0254-6124/2023/43(6)-0973-13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Fang, JIA Huicong, WANG Lei. Spatial Observation and Assessment of Sustainable Development Goals (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 973–985. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023–0108

可持续发展目标空间观测与评估*

陈 方[1,2,3] 贾慧聪[1,2] 王 雷[1,2]

1(可持续发展大数据国际研究中心 北京 100094)

2(中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室 北京 100094)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 联合国《变革我们的世界：2030 年可持续发展议程》已实施过半，国际社会广泛关切 2030 年议程前半程的有益经验和不利教训，并为后半程和未来可持续发展寻找指引和方向。及时、准确数据的缺失，仍然是制约人类应对长期、短期可持续发展问题的短板，更是阻碍可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）进展监测、实施决策的瓶颈。作为全面、综合、整体研究地球系统的重要手段，空间观测技术是弥补当前 SDGs 指标统计数据不足、时空信息缺失的重要方法。本文介绍了空间观测技术在监测和评估 SDG2 零饥饿、SDG6 清洁饮水和卫生设施、SDG7 经济适用的清洁能源、SDG11 可持续城市和社区、SDG13 气候行动、SDG14 水下生物和 SDG 15 陆地生物等 7 个可持续发展目标的研究进展及挑战，并对 SDGs 指标空间观测体系建设、空间观测数据共享和应用、SDGs 监测评估方法研究等进行探讨。

关键词 空间观测，可持续发展目标，指标监测与评估

中图分类号 P715

Spatial Observation and Assessment of Sustainable Development Goals

CHEN Fang[1,2,3] JIA Huicong[1,2] WANG Lei[1,2]

1(*International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals*, *Beijing* 100094)

2(*Key Laboratory of Digital Earth Science*, *Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094)

3(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract Since 2015, the United Nations has reached the halfway point in implementing the 2030 agenda for sustainable development. During this period, progress on the Sustainable Development Goals (SDGs) faced challenges. In order to chart a course for future sustainable development, it's essential for

* 国家重点研发计划项目资助（2022 YFC3800700）

2023-09-28 收到原稿，2023-11-07 收到修定稿

E-mail：chenfang_group@radi.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

the worldwide community to learn from the experiences and lessons of the initial phase of the 2030 agenda, strengthening the implementation of the SDGs in the second phase. The lack of timely and accurate data remains a weak point in responding to both long and short-term issues and is a bottleneck in the implementation and monitoring of the SDGs and the development of science-based decision-making. Spatial observations, as a representative digital technology, can play an important role in bridging the gap between current statistical data and spatiotemporal information of the SDGs. This paper introduces important advances and existing issues in spatial observation techniques in the monitoring and evaluation of the seven sustainable development goals. Finally, the construction of SDGs spatial observation system, sharing and application of spatial observation data, and SDGs monitoring and evaluation methods are discussed.

Key words Space observation, Sustainable Development Goals (SDGs), Monitoring and assessment of SDGs

0 引言

2015 年, 联合国通过了《变革我们的世界: 2030 年可持续发展议程》(以下简称“2030 年议程”)[1], 包含 17 项可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs), 从社会、经济和环境三个维度指导全球可持续发展, 已成为全球各国的重要发展策略和行动计划。2021 年, 全球约 1/10 的人口遭受饥饿挑战, 超过 30 亿的人口面临水安全导致的疾病侵袭, 约 7.33 亿的人口无法获得电力, 海平面上升、温室气体浓度升高、极端气候变化导致气候问题挑战严峻, 海水酸化、过量营养物质和塑料污染等不断加重海洋污染威胁数十亿人口的生计, 森林大规模采伐、土地及生态系统恶化、生物多样性丧失等, 对人类生存和可持续发展带来了严重影响[2]。当前, 2030 年议程进程近半, 但气候变化加剧和新冠肺炎疫情等使议程落实受到巨大冲击, 个别目标的全球进展面临倒退风险, 需要加快实施进程才有望在 2030 年实现各项目标[3]。

及时、准确、动态获取全球 SDGs 指标数据是保障 2030 年议程推进的基础。然而, 如联合国《2023 年可持续发展目标报告》指出, 全球 SDGs 指标数据在覆盖范围、及时性和分类性等方面仍存在巨大差距[4]。目前, SDGs 指标数据以粗粒度的统计数值为主, 时间和空间分辨率多为“年”和“国家”, 难以根据地理位置、人口分布、环境差异等进行有效分解, 阻碍了根据 SDGs 进展的区域差异实施决策。经济合作与发展组织(OECD)提出, 若地方政府无法有效参与, 169 个 SDG 具体目标中的 105 个将难以实现[5]。这些具体目标中, 大部分是对时空变化敏感的环境类具体目标。

空间观测作为人类观测、认知地球和解决重大全球性问题不可或缺的技术手段, 在细致探究人类活动与自然环境交互作用的机制和演变过程, 系统厘清人类可持续发展的各类限制因素并探究其内在协同关系, 以及宏观把握可持续发展在社会、经济和环境三个维度的核心科学问题等方面发挥着关键作用[6]。2030 年议程推动了史无前例的海量数据需求, 极大地促进了数据创新的发展。运用空间观测技术, 研究自然——人类社会系统之间复杂的互动性和协同演化的发展路径, 有助于突破统计数据在行政区域上的局限, 深入挖掘和分析覆盖不同时空尺度和地理位置的信息, 以支撑全面理解和实施 SDGs[7,8]。

利用空间观测技术支撑 SDGs 环境类目标监测与评估具有独特优势。一方面数据来源海量多样, 相互验证可确保信息的准确性和可信度, 使得表征地球表层生态、环境、资源密切相关的 SDGs 目标监测结果更透明、可重复; 另一方面赋予 SDGs 环境相关指标空间差异和动态变化信息, 有利于决策者通过空间信息发现发展的不平衡和薄弱环节、补齐短板, 并通过时间动态变化明确变化趋势和政策效果。SDG 目标中 SDG2 零饥饿、SDG6 清洁饮水和卫生设施、SDG7 经济适用的清洁能源、SDG11 可持续城市和社区、SDG13 气候行动、SDG14 水下生物、SDG15 陆地生物具有大尺度、周期变化的特点, 运用空间观测的优点和独特性, 可为这 7 大目标的监测与评估探索建立一种新的解决方案。

1　可持续发展目标空间观测与评估进展

1.1　SDG2 零饥饿

全球可持续发展的重要基石和核心问题是通过消除饥饿来确保粮食安全,这一目标被纳入 SDG 2[9]。全球饥饿人口比例在连续 5 年稳定后,仅在 2020 年一年间就由 8.4% 增至 10.4%。各种形式的营养不良仍是一个挑战,营养不良率从 2019 年的 8.0% 升至 2021 年的 9.8%[10]。此外,受大规模和高强度的资源环境消耗与开发影响,粮食系统正对全球水资源、生物多样性、关键生态系统等造成威胁。若要实现零饥饿目标需要全球平均农业生产水平在未来 10 年提高 28%,是过去 10 年增幅的 3 倍多[11]。

联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO),作为 SDG 2 的 14 个指标中 9 个指标的监管机构和 1 个指标的合作监管机构,发展了系统全面的统计调查数据搜集与共享系统,为促进可持续的土地、土壤及水资源管理、实现零饥饿目标提供了强有力的数据支撑[12]。然而,全球各国统计调查能力相差较大,近 50% 的国家没有可用数据进行零饥饿目标的评估,75% 的国家面临无法在统一标准上进行评估的普遍问题[13]。目前,寻求创新的技术和数据成为落实 2030 可持续发展议程、实现 FAO 2022－2031 年十年战略目标的 4 大加速因素之一[14]。

空间观测技术为充分、及时、快速地了解粮食生产状况提供了基础,已成为农业生产发展中帮助各利益相关者进行决策的一种经济有效的手段,并在许多方面得到了应用和实践。

(1)在耕地分布信息方面,提取方式已经由土地利用/土地覆盖数据(时空分辨率不一)中获取逐渐转化为生产耕地专题数据集(时空连续)为主[15,16]。

(2)在种植结构方面,聚焦在复种指数和作物种类的监测工作上。同时,植被的时间序列指数监测中,泰拉卫星(Terra)、诺阿卫星(NOAA)、美国陆地卫星(Landsat)、哨兵 2 号卫星(Sentinel-2)等提供了丰富的支撑信息。在研究方法上,统计和数学模型(例如小波变换[17]、主成分分析[18]、时间序列谐波[19]等)与作物物候特征相结合的方式被广泛运用。作物类型提取多基于光学、雷达等空间观测数据,主要聚焦水稻[20–22]、小麦[23]、玉米[24,25]、大豆[26,27] 等作物。大尺度全类型的作物空间观测制图主要集中在美国[28]、中国、加拿大[29] 和欧洲[30] 等区域。同时,通过监测灌溉前后的土壤湿度和地面温度的变化来进行农田灌溉的管理[31]。

(3)在作物长势监测方面,空间观测技术的飞速发展在病虫害检测[32–34]、营养诊断[35,36] 和产量预判[37,38] 等应用领域不断扩展和深化。目前,多学科模型如空间观测数据反演参数和作物生长模型等的融合,已在粮食产量和潜力评估、农业灾害监测等领域得到广泛应用,并且正在逐步发展到规模化、精细化、精准化的监测阶段。空间观测成为研发 SDG 2 零饥饿目标进展的全球公共数据、监测粮食安全热点和敏感区域农业发展的有利工具,从而支撑区域及全球 SDG2 实现进程评估。

1.2　SDG6 清洁饮水与卫生设施

自 2015 年联合国可持续发展议程提出以来,在水资源开发利用方面,粗放式利用、管理不善、淡水和地下水资源的过度抽取和污染态势等未取得根本性改变,全球与水有关的生态系统正在以惊人的速度退化,SDG 6 未在预定的轨道上推进已成为全球共识[39]。由于缺乏监测,全球至少有 30 亿人赖以生存的水资源的水质状况还未可知,且有 7.3 亿人生活在缺水严重的国家。按照目前的速度,到 2030 年,全球仍将有 16 亿人、28 亿人和 19 亿人缺乏安全管理的饮用水、环境卫生设施和基本的洗手卫生设施[4]。为实现 2030 年的具体指标,需要将提升饮用水、环境卫生和个人卫生设施等具体指标的进展速度提高 4 倍[2]。

2021 年,联合国水机制发布报告系统梳理了全球范围内清洁饮水和卫生设施目标实现进展情况,然而在国家和地方尺度上,报告中使用的数据仍然存在巨大的缺口[39]。SDG 6.3.2 的环保水质指标是衡量淡水生态系统健康状况的关键,水质的数据大多数来自现场检测和室内分析。如今,尽管众多发达国家都已设立了持久的水质跟踪项目,但大部分国家依然没有建立起系统的水质数据监测网络[40],这在一定程度上妨碍了对各国的定期监测和评估。全球共有 153 个国家共享跨界流域,占世界淡水流量的 60% 以上[41],因此,在这些跨界流域中开展合作,对公平共享和可持续水管理至关重要。虽然基于国别统计数据得出了全球尺度 SDG 6 总体进展结论,但无法有效支撑国

家尺度及其以下各级制定政策。SDG 6.5.2 作为反映跨界水合作状态的指标,其评价完全取决于联合国成员国的统计上报数据[42],受国家经济发展状况和国际政治局势事件的影响,全球国别尺度这一指标的监测和评价还不够充分。

近年来,非传统的数据来源,例如卫星遥感数据、移动电话数据和公众产生的数据,正在对传统统计数据形成有益的补充。尤其是空间观测技术通过卫星遥测、快速采集和周期巡访等手段,进行相关指标高时空解析度的监测,同时节约资金和时间,提供了更精确和更全面的评估结果[43]。欧洲、美国以及中国的各种空间观测计划以及相关的技术途径,正在支持 SDG 6.1 和 SDG 6.3～6.6 以及 SDG 6.a 的监测和评价。随着卫星遥感技术的发展与水色遥感理论方法的进步,近年来内陆水体空间观测研究取得了快速进展。

(1)光学、重力卫星(GRACE 和 GRACE-FO)以及雷达卫星是水资源获取与高效应用(SDG 6.1 和 SDG 6.4)的基础数据和主要手段,而评估大规模地表水和地下水动态变化则是水资源的管理和调度方式[44,45]。

(2)在水环境改善方面,应用空间观测技术进行水质监测(SDG 6.3)已成为一个研究焦点。当前空间观测数据正成为地表水水质监测最重要的低成本数据来源。在填补数据空白的同时,其大范围长时序动态监测的优势为实现全球湖库水质监测、探究长时序时空变化规律提供了有效途径[46]。

(3)在水生态系统监测和评估(SDG 6.5 和 SDG 6.6)方面,根据联合国最新评估报告,全球与水有关的生态系统正以惊人的速度退化[4]。借助如 Landsat、Sentinel-1/2 以及中国国产的高分系列卫星(GF 1/2/6)等的卫星图像数据,结合机器学习、深度学习和云计算平台等技术工具,来精确检测和估计洪水灾害和水利设施建设所带来的新水域,以及因干旱导致的湿地、湖泊、洪泛区等生态环境的消失和动态变化[47,48]。空间观测技术为全球和区域地表水和地下水动态变化精准监测与计量提供了可能[49]。以光学水质参数作为湖库水生态评价的空间观测主要参量,在遥感监测水质时空变化的可靠性方面大大提升,能更好地服务 SDG6 指标评估。

1.3 SDG7 经济适用的清洁能源

化石燃料利用产生的人为碳排放是导致全球变暖的主要原因。为应对全球气候变化,从化石能源到绿色低碳能源转型已成为全球共识。SDG 7 的主要标准涉及再生能源、能源供给、能源效率的增长以及国际协作等诸多因素,旨在确保 2030 年的现代能源人人都能用得起,用得上,用得持久[50]。目前 SDG 7 各项指标虽然取得了一定进展,但其增长速度显著落后进程目标。如按照目前的增长速度,到 2030 年,全球仍将有超过 10 亿人用不上电以及清洁的烹饪燃料[51]。要实现目标,SDG 7.1.1 的年增长率需要由现在的 0.5 个百分点增加到 0.9 个百分点,SDG 7.3 能效提升速度必须达到目前的 2 倍[52]。要在 2030 年实现 SDG 7 目标,迫切需要全球在资金、技术和政策等各方面加大投入和协调。

自 2017 年起,国际能源署(International Energy Agency)等国际机构每年联合发布全球 SDG 7 跟踪报告,但目前 SDG 7 进程评估依然面临数据缺失、更新滞后等挑战。电力短缺是发展中国家面临的首要能源问题。通电率是反映电力普及程度的 SDG 7 指标,及时准确的通电率数据对于各方实现 SDG 7.1 能源供应目标具有重要的参考价值[51,52]。目前,全球通电率数据主要采用统计调查方法获得,存在数据更新不及时,部分数据缺失,不同国家间数据可比性差,质量参差不齐,数据非空间化等问题[53]。发展中国家普遍存在能源短缺问题,同时缺乏资金和技术来实现能源自给和能源转型。发展可再生能源将成为实现全球能源转型、应对全球气候变化危机的关键[54]。要在全球实现 SDG 7,关键在于如何帮助发展中国家解决能源短缺和转型问题,为此,SDG 7 设立了 7.a 和 7.b 两个国际合作指标来促进发展中国家的绿色低碳能源转型。

空间观测在全球能源可及和转型中已凸显重要作用,发展基于空间观测技术的新一代 SDG 7 跟踪评估方法已成为国际热点。

(1)在光伏时空分布提取方面,采用高分二号卫星和 Sentinel-2 卫星等多源数据,基于颜色、纹理、形状、尺寸以及地理位置等光谱及纹理信息特征,创建光伏电站样本库,基于训练构建的光伏电站提取模型,结合深度学习算法精确提取出小尺度图像中的光伏电站区域。以坐标信息重新拼合提取结果图像,实现国家大尺度光伏电站区域的精准提取[55,56]。长时间序列光伏电站的变化趋势和空间分布格局可为光伏

电站的合理规划和选址以及国家尺度 SDG 7.2 的评估提供重要的科学数据。

(2)在高耗能产业时空监测方面,基于长时序卫星遥感和实地调研等空间观测数据,采用时空密度分割和机器学习相结合的高耗能产业热源识别技术,研制了 2012−2021 年中国高耗能产业长时序数据集[57],为中国重点行业能效提升和产业结构调整提供数据支持,同时为国家尺度 SDG 7.3 评估奠定重要基础。

(3)在发展可再生能源方面,基于空间观测数据,利用 GIS 空间分析方法,筛选影响风光资源开发的政策性、技术性和经济性限制因子,以识别全球风光资源的可开发区和评估风光资源技术的可开发量[58,59],为全球各国的可再生能源规划和风光资源高效利用提供具有空间显示的决策数据支撑。

1.4　SDG11 可持续城市与社区

实现可持续城市和社区是应对气候变化、促进经济增长并减少贫困和污染的关键。据《2018 年版世界城镇化展望》预测,到 2030 年,定居在城市地区的全球人口将达到 60%,而到 2050 年,这个比率将上升至将近 70%[60]。然而,快速城市化也带来了住房短缺、交通拥堵、空气污染、废物管理等问题以及基础设施和服务不足等重大挑战,无计划的城市扩张使其易遭受气候变化和自然灾害的影响风险。虽然贡献了全球 60% 的 GDP,但城市地区也产生了全球 75% 的垃圾和碳排放[61]。目前,超过 40 亿城市居民面临着空气污染、基础设施短缺和无序开发等严峻问题。

在联合国 2030 年议程中涉及的 17 个 SDGs 中,SDG 11 与其他多个可持续发展目标相互关联,230 多个指标中约有 1/3 适用于城市层面内的衡量[62]。然而,很多指标有评估方法而无数据支撑,指标数据的严重缺乏成为目标进展监测与评估的一大挑战。城市的可持续发展具有复杂关系的特点,传统的社会统计和人口普查数据实时性差,空间性欠缺,数据质量参差不齐,只能依靠有限的调查问卷。这不仅导致评价结果的时空精度无法满足决策的需求,也严重影响其及时性和可靠性。世界银行、联合国人居署、麦肯锡咨询公司等都已制定了全面的城市可持续发展指数系统,但由于这些系统的数据采集来源和标准存在较大差异,对经济、社会、环境和资源的关注重点也各不相同,因此无法产生统一对比的评估结果[63]。其中,全球潜力城市指数[64] 聚焦在社会、经济维度,涉及环境的可持续性问题较少体现。

空间观测技术以其完备、实时、稳健、客观等优势,可以定期获取全球数据,挖掘全球 SDG 11 进展的驱动因素,围绕城市住房条件(SDG11.1)、公共交通(SDG11.2)、遗产保护(SDG 11.4)和城市空气污染(SDG11.6)等具体目标开展研究,已成为全球城市可持续发展研究的重要数据来源和分析手段。

(1)通过利用机器学习算法与空间观测大数据的结合,可以精细化估算城市贫穷地区的状况[65,66]。基于高分的遥感影像,并结合城市街区数据,能够获取棚户区的分布和空间变化,这些高时空分辨率的城市住房数据集提供了评估 SDG 11.1 的关键数据基础[67–69]。其中中国的高分二号卫星因其较高空间分辨率,在深入洞察城市棚户区的空间构造中发挥了核心作用[70]。

(2)集结交通空间观测数据对于建构全方位、立体、动态的并且可以实时更新的交通信息系统极为重要。通过衍生“交通覆盖”刻画城市现代化与便捷性的评价维度,对路网密度指数等指标所刻画的城市可持续发展内涵进行评估[71]。

(3)基于多源遥感大数据(例如 Landsat、MODIS 遥感影像)等计算的细颗粒物(PM2.5)浓度及变化、开放空间面积占建成区面积比例、城区人口密度变化率、区域增温敏感性指数等分别刻画空气污染程度、城市公共空间建设情况、城市活力与城市能动性以及城市热岛效应,可以突破传统统计数据难以满足实时动态获取的瓶颈[72,73]。利用空间观测技术进行具体 SDG 11 指标评估,可提供数据基础和经验参考,推动可持续城市和社区建设,应对气候变化、促进经济增长并减少贫困和污染。为揭示全球在城市可持续发展 SDG 11 实施进程中的现状和趋势,空间观测技术可以提供重要的数据基础,在大尺度、高时效、细粒度监测和评估中发挥了不可替代的作用。

1.5　SDG13 气候行动

全球温室气体的浓度持续上升,导致全球平均气温不断打破新的纪录,短期带来更多更极端的气象灾害,长期会加快冰川冰盖的消融,使海平面不断上升,并威胁生物多样性[74]。根据《2023 年全球风险报告》的指引,接下来的 10 年里,全球将遭遇的极大威胁是无法减缓、无法适应的气候变化和极端的自然灾害[75]。联合国 2022 年的可持续发展报告中指出,世界正处

在气候灾难的边缘，躲避的窗口正在关闭。世界范围内温室气体排放总量依旧在上升，各国必须立刻采取措施，才能将即将到来的气候危机阻止在临界边缘，转向一种可持续发展的未来[2]。

迄今为止，SDG 13 的数据在所有 17 个可持续发展目标中最为不足，只有约 20% 的国家能提供相关数据[2]，包含时间和位置信息的数据更是凤毛麟角。SDG 13.1 和 SDG13.2 涉及的监测评估处于方法具备但数据不足的状态。SDG 13.1 的执行依赖于《2015－2030 年仙台减灾框架》，而该框架的主要监管机构联合国防灾减灾署在其报告中明确指出，气候变化已成为导致人类遭受灾害损失的主要原因[76]。现有的灾害指标研究中，大都只包括统计数据，对于灾害类型、影响范围、频次、灾民分布等方面的空间数据和多层次分析严重不足，因此，也无法有效指导和预警以降低灾害风险。SDG 13.2 的执行依赖于《巴黎协议》，该协议致力于通过减少温室气体排放以减缓全球升温。目前，实现碳平衡是对抗气候变化最迫切的使命，然而，SDG 13.2 的标准设定相当粗略，只包括了温室气体排放量，对于如何实现碳平衡、执行进度等问题，却未能提供充分的指导[77,78]。因此，全球亟需既能反映 SDG 指标整体进展，又能提供空间细节和时间趋势的数据信息，为应对自然灾害和减缓气候变化提供决策支撑。

整合空间观测和大数据的优势，有利于减少研究结果的不确定性，同时满足对全球气候变化和相关灾害风险科学数据的迫切需求。空间观测提供了一系列有关全球气候变化影响和响应的时空数据集，能够作为可持续发展目标 SDG13 的支持。

（1）在气候相关灾害领域，空间观测整合了多种数据，包括卫星遥感数据、经济统计数据、测绘数据、地面观测数据、基础地理数据等，能够有效地监控大范围的极端天气和灾害，展示出在实时、精确监测诸如洪水、干旱、地震、滑坡、冰湖溃决等重大灾害发生方面的优势[79–81]；基于空间观测数据搭建的极端气候与灾害数据集成分析平台，实现了灾害性天气、水文和损失数据等连续、动态、大范围的监测，为应对“一带一路”沿线灾害风险挑战提供有力支持[82,83]。

（2）围绕应对气候变化方面，通过解析来自多源卫星的大气多光谱数据，探究全球二氧化碳和二氧化氮浓度在时空维度的差异性，进而研究全球温室气体的变化趋势和碳汇变化的驱动因素[84]。通过融合空间观测技术和生态系统模型，运用随机森林等机器学习方法，精准度量土地覆盖变迁、气候变化、二氧化碳浓度改变以及氮沉积的变化，对全球总碳汇变化产生的影响[85–87]，为实施差别化碳减排路径和区域协同减排对策做出贡献。

1.6 SDG14 水下生物

海洋占据地球面积的 71%，作为全球三大生态系统核心之一，对全球的水循环、气候变化、生物多样性保护，以及为众多物种提供栖息地等方面具有至关重要的作用。2010 年有超过 19 亿的人口选择在沿海地区居住，预测到 2050 年这个数字会增长至 24 亿。但是 40% 以上的海洋表面已遭受到来自陆地和海域活动的多重影响[88]。海洋生态系统以其巨大的格局、快速的变化以及高度的复杂性，体现了 SDG 14 代表的多元化、活跃性和互动性的庞大系统。为了实现 SDG 14，对其所有的具体目标进行有效监控和测量是十分关键的，因此迫切需要建立一个科学、合理并完善的数据和方法支持系统。

从全球角度看，SDG 14 关于海洋及其资源的保护和持久使用的主要目标大都未能达到预设的期待。联合国在发布的《第二次全球海洋综合评估》报告[89] 中披露，自 2015 年首次进行全球海洋评价以来，人类活动造成的诸如气候变化相关影响、不规范的捕鱼行为、外来生物入侵等压力，使得重要的海洋生态系统（例如红树林和珊瑚礁）的状况持续下滑。传统的 SDG 14 大部分数据主张倾向于采用层级填报的统计方式，然而这种方法在某些区域存在数据上报滞后和准确度不高的问题。此外，SDG 14 的相关指标监测数据严重匮乏，使得相应的分析评估和决策信息不足，这些问题严重阻碍了 SDG 14 实际目标的实现。

在海洋研究领域，空间观测技术作为一种新的手段，已成为理解和发现海洋新知识的动力。

（1）在保护海洋生态系统方面，利用长期、多源的空间观测数据构建了一套具有高空间精度、长时间跨度的红树林空间分布监测数据集，能够实时分析红树林退化和恢复的时空分布特点[90,91]。

（2）在保障海洋安全方面，建立了涵盖长时期数据的渤海赤潮事件数据库，推动了实地观察和遥感观测在赤潮监测中的应用，保障了海洋安全监测的及时性和不间断性[92]。

(3)在海洋的可持续经济利用方面,利用空间观测技术和深度学习算法,已构建 2015－2020 年中国范围滨海养殖池和近海筏式养殖区高精度分布数据,以及 2020 年全球尺度滨海养殖池数据集,空间分辨率为 10 m,为持续开展海洋经济活动提供关键数据支撑[90]。

(4)在海洋生态系统健康度评估方面,充分利用空间观测大数据平台的数据,根据海域生态系统的结构、服务功能、生态问题和灾害等特征[93],进一步改进了与 SDG 14 有关的监测方法,并构建了海洋健康评估的技术和模型系统,从而推出了更为精细的监测评估数据,以服务于国家决策和近海开发的管理工作。随着中国高性能计算能力的显著提升,实时监测海洋数据、数值预报和情景模拟系统的集成,能够更好地加强 SDG14 的实施,并提供更高效的海洋灾害和海洋污染防控措施。

1.7　SDG15 陆地生物

尽管联合国 2030 年议程已经实施了 8 年,但 SDG 15 的目标完成情况仍面临严峻挑战。例如,全球的森林面积(SDG 15.1.1)呈现持续缩小趋势[94];全球约有 75% 的土地正在经历退化(SDG 15.3.1)[95];尽管全球重要的生物多样性地点保护比例处于上升趋势(SDG 15.1.2、SDG 15.4.1),但是有关生物种类繁多的红色名册指数(SDG 15.5.1)还在继续下降[96]。考虑到目前的进度,到 2030 年达成 SDG 15 的目标将会面临巨大挑战。

2023 年是 SDGs 中期评估时间节点,开展 SDG 15 进展评估是了解进展、明确差距并采取有效干预的关键。开展大尺度、空间明确的 SDG 15 指标状态评估,并明确气候变化与人类活动的相应贡献,对于指导科学保护与恢复政策的制定具有重要的意义。随着数据可用性的提高与技术方法的发展,SDG 15 涵盖的 14 个指标中有 8 个指标处于 Tier I(有方法有数据)[96]。然而,这些指标的获取方法主要以统计手段为主,缺乏跨尺度(全球－区域－国家－局地)上的可拓展性,很多能力相对落后的发展中国家无法进行进展评估。生态系统变化受多尺度多因素相互作用的影响,传统数据或分析方法显然已力所难及。

当前,充分发挥空间观测和地球大数据的优势,填补 SDG 进展评估数据空缺、实现 SDG 的连续地理空间化评估,已得到了联合国管理机构的广泛认可,相关数据已成为国家统计数据的重要补充。

(1)在森林保护与恢复方面,目前已有若干全球尺度森林分类、覆盖度数据[97]。然而,这些数据存在分类体系不够精细、空间不连续和不确定性较大等问题。充分挖掘空间观测数据的潜力,学者们开展了林木覆盖及油棕分布的监测[98],评估了中国森林地上生物量的动态变化[99,100],以期为森林可持续管理提供数据支持与方法参考。

(2)在土地退化零增长方面,防治荒漠化与土地退化是 SDG 15.3 的核心内容,2030 年实现土地退化零增长已得到国际社会全面接受和认可[101,102]。充分利用空间观测技术的优势,利用一致的土地覆盖、土地生产力与土壤有机碳 3 个子指标开展监测期(2015－2020 年)中国土地退化零增长动态评估,对蒙古高原沙尘暴动态及驱动因素进行分析并提出了对策,以期为土地退化零增长目标实现提供新数据与新手段[103]。空间观测技术产生的数据可以快速、高效、直观且在更高空间颗粒度上呈现 SDG 指标的有效观测和评估,如图 1 所示[104],基于卫星观测数据生产的全球 30 m 分辨率的森林覆盖数据可有效支撑 SDG 15.1.1 森林覆盖率的监测与评估,对比依据传统统计数据获取的国别尺度森林覆盖率指标结果(见图 2[104])具有显著优势[104]。空间观测数据技术为集成多级尺度空间明确的数据,精细化分析不同区域 SDG 15 指标进展、明确不足与空缺提供了重要支撑。

2　结论与展望

落实联合国 2030 年议程面临数据缺失、指标体系不完善、发展不平衡等问题,这对科技创新提出了更高的需求,其中对数据和方法的需求是尤为迫切和重要的。利用空间观测技术,定期收集和整合全球的各类数据,以便对 7 个 SDGs(零饥饿、清洁饮水和卫生设施、清洁能源、可持续城市和社区、气候行动、水下生物和陆地生物)的进展进行持续监测和评估,可以为全球落实联合国“2030 年可持续发展目标”及制定决策提供科学参考和依据。

空间观测技术的广泛应用有效地推动了可持续发展目标的实现,同时也存在诸多问题,例如需要采用更高质量和空间分辨率的地球科学数据,发展更合理、更智能的 SDG 指标评估方法,推动数据共享和应用以及搭建多指标间的综合评价体系等[6,7]。为促进

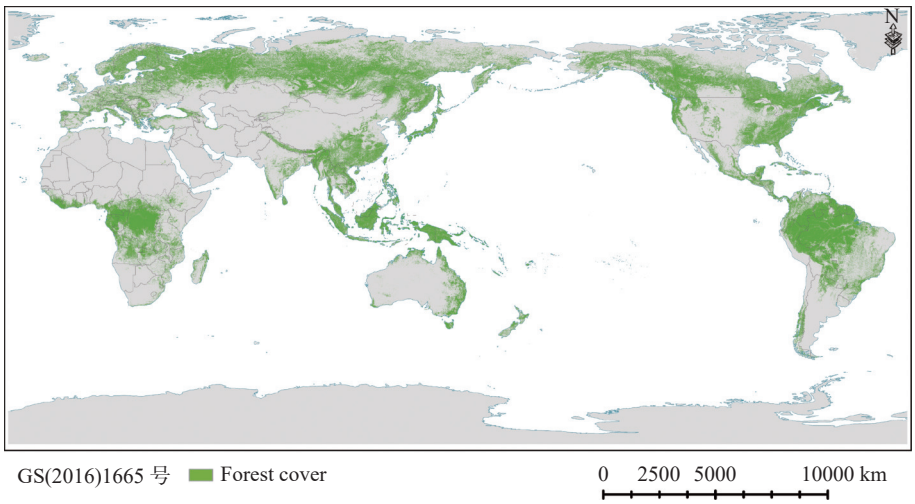


图 1 基于空间观测技术的全球森林覆盖分布

Fig. 1 Global forests cover distribution based on spatial observation technology

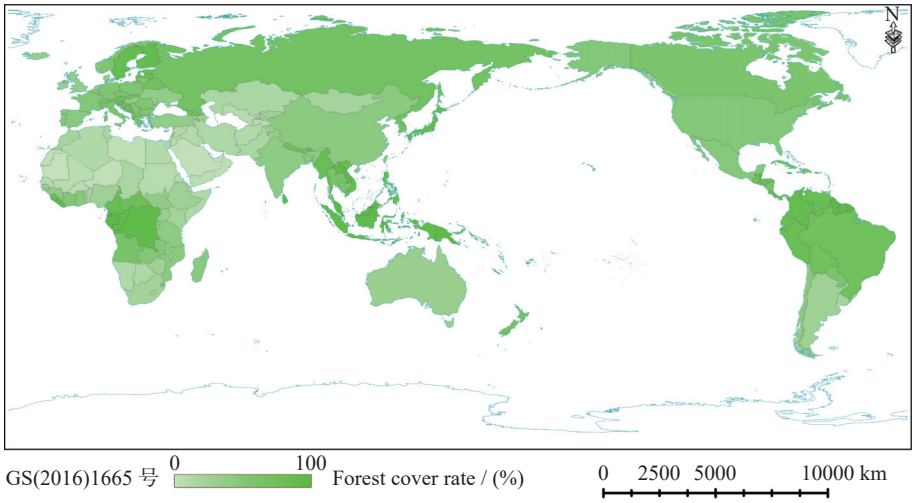


图 2 基于统计数据的全球国别尺度森林覆盖率分布

Fig. 2 Global forest coverage distribution at the national scale based on statistical data

联合国 2030 年议程的实现，未来重点研究内容应包括以下五个方面。

2.1 发展 SDGs 空间观测指标体系

当前联合国 SDG 指标体系中的部分指标无法体现国家间人口、发展程度、地理环境差异，且基于国别尺度的统计数据难以体现国家内部不同地理单元的可持续发展水平差异，限制了践行“不让一个人掉队”的目标宗旨。基于空间观测的地球大数据具有显著的地理空间分解能力，特别是针对环境类指标，可实现更高空间维度的 SDG 指标监测与评估。因此，进一步加强 SDG 指标体系的深层次理解，研究基于空间观测数据的新指标并促进其应用，有助于进一步完善和优化调整现有 SDG 指标体系。

2.2 面向 SDGs 评估的空间观测数据共享模式

由于各国统计标准和方法的不同，各指标数据的规范性和质量参差不齐，发达国家和发展中国家在地理覆盖率和时效性方面也存在显著差距。海量空间观测数据的合理管理模式和高效共享方式是促进可持续发展目标实现的前提。目前，空间观测数据存在着共享机制不完善、共享技术创新性匮乏、共享服务模式单一和共享权益保障较弱等问题，全球需要推动更广泛的科学数据共享和应用，加强多时空数据的管

理与关联融合，夯实空间观测数据共享机制，消除信息孤岛、实现数据的快速汇集和报送，打破空间观测数据的共享壁垒，弥合数字鸿沟，充分发挥空间观测数据在实现全球可持续发展目标中的作用。

2.3　可持续发展目标监测与评估新方法

基于空间观测数据的 SDG 指标监测新方法和新模型需要在自动化、智能化和时效性方面取得进步以实现空间观测数据的高效利用。依赖某个特定领域现有的挖掘分析理论和方法，已经不能有效地促进科学的发现。为解决一些重要的科学问题，需要系统性、全面性地运用并创新各种技术方法。现阶段的空间观测数据分析方法聚焦在统计分析、可视化展现，以及机器学习技术。结合深度学习、人工智能、数据融合、数据同化和区块链等创新前沿技术，进一步提高各种方法的适用性和可解释性，可有效提高空间观测数据衡量可持续发展目标的能力。

2.4　可持续发展科学卫星数据应用

2021 年，可持续发展大数据国际研究中心研制的可持续发展科学卫星 1 号（SDGSAT-1）成功发射，其核心目标在于通过收集并分析特定的人类与自然环境互动的数据，以更好地服务于联合国 2030 年议程。2022 年 9 月“SDGSAT-1 开放科学计划”得以落实，有超过 70 个国家开始使用该卫星提供的信息。推动国际社会广泛使用该卫星数据，利用新型数据为国际社会特别是发展中国家开展 SDGs 研究做出实质贡献。同时，通过优化数据质量、处理方法、空间分辨率和数据粒度方式进一步提升空间观测数据的应用价值，充分发挥其在实现可持续发展目标评估中的作用。

2.5　空间观测服务 SDGs 权衡协同

联合国 2030 年议程提供了一个全面和多维的发展观。由于不同可持续发展目标的相互关系，单一目标会受到其他目标的促进或限制作用。空间观测数据具有的时空连续特征能够补充或替代传统官方的统计数据，并提供包括土地、大气、海洋和人口等在内的多主题信息。需要利用海量多源信息推动全球、国家或区域间跨部门的监测能力，进行问题导向的数据挖掘，探索构建多指标综合评估体系，充分分析不同可持续发展目标间的协同或权衡关系，以准确把握指标动态趋势，为促进全部可持续发展目标的共同发展提供科学依据。

参考文献

[1] UN. Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development[R/OL]. (2015-10-21)[2023-08-20]. https://sdgs.un.org/2030agenda

[2] UN. The Sustainable Development Goals Report 2022[R/OL]. (2022-07-12)[2022-08-22]. https://www.un.org/development/desa/dspd/2022/07/sdgs-report/

[3] SACHS J, LAFORTUNE G, KROLL C, *et al*. From Crisis to Sustainable Development: the SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond. Sustainable Development Report 2022[R/OL]. (2022-06-02) [2023-08-22]. https://www.sdgindex.org/reports/sustainable-development-report-2022/

[4] UN. The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition[R/OL]. (2023-07-10)[2023-08-20]. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/

[5] OECD. A Territorial Approach to the Sustainable Development Goals[R/OL]. (2020-02-07)[2022-08-22]. https://www.oecd.org/cfe/a-territorial-approach-to-the-sustainable-development-goals-e86fa715-en.htm

[6] SHI Jiancheng, GUO Huadong, DONG Xiaolong, *et al*. Developments and future strategies of Earth science from space in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 95-117 (施建成, 郭华东, 董晓龙, 等. 中国空间地球科学发展现状及未来策略 [J]. 空间科学学报, 2021, **41**(1): 95-117)

[7] GUO H D, LIANG D, SUN Z C, *et al*. Measuring and evaluating SDG indicators with Big Earth Data[J]. *Science Bulletin*, 2022, **67**(12): 1792-1801

[8] GUO Huadong, LIANG Dong, CHEN Fang, *et al*. Big earth data facilitates sustainable development goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(8): 874-884 (郭华东, 梁栋, 陈方, 等. 地球大数据促进联合国可持续发展目标实现 [J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(8): 874-884)

[9] FAO. Tracking Progress on Food and Agriculture-Related SDG Indicators 2021: A Report on the Indicators under FAO Custodianship[R]. Rome: FAO, 2021. DOI: 10.4060/cb6872en

[10] FAO, IFAD, UNICEF, *et al*. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing Food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable[R]. Rome: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2022. DOI: 10.4060/cc0639en

[11] OECD, FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032[OL]. (2022-07-06)[2023-08-22]. https://doi.org/10.1787/08801ab7-en

[12] FAO. FAO and the SDGs. Indicators: Measuring Up to the 2030 Agenda for Sustainable Development[R]. Rome: FAO, 2017

[13] FAO. FAO Stat: FAOSTAT Online Statistical Service Food and Agriculture Organization[OL]. (2023-07-17)[2023-08-22]. https://www.fao.org/faostat/en/#home

[14] GENNARI P, ROSERO-MONCAYO J, TUBIELLO F N. The FAO contribution to monitoring SDGs for food and

agriculture[J]. *Nature Plants*, 2019, **5**(12): 1196-1197

[15] SANG Yiming, LU Yahan, WANG Xue, *et al*. Farmland Distribution Dataset of the Yarlung Zangbo–Lhasa–Nyangqu River Region of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2022, **6**(4): 619-630 (桑一铭, 卢亚晗, 王学, 等. 青藏高原"一江两河"地区耕地分布数据集 [J]. 全球变化数据学报, 2022, **6**(4): 619-630)

[16] SHEN Ge, LIU Hang, LI Danan, *et al*. A 10 m spatial resolution dataset for the spatial distribution of cropland resources in the Three Northeastern Provinces from 2020 to 2022[J]. *Journal of Agricultural Big Data*, 2023, **5**(2): 2-8 (申格, 刘航, 李丹丹, 等. 东北三省 2020-2022 年间 10 m 空间分辨率耕地资源空间分布数据集 [J]. 农业大数据学报, 2023, **5**(2): 2-8)

[17] LIU N, XING Z Z, ZHAO R M, *et al*. Analysis of chlorophyll concentration in potato crop by coupling continuous wavelet transform and spectral variable optimization[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(17): 2826

[18] WANG Zhongjiao, WEI Maosheng, GUO Lingfeng, *et al*. Extraction of crop spatial distribution information based onprincipal component analysis[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2021, **44**(6): 114-115,119 (王众娇, 魏茂盛, 郭凌峰, 等. 基于主成分分析的农作物空间分布信息提取 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, **44**(6): 114-115,119)

[19] ROY D P, YAN L. Robust Landsat-based crop time series modelling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **238**: 110810

[20] REN Hongrui, ZHANG Yueqi, HE Qijin, *et al*. Extraction of pddy rice planting area based on multi-temporal FY-3 MERSI remote sensing images[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, **43**(5): 1606-1611 (任鸿瑞, 张悦琦, 何奇瑾, 等. 基于 FY-3 MERSI 遥感数据的水稻种植分布提取 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, **43**(5): 1606-1611)

[21] ZHOU Jiawei, TU Lilin, CHEN Hongjian, *et al*. Deep learning-based rice paddy extraction by fusing spatial and temporal remote sensing information[J]. *Geospatial Information*, 2022, **20**(2): 39-44 (周佳玮, 涂理林, 陈洪建, 等. 融合空间和时序遥感信息的深度学习水稻提取 [J]. 地理空间信息, 2022, **20**(2): 39-44)

[22] CAI Yaotong, LIU Shutong, LIN Hui, *et al*. Extraction of paddy rice based on convolutional neural network using multi-source remote sensing data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2020, **32**(4): 97-104 (蔡耀通, 刘书彤, 林辉, 等. 基于多源遥感数据的 CNN 水稻提取研究 [J]. 国土资源遥感, 2020, **32**(4): 97-104)

[23] DONG Xiuchun, LIU Zhongyou, JIANG Yi, *et al*. Winter wheat extraction of worldView-2 image based on semantic segmentation method[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(3): 564-570 (董秀春, 刘忠友, 蒋怡, 等. 基于 WorldView-2 影像和语义分割模型的小麦分类提取 [J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(3): 564-570)

[24] LIU Huinan, WANG Jingli, ZHOU Bin, *et al*. Maize extraction by multi-source remote sensing based on phenological characteristics of MODIS time series data[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, **35**(4): 113-121 (刘惠楠, 王井利, 周斌, 等. 基于 MODIS 时序数据物候特征下的多源遥感玉米提取 [J]. 江西农业学报, 2023, **35**(4): 113-121)

[25] ZHANG Hongming, TAN Ziwei, HAN Wenting, *et al*. Extraction method of maize height based on UAV remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(5): 241-250 (张宏鸣, 谭紫薇, 韩文霆, 等. 基于无人机遥感的玉米株高提取方法 [J]. 农业机械学报, 2019, **50**(5): 241-250)

[26] ZHANG Dongyan, YANG Yuying, HUANG Linsheng, *et al*. Extraction of soybean planting areas combining Sentinel-2 images and optimized feature model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(9): 110-119 (张东彦, 杨玉莹, 黄林生, 等. 结合 Sentinel-2 影像和特征优选模型提取大豆种植区 [J]. 农业工程学报, 2021, **37**(9): 110-119)

[27] ZHANG Meng, SHE Bao, YANG Yuying, *et al*. Study on extraction method of soybean planting areas based on unmanned aerial vehicle RGB image[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, **35**(4): 952-961 (张梦, 佘宝, 杨玉莹, 等. 基于无人机 RGB 影像的大豆种植区提取方法研究 [J]. 浙江农业学报, 2023, **35**(4): 952-961)

[28] WU Z T, THENKABAIL P S, MUELLER R, *et al*. Seasonal cultivated and fallow cropland mapping using MODIS-based automated cropland classification algorithm[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, **8**(1): 083685

[29] FISETTE T, DAVIDSON A, DANESHFAR B, *et al*. Annual space-based crop inventory for Canada: 2009-2014[M]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE, 2014: 5095-5098

[30] KHANAL S, KUSHAL KC, FULTON J P, *et al*. Remote sensing in agriculture-accomplishments, limitations, and opportunities[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(22): 3783

[31] LIU Yizhu, WU Wenbin, LI Zhaoliang, *et al*. Extracting irrigated cropland spatial distribution in China based on time-series NDVI[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(22): 276-284 (刘逸竹, 吴文斌, 李召良, 等. 基于时间序列 NDVI 的灌溉耕地空间分布提取 [J]. 农业工程学报, 2017, **33**(22): 276-284)

[32] ZHANG Ning, YANG Guijun, ZHAO Chunjiang, *et al*. Progress and prospects of hyperspectral remote sensing technology for crop diseases and pests[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(1): 403-422 (张凝, 杨贵军, 赵春江, 等. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望 [J]. 遥感学报, 2021, **25**(1): 403-422)

[33] LU Junjing, SUN Leigang, HUANG Wenjiang. Research progress in monitoring and forecasting of crop diseases and pests by remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(1): 21-32 (鲁军景, 孙雷刚, 黄文江. 作物病虫害遥感监测和预测预警研究进展 [J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(1): 21-32)

[34] HUANG W J, LU J J, YE H C, *et al*. Quantitative identification of crop disease and nitrogen-water stress in winter wheat using continuous wavelet analysis[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, **11**(2): 145-152

[35] BERGER K, VERRELST J, FÉRET J B, *et al*. Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal develop-

ments in the context of imaging spectroscopy missions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **242**: 111758

[36] YANG H B, YIN H, LI F, *et al*. Machine learning models fed with optimized spectral indices to advance crop nitrogen monitoring[J]. *Field Crops Research*, 2023, **293**: 108844

[37] LIU B H, CHEN X P, MENG Q F, *et al*. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China-Distinguish irrigated and rainfed conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **239**: 108-117

[38] KAMIR E, WALDNER F, HOCHMAN Z. Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, **160**: 124-135

[39] UN Water. SummaryProgress Update 2021: SDG 6-Water and Sanitation for All[R/OL]. (2021-02-24) [2022-08-22]. https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all

[40] WHO, UN-HABITAT. Piloting the Monitoring Methodology and Initial Findings for SDG Indicator 6.3. 1[R]. Geneva: WHO, UNHABITAT, 2018

[41] UNEP. Progress on Integrated Water Resources Management: Tracking SDG 6 Series - Global Indicator 6.5. 1 Updates and Acceleration Needs[R/OL]. (2021-08-23) [2022-08-22]. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36690

[42] MCNABB David. E. Integrated Water Resource Management. In: Water Resource Management [M]. Palgrave Macmillan, Cham. New York, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54816-6_14

[43] LU Shanlong, JIA Li, JIANG Yunzhong, *et al*. Progress and prospect on monitoring and evaluation of United Nations SDG 6 (Clean Water and Sanitation) target[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(8): 904-913 (卢善龙, 贾立, 蒋云钟, 等. 联合国可持续发展目标 6(清洁饮水与卫生设施) 监测评估: 进展与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(8): 904-913)

[44] SHEFFIELD J, WOOD E F, PAN M, *et al*. Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions[J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(12): 9724-9758

[45] ZHU Yonghua, LUO Pingping, ZHANG Jie, *et al*. Regional applicability analysis of two gravity satellite datasets [J]. *Remote Sensing Information*, 2022, **37**(1): 55-60 (朱永华, 罗平平, 张洁, 等. 两种重力卫星数据集的区域适用性分析 [J]. 遥感信息, 2022, **37**(1): 55-60)

[46] WANG Xisen, WANG Di, LEI Qiuliang, *et al*. Advances in the inland surface water quality monitoring byremotely sensed imagery[J]. *China Agricultural Informatics*, 2022, **34**(2): 1-15 (王玺森, 王迪, 雷秋良, 等. 内陆地表水体水质遥感监测研究进展 [J]. 中国农业信息, 2022, **34**(2): 1-15)

[47] AMANI M, MAHDAVI S, AFSHAR M, *et al*. Canadian wetland inventory using Google Earth Engine: The first map and preliminary results[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(7): 842.

[48] LIU Y, ZHANG H Q, ZHANG M, *et al*. Vietnam wetland cover map: using hydro-periods Sentinel-2 images and Google Earth Engine to explore the mapping method of tropical wetland[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, **115**: 103122

[49] ZHONG Yanfei, WU Hao, LIU Yanhe. Research status and prospects of remote sensing for wetland mapping[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(3): 420-431 (钟燕飞, 吴浩, 刘寅贺. 湿地遥感制图研究现状与展望 [J]. 中国科学基金, 2022, **36**(3): 420-431)

[50] IEA. World Energy Outlook 2022[OL]. (2022-10-10)[2023-08-22]. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

[51] IEA. Tracking SDG7: The Energy Progress Report, 2023[R/OL]. (2023-06-10)[2023-08-22]. https://www.iea.org/reports/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2023

[52] IEA. World energy statistics April 2023 Edition (IEA Family and Beyond)[OL]. (2023-04-18)[2023-08-22]. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics

[53] 中国国家能源局. 国家能源局关于 2020 年度全国可再生能源电力发展监测评价结果的通报 [OL]. (2021-06-20) [2022-08-22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-06/20/c_1310039970.htm.

[54] SONG Jing, WANG Fang, MIAO Hong, *et al*. Empowering high-quality development of overseas industrial parks – Chinese overseas industrial park low-carbon development indicator system[J]. *Development Finance Research*, 2022(4): 48-59 (宋婧, 王芳, 苗红, 等. 海外园区低碳发展指标体系: 赋能中国海外园区高质量发展 [J]. 开发性金融研究, 2022(4): 48-59)

[55] LIU Yun, SONG Shanhai, LI Huixuan, *et al*. Information extraction of complex mountain photovoltaic power stations based on GF satellite images[J]. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2023, **47**(3): 88-92 (刘芸, 宋善海, 李慧璇, 等. 基于高分卫星影像的复杂山区光伏电站信息提取 [J]. 中低纬山地气象, 2023, **47**(3): 88-92)

[56] YU Fangyuan, CAO Jiawei, LI Fayuan, *et al*. Ground photovoltaic power station extraction considering object characteristics and carbon reduction benefit evaluation[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, **25**(3): 529-545 (于方圆, 曹家玮, 李发源, 等. 顾及对象特征的地面式光伏电站提取及减碳效益评估 [J]. 地球信息科学学报, 2023, **25**(3): 529-545)

[57] XIE Yanmei, MA Caihong, SUI Xin, *et al*. A dataset of high energy-consuming industrial products in the ASEAN during 2012－2021[J]. *China Scientific Data*, 2023: 1-10 (谢燕妹, 马彩虹, 隋欣, 等. 2012－2021 年东盟 10 国高耗能产业数据集 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2023: 1-10)

[58] ZHANG Feimin, WANG Chenghai, XIE Guohui, *et al*. Projection of global wind and solar energy over land under different climate change scenarios during 2020－2030[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, **36**(5): 725-732 (张飞民, 王澄海, 谢国辉, 等. 气候变化背景下未来

全球陆地风、光资源的预估 [J]. 干旱气象, 2018, **36**(5): 725-732)

[59] SUN Jingbo, WANG Yang, YANG Xiaofan, *et al*. Analysis of spatial and temporal variation character of climate risks of wind and solar resources in China[J]. *Electric Power*, 2023, **56**(5): 1-10 (孙景博, 王阳, 杨晓帆, 等. 中国风光资源气候风险时空变化特征分析 [J]. 中国电力, 2023, **56**(5): 1-10)

[60] United Nations Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision [M]. New York: United Nations, 2019. DOI: 10.18356/b9e995fe-en

[61] CHEN M X, CHEN L K, CHENG J F, *et al*. Identifying interlinkages between urbanization and sustainable development goals[J]. *Geography and Sustainability*, 2022, **3**(4): 339-346

[62] SUN L Q, CHEN J, LI Q L, *et al*. Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 5366

[63] MICHAEL F L, NOOR Z Z, FIGUEROA M J. Review of urban sustainability indicators assessment – Case study between Asiancountries[J]. *Habitat International*, 2014, **44**: 491-500

[64] AMEEN R F M, MOURSHED M. Urban sustainability assessmentframework development: The ranking and weighting ofsustainability indicators using analytic hierarchy process[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **44**: 356-366

[65] JEAN N, BURKE M, XIE M, *et al*. Combining satellite imageryand machine learning to predict poverty[J]. *Science*, 2016, **353**(6301): 790-794

[66] NI Y, LI X T, YE Y M, *et al*. An investigation on deep learning approaches to combining nighttime and daytime satellite imagery for poverty prediction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, **18**(9): 1545-1549

[67] LIU Juan, GUO Hailin, SHI Yibing. Extracting and mapping informal settlements from quickbird remote sensing imagery[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, **34**(5): 199-202, 205 (刘娟, 郭海林, 施以兵. 基于QuickBird 遥感影像的棚户区提取与制图 [J]. 测绘与空间地理信息, 2011, **34**(5): 199-202, 205)

[68] KUANG W H, ZHANG S, LI X Y, *et al*. A 30 m resolution dataset of China's urban impervious surface area and green space, 2000— 2018[J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(1): 63-82

[69] WEI X B, ZHANG W, ZHANG Z, *et al*. Urban land use land cover classification based on GF-6 satellite imagery and multi-feature optimization[J]. *Geocarto International*, 2023, **38**(1): 2236579

[70] MENG Qingwei. Urban public transportation coverage analysis based on AHP[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, **43**(3): 141-145 (孟庆伟. 城市公共交通覆盖度空间统计分析研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, **43**(3): 141-145)

[71] ZHAO Yajun, YU Jingcai. Analysis and application of urban traffic planning basic data based on ARCGIS[J]. *Traffic & Transportation*, 2017(2): 56-60 (赵亚军, 余静财. 基于 ARCGIS 的城市交通规划基础数据分析与应用 [J]. 交通与运输, 2017(2): 56-60)

[72] WU Yizhen, SHI Kaifang, SHE Boliang, *et al*. Analysis of the impact of urban sprawl on haze pollution based on the NPP-VIIRS nighttime light remote sensing data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, **46**(5): 777-789 (伍亿真, 施开放, 余柏蒗, 等. 利用NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据分析城市蔓延对雾霾污染的影响 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, **46**(5): 777-789)

[73] QIAO Zhi, LU Yingshuang, HE Tong, *et al*. Identifying urban heat island patches and spatial expansion path based on remote sensing technology: A case of Beijing City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(8): 1492-1501 (乔治, 卢应爽, 贺曈, 等. 城市热岛斑块遥感识别及空间扩张路径研究——以北京市为例 [J]. 地理科学, 2022, **42**(8): 1492-1501)

[74] WMO. State of the Global Climate 2022[R/OL]. (2023-04-21) [2023-08-22]. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11593

[75] WEF. The Global Risks Report 2023[R/OL]. (2023-01-11) [2023-08-22]. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf

[76] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022[M]. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2022. DOI: 10.18356/9789210015059

[77] NERINI F, SOVACOOL B, HUGHES N, *et al*. Connecting climateaction with other sustainabledevelopment goals[J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**(8): 674-680

[78] GUO H D, NATIVI S, LIANG D, *et al*. Big Earth Data science: Aninformation framework for a sustainable planet[J]. *InternationalJournal of Digital Earth*, 2020, **13**(7): 743-767

[79] YU B, CHEN F, YE C, *et al*. Temporal expansion of the nighttime light images of SDGSAT-1 satellite in illuminating ground object extraction by joint observation of NPP-VIIRS and sentinel-2A images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **295**: 113691

[80] YU B, CHEN F, WANG N, *et al*. Assessing changes in nighttime lighting in the aftermath of the Turkey-Syria earthquake using SDGSAT-1 satellite data[J]. *The Innovation*, 2023, **4**(3): 100419

[81] CHEN F, WANGJ X, LI B, *et al*. Spatial variability in melting on Himalayan debris-covered glaciers from 2000 to 2013[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **291**: 113560

[82] GE Yong, LI Qiangzi, LING Feng, *et al*. Risk assessment and response strategies for extreme climate events in key nodes of the Belt and Road[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(2): 170-178 (葛咏, 李强子, 凌峰, 等. "一带一路"关键节点区域极端气候风险评价及应对策略 [J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(2): 170-178)

[83] WANG Juanle, WEI Haishuo, YAN Xinrong, *et al*. Review and perspective for resources and environmental in-

formation development andservice along the economic corridors of the Belt and Road initiative[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, **24**(6): 1019-1033 (王卷乐, 魏海硕, 严欣荣, 等. “一带一路”经济走廊资源环境信息开发利用研究进展与展望 [J]. 地球信息科学学报, 2022, **24**(6): 1019-1033)

[84] QIN Bingxue, ZENG Jingjing. Development status of global greenhouse gas remote sensing satellite industry[J]. *China Environmental Science*, 2023, **43**(9): 4961-4974 (秦冰雪, 曾静静. 全球温室气体遥感卫星发展现状 [J]. 中国环境科学, 2023, **43**(9): 4961-4974)

[85] WANG J, FENG L, PALMER P I, *et al*. Large Chinese land carbonsink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, **586**(7831): 720-723

[86] LIU Liangyun, CHEN Liangfu, LIU Yi, *et al*. Satellite remote sensing forglobal stocktaking: methods, progress and perspectives[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, **26**(2): 243-267 (刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战 [J]. 遥感学报, 2022, **26**(2): 243-267)

[87] WANG Jianshi, WANG Chengxin, REN Wanxia, *et al*. “Carbon peaking and carbon neutrality” studies in geosciences: theme, effects, and prospects[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, **38**(7): 757-768 (王建事, 王成新, 任婉侠, 等. 地理学视角下“双碳”研究: 主题、成效及展望 [J]. 地球科学进展, 2023, **38**(7): 757-768)

[88] UN Environment. Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People[M]. Cambridge: CambridgeUniversity Press, 2019

[89] United Nations. The Second World ocean assessment[OL]. (2021-04-21)[2023-08-20]. https://www.un.org/regularprocess/

[90] JIA Mingming, WANG Zongming, MAO Dehua, *et al*. Spatial-temporal changes of China's mangrove forests over the past 50 years: An analysis towards the Sustainable-Development Goals (SDGs)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(30): 3886-3901 (贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析 [J]. 科学通报, 2021, **66**(30): 3886-3901)

[91] GUO Huadong. An innovative remote sensing product of global mangrove forests[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, **68**(20): 2575-2576 (郭华东. 新一代全球红树林遥感制图产品 [J]. 科学通报, 2023, **68**(20): 2575-2576)

[92] YU Rencheng, LV Songhui, QI Yuzao, *et al*. Progress and perspectives of harmfulalgal bloom studies in China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, **51**(4): 768-788 (于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望 [J]. 海洋与湖沼, 2020, **51**(4): 768-788)

[93] PAN Qi, LIU Lidong, MA Jingwu, *et al*. Progress in remote sensing satellite monitoring of marine environmental pollution by human activities[J]. *Marine Science Bulletin*, 2022, **41**(6): 722-736 (潘琦, 刘丽东, 马静武, 等. 卫星遥感监测人类活动所致海洋环境污染研究进展 [J]. 海洋通报, 2022, **41**(6): 722-736)

[94] FAO. Global Forest Resources Assessment 2020KeyFindings[R]. Rome: FAO, 2020. DOI:10.4060/ca8753en.

[95] IPBES. Global Assessment Report on Biodiversity andEcosystem Services[R/OL]. (2019-05-21)[2023-08-20]. https://ipbes.net/globalassessment

[96] UNEP. Measuring Progress: Environment and the SDGs[R/OL]. (2021-05-22) [2023-08-20]. https://www.unep.org/resources/publication/measuring-progress-environment-and-sdgs

[97] WANG Wei, YANG Jing, GAO Xianlian, *et al*. Method and enlightenment of 2020 global forest resources assessment remote sensing survey[J]. *Forest Resources Management*, 2021(6): 1-5 (王伟, 杨净, 高显连, 等. 2020 年全球森林资源评估遥感调查方法和思考 [J]. 林业资源管理, 2021(6): 1-5)

[98] ZHAO Qiang, YU Le, XU Yidi, *et al*. Application of space observation technology in oil palm research[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(5): 1029-1042 (赵强, 俞乐, 徐伊迪, 等. 空间观测技术在油棕研究中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(5): 1029-1042)

[99] ZHANG Pengchao, LIANG Yu, LIU Bo, *et al*. Remote sensing estimation of forest aboveground biomass in Tibetan Plateau based on random forest model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(2): 415-424 (张鹏超, 梁宇, 刘波, 等. 基于随机森林模型的青藏高原森林地上生物量遥感估算 [J]. 生态学杂志, 2023, **42**(2): 415-424)

[100] LUO S Z, WANG C, XI X H, *et al*. Combining hyperspectral imagery and LiDAR pseudo-waveform for predicting crop LAI, canopy height andabove-ground biomass[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 801-812

[101] United Nations Conventionto Combat Desertification (UNCCD). 2030 Agenda for Sustainable Development: implications for the United Nations Convention to Combat-Desertification-The future strategic framework of the Convention[OL]. (2017-09-16)[2023-08-20]. https://www.unccd.int/sites/default/files/inline-files/ICCD_COP%2813%29_L.18-1716078E_0.pdf

[102] WANG Hai, WANG Lianxi, YANG Zuxiang, *et al*. The application of remote sensing monitoring and evaluation of desertification research dynamic[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, **32**(4): 153-161 (王海, 王连喜, 杨祖祥, 等. 荒漠化遥感监测与评估的应用研究动态 [J]. 灾害学, 2017, **32**(4): 153-161)

[103] SHAO Jing, LI Xiaosong, YANG Junting, *et al*. Study on large scale grassland shrub monitoring based on optical and radar remote sensing[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(2): 130-135 (邵京, 李晓松, 杨珺婷, 等. 光学与雷达遥感协同的大尺度草地灌丛化监测研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(2): 130-135)

[104] ZHANG X M, LONG T F, HE G J, *et al*. Rapid generation of global forest cover map using Landsat based on the forest ecological zones[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, **14**(2): 022211