

DOI: 10.5846/stxb201812292842

何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. 生态学报, 2019, 39(18): - .

He X J, Wang L, Ke B, Yue Y M, Wang K L, Cao J H, Xiong K N. Progress on ecological conservation and restoration for China Karst. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

中国喀斯特生态保护与修复研究进展

何霄嘉¹, 王磊¹, 柯兵^{1,*}, 岳跃民^{2,3}, 王克林^{2,3}, 曹建华⁴, 熊康宁⁵

1 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038

2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125

3 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

4 中国地质科学院岩溶地质研究所 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004

5 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001

摘要:喀斯特生态系统是地球表层系统的重要组成部分。我国西南喀斯特地区以高强度农业活动为主,人地矛盾尖锐、石漠化严重,是我国最大面积的连片贫困区。在国家科技计划项目等的持续支持下,我国围绕喀斯特区生态修复与石漠化治理,系统开展了喀斯特生态保护与修复基础理论、技术研发、产业示范等研究,在喀斯特生态系统退化机理、石漠化治理技术与模式、生态治理助力脱贫攻坚、喀斯特景观资源保护、喀斯特国际合作等方面取得突出进展,引领了国际喀斯特学科发展。面对当前石漠化治理过程中产生的治理成效巩固困难、缺乏可持续性等新问题,未来喀斯特生态保护与修复研究应以增强生态治理的可持续性为导向,加强生态恢复过程机理与机制研究,提升喀斯特生态系统服务、提高生态恢复质量、巩固扶贫成果,实现石漠化治理的提质与增效,为“美丽中国”战略的贯彻实施及全球喀斯特分布国家生态治理提供“中国方案”。

关键词:喀斯特;石漠化;生态修复;治理技术;生态系统服务提升

Progress on ecological conservation and restoration for China Karst

HE Xiaojia¹, WANG Lei¹, KE Bing^{1,*}, YUE Yuemin^{2,3}, WANG Kelin^{2,3}, CAO Jianhua⁴, XIONG Kangning⁵

1 The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China

2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, 410125, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Huanjiang 547100, China

4 Key Laboratory of Karst Dynamics (Ministry of Natural Resources/Guangxi), Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

5 School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: Karst is an important part of the surface earth system. Southwest China karst faces high pressure from agricultural activities and rocky desertification, the most serious eco-environmental problems in karst regions, as there is relatively less human and poverty pressure in the other karst regions of the world. Southwest China karst is the largest area of continuous poverty in China. In this study, we reviewed the progress on ecological conservation and restoration of China karst. For karst ecosystem conservation and restoration, the local and national Chinese governments have implemented a series of ecological restoration projects to combat rocky desertification and relieve poverty. Under the continuous support of scientific projects, researchers have been exploring the fundamental theories, treatment measures and technology, and industrial demonstration related to karst ecological restoration and rocky desertification treatment. China has achieved great progress on the karst ecosystem degradation mechanisms, rocky desertification treatment technology and measures, poverty alleviation with

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502400)

收稿日期:2018-12-29; 修订日期:2019-09-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjhe1218@sina.com

ecological restoration, karst landscape protection, and international karst research collaboration. All these achievements make China the leader of international karst research. Currently, rocky desertification in China is continuously decreasing with the implementation of large ecological restoration projects. However, intervention is facing new problems, such as the extensive investment and coarse subregions, difficulties for consolidation of restoration benefits, lack of sustainability for treatment, and lagged recovery of ecosystem services. Therefore, further ecological conservation and restoration in China karst should aim to enhance the sustainability of ecological restoration and pay more attention to the mechanisms and institution of recovery processes. For improving the quality and efficiency of rocky desertification restoration, we should highlight the promotion of karst ecosystem services and the consolidation of poverty relief in further ecological project implementation. It will provide scientific foundations for the implementation of the Beautiful China strategy and China's solutions for ecological restoration in other karst countries.

Key Words: Karst; rocky desertification; ecological restoration; treatment technology; ecosystem services improvement

喀斯特约占全球陆地总面积的 12%,为近 25%的世界人口提供饮用水,喀斯特分布面积 5 万 km²或占国土总面积 20%以上的国家有 88 个^[1-3]。岩溶过程的活跃性及与地表生态系统的相互融合,使得喀斯特生态系统成为地球表层系统的重要组成部分^[4-5]。我国西南喀斯特地区以云贵高原为中心,面积约 54 万 km²。我国喀斯特发育最为典型、地貌类型齐全,主要包括:喀斯特峰丛洼地、断陷盆地、喀斯特高原、喀斯特槽谷等。从全球角度来看,我国西南喀斯特地区由于碳酸盐岩古老坚硬、受季风气候的水热配套等影响,加上人类活动强度高,具有显著生态脆弱性^[5]。由于碳酸盐岩的可溶性,形成地表地下双层水文地质结构,水资源难利用;碳酸盐岩成土物质先天不足,造成土壤资源短缺,土层浅薄,土被不连续,土壤富钙而偏碱性,土壤较肥沃但总量少,限制喀斯特山地植被生产力^[6-7];受人为干扰的影响,大部分地区目前表现为次生的矮林和灌草丛,部分地区退化为石漠化,恢复难度较大^[8]。

“九五”以来,在国家科技计划的持续支持下,围绕喀斯特生态修复与石漠化治理,在喀斯特生态保护与修复基础理论、技术研发、产业示范等方面开展了系统研究,从全球角度阐明了我国喀斯特区的特殊性 & 生态脆弱性,发现了喀斯特地上-地下双层水文地质结构及水土运移过程的特殊性,揭示了人类干扰胁迫下喀斯特生态系统退化机制,在生物地球化学循环、岩溶风化成土过程、水土流失/漏失机制、地表-地下水文过程、喀斯特生境植被适应机制、西南生态安全维持机制等理论研究基础上,研发了喀斯特适应性生态修复与石漠化治理技术与模式,提出了喀斯特景观资源保护与可持续利用对策,为我国西南生态安全屏障建设及喀斯特区域可持续发展提供了重要科技支撑^[7,9-15]。然而,我国西南喀斯特地区石漠化治理与脱贫攻坚的任务依然艰巨,据国家林业和草原局第三次石漠化监测结果显示,截至 2016 年底,仍有石漠化 10.07 万平方公里,贫困人口占全国的 1/3,截至 2017 年仍有 211 个县没有脱贫。

党的十八大首次把生态文明建设提到中国特色社会主义建设“五位一体”总体布局的战略高度,十九大提出“树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,形成人与自然和谐发展的新格局,满足人民日益增长的优美生态环境的需求”;第十三届全国人民代表大会将建设“美丽中国”和生态文明写入宪法,生态文明建设被提高到空前的历史高度和战略地位。新形势下,亟需梳理我国喀斯特生态保护与修复主要研究进展,剖析我国喀斯特生态修复与石漠化治理存在主要问题及其未来研究重点,为我国西南喀斯特地区生态文明建设和可持续发展提供科技支撑。

1 国内外喀斯特区地球表层系统研究概况

喀斯特系统具有二元三维空间结构,存在地表-地下水文路径联通的多界面网络通道,其水文过程独特、复杂且时空异质性高,岩-土-水-气-生各界面具有独特的、相互紧密联系的界面过程及其响应与反馈机制。国外喀斯特地区生态环境以保育为主,研究主要侧重喀斯特水文地质、地下水资源与利用、洞穴及古气候记录、

岩溶地质灾害防治等研究。国际上早期的喀斯特研究以欧洲发达国家占主导地位,以斯洛文尼亚、意大利、西班牙、瑞士和奥地利为代表的发达国家侧重地理地质综合研究,在地貌演化、洞穴、水文水资源等领域总体水平较高。东南亚和中亚等发展中国家、社会经济发展水平低,人地矛盾尖锐,研究以开发利用和生态修复为主,如泰国在洞穴开发、岩溶塌陷等方面工作较多,土耳其、伊朗在干旱区喀斯特研究上具有一定的研究特色。

我国喀斯特区主要集中分布于滇桂黔等 8 省(区、市,图 1),总人口 2.22 亿人(少数民族 4537 万人),社会经济发展水平低,以高强度农业活动为主,人地矛盾尖锐,石漠化严重,同时也是连片贫困区和少数民族聚居区,开发与生态保护的矛盾更为突出,在喀斯特基础研究和生态保护与建设方面具有世界代表性和范例性^[3,7,9]。目前国内喀斯特表层地球系统科学研究从原来的侧重地貌过程和水文过程的传统岩溶过程研究转变到研究更多关注喀斯特生态系统脆弱性评价、人类干扰胁迫下生态系统退化机理与修复、水土资源利用等研究,在生态学、生物地球化学、生态水文学等领域颇有建树,积累了一系列水-土-植被-生态延伸产业方面的生态保护与修复技术模式。

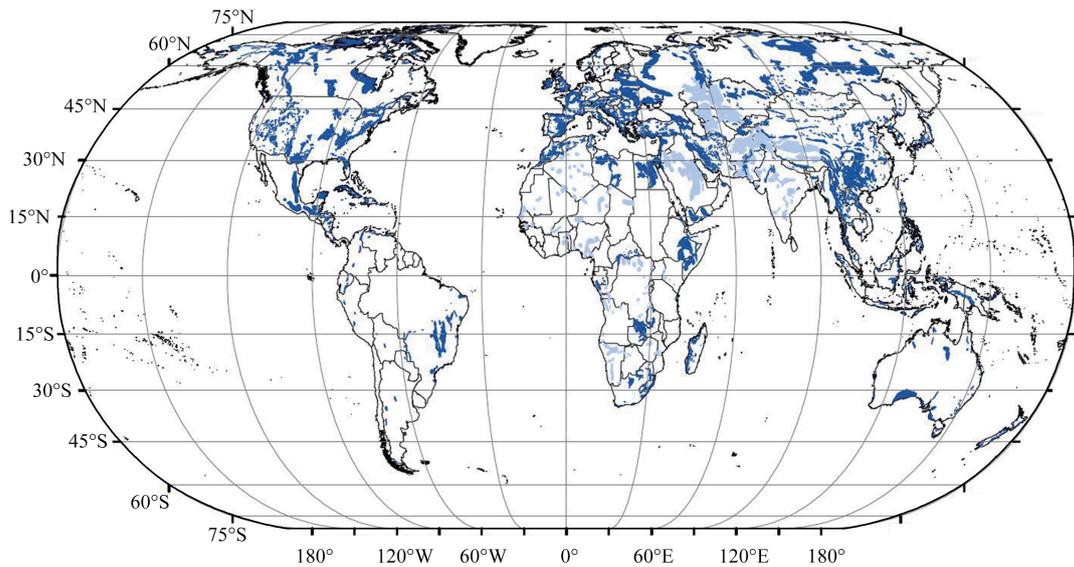


图 1 全球喀斯特分布(蓝色深度代表碳酸盐岩分布程度)^[16]

Fig.1 World carbonate extent (The deeper the blue legend, the more carbonate extent)^[16]

我国喀斯特研究领域论文数、被引频次均列世界第一,国际学术影响力最大,截止 2017 年,我国喀斯特研究发文量 4516 篇,排名第一,占全球总体发文量的 46%,是第二名美国的 4 倍多;我国该领域论文总被引频次也最多,达到 24191 次,高于美国的总被引频次^[17]。全球喀斯特发文量前 10 的研究机构中,我国研究机构占到一半,包括中国科学院、中国地质科学院、贵州师范大学等。我国喀斯特研究已由过去仅具备地域优势,发展到现今地域优势与学术优势并存的新阶段,已由传统地貌学拓展为支撑经济社会发展的资源、能源、生态“三位一体”的综合性学科,研究水平从跟跑向引领方向发展,形成具有我国特色的喀斯特研究成果,提出了地表地下二元水文地质结构、表层岩溶带对生态、水文系统控制作用、石漠化现象、水地下漏失等理念,石漠化治理措施和成效在国际上得到高度关注和认可,尤其是提出的喀斯特生态保护与修复、石漠化综合治理、喀斯特与应对全球气候变化等新方向,引领了国际喀斯特领域学科发展。

2 我国喀斯特生态保护与修复研究突出进展

“九五”以来,针对西南喀斯特地区植被退化、水土流失、石漠化等问题,在科技部等部门和地方政府的科研项目支持下,开展了一系列水土流失、石漠化治理、水资源利用、植被恢复与重建等方面的科技攻关项目,研究成果和治理成效显著,有效支撑了我国西南喀斯特地区的可持续发展。

(1) 喀斯特石漠化治理取得阶段性突破。我国长期关注西南喀斯特地区的生态保护与修复问题,“九五”期间主要针对石漠化发生的水文地质条件不清等问题,开展了石漠化综合考察、水文地质条件调查与评价、全球岩溶作用以及物种引入等研究,突破了喀斯特生态系统的脆弱性特征辨识等技术(表1)。“十五”期间主要针对喀斯特峰丛洼地和高原不同退化程度石漠化治理及加快小流域石漠化治理的需求,划分了石漠化类型和等级,研发了喀斯特适生植物筛选、速生植物栽培、山地生态农业、特色农林植物推广等技术,提出了生态恢复、基本农田建设、岩溶水开发利用、农村能源及生态移民等工程措施为主的生态恢复技术,解决物种的适生性、工程性缺水以及传统农业结构转变等问题。“十一五”期间主要针对喀斯特峰丛洼地、高原和槽谷类型石漠化治理缺乏系统性,开始了县域石漠化综合治理试点工程,研发了生物与工程措施配套的植被恢复、坡耕地治理、土壤漏失通道封堵等治理技术与模式,解决了石漠化地区植被构建和人工诱导等植被恢复和水土流失等问题。“十二五”期间主要针对石漠化实现持续增加到“净减少”的拐点、全面推进石漠化综合治理的需求,研发了表层岩溶水调蓄、土壤流失/漏失阻控、表层水资源有效开发、耐旱植被群落优化配置等适应性生态修复技术体系,提出了石漠化治理典型模式并推广示范,初步解决了恢复植被的稳定性问题。“十三五”期间主要针对石漠化治理技术与模式缺乏可持续性、治理综合效益较低、生态服务功能亟待提升等问题,分别在喀斯特峰丛洼地、高原、槽谷和断陷盆地等类型区正在开展喀斯特石漠化治理技术与模式的集成、生态衍生产业培育、生态服务功能提升、规模化示范等研究,以形成石漠化治理与生态产业协同的系统性解决方案。

表1 我国喀斯特石漠化治理阶段进展

Table 1 Progress on rocky desertification treatment in China karst

时期 Time	问题/需求 Problem/need	机理/机制 Mechanism	技术/模式 Technology/mode
“九五” The 9 th Five-Year Plan	石漠化发生背景不清	喀斯特二元三维水文地质结构特征	水文地质条件评价、喀斯特生态脆弱性识别技术
“十五” The 10 th Five-Year Plan	石漠化分级分类不清,加快小流域石漠化治理	石漠化退化机制、喀斯特物种适生性	适生植物筛选、速生植物栽培、山地生态农业等技术
“十一五” The 11 th Five-Year Plan	石漠化治理缺乏系统性、实施县域石漠化治理试点工程	人工诱导植被恢复机制、水土流失机理	生物与工程措施配套的植被恢复、坡耕地治理、土壤漏失通道封堵等技术
“十二五” The 12 th Five-Year Plan	实现石漠化“净减少”拐点,全面推进综合治理	土壤流失/漏失机理、喀斯特生境植物适应机制	表层水调蓄、土壤漏失阻控、植被群落优化配置等适应性技术、生态衍生产业培育
“十三五” The 13 th Five-Year Plan	治理技术与模式缺乏可持续性、生态功能亟待提升	生态服务功能形成与提升机理、产业化形成机制	治理技术与模式的集成、生态衍生产业的规模化与集约化示范

(2) 突破喀斯特区保土集水与植被恢复等石漠化治理技术体系,形成喀斯特生态治理的全球典范。欧美喀斯特区没有人有干扰导致的大规模生态环境退化,发展中国家存在但政府关注有限,我国政府高度重视喀斯特生态修复与石漠化治理。在国家科技支撑计划、重点研发计划等支持下,围绕喀斯特退化生态系统修复与石漠化治理,系统开展了喀斯特石漠化退化过程与机理研究。针对喀斯特地上-地下双层水文地质结构及水土运移过程的特殊性,在喀斯特生态系统退化机理、水土流失/漏失机制、生物地球化学循环、喀斯特生境植被适应机制等理论研究基础上,创新石漠化治理技术体系,突破了喀斯特地下水探测与开发、表层岩溶水生态调蓄与调配利用、道路集雨综合利用、土壤流失/漏失阻控、土壤改良与肥力提升、喀斯特适生植被物种筛选与培育、人工诱导栽培、耐旱植被群落优化配置、植被复合经营、生态衍生产业培育等石漠化治理技术体系(图2),提出了喀斯特山区替代型草食畜牧业发展、石漠化垂直分带治理、喀斯特复合型立体生态农业发展等石漠化治理模式,开展了治理技术与模式的集成和规模化示范,编制修订了喀斯特区水土流失防治标准,初步形成了石漠化治理与生态产业协同的系统性解决方案,有效遏制了石漠化扩展趋势,为国家石漠化治理工程的实施及全球喀斯特生态治理提供了有力技术保障。

(3) 将生态治理与扶贫开发有机结合,因地制宜发展多种特色石漠化治理模式,助力喀斯特地区生态环境改善和脱贫攻坚。①肯福模式:针对石漠化严重地区人口密度远超其生态承载能力的问题,采取生态移民

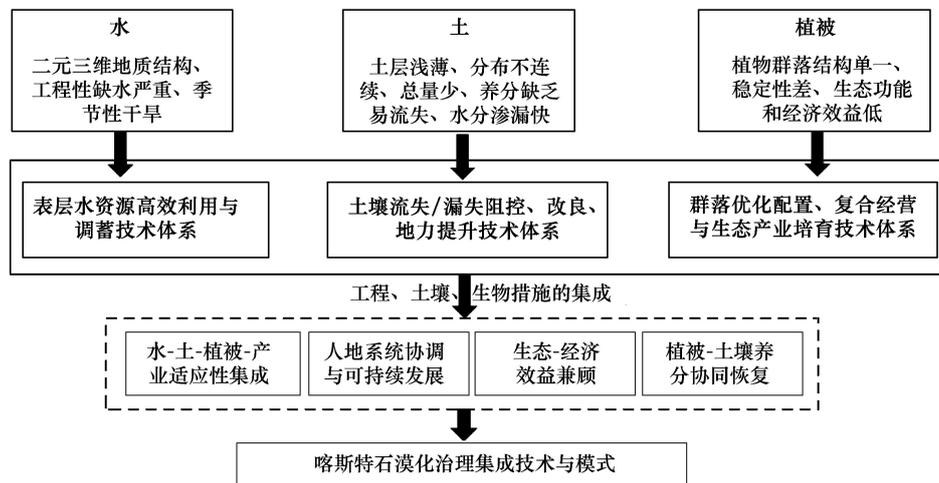


图2 喀斯特石漠化治理技术体系

Fig.2 Treatment technology for karst rocky desertification

的科技扶贫模式,集成特色生态衍生产业培育以及生态移民-异地扶贫植被复合经营等技术体系。迁出区在人口密度降低的前提下,实施种养结合的替代型草食畜牧业培育;迁入区利用水土资源配套优势,开展土壤改良与肥力提升,发展特色经济林果等生态高值农业。示范区植被覆盖度达到70%以上,土壤侵蚀速率下降30%;人均纯收入由2008年的2918元增加到2017年的9664元。该模式创建了生态移民-特色产业培育的科技扶贫长效机制,实现了扶贫开发的可持续性,受到联合国教科文组织(UNESCO)专家高度认可。②花江模式:在重度石漠化的干热河谷地区,针对严重干旱胁迫条件下脆弱生态系统恢复维持与适应性调控,重点突破耐旱乡土物种选育种植、镶嵌群落配置与固碳保育、水质生物净化、农村能源结构优化等关键共性技术,解决了植物抗旱保墒、特色林果、增汇物种培植、水资源高效利用等生态问题,形成了以特色经果-立体农业、水利水保优化配套与极度干旱应急调控为核心的技术模式。1996—2018年,示范区植被覆盖度从2.5%提高到49.25%,农民人均纯收入从610元提高到6893元。该模式已在贵州、云南、广西、重庆33个县区推广应用,可在喀斯特高原、峡谷和峰丛洼地推广。③果化模式:在中度石漠化亚热带地区,针对喀斯特峰丛山区石漠化问题,结合山区立体特点和水土热条件,采用水资源开发和综合利用、植被恢复、农业结构转变水土保持等一体化复合生态模式。其关键技术包含人工诱导植被修复技术、霸王花嫁接火龙果产业化技术、表层岩溶水生态调蓄技术、水土流失生物与工程措施联合防治技术等。通过近20年治理,植物覆盖率由不足10%提高到70%,森林覆盖率由不足1%提高到50%以上,土壤侵蚀模数下降了80%,水资源利用率提高了3倍。示范区人均年收入由不足600元提高到1.8万元。并已在广西百色市、南宁市等周围10多个县得到了推广应用,带动了20多万人脱贫。今后可在桂、滇、黔10多万平方千米的喀斯特峰丛山区推广。④毕节模式:在轻度石漠化高原地区,针对水土流失与林草植被生产力维系调控,重点突破了抗冻群落配置、草地生产力维持及草畜平衡调控、坡地植物篱保水固土、社区种养与再生能源清洁循环利用等技术,解决了抗冻耐旱乡土物种和牧草选育种植、镶嵌群落配置与固碳保育、林草及粮草空间优化配置、草种营养优化配制、水利水保优化配套与极度干旱应急调控、能源结构多能互补等生态问题,形成了以物种多样性生态修复诱导、草食畜牧配置、水土综合整治与合理调配、社区种养与能源结构优化为核心的技术模式。2005—2018年,示范区植被覆盖度从34.70%提高到51.34%,农民人均纯收入从3091元提高到8090元。该模式已在贵州、云南、广西、重庆25个县区推广应用,可在喀斯特高原、峡谷和槽谷地区推广。

(4)喀斯特生态保护与修复有效改善了喀斯特地区生态环境,有力支撑了当地脱贫攻坚,并获得国际社会的高度认可。通过多年持续治理,我国喀斯特石漠化面积由2005年的12.96万平方公里减少到2016年的

10.07 万平方公里。喀斯特地区 2001—2015 年植被生物量的增加速度是治理前(1982—2000 年)的 2 倍,治理区域比非治理区域的植被覆盖度高 7%,与未开展生态治理的越南、老挝和缅甸等邻国相比,生态治理显著促进了西南喀斯特地区的生态环境改善,仅滇桂黔三省植被生物固碳量就达到 4.7 亿吨,比治理前增加了 9%。2018 年 1 月 9 日,《自然》子刊(Nature Sustainability)发表上述喀斯特生态修复与石漠化治理成效评估成果^[18];1 月 25 日,《自然》针对该论文发表长篇评述,指出“卫星影像显示中国正在变得更绿”,进一步肯定我国通过生态修复与石漠化治理加快西南喀斯特地区植被恢复的积极成效(图 3)^[19]。同时,喀斯特石漠化区农村脱贫效果明显,全国 14 个集中连片特困地区中,滇桂黔石漠化区贫困县减少量最多,达 80 个;滇桂黔农村贫困人口从 2010 年的 2898 万减少到 2017 年的 858 万。

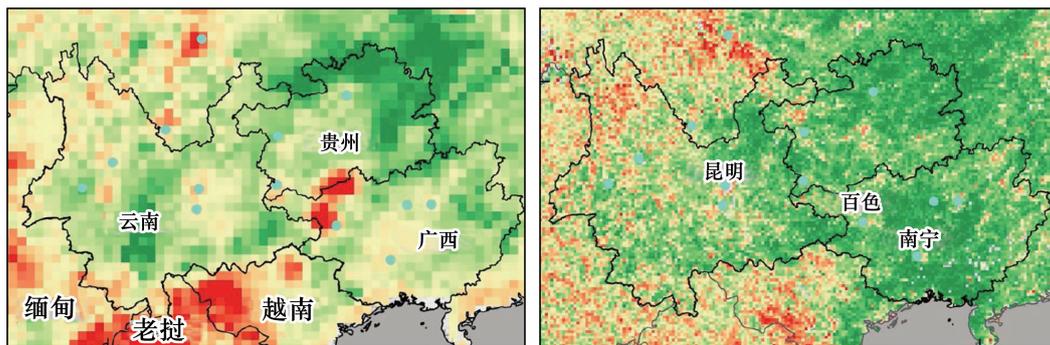


图 3 Nature 专文评述我国西南喀斯特区域生态恢复成效评估成果

Fig.3 Views and news in Nature about the ecological restoration assessment for Southwest China karst

(5)喀斯特景观资源保护取得显著成效,多处入选世界自然遗产地。由于丰富的生物多样性、奇异的地貌景观和洞穴等资源,喀斯特景观具有较高的美学、科学及保护价值,联合国教科文组织公布的世界自然遗产地名录中,有 50 个左右主要分布于喀斯特地区^[3]。由于易受人类活动影响的脆弱性,我国喀斯特景观保护一直是国内喀斯特研究的重点,特别是国家和世界地质公园、石漠化公园规划与建设成为近年来我国喀斯特景观保护的热点^[5]。目前我国以喀斯特景观为主或为辅的国家地质公园有 32 家,占国家地质公园的 23.2%,入选世界地质公园 11 处。同时,鉴于我国南方喀斯特地区展示了喀斯特特征和地貌景观的最好范例,完全满足世界遗产的美学和地质地貌标准,有潜力满足生态过程和生物多样性标准,以及完整性和保护管理要求。云南石林喀斯特、贵州荔波喀斯特、重庆武隆喀斯特、广西桂林喀斯特、贵州施秉喀斯特、重庆金佛山喀斯特、广西环江喀斯特分两批列入世界自然遗产地,显著提升了我国西南喀斯特景观的全球价值和重要性,成为喀斯特生态文明建设的国际品牌。

(6)国际喀斯特研究中心落户我国桂林,喀斯特国际科技合作计划倡议得到多国积极响应。自 1990 年开始,以我国科学家为核心的国际团队,连续实施了 UNESCO 六个国际喀斯特地质对比计划,创造了 UNESCO 持续支持同一学科领域的纪录。2008 年 2 月,联合国教科文组织(UNESCO)国际喀斯特研究中心落户我国桂林。截至目前,已举办 9 届国际培训班,吸引了来自 5 大洲 36 个国家的 169 名学员,惠及 18 个“一带一路”沿线国家。先后与泰国、柬埔寨、斯洛文尼亚、塞尔维亚、斯洛伐克、德国、美国实施了双边合作项目。2016 年 11 月,我国提出“全球喀斯特动力系统资源环境效应”国际合作计划倡议,拟开展生态改善、减贫开发、应对气候变化等研究与合作。22 个国家,36 位科学家表示支持,来自美国、巴西等 11 个国家的科学家代表共同签署了支持函。时任联合国教科文组织总干事致贺信,认为该计划的实施对克服人类共同面临的难题非常重要。此外,今年由我国主持的“国际标准组织喀斯特专业分委员会”获批,进一步提升了我国在国际喀斯特研究领域的话语权。

3 我国喀斯特生态修复与石漠化治理存在主要问题

整体而言,当前国内外喀斯特表层地球系统科学研究各自侧重的领域和优势不同,针对某一领域的某一问题专项研究多,统一的对比监测研究体系尚未形成,尤其没有从地球表层系统科学层面进行整体系统分析,难以深入认识表层地球系统(地球关键带)的形成、演化以及控制人类生存环境的过程和生态服务功能变化规律,亟需由要素过程研究向系统化的“表层地球系统科学”研究过渡。大规模生态保护与建设背景下,我国西南喀斯特区石漠化面积已呈现“面积持续减少、危害不断减轻、生态稳步好转”的态势。然而,受喀斯特地质背景的制约(地上-地下水土二元结构、成土慢且土层浅薄不连续、水文过程迅速等)及生态治理长期性和复杂性的影响,喀斯特石漠化治理与生态恢复重建过程中又产生了治理成效巩固困难、缺乏可持续性问题:

(1)初步阐明了喀斯特生态系统的退化机制,但生态修复的过程机理还不够不清楚。受岩溶地质背景制约,喀斯特生态系统的高强度人为干扰是导致喀斯特生态系统退化的主要原因。大规模生态保护与建设促进了喀斯特生态环境的改善,但生态修复对喀斯特生态系统格局-过程-功能的影响机理不清。

(2)石漠化治理取得初步成效,但生态系统服务提升滞后。西南喀斯特地区 2001—2015 年的地上植被生物量的增加速率是生态工程实施前(1982—2000 年)的 2 倍,工程区比非工程区的植被覆盖度高 7%,石漠化面积呈持续“净减少”态势。但相对于植被覆盖的快速提升,土壤固持、水源涵养等生态服务恢复滞后,有待于进一步恢复与提升关键生态系统服务功能。

(3)当前的治理工程分区较多考虑地质地貌背景,忽略了人类活动强度的空间差异,一些地区坡地大规模开发容易加剧区域性水土资源失衡的风险。由于城镇化、劳务输出等影响,人类活动压力有所缓解,但云南断陷盆地等区域仍人地矛盾尖锐。对人类活动强度变化对生态恢复的影响关注还不够,人为耕作扰动土壤是导致石漠化的主要诱因,部分地区为了快出政绩,不顾生态适应性建设大规模连片经济林果,对土壤扰动和地表灌草被破坏较大,存在流域性水土资源失衡、出现新的石漠化的风险。经济林生长也受喀斯特区土层浅薄、土壤总量有限、矿质养分不足的制约。

(4)部分恢复技术和模式缺乏喀斯特区域针对性与可持续性。喀斯特区具有地上地下二元水文地质结构,土壤受到扰动后地下漏失加剧,而现有治理工程大多照搬黄土高原和南方土山区等高梯土、砌墙保土、植物篱笆等措施,没有充分考虑水土运移的特殊性,模式的生态和经济效益也较难统筹兼顾,部分生态工程事倍功半。同时,推广过程中对技术与模式的关键限制因素及区域适宜性考虑不足,导致部分技术与模式面上推广应用困难。

(5)生态恢复成效忽略了人文社会的作用机制。喀斯特地区趋于暖干化的不利气候条件下,大规模生态保护与建设工程的实施促进了喀斯特地区生态环境的改善。但城镇化、劳务输出、生态移民、异地扶贫搬迁等社会化共同治理模式一定程度上也缓解了喀斯特地区的高强度人口压力,人类活动对喀斯特脆弱生态系统的扰动显著减少,其对生态恢复的作用机制被忽略。

4. 喀斯特生态保护与修复未来研究展望

生态环境建设是生态文明建设的核心,将山水林田湖草作为生命共同体,以增强可持续性为目标,提升生态系统质量和稳定性,提出“美丽中国”建设的系统性解决方案,成为新时期国家生态文明建设战略迫切的科技需求。未来生态保护与修复研究将以增强生态治理的可持续性为导向,强调自然过程与人文过程的有机结合,融合大数据、空天地一体化等新技术,实现生态环境多要素、多尺度、全过程的监测与模拟,实现生态治理综合效益的提高,科技支撑国家生态文明建设战略^[20]。

作为我国主要的生态脆弱区、长江和珠江上游生态安全屏障区、以及全国最大面积的连片贫困区,在喀斯特初步实现“变绿”基础上,如何通过生态治理将喀斯特地区的生态资源优势转化为发展优势,提高生态恢复质量、巩固扶贫成果、增强生态恢复与扶贫开发的可持续性?成为当前喀斯特生态保护与修复面临的现实需求。在植被覆盖快速增加和喀斯特生态系统服务功能恢复与提升的基础上,如何实现石漠化治理的提质与增

效,实现喀斯特绿水青山转变为金山银山的转换?成为当前喀斯特生态保护与修复亟需解决的技术问题。迫切需要深入剖析喀斯特生态系统演化对气候变化、人类活动的响应机理,厘清自然和人为因素对喀斯特系统演化的相对贡献。在此基础上,根据水土资源赋存特征、社会经济发展现状以及文化差异,开展喀斯特生态系统的综合评估,识别喀斯特系统关键类型区与生态红线,将生态修复与人口布局、产业结构调整、城镇化发展、生态产业等有机结合,提出不同喀斯特功能类型区可持续发展的适应性调控途径与生态空间管控方案(图4),为“美丽中国”和“乡村振兴”战略的贯彻实施及全球喀斯特分布国家生态治理提供“中国方案”。亟需重点开展以下研究:

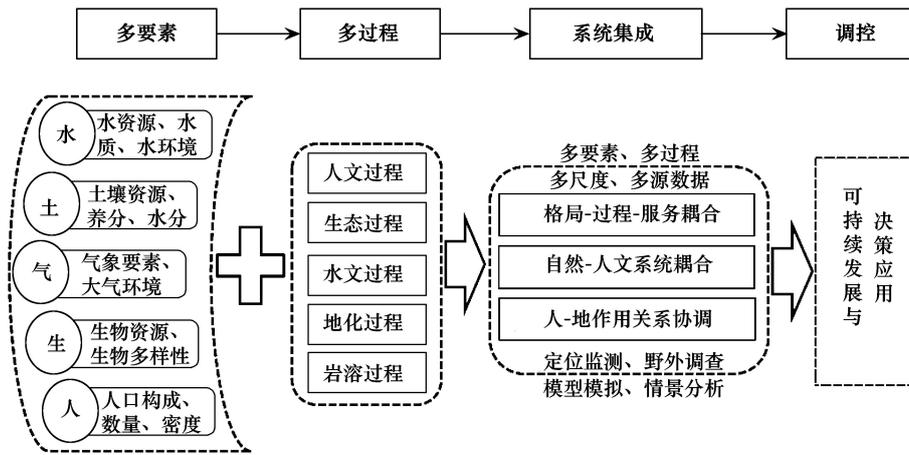


图4 喀斯特表层地球系统集成研究与可持续性调控

Fig.4 The integration research on karst surface-earth system and sustainability regulation

1)加强喀斯特生态修复的格局-过程-功能响应机理研究,突出喀斯特地上-地下生态过程的相互作用及其反馈调节机制。研究在高强度人为干扰向大规模生态建设转变背景下,生态修复对喀斯特生态系统格局、水土流失/漏失、土壤养分水分及植被结构与功能的影响机理,厘清自然因素与生态治理对喀斯特生态系统演变的相对影响。系统开展喀斯特地球关键带研究,应由传统“二维”景观生态研究向“三维”角度转变,将植被-土壤-表层岩溶带作为一个整体,系统研究地上-地下生态过程及岩石-土壤-生物-水-大气的相互作用机理,揭示喀斯特地球关键带的结构、组成及其演变规律。

2)定量刻画与表征喀斯特区域人类活动强度,揭示喀斯特区域生态恢复的社会人文机制。研究不同喀斯特类型区资源环境要素时空配置、人口分布及其对喀斯特生态系统服务能力提升的制约机制,发展区域尺度人类活动的定量表征及空间表达方法,揭示不同人类活动强度下喀斯特区域生态环境效应差异特征,厘清自然及社会人文发展过程对喀斯特生态系统演变的相对作用,提出不同喀斯特类型区可持续发展的生态调控策略;在此基础上,因地制宜统筹自然恢复(封育、封禁)与人工造林、土壤与生物措施等工程治理措施的优化布局,形成石漠化治理的一体化解决方案。同时考虑非示范区的石漠化问题的治理策略。

3)提升喀斯特生态治理的可持续性,继续服务脱贫攻坚与民生改善。构建喀斯特区域生态监测体系,开展石漠化治理模式成效系统评估,包括生态效益、社会经济效益以及投入产出比等,划定喀斯特生态-生产-生活空间,优化喀斯特区域生态安全格局。打造和完善不同喀斯特类型区的特色生态产业链,建设西南喀斯特农牧复合带,形成石漠化地区生态经济协调发展的新增长点。以石漠化治理提质增效为重点,建设喀斯特地区生态产品与生态服务价值评估机制。推进石漠化治理生态产业发展,提升治理的综合效益,助力脱贫攻坚与乡村振兴。集成特色林产业与乡村产业链集群、生态畜牧业与乡村标准化健康养殖、混农林业与乡村农林要素跨界协同、山地旅游产业与乡村多产融合、生态产业技术创新联盟与乡村产业经营、生态产品市场与乡村产业品牌联动等技术体系,构建喀斯特生态产业云平台与乡村智能振兴模式及决策支持系统。

4) 依托桂林国家可持续发展议程创新示范区,推进喀斯特领域国际科技合作。国务院于2016年12月印发《中国落实2030年可持续发展议程创新示范区建设方案》,2018年2月国务院正式批复太原、桂林、深圳三个城市为首批国家可持续发展议程创新示范区,国际社会对此予以密切关注并积极参与相关国际合作。桂林市专门围绕喀斯特景观资源可持续利用,重点针对石漠化地区生态修复和环境保护等问题实施相关行动。建议以桂林示范区建设为依托,利用好国际喀斯特研究中心,发挥我国在喀斯特领域的研究优势,深化面向东盟、对接“一带一路”、辐射全球的国际科技合作,力求牵头组织喀斯特领域国际科学计划和科技合作。

参考文献 (References):

- [1] Veni G, DuChene H, Crawford N C, Groves C G, Huppert G N, Kastning E H, Olson R, Wheeler B J. Living with Karst: A Fragile Foundation. Alexandria, VA: American Geological Institute, 2001.
- [2] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: Wiley, 2007
- [3] van Beynen P E. Karst Management. Dordrecht: Springer, 2011.
- [4] 曹建华,袁道先,裴建国,章程,夏日元,张美良. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京:地质出版社,2005.
- [5] 袁道先,蒋勇军,沈立成,蒲俊兵,肖琼. 现代岩溶学. 北京:科学出版社,2016.
- [6] 张信宝,王克林. 西南碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿质养分不足问题的思考. 地球与环境,2009,37(4):337-341.
- [7] 王克林,岳跃民,马祖陆,雷廷武,李德军,宋同清. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究. 生态学报,2016,36(22):7098-7102.
- [8] 郭柯,刘长成,董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. 植物生态学报,2011,35(10):991-999.
- [9] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环:西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环. 北京:科学出版社,2009.
- [10] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,曹建华,覃星铭,李衍青,杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究. 地球学报,2014,35(5):535-542.
- [11] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. 生态学报,2016,36(22):7088-7091.
- [12] 曹建华,邓艳,杨慧,蒲俊兵,朱同彬,蓝芙宁,黄芬,李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范. 生态学报,2016,36(22):7103-7108.
- [13] 蒋勇军,刘秀明,何师意,何丙辉,谢建平,罗维均,白晓永,肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. 生态学报,2016,36(22):7092-7097.
- [14] 熊康宁,朱大运,彭韬,喻理飞,薛建辉,李坡. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究. 生态学报,2016,36(22):7109-7113.
- [15] 王世杰,刘再华,倪健,闫俊华,刘秀明. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展. 地球与环境,2017,45(1):2-9.
- [16] http://www.sges.auckland.ac.nz/sges_research/karst.shtm(2016-11-18)
- [17] 安显金,李维. 基于WOS数据库和CSCD的全球喀斯特研究动态. 贵州师范大学学报:自然科学版,2018,36(3):14-22.
- [18] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. Nature Sustainability, 2018, 1(1):44-50.
- [19] Macias-Fauria M. Satellite images show China going green. Nature, 2018, 553(7689):411-413.
- [20] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展,2018,37(1):1-7.