星 Aqua, GPM (Global Precipitation Measurement), SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), SMAP (Soil Moisture Active Passive), GCOM-W (Global Change Observation Mission- Water), FY-3, HY-2, Sentinel, GF 等. 遥感观测可以提供大范围、长时序的水循环参量数据, 包括重要的水循环过程量, 例如降水和蒸散发, 以及关键的水循环状态量, 例如土壤水分 (液态水) 和雪水当量 (固态水), 极大推动了对于陆地水循环过程的认识和理解.

大气中的水气、云和降水等参量在大气环流的作用下实现不同区域水资源的输送. 光学遥感和微波遥感是获取大气水气总量的主要手段, Hu 等 [98] 新开发的光学静止卫星反演算法已被应用于中国风云二号静止卫星, 作为官方算法生成大气水气总量数据. Wang 等 [99] 提出的基于微波辐射计的海洋上空大气水气总量算法不需任何辅助数据便可达到较高的精度. Du 等 [100] 和 Ji 等 [101] 针对 ASMR-E, AMSR2, FY3D-MWRI 等微波辐射计缺失陆地上空大气水气总量的问题, 提出了较好的解决方案, 这为生成长时序, 不受云影响的大气水气总量遥感数据奠定了基础. 在云遥感方面, 光学遥感是反演云参数的主要手段, Husi Letu 等 [102,103] 提出了新的冰晶光闪射模型, 发展了冰云微物理反演算法, 显著降低了冰云参数的反演误差. 遥感作为降水数据获取的手段, 在空间覆盖和时效性上有很大的优势. 中国最新的静止气象卫星风云四号可实时获取中国及周边地区的降水估计数据 (时间分辨率 5 min, 空间分辨率 4 km). 通过多源数据融合的方式可在一定程度上提高遥感降水精度, Shen 等 [104] 通过融合地面观测数据与遥感降水数据生成了中国地区长时序的降水融合数据. Ma 等 [105] 提出了利用动态贝叶斯模型融合多源遥感数据的方法, 融合多源遥感数据的优势, 获取最优的降水数据. 然而由于降水发生时复杂的大气条件严重影响了当前利用卫星遥感反演降水的精度, 考虑到雷达在获取降水三维结构上的优势, 因此发展新一代的星载降水雷达技术对于将来改进卫星遥感降水能力具有重要意义.

土壤水分变化对于陆地蒸散发、降雨、汇流、产流过程的空间分布与强度具有重要影响, 在水文学和陆面模式中必须准确表达. 目前中国已有基于风云三号气象卫星微波成像仪的土壤水分业务化数据, 算法主要利用地表粗糙度影响的极化差异, 进行辐射传输模型的逆向解算 [106]. 随着风云三号 D 星的投入使用和植被校正方案的改进 [107], 风云三号卫星已经持续发布了 10 年以上的土壤水分遥感数据. 同时, 海洋二号搭载的微波成像仪也具备了陆表土壤水分的探测能力 [108]. 基于中国气象局陆面数据同化系统, 国家气象信息中心发布了涵盖多层土壤水分的近实时数据集 [109], 以及集合同化算法、多源融合方法、陆面模式及地表参数优化等核心技术的中国陆面土壤水分再分析数据 (1979 至今). 基于自动标定参数的陆面同化系统, 以中国区域高时空分辨率的地面气

象要素数据集驱动陆面过程模型, 通过同化微波辐射计观测亮温, Yang 等 [110] 生成和发布了基于微波数据同化的中国土壤水分数据集 (2002−2011), 发现土壤水分含量与降水和蒸发的空间分布基本一致, 即中国东南部湿润、西北干旱. 以土壤水分为首要研究目标之一, 中国面向未来土壤水分空间观测能力的提升和可持续性, 已经论证了空间科学先导专项中的全球水循环卫星观测计划 [111] 以及民用空间基础设施部署的陆地水资源卫星任务, 并在流域尺度开展了天–空–地协同的土壤水分遥感专题试验 [112], 有效支撑了先进综合孔径微波辐射计的载荷设计与论证.

中国在遥感雪深和雪水当量监测方面进行了大量探索和算法研究. 基于被动微波遥感雪深和雪当量反演的工作主要体现在如下方面. 在半经验线性算法的基础上, 修正了基于 SMMR 中国西部地区的雪深反演算法 [113], 基于地面台站观测, 改进了基于 SMMR 和 SMM/I 的中国区雪深反演算法 [114]. 由于星载微波辐射计空间分辨率粗 (约 25 km), 混合像元问题一直被认为是影响雪深和雪水当量反演的最重要因素之一, 为了解决该问题, 已有研究引入积雪覆盖度来改进中国地区的雪深监测算法 [115,116]. 但在业务化算法中引入积雪覆盖度无法保证算法的时效性, 因此 Jiang 等 [117] 利用 2002−2009 年的 AMSR-E 数据和气象台站的常规观测资料, 引入混合像元分解思路, 建立了考虑不同地表覆盖类型对雪深反演影响的算法. 目前该算法已作为中国风云卫星三号微波成像仪的雪深/雪水当量业务化监测算法. 此外, 还有研究探索了基于积雪辐射模型的雪水当量反演算法. Jiang 等 [118] 发展了基于模型的雪水当量物理统计反演算法, 该算法基于考虑多次散射的双矩阵方法求解雪层矢量辐射传输方程, 得到了包含多次散射的积雪辐射参数化模型 [119]. Dai 等 [120] 基于 MEMLS 模型建立了一种融合先验知识的查找表, 进而实现了基于查找表的雪深/雪水当量反演. Che 等 [121] 进一步将该算法拓展到林区雪深反演研究中. Che 等 [122] 利用 MEMLS 多层积雪辐射半经验模型结合陆面模式 CoLM (Common Land Surface Model) 中的积雪模块进行了积雪参数同化研究. 借助辐射传输模型与积雪物理过程模型建立关系, 通过同化卫星观测亮温, 可以有效减小卫星观测反演积雪物理参数的误差. 近年来机器学习方法也用于雪深的反演中, Xiao 等 [123] 提出了运用支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 方法, Yang 等 [124] 运用随机森林 (Random Forest) 机器学习方法, 结合地理辅助数据和卫星亮温数据发展了中国地区逐像元动态雪深反演算法, 并利用该算法重建了 1987−2019 年的雪深数据, 其气象站点验证结果表明, 反演精度得到明显提高. 如上所述, 被动微波遥感混合像元问题一直是个难题, 有望通过超分辨率重建方法和混合像元分解方法 [125−128] 实现亮温降尺度, 通过提高亮温数据的空间分辨率, 以减弱混合像元问题对雪深反演的影响. 但亮温降尺度方法同样存在误差, 也会对雪深反演造成影响. 目前, 被动微波混合像元问题尚未解决, 仍有待进一步深入研究.

利用雷达观测反演雪水当量研究始于 SIR-C/XSAR, 多个地面测量实验证实了不同雷达后向散射系数与雪水当量 (SWE) 之间的关系 [129,130]. 为了开展全球雪水当量高分辨率时空监测, Shi 等 [111] 提出一项旨在进行全球水循环要素综合观测的卫星计划 (WCOM), 拟利用 X 和 Ku 波段微波散射计实现雪水当量的高时空分辨率全球监测. Du 等 [131] 建立了积雪雷达后向散射体散射分量的参数化方案, 描述了单次散射反照率及雪层光学厚度与积雪后向散射中体散射分量之间的关系, 可以用于雪水当量反演. Cui 等 [132] 针对 WCOM 卫星设计特点, 基于 Bicontinuous-VRT 模型模拟的 X 和 Ku 波段数据发展主动微波雪水当量反演算法, 利用实测数据对反演结果进行了验证, 结果较好.

陆表蒸散发是陆表水分平衡和能量平衡的过程变量, 受到地表水分、植被、覆盖类型等状态以及大气的风、温、湿、压共同影响. 当前卫星传感器尚不能直接观测陆表蒸散发, 但借助诸如地表温度、地表覆盖类型、植被指数、土壤水分、积雪覆盖和雪水当量等参量的遥感数据, 采用遥感蒸散发模型可以实现陆表蒸散发的估算 [133−135]. 中国科学院青藏高原所研究人员以卫星遥感数据和再分析气象数据作为输入, 利用地表能量平衡系统模型计算得到了青藏高原月平均地表蒸散发, 其在计算湍流通量的过程中引入了次网格地形拖曳参数化方案, 提高了对地表感热通量和潜热通量的模拟. Jia 等 [136] 研发了基于多参数化方案适用于不同土地覆盖类型的地表蒸散发估算模型 ETMonitor, 该模型从主控地表能量与水分交换过程的能量平衡、水分平衡及植物生理过程的机理出发, 融合了微波遥感反演的土壤水分及

光学遥感反演的植被生态参数, 并生成了全球逐日地表蒸散发数据. Zhang 等 [137] 在 Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型的基础上, 根据气孔导度理论耦合了 GPP 过程, 模型中相关参数化方案及参数赋值依据不同的植被类型在全球 95 个涡度相关通量站上进行率定, 发布了全球 PML_V2 陆地蒸散发数据集 (2002 至今). 如何提升地表蒸散发相关参量的遥感精度和综合利用多源遥感信息, 改善地表阻抗参数化方案随类型及尺度的自适应能力是蒸散发遥感估算的未来发展方向.

以上陆地水循环关键参量的空间观测研究进展极大促进了地球系统水循环与水资源方面的研究. 例如 Liu 等 [138] 将太阳诱导荧光、土壤水分的卫星观测与大气水分需求量进行综合分析, 发现土壤水分是干旱胁迫对生态系统生产力影响的主导因素, 并且在半干旱生态系统中表现最强. Wang 等 [139] 利用 30 m 地表水体数据分析发现 1989−2006 年中国北方地区地表水体减少, 而南方呈现增加趋势, 这与重力卫星获取的陆地水储量变化表现一致. 中国在陆地水循环空间观测与模拟研究方面取得了长足的进步, 但是水循环遥感研究仍然表现出一定的碎片化, 各个参量之间的系统关联性 (或者水文一致性) 不足, 有待于在全波段遥感辐射建模、水循环多参量协同反演等方面进一步提升研究水平.

2.3 陆地生态系统碳循环

随着近 50 年中国在空间对地观测领域的迅速发展, 应用于陆地碳循环研究的卫星遥感技术开发和应用也得到了迅速发展, 尤其近 10~20 年在部分领域发展迅猛, 已接近和达到国际先进水平.

2.3.1 陆地生态系统结构与生化参数提取及碳循环模拟

陆地生态系统碳循环是复杂的生物物理化学过程的结果, 而卫星遥感资料可用来提取陆地生态系统的许多参量, 为模拟陆地碳循环过程提供不可或缺的信息. 除了土地覆盖类型及其变化、陆表水文参数及大气和陆表辐射参数, 卫星遥感也已大量用来提取与碳循环密切相关的植被结构 (叶面积指数、聚集度指数、植被高度、生物量)、辐射吸收 (光合有效辐射吸收率, FPAR)、生化 (叶绿素) 和功能 (叶绿素荧光) 等参数. 中国在这些参数的研究方面取得了许多国际先进或领先的结果.

叶面积指数代表叶面积的量, 即单位土地面上所有叶面积 (单面或所有面的一半) 的总和, 是决定植被吸收光合有效辐射和进行光合作用最重要的结构参数. 目前, 中国已有两套业务运行的全球叶面积指数数据, 分别是 GLASS[140] 和 GLOBMAP[141]. GLASS 在辐射传输的理论框架下融合全球多种数据并生成全球叶面积指数数据 (1981 至今, 8 天步长, 0.05° 分辨率). GLASS 也同时提供相对应的 FPAR 数据. GLOBMAP 进一步开发了 GLOBCARBON 算法 [142] 并无缝 (像元尺度) 衔接了 AVHRR (1981−2006) 和 MODIS (2000 至今) 数据, 从而产生了全球叶面积指数数据集 (1981 至今, 8 d, 1~8 km). GLOBCARBON 算法同时被国家卫星气象中心采用并用风云卫星系列的 MERSI 传感器观测进行业务运行, 产生全球叶面积指数数据 [143].

聚集度指数用来描述叶片空间分布格局, 因为叶片通常聚集于树冠、树枝以及分支之内或受到行播作物结构的限制而在空间分布不随机. 聚集度指数是第二个植冠结构参数, 与叶面积指数同等重要, 对植被的光吸收、光合作用及蒸散发有很大的影响 [144,145]. 在全球尺度, 聚集度指数可从多角度光学遥感观测获取. Zhu 等 [146] 利用中国多地的观测资料和 MODIS 资料验证了并改进了中国的聚集度指数图. Wei 等 [147] 采用同样的算法用 MODIS 双向反射数据生成了有季节变化的全球聚集度指数长时间序列 (2000−2016 年, 500 m, 16 d), 为全球生态系统碳水循环研究提供了更详细的时空分布数据.

植被高度影响阳光在植被内的分布和植被粗糙度从而影响陆气相互作用. 用激光雷达可较可靠地获取植被高度的空间分布数据. Wang 等 [28] 利用星载激光高度计 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 数据计算了全球树高的分布 (500 m 分辨率, 2005−2006 年). 由于采用了 MISR 卫星传感器的多角度信息, 其结果提高了原有树高数据的精度 [148]. 叶片叶绿素含量是植物获取光合有效辐射的主要机制, 其时空变化也影响叶面积指数的反演精度, 反之亦然. Xu 等 [149] 开发了双植被指数的查找表方法来克服叶面积指数对叶绿素反演的影响, 并利用该方法产生了全球叶绿素分布图. 这一研究与国际最新成果 [150] 有异曲同工之处. Li 等 [151] 同时也提出了一个对叶面积指数不敏感的叶绿素指数 (LICI) 并成功应用于不同行播结构的农作物叶绿素提取. 太阳诱导叶绿素荧光 (SIF) 是叶绿素所吸

收的可见光被叶片内的光合作用系统 (photosystem) 以更长的波长发射的微量辐射, 在通常条件下与叶片的光合作用率近似线性相关. 中国在 SIF 遥感应用研究的几个方面取得了突出的成就. (1) 从 TanSat 提取 SIF 的全球分布, 所产生的数据集与现有全球同类数据质量类似, 同时弥补了高纬度地区资料不足的缺陷 [21]. (2) 在农田进行 SIF 的多角度观测, 验证了从单角度观测到半球面逃逸系数的算法并将此算法应用于卫星资料处理 [152,153]. (3) 将 SIF 与光化学指数 (PRI) 结合提高反演总初级生产力的精度并用全球 61 个通量站点的资料进行验证 [154]. (4) 利用全球 2001−2015 年 SIF 资料, 结合 1981−2015 年 AVHRR 和 2000−2015 年 MODIS 资料计算了全球 GPP 和 CO_2 施肥效应在 1981−2015 年期间的变化, 得出了 CO_2 有显著下降趋势的重要结论 [155], 对预估未来陆地生态系统碳循环和气候变化提供了新的认识和数据依据.

以上植被遥感的进展极大地促进了中国在陆地碳循环研究方面的迅速发展. Piao 等 [156] 和 Zhu 等 [157] 分别提出中国和全球生态系统自 1981 年以来有逐渐变绿的趋势 (即叶面积指数在增加), 并分析了变绿的原因. Chen 等 [158] 估算了全球变绿对 1981−2016 年陆地生态系统碳汇的影响 (12.4%) 并区分了 CO_2 施肥效应, 气候变化, 氮沉降对碳汇的影响. 继 Fang 等 [159] 对中国碳汇的首次估算之后 (1970−1998 年, 0.021 PgC yr-1), Wang 等 [160,161] 通过将短期的遥感资料和长期的气候资料 (1901−2001 年) 相结合, 考虑了森林扰动和植树造林对森林年龄和再生长的影响, 模拟了中国森林碳汇在 1901−2001 年的变化, 并得出由于 20 世纪 70 年代末大片植树造林 1980 年以来碳汇在迅速增加的结论 (1987−2001, 0.178± 0.045 PgC yr-1). Yu 等 [162] 利用卫星遥感土地覆盖和 FPAR、站点通量、气象、氮沉降等资料, 对中国亚热带季风区森林碳汇进行了全面评估, 得出较高的碳汇估计 (2000−2005 年, 0.72± 0.08 PgC yr-1), 并将此碳汇归因于中国植树造林和氮沉降的影响.

虽然以上的碳汇估算差别较大, 中国森林碳汇随着森林面积的增加和进入中等年龄的生长旺期所呈现的增加趋势是明显的. 同时所伴随的氮沉降也进一步增强了森林生长和碳汇. 除此之外, Jiang 等 [163] 用嵌套式的大气反演方法也获得了中国陆地碳汇 (2006−2009 年, 0.39∼0.51 PgC yr-1). 该方法不仅使用了叶面积指数计算 GPP 和碳汇, 同时还利用了全球的大气 CO_2 浓度观测网和中国周边的飞机观测资料并结合了大气传输模型计算网格化 (1° 分辨率) 的陆地碳汇. 其结果包括了所有生态系统类型的碳汇, 但森林是主要碳汇, 其数值与以上结果大致吻合. Wang 等 [164] 同时使用了地面和卫星 CO_2 浓度观测资料对中国地区的碳汇进行网格化 (4°×5°) 反演, 获得了非常高的碳汇 (2010−2016 年, 1.11±0.38 PgC yr-1). 中国 20 世纪 70 年代末的大片植树造林和 2000 年后的退耕还林可能是产生碳汇增高的主要原因, 但粗分辨率大气反演的误差以及缺乏利用地表卫星资料对反演进行限制可能使得反演的碳汇大幅度偏高. 总之, 中国在应用卫星资料研究陆地碳循环方面有了很大的进展, 为全球变化研究做出了积极的贡献, 但现有结果的不一致性还很大, 有待于更多和更精确的遥感数据和更精细的模型开发以提高陆地碳循环的研究水平.

2.3.2 全球碳同化系统

卫星遥感资料不仅提供地表各种参数, 同时也产生了大量的大气 CO_2 柱浓度资料. 碳同化系统是通过综合利用地表和大气观测来优化计算全球陆地生态系统碳通量的新技术. 为降低陆地生态系统碳通量估算结果的不确定性, 美国 NOAA 于 2007 年建成了全球第一个面向业务运行的全球碳同化系统 (Carbon Tracker, CT), 该系统采用嵌套式大气输送模式 (北美地区 1°×1°, 其他地区 3°×2°), 同化全球地面和飞机 CO_2 浓度观测数据, 优化每周的全球生态系统碳通量. 国际上先后移植了该系统, 分别建立了以欧洲 (CT-Europe)、亚洲 (CT-Asia)、澳洲 (CT-Australasia) 和中国 (CT-China) 为中心的 CT 系统.

中国在全球碳同化领域的研究起步较晚, 但发展较为迅速, 具备了自主开发全球碳同化系统的能力. 2010 年在全球变化研究国家重大科学计划项目 “全球不同区域陆地生态系统碳源汇演变驱动机制与优化计算研究 (2010CB950700)” 支持下, 南京大学和北京师范大学开展了相关研究, 合作开发了具有自主知识产权的全球碳同化系统 GCAS (Global Carbon Assimilation System) [165]. 其中, GCAS 系统的观测算子、同化算法和误差估计等核心算法全部自主完成, 其与欧美的 CT 不同之处在于, GCAS 采用了多个模型的陆地生态系统先验碳通量, 还将大气 CO_2 浓度作为一个状态变量进行优化 [166]. 该系统也能同时优

化关键的生态系统参数, 实现大气和生态系统的耦合模拟 [167].

在中国科学院先导专项和国家高技术研究发展计划项目支持下, 中国科学院大气物理研究所基于先进的集合四维变分同化方法 POD-4DVar 自主建成了全球碳同化系统 Tan-Tracker[168]. 该系统面向中国碳卫星 TanSat 设计, 可同化卫星和地面 CO_2 浓度观测数据, 其空间分辨率为 2°×2.5°, 采用 4D 滑动采样以提高计算效率. 此外, 中国气象科学研究院和中国科学院地理科学与资源研究所先后全套引进了美国 NOAA 的 CT, 将嵌套区域 (1°×1°) 由北美移到了中国区域, 加入了中国及周边地区更多的 CO_2 观测数据, 开展了中国和东亚地区生态系统碳通量优化研究. 这两套系统分别命名为 CarbonTracker-China 和 CarbonTracker-China-CAS.

联合同化卫星和地面大气 CO_2 浓度、站点通量数据、遥感地表参数等数据, 同时优化生态系统和人为源碳通量全球碳同化系统, 是 2016 年开始实施的国家重点研发计划项目 “基于多源卫星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究 (2016YFA0600200)” 的努力目标 [169]. 项目以 GCAS 系统为基础, 汲取 Tan-Tracker 的优势, 发展了 GCAS-V2, 将大气输送模型的空间分辨率提高到 1°×1°, 可联合同化多源地面和卫星观测数据 [170].

2.4 人类活动

城市和农地是受人类活动影响最为剧烈的地表覆盖类型, 其变化影响着人类居住环境的改变、社会经济的发展、粮食安全与生态环境的保护. 遥感技术具有覆盖范围广、获取成本低、时效性强等优点 [171]. 因此, 以遥感技术为代表的空间地球科学的发展, 为监测城市化、城市环境变化和农地变化提供了新的视角, 是研究人类活动与周边自然环境交互的重要工具. 随着中分辨率遥感卫星数据, 例如 Landsat (1972−), Sentinel (2010−) 数据以及国产卫星 (高分系列卫星等) 数据的免费公开获取, 国内的城市和农地遥感制图取得了一系列重要进展.

2.4.1 城市化进程

遥感技术在城市研究领域的应用最早可以追溯到 20 世纪 80 年代, 相关调查研究主要依赖于航空相片, 该阶段的主要方法是目视判别且多为定性研究 [172,173]. 进入 20 世纪 90 年代, 随着光学遥感数据的丰富, 以定量监测城市扩张为主要特征的相关研究得到了快速发展. 例如, Dai 等 [174] 应用两个时相的 TM 影像, 分析了北京的城市扩张变化. 这类研究监测的主要对象是城市的不透水面, 包括房屋建筑、道路、停车场等人造面. 针对城市建筑环境本身的复杂性 (范围小、变化快、光谱及空间特征多样), 研究开发了不同的分类和特征提取算法来提高城市动态监测的精度和效率, 例如光谱解混、空间纹理、面向对象分类等方法 [175−177]. 然而, 受遥感数据和计算能力所限, 这类研究主要集中在单个城市或城市群, 缺乏大范围和长时序的相关研究. 在过去的近 20 年里, 随着遥感影像资料的逐步公开化 (例如美国陆地卫星系列 Landsat)[178], 以及新一代云计算平台的发展 (例如 Google Earth Engine, GEE)[179], 开展大范围、长时序、高时空分辨率的城市动态监测成为了可能. 例如, Gong 等 [180] 基于 Landsat 数据和 GEE 平台绘制了全球逐年 30 m 分辨率的不透水面数据集 (1985−2018 年). 同时, 随着卫星遥感技术的进一步发展, 多种不同城市遥感监测维度 (或观测数据) 也被广泛应用于描述城市环境的变化, 包括夜间灯光 [181], 雷达数据 [182] 等.

近年来, 随着高分遥感数据的逐步普及, 以深度学习为代表的城市研究正在受到越来越广泛的关注, 且其监测维度也从传统的不透水面进一步深入到建筑的轮廓等城市的其他特征要素 [183,184]. 这些对地观测技术的发展和城市环境时空动态演化特征的识别, 为城市化机制研究与城市动态过程模拟以及城市化进程对自然环境的影响提供了重要的数据基础 [185].

2.4.2 农地遥感制图

近 40 年来, 农地遥感制图的空间分辨率已经从公里级别逐渐提升到百米、十米级. 在全球尺度上, 清华大学团队基于 Landsat 数据率先完成了首套 30 m 分辨率地表覆盖数据集 FROM-GLC[186] 和首套 30 m 农地分布数据集 FROM-GC[187], 并且进一步提出了有限样本稳定分类理论, 实现了样本时空迁移, 完成了全球首套 10 m 分辨率包含农地等 10 种类型的地表覆盖数据 FROM-GLC10[188]. 随着中国农业生产向集约化方向转变, 大范围、动态、及时的农地空间信息需求非常迫切 [189]. 一系列长时间序列遥感数据的开放促进了农地动态遥感制图向更高时间频率发展. 其中的农地分布遥感数据为中国的土地覆盖和农地资源调查提供了重要基础, 但也存

在自动化程度不高, 难以实现农地动态连续监测的问题. 中国科学院地理所团队使用 Landsat、高分 -2 等数据, 基于人机交互方式识别变化区域和类型, 建成了 1990−2015 年 6 期中国土地利用数据库 [190,191]. 有研究使用粗分辨率数据完成了全球/中国长时间序列土地利用/覆盖数据, 获取了全球/中国农地分布和变化信息 [192,193]. 由此, Xu 等 [194] 针对观测数据充足的区域, 开发了一套基于变化检测的逐年农地更新算法, 农地变化识别精度比传统分类精度有了显著提高. Xu 等 [195] 进一步提出了基于多源遥感数据时间序列断点检测方法, 克服了大区域农地制图中存在的时空覆盖不全的难题, 实现了中国 1980−2015 逐年土地利用数据构建. 这套制图数据揭示了中国近 40 年来农地等类型的时空动态过程, 具备了与逐年统计数据相一致的更新频率. 伴随着农地制图的时空精度提高, 农地制图对象也逐渐细化, 从单一的农地制图向灌溉和非灌溉区制图 [196]、作物类型制图 [197−199] 等方向发展.

2.4.3 面临的问题

中国城市与农地遥感制图在时空分辨率上有了显著提升, 但仍存在数据间不一致性较大、变化识别不准确、大尺度连续制图业务化程度不高等问题. 高精度、快速及时的农地动态遥感监测是重要的未来发展方向. 未来的城市与农地研究都需要进一步探索人为活动与自然系统的交互, 因此需要将遥感观测与社会感知进行深入连结, 开展相关的机理研究, 并推动模型发展.

首先, 传统的基于土地覆盖的遥感监测需要进一步拓展到土地利用 (例如居住、商用、工业、灌溉、种植强度等), 以更好地理解人为活动的空间分布及动态 [200,201]. 土地利用可以间接反映城市内部和农地地块上更加精细的人口分布及行为模式, 从而辅助人类多动中的能源使用和排放等相关研究. 实现这一过程依赖于高分辨率的遥感数据 (亚米级) 来反映城市内部和农地地块上的复杂要素, 例如经济发展水平 [202], 城市建筑三维高度 [203] 以及作物健康状态 [204] 等.

其次, 要发展相应的模型和方法来探讨遥感观测与自然及社会经济指标的关系. 在传统的土地覆盖/利用变化基础上, 深度串联多个子模块 (例如城市热岛、人口动态、能源经济、粮食安全、生物多样性、人群健康评估等), 发展区域和全球尺度的人类活动环境综合评价耦合系统或模式, 为评价未来人类活动的生态环境影响提供支撑 [205].

3 空间地球科学发展面临的机遇与挑战

3.1 国际发展趋势

随着地球系统科学快速发展, 学科交叉不断深入, 将地球系统作为一个整体复杂系统的研究方式对认识气候变化和其他全球环境问题至关重要. 从空间地球科学及探测技术的发展趋势来看, 当前空间地球科学及探测技术发展具有以下特点.

(1) 更加关注地球系统中的关键循环过程及系统性. 以地球科学发展前沿和国家重大需求牵引, 如何提高传统的天气、气候、水文、生态等的预测预报能力面临着巨大的压力. 人们已认识到地球中的物理、生物化学等自然过程以及人类活动的相互影响和复杂性. 例如, 水文学更关注地表水文过程模型中的产流、汇流、蒸散发等过程的描述, 对驱动地表水文过程模型中降雨数据的时空分布和误差了解不足是导致目前地表水文过程模型预报不确定性的一个重要因素. 综合交叉研究驱动地球系统的关键循环过程 (例如能量和水循环、碳循环等) 是当前地球科学全新的发展思路, 也是促进地球系统科学取得突破性进展的关键步骤.

(2) 明确科学目标下的卫星观测与模型有机结合. 卫星观测和地球系统科学发展已成为一个相互促进的有机整体. 卫星遥感提供的全球观测提高了人们对地球系统科学的认识. 例如卫星对海水表面温度的长期观测, 揭示了海洋在全球气候变化中的作用. 地球系统科学研究离不开高精度、多尺度、立体、全覆盖、连续过程的观测信息, 这种需求促进了全球范围内各种卫星计划、新型传感器和参数反演方法的发展. 遥感观测与地球系统各模型的有机结合已成为目前发展的主要趋势.

3.2 中国空间地球科学未来发展策略

未来 15∼20 年, 中国空间地球科学要以重大科学问题为导向, 创新和提升地球观测水平和能力, 加强空间地球科学关键和交叉领域的前沿科学与技术问题的研究, 在包括全球变化和各圈层科学研究方面形成有中国特色的科学理论与方法体系, 力争在空间地球科学若干领域进入国际先进行列, 取得有国际影

响的重大原创性成果.

加强中国空间地球科学的顶层设计, 针对国际地球科学的重大问题、联合国可持续发展目标、国家安全、环境灾害监测中的重大理论和关键技术问题, 加强空间地球科学研究的原始创新和地球三大自然循环系统的综合集成, 在地球科学研究中做出基础性、战略性、前瞻性的重大贡献.

建设以空间地球科学研究为主的国家级科学研究基地, 造就培养一批站在国际前沿的中青年学术带头人, 全面提升中国空间地球科学自主创新能力, 为实现空间地球科学整体跨越发展奠定基础.

3.2.1 发展中国的空间地球科学系列卫星计划

空间地球科学的发展依赖于空间对地观测和测量技术的发展. 对地观测技术的每一次进步, 都会带来空间地球科学新成果的产生和重大突破. 积极发展以国际前沿科学研究为目标并具有突破性、创新性的地球关键要素和过程的空间地球科学卫星, 拓展空间地球科学新方向, 促进技术突破, 并较快转移到实际研究应用中. 同时充分利用中国已经建立的较完整的气象、海洋、资源等业务应用卫星系列, 部署和发展针对地球三大自然循环系统与人类活动影响的系统性观测能力, 推动建设地球系统科学卫星的综合观测体系.

3.2.2 建设支撑地球系统科学的大科学装置

空间地球科学的发展需要空间对地观测技术与地球系统模拟的有机结合, 中国目前在空间对地观测数据服务上还缺乏面向地球科学研究的系统性信息汇集与共享服务, 不具备充分考虑与资料同化系统和地球系统模式相衔接的实验验证能力, 迫切需要建设空间地球系统科学的实验支撑平台, 形成一体化地球综合观测系统仿真模拟、数据汇聚与加工能力, 进行地球辐射与能量平衡系统、水循环系统、碳循环系统以及人类活动相关要素信息提取与多尺度时空无缝数据生产, 实现地球辐射与能量平衡系统、水循环系统、碳循环系统与人类活动时空演变规律大数据挖据与分析, 以及多圈层耦合与互馈机制的模拟分析, 为中国空间地球科学发展提供大科学装置支撑.

3.2.3 深化空间地球科学的国际合作

从空间地球科学的发展态势来看, 各空间大国将更加重视空间领域的国际合作, 合作领域也不断扩大, 合作也从双边合作向跨地区的有多个国家共同参与的多边合作发展. 中国应在积极参与 “地球观测组织 GEO” 等已有国际组织的基础上, 培育和发起以我为主的空间地球科学领域国际大科学计划, 逐步引领空间地球科学领域的发展方向.

4 结语

中国空间科学发展的 40 年, 也是中国空间地球科学从无到有的 40 年. 当前, 中国已成为世界第二大对地观测国家, 气象、海洋、资源、环境减灾、测绘等卫星观测体系不断完善. 高分辨率卫星专项投资近 500 亿, 到 2020 年将发射 30 颗卫星. 2030 年中国将达到 30 颗遥感卫星在轨, 数量可能超过美国, 成为世界第一. 空间基础设施的发展为中国空间地球科学的发展奠定了基础. 空间对地观测技术已广泛在地球科学的各分支方向得到深入应用, 发挥出传统观测手段无法达到或难以实现的作用, 从根本上改变了地球科学的研究方式. 随着中国自主空间地球科学系列卫星计划的实施, 空间地球科学装置的建设, 空间地球科学学科的发展, 必将形成具有中国特色的科学理论与方法体系, 造就培养一批站在国际前沿的中青年学术带头人, 全面提升中国空间地球科学自主创新能力, 全面支撑国家科技进步和经济社会可持续发展目标的实现.

参考文献

[1] COUNCIL N R. Earth System Science: A Closer View [R]. Washington DC: The National Academies Press, 1988: 210

[2] LAWLER A. NASA mission gets down to Earth [J]. *Science*, 1995, **269**(5228): 1208-1210

[3] BORGEAUD M, DRINKWATER M, SILVESTRIN P, *et al*. Status of the ESA Earth explorer missions and the new ESA Earth observation science strategy [C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan: IEEE, 2015: 4189-4192

[4] SIMON P, HOLLINGSWORTH A, CARLI B, *et al*. The Changing Earth: New scientific challnges for ESA's Living Planet Programme [R]. Paris: European Space Agency, 2006: 83

[5] LEEMANS R, ASRAR G, BUSALACCHI A, *et al*. Developing a common strategy for integrative global environmental change research and outreach: the Earth System Science Partnership (ESSP) [J]. *Curr. Opin. Environ. Sust.*, 2009, **1**(1): 4-13

[6] LEFEVRE R J, PEARLMAN J, WIENER T F. The role of science and technology in GEOSS [C]//2010 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2010: 1-7

[7] VAN DER HEL S. New science for global sustainability—The institutionalisation of knowledge co-production in future Earth [J]. *Environ. Sci. Policy*, 2016, **61**: 165-175

[8] LU Naimeng, GU Songyan. Review and prospect on the development of meteorological satellites [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 832-841 (卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 832-841)

[9] JIANG Xingwei, LIN Mingsen, ZHANG Youguang. Progress and prospect of chinese ocean satellites [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 1185-1198 (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 1185-1198)

[10] LI Li. CBERS-04A satellite mission [J]. *Satellite Appl.*, 2020, **1**: 62 (李莉. 中巴地球资源卫星 04A 星 [J]. 卫星应用, 2020, **1**: 62)

[11] WANG Qiao, LIU Sihan. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 1161-1169 (王桥, 刘思含. 国家环境遥感监测体系研究与实现 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 1161-1169)

[12] TANG Xinming, WANG Hongyan, ZHU Xiaoyong. Technology and applications of surveying and mapping for ZY-3 satellites [J]. *Acta Geod. Cartograph. Sin.*, 2017, **46**: 1482-1491 (唐新明, 王鸿燕, 祝小勇. 资源三号卫星测绘技术与应用 [J]. 测绘学报, 2017, **46**: 1482-1491)

[13] TONG Xudong. Development of China high-resolution Earth observation system [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 775-780 (童旭东. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 775-780)

[14] HAN Zhen, JIN Yaqiu, YUN Caixing. Spatial and temporal distributions of suspended sediment contents in the yangtze river estuary using the CMODIS image data from China's SZ-3 spacecraft [J]. *J. Remote Sens.*, 2006, **3**: 381-386 (韩震, 金亚秋, 恽才兴. 神舟三号 CMODIS 数据获取长江口悬浮泥沙含量的时空分布 [J]. 遥感学报, 2006, **3**: 381-386)

[15] ZHANG Dehai, JIANG Jingshan, ZHENG Zhenpan, *et al.* SZ-4 Main Payload-Multi-Mode microwave remote sensor [J]. *Remote Sens. Technol. Appl.*, 2005, **20**: 74-80 (张德海, 姜景山, 郑震藩, 等. 神舟 4 号主载荷–多模态微波遥感器 [J]. 遥感技术与应用, 2005, **20**: 74-80)

[16] LI Hua, DU Yongming, LIU Qinhuo, *et al.* Land surface temperature retrieval from Tiangong-1 data and its applications in urban heat island effect [J]. *J. Remote Sens.*, 2014, **18**: 133-143 (历华, 杜永明, 柳钦火, 等. 天宫一号数据地表温度反演及其在城市热岛效应中的应用 [J]. 遥感学报, 2014, **18**: 133-143)

[17] PANG Y, ZHANG L H, LI Z Y, *et al.* Forest change detection using Tiangong-1 and Landsat 7 Earth observation data [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **18**: 121-125 (庞勇, 张连华, 李增元, 等. 利用天宫一号和 Landsat7 对地观测数据的森林变化检测 [J]. 遥感学报, 2016, **18**: 121-125)

[18] REN Haigen, LI Shengyang. Research progress of Tiangong-2 Earth observation applications [J]. *Manned Spaceflight*, 2019, **25**: 825-833 (任海根, 李盛阳. 天宫二号对地观测应用研究进展 [J]. 载人航天, 2019, **25**: 825-833)

[19] LIU Y, WANG J, YAO L, *et al.* The TanSat mission: preliminary global observations [J]. *Sci. Bull.*, 2018, **63**(18): 1200-1207

[20] YANG D, LIU Y, BOESCH H, *et al.* A new TanSat XCO_2 global product towards climate studies [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2021, **38**(1): 8-11

[21] DU S S, LIU L Y, LIU X J, *et al.* Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite [J]. *Sci. Bull.*, 2018, **63**(22): 1502-1512

[22] HAUSER D, DONG X, AOUF L, *et al.* Overview of the CFOSAT mission [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE, 2016: 5789-5792

[23] TISON C, AMIOT T, BOURBIER J, *et al.* Directional wave spectrum estimation by SWIM instrument on CFOSAT [C]//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE, 2009: V-312-V-315

[24] LIN W M, DONG X L. Design and optimization of a Ku-band rotating, range-gated fanbeam scatterometer [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2011, **32**(8): 2151-2171

[25] WANG Lanwei, HU Zhe, SHEN Xuhui, *et al.* Data processing methods and procedures of CSES satellite [J]. *J. Remote Sens.*, 2018, **22**: 39-55 (王兰炜, 胡哲, 申旭辉, 等. 电磁监测试验卫星 (张衡一号) 数据处理方法和流程 [J]. 遥感学报, 2018, **22**: 39-55)

[26] DU S S, LIU L Y, LIU X J, *et al.* The Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer (SIFIS) onboard the first Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (TECIS-1): specifications and prospects [J]. *Sensors*, 2020, **20**(3): 815

[27] CHEN J M, MENGES C H, LEBLANC S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2005, **97**(4): 447-457

[28] WANG Y Y, LI G C, DING J H, *et al.* A combined GLAS and MODIS estimation of the global distribution of mean forest canopy height [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2016, **174**: 24-43

[29] LIANG S L, WANG D D, HE T, *et al.* Remote sensing of Earth's energy budget: synthesis and review [J]. *Int. J. Digital Earth*, 2019, **12**(7): 1-44

[30] KOPP G. 5.02-Earth's incoming energy: the total solar irradiance [M]//Comprehensive Remote Sensing. Oxford: Elsevier, 2018: 32-66

[31] GUEYMARD C A. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations [J]. *Sol. Energy*, 2018, **168**: 2-9

[32] STEPHENS G L, O'BRIEN D, WEBSTER P J, *et al.* The albedo of Earth [J]. *Rev. Geophys.*, 2015, **53**(1): 141-163

[33] WIELICKI B A, WONG T, LOEB N, *et al.* Changes in Earth's albedo measured by satellite [J]. *Science*, 2005,

308(5723): 825

[34] LOEB N G, SU W, DOELLING D R, *et al*. Comprehensive remote sensing [M]//Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget. Oxford: Elsevier, 2018: 67-84

[35] LOEB N G, KATO S, LOUKACHINE K, *et al*. Angular distribution models for top-of-atmosphere radiative flux estimation from the clouds and the Earth's radiant energy system instrument on the terra satellite. part i: methodology [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2005, **22**(4): 338-351

[36] WANG D D, LIANG S L. Estimating top-of-atmosphere daily reflected shortwave radiation flux over land from MODIS data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2017, **55**(7). DOI: 10.1109/TGRS.2017.2686599

[37] LOEB N, THORSEN T, NORRIS J, *et al*. Changes in Earth's energy budget during and after the "Pause" in global warming: an observational perspective [J]. *Climate*, 2018, **6**(3): 62

[38] KIM B Y, LEE K T, JEE J B, *et al*. Retrieval of outgoing longwave radiation at top-of-atmosphere using Himawari-8 AHI data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2018, **204**: 498-508

[39] LIANG S, WANG D D, HE T, *et al*. Remote sensing of Earth's energy budget: synthesis and review [J]. *Int. J. Digital Earth*, 2019, **12**(7): 1-44

[39] ZHOU Y, S. LIANG D, WANG Z, *et al*. Evaluation of six outgoing longwave radiation satellite products [J]. *J. Geophys. Res.*, 2019 (press)

[40] SUSSKIND J, MOLNAR G, IREDELL L, *et al*. Interannual variability of outgoing longwave radiation as observed by AIRS and CERES [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2012, **117**(D23). DOI: 10.1029/2012JD017997

[41] SU W Y, LOEB N G, LIANG L S, *et al*. The El Nio-Southern Oscillation effect on tropical outgoing longwave radiation: a daytime versus nighttime perspective [J]. *J. Geophys. Res.*, 2017, **122**(15). DOI: 10.1002/2017JD-027002

[42] HANSEN J, SATO M, KHARECHA P, *et al*. Earth's energy imbalance and implications [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, **11**(9). DOI: 10.5194/acp-11-13421-2011

[43] TRENBERTH K E, FASULLO J T, BALMASEDA M A. Earth's energy imbalance [J]. *J. Climate*, 2014, **27**(9): 3129-3144

[44] LOEB N G, LYMAN J M, JOHNSON G C, *et al*. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty [J]. *Nature Geosci.*, 2012, **5**(2): 110-113

[45] RESPLANDY L, KEELING R F, EDDEBBAR Y, *et al*. Quantification of ocean heat uptake from changes in atmospheric O_2 and CO_2 composition [J]. *Nature*, 2018, **563**(7729): 105-108

[46] SCHMETZ J, PILI P, TJEMKES S, *et al*. Supplement to an introduction to Meteosat Second Generation (MSG) [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2002, **83**(7): 991-991

[47] PINKER R T, LI X, MENG W, *et al*. Toward improved satellite estimates of short-wave radiative fluxes-Focus on cloud detection over snow: 2. results [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2007, **112**(D9). DOI: 10.1029/2005JD006698

[48] LU N, LIU R G, YUAN L J, *et al*. An algorithm for estimating downward shortwave radiation from GMS 5 visible imagery and its evaluation over China [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2010, **115**(D18). DOI: 10.1029/2009JD013457

[49] HUANG G H, MA M G, LIANG S L, *et al*. A LUT-based approach to estimate surface solar irradiance by combining MODIS and MTSAT data [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2011, **116**(D22). DOI: 10.1029/2011JD016120

[50] LASZLO I, CIREN P, LIU H Q, *et al*. Remote sensing of aerosol and radiation from geostationary satellites [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**(11): 1882-1893

[51] LIANG S L, ZHENG T, LIU R G, *et al*. Estimation of incident photosynthetically active radiation from moderate resolution imaging spectrometer data [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2006, **111**(D15). DOI: 10.1029/2005-JD006730

[52] LIANG S L, ZHENG T, WANG D D, *et al*. Mapping high-resolution incident photosynthetically active radiation over land from polar-orbiting and geostationary satellite data [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2007, **73**(10): 1085-1089

[53] LIANG S, WANG K, ZHANG X, *et al*. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2010, **3**(3): 225-240

[54] OREOPOULOS L, MLAWER E, DELAMERE J, *et al*. The continual intercomparison of radiation codes: results from phase I [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2012, **117** (D6). DOI: 10.1029/2011JD016821

[55] KATO S, ROSE F G, RUTAN D A, *et al*. Surface irradiances of edition 4.0 Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) data product [J]. *J. Clim.*, 2018, **31**(11). DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0523.1

[56] ZHANG Y C, ROSSOW W B, LACIS A A, *et al*. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: refinements of the radiative transfer model and the input data [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2004, **109**(D19). DOI: 10.1029/2003JD004457

[57] PINKER R T, TARPLEY J D, LASZLO I, *et al*. Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project (GAPP), including the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2003,

108(D22). DOI: 10.1029/2002JD003301

[58] DENEKE H M, FEIJT A J, ROEBELING R A. Estimating surface solar irradiance from METEOSAT SEVIRI-derived cloud properties [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2008, **112**(6): 3131-3141

[59] LIANG S, ZHAO X, LIU S, *et al.* A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies [J]. *Int. J. Digital Earth*, 2013, **6**(1): 5-33

[60] ZHANG Y, HE T, LIANG S L, *et al.* Estimation of all-sky instantaneous surface incident shortwave radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data using optimization method [J]. *Remote Sen. Environ.*, 2018, **209**: 468-479

[61] QIN J, CHEN Z Q, YANG K, *et al.* Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products [J]. *Appl. Energy*, 2011, **88** (7): 2480-2489

[62] WILD M. Enlightening global dimming and brightening [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2012, **93**(1): 27-37

[63] WILD M. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming [J]. *Wiley Interdiscipl. Rev. Clim. Change*, 2016, **7**(1): 91-107

[64] BOUSSETTA S, BALSAMO G, DUTRA E, *et al.* Assimilation of surface albedo and vegetation states from satellite observations and their impact on numerical weather prediction [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2015, **163**: 111-126

[65] QU Y, LIANG S L, LIU Q, *et al.* Mapping surface broadband albedo from satellite observations: a review of literatures on algorithms and products [J]. *Remote Sens.*, 2015, **7**(1): 990-1020

[66] LIANG S, FANG H, CHEN M. Atmospheric correction of Landsat ETM+land surface imagery. I. Methods [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39**(11): 2490-2498

[67] SCHAAF C B, GAO F, STRAHLER A H, *et al.* First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **83**(1/2): 135-148

[68] LIANG S L, MEMBER S. A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery [J]. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.*, 2003, **41**(1): 136-145

[69] LIANG S L, STROEVE J, BOX J E. Mapping daily snow/ice shortwave broadband albedo from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): the improved direct retrieval algorithm and validation with Greenland in situ measurement [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2005, **110**(D10). DOI: 10.1029/2004JD005493

[70] WANG K C, DICKINSON R E. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses [J]. *Rev. Geophys.*, 2013, **51**(2): 150-185

[71] HE T, LIANG S L, WANG D D, *et al.* Land surface albedo estimation from chinese HJ satellite data based on the direct estimation approach [J]. *Remote Sens.*, 2015, **7**(5): 5495-5510

[72] HE T, LIANG S, WANG D. Direct estimation of land surface albedo from simultaneous misr data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2017, **55**(5): 2605-2617

[73] DARNELL W L, GUPTA S K, STAYLOR W F. Downward longwave surface radiation from sun-synchronous satellite data: validation of methodology [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 1986, **25**(7): 1012-1021

[74] CHENG J, LIANG S, WANG W, *et al.* An efficient hybrid method for estimating clear-sky surface downward longwave radiation from MODIS data [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2017, **122**(5): 2616-2630

[75] YU S S, XIN X Z, LIU Q H, *et al.* Comparison of cloudy-sky downward longwave radiation algorithms using synthetic data, ground-based data, and satellite data [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2018, **123**(10): 5397-5415

[76] WANG T, SHI J, YU Y, *et al.* Cloudy-sky land surface longwave downward radiation (LWDR) estimation by integrating MODIS and AIRS/AMSU measurements [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2018, **205**: 100-111

[77] YANG F, CHENG J. A framework for estimating cloudy sky surface downward longwave radiation from the derived active and passive cloud property parameters [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **248**. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111972

[78] SCHULZ J, ALBERT P, BEHR H D, *et al.* Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, **9**(5): 1687-1709

[79] LIANG S L, CHENG J, JIA K, *et al.* The Global LAnd Surface Satellite (GLASS) product suite [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2020. DOI.org/10.1175/BAMS-D-18-0341.1

[80] ZENG Q, CHENG J, DONG L. Assessment of the long-term high-spatial-resolution Global LAnd Surface Satellite (GLASS) surface longwave radiation product using ground measurements [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2020, **13**: 2032-2055

[81] LI Z L, TANG B H, WU H, *et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2013, **131**: 14-37

[82] WAN Z M, LI Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(4): 980-996

[83] YU Y Y, PRIVETTE J L, PINHEIRO A C. Analysis of the NPOESS VIIRS land surface temperature algorithm using MODIS data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, **43**(10): 2340-2350

[84] GILLESPIE A, ROKUGAWA S, MATSUNAGA Tsuneo,

et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1998, **36**(4): 1113-1126

[85] XU S, CHENG J. A new land surface temperature fusion strategy based on cumulative distribution function matching and multiresolution Kalman filtering [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2021, **254**: 112256

[86] JIN M L, LIANG S L. An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations [J]. *J. Clim.*, 2006, **19**(12): 2867-2881

[87] CHENG Jie, LIANG Shunlin, YAO Yunjun, *et al*. Estimating the optimal broadband emissivity spectral range for calculating surface longwave net radiation [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2013, **10**(2): 401-405

[88] CHENG J, LIANG S. Estimating the broadband longwave emissivity of global bare soil from the MODIS shortwave albedo product [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2014, **119**(2): 614-634

[89] CHENG Jie, LIANG S, VERHOEF Wout, *et al*. Estimating the hemispherical broadband longwave emissivity of global vegetated surfaces using a radiative transfer model [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2016, **54**(2): 905-917

[90] GRISTEY J J, CHIU J C, GURNEY R J, *et al*. Determination of global Earth outgoing radiation at high temporal resolution using a theoretical constellation of satellites [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2017, **122**(2): 1114-1131

[91] MEFTAH M, DAMÉ L, BOLSÉE D, *et al*. SOLAR-ISS: a new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations [J]. *Astron. Astrophys.*, 2018, **611**: A1

[92] WIELICKI B A, YOUNG D F, MLYNCZAK M G, *et al*. Achieving climate change absolute accuracy in orbit [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2013, **94**(10): 1519-1539

[93] LIANG S. Remote Sensing of Earth's Energy Budget: An Overview of Recent Progress [M]. 2017: 1-31

[94] MA H, LIANG S L, XIAO Z Q, *et al*. Simultaneous inversion of multiple land surface parameters from MODIS optical-thermal observations [J]. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 2017, **128**: 240-254

[95] LEWIS P, GÓMEZ-DANS J, KAMINSKI T, *et al*. An Earth Observation Land Data Assimilation System (EOLDAS) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2012, **120**: 219-235

[96] LIU Changming. Research on the evolution of water cycle in the Yellow River Basin [J]. *Adv. Water Sci.*, 2004, **15**: 608-614 (刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究 [J]. 水科学进展, 2004, **15**: 608-614)

[97] SHI Jiancheng, LEI Yonghui. Remote sensing and Earth system science [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 827-831 (施建成, 雷永荟. 遥感与地球系统科学 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 827-831)

[98] HU J Y, TANG S H, LIU H L, *et al*. An operational precipitable water vapor retrieval algorithm for Fengyun-2F/VLSSR using a modified three-band physical split-window method [J]. *J. Meteorol. Res.*, 2019, **33**(2): 276-288

[99] WANG Y, FU Y F, LIU G S, *et al*. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2009, **114**(D21): DOI: 10.1029/2008-JD011057

[100] DU J Y, KIMBALL J S, JONES L A. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2 [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015, **53**(5): 2520-2531

[101] JI D B, SHI J C, XIONG C, *et al*. A total precipitable water retrieval method over land using the combination of passive microwave and optical remote sensing [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2017, **191**: 313-327

[102] LETU H, ISHIMOTO H, RIEDI J, *et al*. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, **15**(21): 31665-31703

[103] LETU H, NAGAO T M, NAKAJIMA T Y, *et al*. Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: capability of the ahi to monitor the dc cloud generation process [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2018, **6**: 1-11

[104] SHEN Y, ZHAO P, PAN Y, *et al*. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, **119**(6): 3063-3075

[105] MA Y Z, HONG Y, CHEN Y, *et al*. Performance of optimally merged multisatellite precipitation products using the dynamic bayesian model averaging scheme over the tibetan plateau [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2018, **123**(2): 1-21

[106] SHI J, JIANG L, ZHANG L, *et al*. Physically based estimation of bare-surface soil moisture with the passive radiometers [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. A Publ. IEEE Geosci. Remote Sens. Soc.*, 2006, **44**: 3145-3153

[107] KANG C S, ZHAO T J, SHI J C, *et al*. Global soil moisture retrievals from the chinese FY-3D microwave radiation imager [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2020, **99**: 1-15

[108] ZHAO T J, SHI J C, LIN M S, *et al*. Potential soil moisture product from the Chinese HY-2 scanning microwave radiometer and its initial assessment [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2014, **8**(1): 083560

[109] SHI C X, XIE Z H, QIAN H, *et al*. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *ENCE China*, 2011, **54**(9): 1430-1440

[110] YANG K, CHEN Y Y, HE J, *et al*. Development of a daily soil moisture product for the period of 2002—2011 in Chinese mainland [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2020, **63**(8): 1113-1125

[111] SHI J C, DONG X L, ZHAO T J, *et al*. WCOM: the science scenario and objectives of a global water cycle observation mission [C]//IGARSS 2014-2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec: IEEE, 2014

[112] ZHAO T J, SHI J C, LV L Q, *et al*. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **240**: 111680

[113] CAO Meisheng, LI Peji, ROBINSON D A, *et al*. Evaluation and preliminary application of SMMR microwave remote sensing of snow cover in Western China [J]. *J. Remote Sens.*, 1993, **4**: 260-269 (曹梅盛, 李培基, ROBINSON D A, 等. 中国西部积雪 SMMR 微波遥感的评价与初步应用 [J]. 遥感学报, 1993, **4**: 260-269)

[114] CHE T, LI X, JIN R, *et al*. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. *Ann. Glaciol.*, 2008, **49**: 145-154

[115] SUN Zhiwen. Research and System Development of Snow Parameter Inversion Algorithm for FY-3 MWRI [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007 (孙知文. 风云三号微波成像仪 (FY-3 MWRI) 积雪参数反演算法研究与系统开发 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007)

[116] CHANG S, SHI J C, JIANG L M, *et al*. Improved snow depth retrieval algorithm in China area using passive microwave remote sensing data [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE, 2009

[117] JIANG L M, WANG P, ZHANG L X, *et al*. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China [J]. *Sci. China*: *Earth Sci.*, 2014, **57**(6): 1278-1292

[118] JIANG L, SHI J,TJUATJA S, *et al*. Estimation of snow water equivalence using the polarimetric scanning radiometer from the Cold Land Processes Experiments (CLPX03) [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2011, **8**(2): 359-363

[119] JIANG L M, SHI J C, TJUATJA S B, *et al*. A parameterized multiple-scattering model for microwave emission from dry snow [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2007, **111**(2-3): 357-366

[120] DAI L Y, CHE T, WANG J, *et al*. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2012, **127**(1): 14-29

[121] CHE T, DAI L Y, ZHENG X M, *et al*. Estimation of snow depth from passive microwave brightness temperature data in forest regions of northeast China [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2016, **183**: 334-349

[122] CHE T, LI X, JIN R, *et al*. Assimilating passive microwave remote sensing data into a land surface model to improve the estimation of snow depth [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2014, **143**: 54-63

[123] XIAO X G, ZHANG T J, ZHONG X Y, *et al*. Support vector regression snow-depth retrieval algorithm using passive microwave remote sensing data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2018, **210**: 48-64

[124] YANG J W, JIANG L M, LUOJUS K, *et al*. Snow depth estimation and historical data reconstruction over China based on a random forest machine learning approach [J]. *Cryosph.*, 2020, **14**(6): 1763-1778

[125] GU L J, REN R Z, ZHAO K, *et al*. Snow depth and snow cover retrieval from FengYun3B microwave radiation imagery based on a snow passive microwave unmixing method in Northeast China [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2014, **8**(1): 084682

[126] GU L J, REN R Z, LI X F. Snow depth retrieval based on a multifrequency dual-polarized passive microwave unmixing method from mixed forest observations [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2016, **54**(99): 1-13

[127] GU L, REN R, LI X, *et al*. Snow depth retrieval based on a multifrequency passive microwave unmixing method for saline-alkaline land in the Western Jilin Province of China [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2018, **11**(7): 2210-2222

[128] LIU X J, JIANG L M, WANG G X, *et al*. Using a linear unmixing method to improve passive microwave snow depth retrievals [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2018, **99**: 1-16

[129] SHI J C, DOZIER, J. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, part I: inferring snow density and subsurface properties [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**(6). DOI: 10.1109/36.885195

[130] SHI J C, DOZIER J. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, Part II: inferring snow depth and particle size [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**(6): 2475-2488

[131] DU J Y, SHI J C, ROTT H. Comparison between a multi-scattering and multi-layer snow scattering model and its parameterized snow backscattering model [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2010, **114**(5): 1089-1098

[132] CUI Y R, XIONG C, LEMMETYINEN J, *et al*. Estimating snow water equivalent with backscattering at X and Ku band based on absorption loss [J]. *Remote Sens.*, 2016, **8**(6): 505

[133] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2002, **6**(1): 85-100

[134] LIU S M, LU L, MAO D, *et al*. Evaluating parametrizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurement [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, **11**: 769-783

[135] HU G C, JIA L. Monitoring of evapotranspiration in a semi-arid inland river basin by combining microwave and optical remote sensing observations [J]. *Remote Sens.*, 2015, **7**(3): 3056-3087

[136] JIA L, ZHENG C, HU G C, *et al*. Evapotranspiration [J]. *Comprehensive Remote Sens.*, 2018, **4**: 25-50

[137] ZHANG Y Q, KONG D D, GAN R, *et al*. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017 [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2019, **222**: 165-182

[138] LIU L B, GUDMUNDSSON L, HAUSER M, *et al*. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. *Nat. Commun.*, 2020, **11**(1): 1234567890

[139] WANG X X, XIAO X M, ZOU Z H, *et al*. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989—2016 [J]. *Nat. Commun.*, 2020, **11**(1): 3471

[140] XIAO Z Q, LIANG S L, WANG J D, *et al*. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2016, **54**(9): 5301-5318

[141] LIU Y, LIU R, CHEN J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981—2011) from combined AVHRR and MODIS data [J]. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 2012, **117**(G4). DOI: 10.1029/2012JG002084

[142] DENG D, CHEN J M, PLUMMER S, *et al*. Global LAI algorithm integrating the bidirectional information [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(8): 2219-2229

[143] ZHU L, CHEN J M, TANG S H, *et al*. Inter-Comparison and validation of the FY-3A/MERSI LAI product over mainland China [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2013, **7**(2): 458-468

[144] CHEN W, ZHANG Y H, YIN Z, *et al*. The TanSat mission: global CO_2 observation and monitoring [C]//Proceedings of the 63rd International Astronautical Congress. 2012: 4419-4425

[145] CHEN B, LIU J, CHEN J M, *et al*. Assessment of foliage clumping effects on evapotranspiration estimates in forested ecosystems [J]. *Agricult. Forest Meteorol.*, 2016, **216**: 82-92

[146] ZHU G L, JU W M, CHEN J M, *et al*. Foliage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, **50**(6): 2122-2137

[147] WEI S S, FANG H L, SCHAAF C B, *et al*. Global 500 m clumping index product derived from MODIS BRDF data (2001—2017) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2019, **232**: 111296

[148] LEFSKY M A. A global forest canopy height map from the moderate resolution imaging spectroradiometer and the geoscience laser altimeter system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**(15). DOI: 10.1029/2010GL043622

[149] XU M Z, LIU R G, CHEN J M, *et al*. Retrieving leaf chlorophyll content using a matrix-based vegetation index combination approach [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2019, **224**: 60-73

[150] CROFT H, CHEN J M, WANG R, *et al*. The global distribution of leaf chlorophyll content [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **236**(2020): 111479

[151] LI D, CHEN J M, ZHANG X, *et al*. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **248**: 111985

[152] ZHANG Z Y, CHEN J M, GUANTER L, *et al*. From canopy-leaving to total canopy far-red fluorescence emission for remote sensing of photosynthesis: first results from TROPOMI [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, **46**(21): 12030-12040

[153] ZHANG Z Y, ZHANG Y G, ZHANG Q, *et al*. Assessing bi-directional effects on the diurnal cycle of measured solar-induced chlorophyll fluorescence in crop canopies [J]. *Agricult. Forest Meteorol.*, 2020, **295**: 108147

[154] WANG X P, CHEN J M, JU W M. Photochemical Reflectance Index (PRI) can be used to improve the relationship between Gross Primary Productivity (GPP) and Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) [J]. *Remote Sen. Envir.*, 2020, **246**: 111888

[155] WANG S H, ZHANG Y G, JU W M, *et al*. Recent global decline of CO_2 fertilization effects on vegetation photosynthesis [J]. *Science*, 2020, **370**(6522): 1295

[156] PIAO S L, YIN G D, TAN J G, *et al*. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. *Global Change Biol.*, 2015, **21**(4): 1601-1609

[157] ZHU Z C, PIAO S L, MYNENI R B, *et al*. Greening of the Earth and its drivers [J]. *Nature Clim. Change*, 2016, **6**(8): 791-795

[158] CHEN J M, JU W M, CIAIS P, *et al*. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink [J]. *Nat. Commun.*, 2019, **10**(1). DOI: 10.1038/s41467-019-12257-8

[159] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, *et al*. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, **292**(5525): 2320-2322

[160] WANG S Q, CHEN J M, JU W M, *et al*. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901—2001 [J]. *J. Environ. Manag.*, 2007, **85**(3): 524-537

[161] WANG S Q, ZHOU L, CHEN J M, *et al*. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance [J]. *J. Environ. Manag.*, 2011, **92**(6): 1651-1662

[162] YU G R, CHEN Z, PIAO S L, *et al*. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2014, **111**(13): 4910-4915

[163] JIANG F, CHEN J M, ZHOU L X, *et al*. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches [J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6**(6): 22130

[164] WANG J, FENG L, PALMER P I, *et al*. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dio-

xide data [J]. *Nature*, 2020, **586**(7831): 720-723

[165] CHEN Jingming, JU Weimin, LIU Ronggao, *et al*. Remote Sensing and Optimal Calculation Method of Global Terrestrial Carbon Sink [M]. Beijing: Science Press, 2015 (陈镜明, 居为民, 刘荣高, 等. 全球陆地碳汇的遥感和优化计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015)

[166] ZHANG S P, ZHENG X G, CHEN J M, *et al*. A global carbon assimilation system using a modified ensemble Kalman filter [J]. *Geosci. Model Develop.*, 2015, **8**(3): 805-816

[167] CHEN Z, CHEN J, ZHANG S, *et al*. Optimization of terrestrial ecosystem model parameters using atmospheric CO₂ concentration data with a global carbon assimilation system (GCAS) [C]//San Francisco, The American Geophysical Union, 2016: B53B-0535

[168] TIAN X, XIE Z H, LIU Y, *et al*. A joint data assimilation system (Tan-Tracker) to simultaneously estimate surface CO_2 fluxes and 3-D atmospheric CO_2 concentrations from observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, **14**(23): 13281-13293

[169] JU Weimin, FANG Hongliang, TIAN Xiangjun, *et al*. Research on high-resolution global carbon assimilation system based on multi-source satellite remote sensing [J]. *Earth Sci. Prog.*, 2016, **31**: 1105-1110 (居为民, 方红亮, 田向军, 等. 基于多源卫星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究 [J]. 地球科学进展, 2016, **31**: 1105-1110)

[170] WANG H M, JIANG F, WANG J, *et al*. Terrestrial ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2 XCO_2 retrievals [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, **19**(18): 12067-12082

[171] CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, TANG Huajun, *et al*. Progress and perspectives on agricultural remote sensing research and applications in China [J]. *J. Remote Sens.*, 2016, **20**: 748-767 (陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望 [J]. 遥感学报, 2016, **20**: 748-767)

[172] ZHU Laidong. Development and present situation of urban environmental remote sensing [J]. *Trend. Environ. Sci.*, 1983, **14**: 8-10 (朱来东. 城市环境遥感的发展和现状 [J]. 环境科学动态, 1983, **14**: 8-10)

[173] CHEN Bingxian, GONG Peng. Foreign urban remote sensing research [J]. *Develop. Remote Sens. Technol.*, 1987, **1**: 1-5 (陈丙咸, 宫鹏. 国外城市遥感研究 [J]. 遥感技术动态, 1987, **1**: 1-5)

[174] DAI Changda, TANG Lingli, CHEN Gang, *et al*. Study on monitoring urban expansion and environmental change by satellite remote sensing [J]. *Environ. Remote Sens.*, 1995, **1**: 1-8 (戴昌达, 唐伶俐, 陈刚, 等. 卫星遥感监测城市扩展与环境变化的研究 [J]. 环境遥感, 1995, **1**: 1-8)

[175] RIDD M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1995, **16**(12): 2165-2185

[176] GONG P, HOWARTH P J. Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1992, **58**(4): 423-437

[177] YU B L, LIU H X, WU J P. Theoretical framework of object oriented remote sensing analysis of urban spatial information [J]. *J. East China Normal Univ.: Natl. Sci. Ed.*, 2010, **6**: 12-25, 63 (余柏蒗, 刘红星, 吴健平. 面向对象的城市空间信息遥感分析的理论框架 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2010, **6**: 12-25, 63)

[178] WOODCOCK C E, ALLEN R, ANDERSON M, *et al*. Free access to Landsat imagery [J]. *Science*, 2008, **320** (5879): 1011

[179] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, *et al*. Google Earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2017, **202**: 18-27

[180] GONG P, LI X C, WANG J, *et al*. Annual maps of Global Artificial Impervious Area (GAIA) between 1985 and 2018 [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **236**: 111510

[181] ZHOU Y, LI X, ASRAR G R, *et al*. A global record of annual urban dynamics (1992—2013) from nighttime lights [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2018, **219**: 206-220

[182] CHEN Jiwei. Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) and its significance to urban remote sensing [J]. *Geol. Shanghai*, 2001, **4**: 52-55 (陈基炜. 合成孔径雷达干涉测量技术 (InSAR) 及其对城市遥感的意义 [J]. 上海地质, 2001, **4**: 52-55)

[183] WU Wensheng. Remote Sensing Image Classification Based on Deep Learning [D]. Xijing: Xijing University, 2019 (武文胜. 基于深度学习的遥感图像分类研究 [D]. 西安: 西京学院, 2019)

[184] ZHU X X, TUIA D, MOU L, *et al*. Deep learning in remote sensing: a comprehensive review and list of resources [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, 2017, **5**(4): 8-36

[185] LI X C, GONG P. Urban growth models: progress and perspective [J]. *Sci. Bull.*, 2016, **61**(21): 1637-1650

[186] 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]. *Int. J. Remote Sens.*, 2013, **34**(7): 2607-2654

[187] YU L, WANG J, CLINTON N, *et al*. FROM-GC: 30 m global cropland extent derived through multisource data integration [J]. *Int. J. Digital Earth*, 2013, **6**(6): 521-533

[188] GONG P, LIU H, ZHANG M N, *et al*. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 [J]. *Sci. Bull.*, 2019, **64**(6): 370-373

[189] ZHAO Chunjiang. Research and application progress of agricultural remote sensing [J]. *J. Agricult. Mach.*, 2014, **45**: 277-293 (赵春江. 农业遥感研究与应用进展 [J]. 农业机械学报, 2014, **45**: 277-293)

[190] LIU J Y, ZHANG Z X, XU X L, *et al*. Spatial patterns

and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. *J. Geograph. Sci.*, 2010, **20**(4): 483-494

[191] LIU Jiyuan, KUANG Wenhui, ZHANG Zengxiang, *et al.* Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. *J. Geograph. Sci.*, 2014, **69**: 3-14 (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**: 3-14)

[192] HE Y Q, LEE E, WARNER T A. A time series of annual land use and land cover maps of China from 1982 to 2013 generated using AVHRR GIMMS NDVI3g data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2017, **199**: 201-217

[193] LIU H, GONG P, WANG J, *et al.* Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015 [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, **12**(2): 1217-1243

[194] XU Y D, YU L, ZHAO F R, *et al.* Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat images with a change-detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2018, **218**: 13-31

[195] XU Y D, YU L, PENG D L, *et al.* Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980—2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2020, **63**(9): 1390-1407

[196] XIE Y H, LARK T J, BROWN J F, *et al.* Mapping irrigated cropland extent across the conterminous United States at 30 m resolution using a semi-automatic training approach on Google Earth Engine [J]. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 2019, **155**: 136-149

[197] DONG J W, XIAO X M, KOU W L, *et al.* Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986—2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2015, **160**: 99-113

[198] XU Y, YU L, LI W, *et al.* Annual oil palm plantation maps in Malaysia and Indonesia from 2001 to 2016 [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, **12**(2): 847-867

[199] XU Y D, YU L, LI W, *et al.* Annual oil palm plantation maps in Malaysia and Indonesia from 2001 to 2016 [DS]. Secondary Annual oil palm plantation maps in Malaysia and Indonesia from 2001 to 2016: Publisher, 10.5281/zenodo.3467071, 2019

[200] GONG P, CHEN B, LI X C, *et al.* Mapping Essential Urban Land Use Categories in China (EULUC-China): preliminary results for 2018 [J]. *Sci. Bull.*, 2020, **65**(3): 182-187

[201] VERBURG P H, CROSSMAN N, ELLIS E C, *et al.* Land system science and sustainable development of the Earth system: a global land project perspective [J]. *Anthropocene*, 2015, **12**: 29-41

[202] SHI K F, YU B L, HU Y J, *et al.* Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data [J]. *Gisci. Remote Sens.*, 2015, **52**(3): 274-289

[203] LI X C, ZHOU Y Y, GONG P, *et al.* Developing a method to estimate building height from Sentinel-1 data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2020, **240**: 111705

[204] ZHENG J, FU H, WU W, *et al.* Automatic fine-grained detection of growing status for oil palm trees using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images and deep learning [J]. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* (in review)

[205] YU C Q, HUANG X, CHEN H, *et al.* Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. *Nature*, 2019, **567**(7749): 516-520