

科技支撑美丽中国建设的进展和展望

杨林生^{1,2}, 邓浩宇¹, 廖晓勇^{1,2}, 赵东升^{1,2}, 李言鹏¹, 杨振山^{1,2}, 葛全胜^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 美丽中国先导专项管理办公室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘要】 自党的十八大提出美丽中国建设目标以来, 为发挥好科技支撑作用, 国家组织开展了一系列关于资源、生态和环境等领域的科技计划, 有效支撑了美丽中国建设的理论探索、生态环境保护修复和生态文明体制建设决策支持等方面的科技需求。本文在梳理过去十年国际及发达国家生态环境领域科技研发布局情况, 以及我国相关领域科技研发计划和推进情况的基础上, 重点介绍了中国科学院“美丽中国生态文明建设科技工程”战略性先导科技专项(A类)的主要研发内容及取得的阶段进展, 并基于现状与期望分析, 辨识有关领域科技前沿动态与发展趋势, 提出关于下一步科技发展方向的建议, 以期在党的二十大之后科技推进美丽中国建设的方向提供参考。

【关键词】 美丽中国; 科技支撑; 绿色发展; 生态环境; 保护修复; 先导专项

【中图分类号】 X32

【文章编号】 1674-6252 (2022) 06-0017-08

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.017

引言

2012年, 面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势, 党的十八大提出“大力推进生态文明建设”的目标和任务。2017年, 党的十九大提出“加快生态文明体制改革, 建设美丽中国”, 包括推进绿色发展、着力解决突出环境问题、加大生态系统保护力度、改革生态环境监管体制四大任务(以下简称“四大任务”)。美丽中国生态文明建设的核心是推动形成人与自然和谐发展现代化建设新格局, 涉及资源、生态、环境和绿色发展等多领域的科学和技术难题, 需多方面的科技力量协同发展与合作创新^[1-3]。因此, 自党的十八大以来, 我国以美丽中国生态文明建设的科技需求为导向, 规划部署了多领域科技计划, 为科技助力美丽中国建设奠定了坚实基础^[4-6]。本研究在梳理近10年国内外绿色发展、环境保护和生态修复等领域科技布局的基础上^[7-10], 重点介绍了中国科学院“美丽中国生态文明建设科技工程”战略性先导专项(A类)的研发内容和取得的阶段进展, 在此基础上, 提出未来支撑美丽中国建设的科技方向。

1 国内外近期相关科技布局

1.1 国际相关科技布局

近10年来, 为应对日益增加的资源、生态和环

境压力, 联合国、国际科学理事会、美国、欧盟、英国、德国、日本、韩国、澳大利亚、加拿大等主要国际组织及发达国家聚焦推进绿色发展、环境污染防治、生态保护修复、生态环境管理等方向, 制订了系列重大科技发展战略或研究计划^[7,8,11](表1)。

这些计划针对不同类型生态环境恶化问题, 先研究拟定高标准的生态环境状态目标, 进而一方面通过生态环境监测与生产生活绿色升级等方面的科技支撑实现源头管控, 另一方面通过污染治理、生态修复等方面的科技支撑处理已发生的恶化现象, 重点创新突破空气污染防治、污水利用、污染土壤修复、退化土地修复、产品环保化设计、资源高效利用、废弃物循环利用、淡水生态系统修复、海洋生态系统修复等方面的科技瓶颈, 并在保证成效的基础上开展技术经济化、实用化与高效化创新^[12-16]。同时以增加生物多样性和改善栖息地环境为主要目标, 科学规划各项保护地建设、造林育林、自然恢复等, 并在生物入侵防治等生态系统结构优化与功能提升方面寻求技术突破与模式创新^[11,17-19]。此外, 科技也被用于探索生态环境管理方法, 包括服务于生态环境管理的数字化、大数据、互联网、自动化、智能化等技术研发和应用^[20-22], 生态服务、生态资产、环境质量、环境足迹等算法研发及其标准化技术^[23-25], 以及生态退化、环境污染、气候变化、自然灾害等方面防治一体的管理方法^[26-28]。

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23100000)。

作者简介: 杨林生(1966—), 男, 研究员, 主要从事环境健康研究, E-mail: yangls@igsnr.ac.cn。

*** 责任作者:** 葛全胜(1963—), 男, 研究员, 主要从事气候变化研究, E-mail: geqs@igsnr.ac.cn。

表1 国际相关科技计划

方向	计划	主旨	国家 / 组织	发布年份
推进绿色发展	迈向 2050 年净零排放的长期战略	确定净零排放的时间节点与技术路径	美国	2021
	新循环经济行动计划	促进循环经济发展, 鼓励可持续消费	欧盟	2020
	可持续和智能交通战略	推动交通绿色和数字化转型	欧盟	2020
	绿色工业革命十点计划	更好地重建、支持绿色工业并加速实现净零排放	英国	2020
	革新环境技术创新战略	绿色技术的发展与应用	日本	2020
	碳中和技术创新推进战略	推进关键绿色技术创新	韩国	2021
环境污染防治	联邦土壤科学计划	土壤保护和恢复	美国	2016
	2020—2025 年空气污染对健康影响的战略规划	减少空气污染对健康的影响	美国	2020
	2030 年土壤战略	土壤健康管理	欧盟	2021
	欧盟行动计划: 实现空气、水和土壤零污染	减少空气、水和土壤污染	欧盟	2021
	废物处理与资源利用战略	消除塑料垃圾污染	英国	2018
	零塑料废物战略	解决塑料问题	加拿大	2018
生态保护修复	欧盟生物多样性 2030 战略	保护自然, 逆转生态系统退化, 阻止生物多样性损失	欧盟	2020
	2021—2025 年英格兰树木行动计划	提高生物多样性, 恢复和保护自然环境	英国	2021
	英格兰泥炭地行动计划	加强泥炭地保护管理, 减少碳排放	英国	2021
	国家海洋科学计划 2015—2025: 中期计划	促进海洋生态系统修复与可持续发展	澳大利亚	2021
	“零灭绝”计划	保护濒危物种、改善栖息地环境、应对气候变化	澳大利亚	2022
生态环境管理	未来地球计划 (Future Earth)	动态星球、全球发展、可持续性	国际科学理事会、国际社会科学理事会	2012
	城市健康与福祉的跨学科科学行动规划	城市化与健康福祉	国际科学理事会	2021
	气候保护计划 2030	碳排放定价、建筑节能改造、资助相关科研	德国	2019
	澳大利亚地球科学局战略 2028	地球科学关键战略领域优先发展事项	澳大利亚	2019

1.2 国内相关科技部署

2006 年, 国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》时, 在重点领域清单中将能源、资源与环境列入优先项, 相应地设立了多个关于绿色、生态与环保的优先主题, 在农业、制造业、交通、城镇化等其他项也没有多个与绿色、环保相关的优先主题, 并确定了水体污染控制与治理科技重大专项^[29]。2012 年, 党的十八大提出“大力推进生态文明建设”目标任务后, 国家科技发展布局中愈加强调生态文明建设相关科技支撑能力的提升, 编制了国家科技创新规划^[6], 包括深入实施水体污染控制与治理科技重大专项, 部署启动京津冀环境综合治理重大工程, 发展针对水污染、大气污染、农业污染、土壤污染等环境问题的防治技术, 面向典型生态脆弱区、生态退化区等区域的生态保护与修复技术, 面向各类自然资源的环境可持续开发和利用技术, 以及废

物循环利用、重大自然灾害监测预警与风险控制、全球环境变化应对等技术。2017 年, 党的十九大提出“加快生态文明体制改革, 建设美丽中国”目标任务后, 科技支撑美丽中国生态文明建设的科技资源持续增加^[30], 研发内容涉及大气污染管控、农业污染防治、土壤污染治理、水环境治理、固废资源化利用、生态修复保护、土壤资源保护利用、乡村绿色发展、自然灾害防控、海洋生态环境保护等。同时, 为全面打响蓝天、碧水、净土三大保卫战, 科技界也启动了多项大气污染成因与治理、水体污染控制与治理、土壤污染防治等领域科技专项 (表 2)。

2 “美丽中国生态文明建设科技工程” 战略性先导科技专项 (A 类) 的主要研发内容和阶段进展

2.1 主要研发内容

针对美丽中国建设科技需求, 中国科学院于 2019

表2 相关科技领域的国家重点研发计划专项

时期	专项名称
“十三五” (2016—2020)	水体污染控制与治理 大气污染成因与控制技术研究 农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发 场地土壤污染成因与治理技术 典型脆弱生态修复与保护研究 重大自然灾害监测预警与防范 海洋环境安全保障 固废资源化 绿色宜居村镇技术创新 林业资源培育及高效利用技术创新 全球变化及应对
	大气与土壤、地下水污染综合治理 农业面源 重金属污染防控和绿色投入品研发 典型脆弱生态系统保护与修复 黑土地保护与利用科技创新 北方干旱半干旱与南方红黄壤等中低产田能力提升科技创新 重大自然灾害防控与公共安全 海洋环境安全保障与岛礁可持续发展 长江黄河等重点流域水资源与水环境综合治理 林业种质资源培育与质量提升 地球系统与全球变化
“十四五” (2021—2025)	

年启动“美丽中国生态文明建设科技工程”战略性先导专项(A类)(以下简称“专项”),发挥中国科学院的科技引领作用与多学科优势,协同科技攻关^[31]。专项对标党的十九大提出的“四大任务”,设置了十个研发项目(表3),执行期为5年。专项的目标是:①围绕生态文明建设的重大应用示范,多尺度精准检测和诊断生态文明建设状态,突破研制复合污染防治、生态系统修复及绿色升级核心技术和装备体系,设计支撑生态文明建设供给侧改革的重要技术平台和制度创新的关键技术;②科学设计区域环境污染综合治理和生态环境协同管理、自然保护地健康管理、生态智慧城市建设、乡村振兴等发展路线图,以及践行“绿水青山就是金山银山”理念模式和优化国土空间管控方案,多尺度动态模拟美丽中国“35目标和50愿景”,动态开展美丽中国建设进程第三方评估;③通过重大技术集成和示范,牵引地方(企业)配套支持,树立生态文明建设的科技标杆,为实现党的十九大提出的“四大任务”目标提供技术支撑,为建设美丽中国,打造山水林田湖草(沙冰)生命共同体提供蓝图与实施途径。

2.2 主要进展

专项实施三年多来,在区域大气环境容量精准核

表3 美丽中国专项总体设计

四大任务	研究任务	核心科技问题
推进绿色发展	生态脆弱区绿色升级发展途径与区域综合示范	脆弱区生态保护和绿色发展的协同范式
	“绿水青山”提质增效与乡村振兴关键技术与示范	“绿水青山就是金山银山”理念践行范式与乡村振兴模式
着力解决突出环境问题	重点污染区域大气环境与大型复杂场地的污染防治关键技术研发及示范	经济实用高效的复合污染防治技术体系
	长三角区域生态环境协同管理与综合治理示范	长三角生态环境协同治理与保护机制
	长江经济带干流水环境水生态综合治理与应用	长江自然与社会过程耦合的系统模拟
加大生态系统保护力度	近海与海岸带环境综合治理及生态调控技术和示范	近海与海岸带生态系统健康调控
	粤港澳大湾区城市群生态建设工程与生态系统智能管理示范	城市环境生态系统智能管理和固体废物综合利用
改革生态环境监管体制	自然保护地健康管理与生态廊道设计技术及示范	自然保护地规划布局与绿色发展模式
	气候变化条件下山地致灾风险绿色调控关键技术与示范	山区灾害风险过程模拟与绿色管理
	生态文明建设地理图景技术与应用示范	生态文明建设的地理图景路线图设计

算、柴油车双降和智能监控、城市多源固体废物协同资源化和智能管控、中小城镇和流域环境污染综合治理等方面形成近20套技术体系,并在京津冀、粤港澳和长三角建立多个推广应用示范区^[32-36];在黄河口生物多样性保护和盐碱地治理、自然保护地体系规划与生态廊道设计、西部脱贫地区乡村振兴保护地特色农业发展等方面,形成多套核心技术模式,并在相关地区形成重大示范^[37-43];研发的区域生态文明建设地理图景设计与应用系统(福建)、长江干流水系统综合模拟和调控平台(长江模拟器)、山地灾害风险模拟与险情预报系统等分别在福建、重庆、四川等地落地^[44-47]。同时,根据国家发展和改革委员会《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》,受中国科学院委托,专项组织实施了美丽中国建设进程试评估^[48],主要进展如下:

(1)环境复合污染防治技术体系。专项针对当前我国污染防治的重点和难点,开展区域多要素复合污染防治和智能化管控技术体系的研发。一是针对农村炉灶无组织排放及影响,突破无组织排放和室内三维颗粒物监测技术,开展了室内无组织燃烧PM_{2.5}和其他污染物的多维动态排放过程和污染危害评估,并

开展干预示范,为国家开展清洁取暖提供了科学依据^[32,49-53]。二是针对移动源柴油车高排放问题,开展了柴油车识别、改造和智能监管技术的研发与示范。除开展柴油车PM和NO_x减排技术研发外,重点突破柴油车远程在线监控技术、实时轨迹信息采集技术和污染排放相关参数采集技术,搭建柴油车远程在线监控平台,在24个城市完成与远程在线国家平台的对接^[54,55]。三是突破星载超光谱自适应迭代算法的关键技术,发展了基于我国高分卫星的遥感算法,解析出长三角各省份间的大气污染物相互传输通量,建立中短期大气环境容量和承载力预测模型,量化评估各分量贡献,形成了长三角地区大气污染立体遥感监测体系^[56,57]。四是开展多源固体废物循环利用—协同处置—智能管控技术研发与集成示范,在城市污泥与餐厨垃圾协同资源回收、电子污泥多金属协同提取技术及装备研发和推广基础上,研发城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控技术,实现多种资源能源环境代谢动态模拟及综合评估功能,形成粤港澳大湾区城市群多源固废集中化循环利用与绿色发展系统解决方案^[36,58,59]。五是以场地环境大数据为基础,以多模型融合运行是关键,以信息化智能化管理为导向,研发土壤—工业退役场地修复智能管理平台,研发出首台智能土壤修复工作站,目前设备基本达到目标处理量(15 t/h),并开展重金属污染土壤淋洗修复示范^[60-62]。六是在浙江湖州建立了集流域和区域面源污染消减、养殖污水及粪污高效处置、污水处理厂和分散污水处理点提标改造、新建城区雨污分流等多个经济实用技术一体的中小城镇环境综合治理技术体系,创建了小城镇环境综合治理的“湖州模式”,并在浙江千岛湖、云南抚仙湖和星云湖等多个流域开展示范推广^[63-65]。同时,专项依托这些研究成果,结合国家和区域美丽中国生态文明建设的需求,评估了长三角、京津冀和粤港澳大湾区超大城市群生态环境保护治理成效,建立高精度生态环境保护数据库,梳理了不同区域美丽中国建设的代表性案例,提出区域环境一体化管控分区方案,为跨省(市)生态环境协同管理与综合治理提供了科技支撑^[34,66-68]。

(2) 生态系统修复及绿色发展技术模式。专项从山水林田湖草沙一体化保护和系统治理出发,遵循“绿水青山就是金山银山”理念,研究提出不同区域、不同类型生态系统保护修复与区域绿色发展协同的技术模式。一是基于陆海一体化理念,在黄河入海口研发种养优化、土壤改良、功能生物调控等陆地污染物减排综合技术,近岸湿地水文连通网络、生态修复的

海岸带污染物阻控技术,近海生物礁牡蛎养殖尾水处理技术等,形成了陆源入海减排—海岸带减缓—近海提质增效的海岸带湿地生态恢复技术模式^[37,69-72]。二是在云南高原湿地开展了水生植物(海菜花)人工培育、旗舰鱼类(滇池金线鲃、大理裂腹鱼)人工增殖和黑颈鹤栖息地生态修复技术的研发,创建了“花—鱼—鸟(螺)”湿地修复新模式。三是在广西石漠化地区,根据喀斯特地表—地下二元水土过程规律及景观结构垂直分异特征,通过人工林提质改造与植被群落稳定性提升恢复,培育不同类型生态衍生产业,建立了石漠化治理与生态产业发展的协同模式^[38,73]。四是在干旱区研发绿色快速装配式固沙技术、人工结皮固沙技术和生物结皮防沙技术等,形成新一代干旱区防沙治沙技术体系^[74-76]。五是在黄土高原区,开发了沙地地力快速提升、典型植物群落重构和人工林提质增效技术,构建了低效人工防护林改造与提质增效技术模式^[77,78]。在上述研究的基础上,开展了全国生态脆弱区和自然保护地修复保护的空间布局、珍稀物种生态廊道设计和珍稀植物产地溯源、“绿水青山”价值评估、脱贫地区乡村振兴理论、技术和规划方法研究,形成适合不同地域的乡村产业—绿色发展技术方案与模式,支撑国家乡村全面振兴和美丽中国建设^[41-43,79-81]。

(3) 多尺度美丽中国建设智能化模拟研究。一是以福建省为例,研发生态文明大数据标准规范及数据采集与处理技术,国土空间规划监测与管控技术,流域水污染防治管理措施情景分析及空间优化技术、武夷山国家公园生态服务价值遥感定量测算模型等。建成福建省生态文明大数据平台,研发福建省国土空间规划实施效果评估系统、国土资源空间管控决策系统、水环境监测和综合分析系统,参与共建武夷山国家公园智慧管理信息平台等,在省属多个厅局实现业务运行并在全省推广^[46,47]。二是聚焦长江流域水生态环境问题,提出以流域监测监控为基础,以流域水循环为纽带,综合考虑流域上下游、左右岸、干支流、“湖库—岸线—城市群”的互联互动关系,建设自然与社会过程相耦合的长江流域综合模拟装置(长江模拟器)。长江模拟器以气象数据、社会经济数据和流域地理信息数据为数据源,以水文模型驱动流域面源污染模型、三峡库区水动力—水质—调度耦合模型、干流河道水动力水质耦合模型、通江湖泊二维水动力模型、河道水生态模型、城市水系统模型等,形成了基于多模型的多尺度、多过程、多要素耦合模拟技术^[44,82-85],目前长江模拟器已业务化运行并落户重

庆。三是聚焦西南山地山洪泥石流基本成灾单元和形成—演进—致灾全过程,研发山地灾害风险模拟与险情预报系统,包含山地灾害孕灾成灾基础数据模块、天气气候模块、灾害风险模拟模块、预报预警模块等,设置了山地灾害风险识别、全过程模拟、情景分析、风险预测、潜在损失预报预警和综合减灾等功能,已经在四川省业务化运行,并在山洪泥石流预报预警领域取得重要进展,山洪泥石流精细化预报预警水平显著提升^[45, 86-88]。此外,专项构建了美丽中国建设评估监测与动态模拟原型系统,实现生态文明建设成就展示、“35 目标和 50 愿景”智能化模拟和专项重要成果展示等^[48]。

3 美丽中国生态文明建设科技发展方向

从以上的分析可以看出,10 年来,我国在美丽中国生态文明建设领域开展了系列科技部署,在环境保护和修复、资源节约及高效利用、推进绿色发展和服务生态文明建设的监测评估方面,取得了许多重要理论进展,积累了丰富的技术、数据和模式,支撑了环境污染防治攻坚和生态保护修复等重大生态文明建设工程的落实,为持续开展美丽中国生态文明建设研究奠定了基础^[89,90]。2022 年 10 月,党的二十大报告中提出了“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”新目标和新任务,强调“要推进美丽中国建设,坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。以此为指引,未来科技支撑美丽中国的创新应重点开展以下方面的研究:

(1) 美丽中国生态文明建设科技发展要在持续开展环境污染防治(包括新污染物防治)、生态系统保护修复和绿色低碳技术的研发基础上,加强减污降碳协同技术的研发,在全国和区域开展产业结构调整、污染治理、生态保护和应对气候变化的关联机理研究和治理技术的协同集成研究,基于区域特征开展多领域科技协同应用情景智能模拟,持续提出不同生态类型区山水林田湖草沙一体化保护和系统治理技术模式。围绕新发展格局和高质量发展,重点开展京津冀协同发展、长江经济带发展、长三角一体化发展,黄河流域生态保护和高质量发展等区域发展战略中的生态环境保护 and 修复的科技创新。

(2) 加强现有科技体系与信息、生命、运载、化工、材料等领域变革性科技的融合创新,研发探索利用大数据、云计算、人工智能、虚拟现实、星地计

算等科技开展生态环境监测和开展生态环境保护修复多尺度空间优化,利用基因编程、生化合成、生化调控、生物驯化、机器人、人工智能、量子计算等科技开展生态环境绿色修复与健康治理,利用新型催化剂、材料转化、可持续材料、智能材料、轻量化材料、机器人等科技发展相关科技应用设备,创新固体废物管理与资源化利用技术,助力生产生活绿色升级。

(3) 加强美丽中国建设的顶层设计,科学规划美丽中国前景和愿景。依据党的二十大提出的“五个现代化”和“四个中国”的使命,借鉴发达国家生态保护和环境治理经验,制定前瞻性的美丽中国建设目标体系;建立美丽中国建设进程评估和指标体系迭代方法,从国家与区域等不同评估尺度、一般性与特殊性等不同评估需求、稳定与动态更新等不同评估周期,以及综合与单一评估相结合等要求出发,构建多维度相协调的美丽中国建设监测、评估技术体系,持续开展美丽中国建设进程动态评估,精准识别不同时期美丽中国建设的短板与差距,为实现美丽中国建设目标提供动态科技支撑。

(4) 强化美丽中国生态文明制度建设的科技支撑。围绕资源和环境承载力、国土空间管控、清洁生产、循环经济、低碳经济、生态环境保护制度等,评估生态文明体制改革进展和成效,研究制度间的协调性、集成性和有效性。加强绿色金融、碳排放交易、生态补偿、生态标志产品等生态资产价值实现途径的研究,支撑全社会参与美丽中国生态文明建设。

参考文献

- [1] 高卿,骆华松,王振波,等.美丽中国的研究进展及展望[J].地理科学进展,2019,38(7): 1021-1033.
- [2] 葛全胜,方创琳,江东.美丽中国建设的地理学使命与入地系统耦合路径[J].地理学报,2020,75(6): 1109-1119.
- [3] 周宏春.美丽中国建设呼唤生态环境技术创新[J].科技与金融,2020(11): 53-54.
- [4] 白春礼.科技支撑我国生态文明建设的探索、实践与思考[J].中国科学院院刊,2013,28(2): 125-131.
- [5] 张伟,蒋洪强,王金南,等.科技创新在生态文明建设中的作用和贡献[J].中国环境管理,2015,7(3): 52-56.
- [6] 国务院.国家重点专项规划之——“十三五”国家科技创新规划(国发[2016]43号)[EB/OL].(2016-07-28)[2022-11-05].http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [7] 中国科学院西北生态环境资源研究院文献情报中心资源生态环境战略情报研究团队.趋势观察:国际资源生态环境领域科技发展态势与战略[J].中国科学院院刊,2021,36(2): 229-232.
- [8] 陈伟,郭楷模,岳芳,等.世界主要经济体能源战略布局与能源

- 科技改革[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 115-117.
- [9] 曾甜, 邬志龙. 国际绿色发展研究进展及其热点趋势分析[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(4): 5-15.
- [10] CHIMHOWU A O, HULME D, MUNRO L T. The 'New' national development planning and global development goals: processes and partnerships[J]. World development, 2019, 120: 76-89.
- [11] MORENO-MATEOS D, ALBERDI A, MORRIËN E, et al. The long-term restoration of ecosystem complexity[J]. Nature ecology & evolution, 2020, 4(5): 676-685.
- [12] 杨越, 陈玲, 薛澜. 寻找全球问题的中国方案: 海洋塑料垃圾及微塑料污染治理体系的问题与对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 45-52.
- [13] 朱彤, 万薇, 刘俊, 等. 世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读[J]. 科学通报, 2022, 67(8): 697-706.
- [14] FULLER R, LANDRIGAN P J, BALAKRISHNAN K, et al. Pollution and health: a progress update[J]. The lancet planetary health, 2022, 6(6): E535-E547.
- [15] HE Y Q, LIU X T, WANG X Q. How can environment get better? A research review of pollution governance[J]. Management of environmental quality, 2022, 33(2): 406-418.
- [16] CENCI M P, SCARAZZATO T, MUNCHEN D D, et al. Eco-friendly electronics-a comprehensive review[J]. Advanced materials technologies, 2022, 7(2): 2001263.
- [17] 刘海鸥, 张凤春, 赵富伟, 等. 从《生物多样性公约》资金机制战略目标变迁解析生物多样性热点问题[J]. 生物多样性, 2020, 28(2): 244-252.
- [18] SHACKLETON R T, ADRIAENS T, BRUNDU G, et al. Stakeholder engagement in the study and management of invasive alien species[J]. Journal of environmental management, 2019, 229: 88-101.
- [19] WOLFF S, SCHRAMMEIJER E A, SCHULP C J E, et al. Meeting global land restoration and protection targets: what would the world look like in 2050?[J]. Global environmental change, 2018, 52: 259-272.
- [20] MACLACHLAN A, BIGGS E, ROBERTS G, et al. Sustainable city planning: a data-driven approach for mitigating urban heat[J]. Frontiers in built environment, 2021, 6: 519599.
- [21] SUN A Y, SCANLON B R. How can Big Data and machine learning benefit environment and water management: a survey of methods, applications, and future directions[J]. Environmental research letters, 2019, 14(7): 073001.
- [22] 刘建国, 孟德硕, 桂华侨, 等. 环境监测领域颠覆性技术的发展与展望[J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 50-56.
- [23] 侯鹏, 付卓, 祝汉收, 等. 生态资产评估及管理研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8851-8860.
- [24] LIU C L, LI W L, XU J, et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: a literature review and bibliometric analysis[J]. Ecological indicators, 2022, 137: 108734.
- [25] VANHAM D, LEIP A, GALLI A, et al. Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs[J]. Science of the total environment, 2019, 693: 133642.
- [26] 于贵瑞, 杨萌, 付超, 等. 大尺度陆地生态系统管理的理论基础及其应用研究的思考[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 771-787.
- [27] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022.
- [28] UNDRR. Global assessment report on disaster risk reduction 2022: our world at risk: transforming governance for a resilient future[R]. Geneva: UNDRR, 2022.
- [29] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2006(9): 7-37.
- [30] 科技部, 生态环境部, 住房和城乡建设部, 等. 科技部 生态环境部 住房和城乡建设部 气象局 林草局关于印发《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》的通知(国科发社[2022] 238号)[EB/OL]. (2022-11-02)[2022-11-05]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzcg/gfxwj/gfxwj2022/202209/t20220926_182638.html.
- [31] 高雅丽. 中科院“美丽中国”先导专项启动[N]. 中国科学报, 2019-02-18(01).
- [32] QIU Y W, TAO S, YUN X, et al. Indoor PM_{2.5} profiling with a novel side-scatter indoor lidar[J]. Environmental science & technology letters, 2019, 6(10): 612-616.
- [33] 杨桂山, 徐昔保. 长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的基础与策略[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(8): 940-950.
- [34] 于贵瑞, 杨萌, 陈智, 等. 大尺度区域生态环境治理及国家生态安全格局构建的技术途径和战略布局[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1141-1153.
- [35] 吴德胜, 陈淑珍. 生态环境损害经济学评估方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [36] CHEN Z, YU G W, ZOU X Y, et al. Co-disposal of incineration fly ash and sewage sludge via hydrothermal treatment combined with pyrolysis: Cl removal and PCDD/F detoxification[J]. Chemosphere, 2020, 260: 127632.
- [37] 李乃胜. 经略海洋(2020)——健康海洋专辑[M]. 北京: 海洋出版社, 2020.
- [38] TONG X W, BRANDT M, YUE Y M, et al. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 129.
- [39] 丁永建, 杨建平, 方一平, 等. 冰冻圈变化的适应框架与战略体系[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 11-22.
- [40] 赵新全. 三江源国家公园生态系统现状、变化及管理[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [41] 刘彦随, 周扬, 李玉恒. 中国乡村地域系统与乡村振兴战略[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2511-2528.
- [42] 邓祥征, 宋马林. 乡村振兴与产业富民——路径、技术与案例[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [43] 欧阳志云, 徐卫华, 臧振华. 完善国家公园管理体制的建议[J]. 生物多样性, 2021, 29: 272-274.

- [44] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505-514.
- [45] 崔鹏, 邹强. 川藏交通廊道山地灾害演化规律与工程风险[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [46] CHENG S F, PENG P, LU F. A lightweight ensemble spatiotemporal interpolation model for geospatial data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2020, 34(9): 1849-1872.
- [47] WANG S, QIAN L., ZHU Y Q, et al. A web text mining approach for the evaluation of regional characteristics at the town level[J]. Transactions in Gis, 2021, 25 (4): 2074-2103.
- [48] 国家发展改革委. 关于印发《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》的通知(发改环资[2020]296号)[EB/OL]. (2020-02-28)[2022-11-05]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202003/t20200306_1222531.html?code=&state=123.
- [49] SHEN G F, DU W, LUO Z H, et al. Fugitive emissions of CO and PM_{2.5} from indoor biomass burning in chimney stoves based on a newly developed carbon balance approach[J]. Environmental science & technology letters, 2020, 7(3): 128-134.
- [50] HE X, ZHENG S X, ZHANG H, et al. Three-dimensional dynamic monitoring of indoor PM_{2.5} with 3D L-Lidar[J]. Environmental science & technology letters, 2022, 9(6): 533-537.
- [51] MENG W J, ZHONG Q R, CHEN Y L, et al. Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2019, 116(34): 16773-16780.
- [52] YUN X, SHEN G F, SHEN H Z, et al. Residential solid fuel emissions contribute significantly to air pollution and associated health impacts in China[J]. Science advances, 2020, 6(44): eaba7621.
- [53] LU C X, XU H R, MENG W J, et al. A novel model for regional indoor PM_{2.5} quantification with both external and internal contributions included[J]. Environment international, 2020, 145: 106124.
- [54] CHENG S F, LU F, PENG P. A high-resolution emissions inventory and its spatiotemporal pattern variations for heavy-duty diesel trucks in Beijing, China[J]. Journal of cleaner production, 2020, 250: 119445.
- [55] CHENG S F, ZHANG B B, PENG P, et al. Spatiotemporal evolution pattern detection for heavy-duty diesel truck emissions using trajectory mining: a case study of Tianjin, China[J]. Journal of cleaner production, 2020, 244: 118654.
- [56] ZHAO D D, XIN J Y, WANG W F, et al. Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the total environment, 2022, 807: 150306.
- [57] JIANG Y Y, XIN J Y, WANG Z F, et al. The dynamic multi-box algorithm of atmospheric environmental capacity[J]. Science of the total environment, 2022, 806: 150951.
- [58] WANG X D, CHANG V W C, LI Z W, et al. Co-pyrolysis of sewage sludge and organic fractions of municipal solid waste: synergistic effects on biochar properties and the environmental risk of heavy metals[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 412: 125200.
- [59] CHEN Z, YU G W, WANG Y, et al. Research on synergistically hydrothermal treatment of municipal solid waste incineration fly ash and sewage sludge[J]. Waste management, 2019, 100: 182-190.
- [60] ZHANG X R, LIAO X Y, GONG Z Q, et al. Formation of fatty acid methyl ester based microemulsion and removal mechanism of PAHs from contaminated soils[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 413: 125460.
- [61] 袁影影, 李晓军, 贾春云, 等. 生物柴油基微乳液的制备及其对钢铁厂多环芳烃污染土壤的修复性能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(12): 3505-3514.
- [62] XIE S Y, YU G W, LI C X, et al. Treatment of high-ash industrial sludge for producing improved char with low heavy metal toxicity[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2020, 150: 104866.
- [63] CHENG Y X, WU D S, BIAN Y. A systematic approach of determining compensation and allocation for river basin water environment based on total pollutants control[J]. Journal of environmental management, 2020, 271: 110896.
- [64] 蒋玉柱, 惠贺龙, 刘弘毅, 等. 印染污泥基生物炭吸附处理难降解有机废水研究[J/OL]. 环境工程, 2022, 40(10): 1-10 (2022-05-16). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20220513.1537.028.html>.
- [65] 杜利军, 付兴民, 惠贺龙, 等. 新型铁碳微电解填料制备与除磷性能评价[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1421-1427.
- [66] 苏伟忠, 周佳, 彭棋, 等. 长江三角洲跨界流域生态产品交易机制——以天目湖流域为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1598-1608.
- [67] 陈舒凡, 徐勇. 区域环境功能管控区划方法及应用[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 663-679.
- [68] 陈雯, 刘伟, 孙伟. 太湖与长三角区域一体化发展: 地位、挑战与对策[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 327-335.
- [69] GONG H R, LI J, SUN M X, et al. Lowering carbon footprint of wheat-maize cropping system in North China Plain: Through microbial fertilizer application with adaptive tillage[J]. Journal of cleaner production, 2020, 268: 122255.
- [70] 杨红生, 王德, 李富超, 等. 海岸带生态农牧场创新发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [71] 韩广轩, 初小静, 赵明亮. 黄河三角洲湿地碳循环与碳收支[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [72] 王威, 李莉, 黎奥, 等. 近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)规模化人工育苗及养成[J]. 海洋科学, 2020, 44(2): 108-112.
- [73] HU Z Y, WANG S J, BAI X Y, et al. Changes in ecosystem service values in karst areas of China[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2020, 301: 107026.
- [74] ZHAO Y, WANG N, ZHANG Z S, et al. Accelerating the development of artificial biocrusts using covers for restoration of degraded land in dryland ecosystems[J]. Land degradation & development, 2021, 32(1): 285-295.

- [75] BU L Y, PENG Z H, TIAN J, et al. Distinct abundance patterns of nitrogen functional microbes in desert soil profiles regulate soil nitrogen storage potential along a desertification development gradient[J]. CATENA, 2020, 194: 104716.
- [76] WANG H L, BU L Y, TIAN J, et al. Particular microbial clades rather than total microbial diversity best predict the vertical profile variation in soil multifunctionality in desert ecosystems[J]. Land degradation & development, 2021, 32(6): 2157-2168.
- [77] YANG H L, LI Y L, WANG S K, et al. The response of critical microbial taxa to litter micro-nutrients and macro-chemistry determined the agricultural soil priming intensity after afforestation[J]. Frontiers in microbiology, 2021, 12: 730117.
- [78] LÜ Y H, LÜ D, FENG X M, et al. Multi-scale analyses on the ecosystem services in the Chinese Loess Plateau and implications for dryland sustainability[J]. Current opinion in environmental sustainability, 2021, 48: 1-9.
- [79] 刘彦随. 中国乡村振兴规划的基础理论与方法论 [J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1120-1133.
- [80] 周扬, 张轩畅, 刘彦随. 产业扶贫模式及不同地域减贫案例解析 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(S2): 4-16.
- [81] DU A, XU W H, XIAO Y, et al. Evaluation of prioritized natural landscape conservation areas for national park planning in China[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1840.
- [82] XIA J, LI Z, ZENG S D, et al. Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin[J]. Geoscience letters, 2021, 8(1): 18.
- [83] LI Y L, ZHANG Q, LIU X G, et al. Water balance and flashiness for a large floodplain system: a case study of Poyang Lake, China[J]. Science of the total environment, 2020, 710: 135499.
- [84] MEI Z G, CHENG P L, WANG K X, et al. A first step for the Yangtze[J]. Science, 2020, 367(6484): 1314.
- [85] LI Y L, TAN Z Q, ZHANG Q, et al. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: framework and implications for eco-environmental assessments[J]. Water research, 2021, 195: 117005.
- [86] MA Y, LEE E W M, SHI M, et al. Spontaneous synchronization of motion in pedestrian crowds of different densities[J]. Nature human behaviour, 2021, 5(4): 447-457.
- [87] LIU X B, WANG Y K, LI M. How to identify future priority areas for urban development: an approach of urban construction land suitability in ecological sensitive areas[J]. International journal of environmental research and public health, 2021, 18(8): 4252.
- [88] JIN K, CHEN J G, CHEN X Q, et al. Impact failure models and application condition of trees in debris-flow hazard mitigation[J]. Journal of mountain science, 2021, 18(7): 1874-1885.
- [89] 万军, 王金南, 李新, 等. 2035 年美丽中国建设目标及路径机制研究 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 29-36.
- [90] 王金南, 秦昌波, 苏洁琼, 等. 美丽中国建设目标指标体系设计与应用 [J]. 环境保护, 2022, 50(8): 12-17.

Progress and Prospect of the Science and Technology Supporting a Beautiful China Initiative

YANG Linsheng^{1,2}, DENG Haoyu¹, LIAO Xiaoyong^{1,2}, ZHAO Dongsheng^{1,2}, LI Yanpeng¹, YANG Zhenshan^{1,2}, GE Quansheng^{1,2*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research Chinese Academy of Sciences, General Office of the CAS Strategic Priority Research Program “Ecological Civilization Project Towards a Beautiful China”, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the 18th National Congress of the Communist Party of China set out the goal of building a Beautiful China, the state has organized a series of S&T programs in the fields of resources, ecology and the environment to effectively support the scientific and technological needs in theoretical exploration of building a Beautiful China, protection and restoration of eco-environment, and decision-making support for building the ecological civilization system. After reviewing the scientific and technological R&D plans in the field of eco-environment in the international and developed countries in the past ten years, as well as the scientific and technological R&D plans and advancement in the relevant fields in China, this paper introduced the main contents and progress of the CAS Strategic Priority Research Program (A) “Ecological Civilization Project Towards a Beautiful China”. And based on the analysis of status and expectation, this paper identified the dynamics and trends of S&T frontiers in related fields, and put forward suggestions on the future development of S&T, in order to provide reference for the direction of S&T to promote the construction of Beautiful China after the 20th National Congress of the Communist Party of China.

Keywords: Beautiful China; scientific and technological support; green development; eco-environment; protection and restoration; CAS Strategic Priority Research Program