

DOI: 10.5846/stxb201909051849

王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): - - .

Wang K L, Yue Y M, Chen H S, Wu X B, Xiao J, Qi X K, Zhang W, Du H. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - - .

喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应

王克林^{1,2,*}, 岳跃民^{1,2}, 陈洪松^{1,2}, 吴协保³, 肖峻^{1,2}, 祁向坤^{1,2}, 张伟^{1,2}, 杜虎^{1,2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 国家林业和草原局中南调查规划设计院, 长沙 410014

摘要: 国家加大生态保护与建设力度背景下, 我国西南喀斯特石漠化面积实现“持续净减少”, 面临由传统高强度人为干扰向大规模自然恢复与人工造林的转变, 石漠化治理也面临转型。现有喀斯特生态研究已阐明了喀斯特脆弱生态系统人为干扰退化机制, 初步揭示了生态治理改善生态系统结构与功能的恢复机理, 突破了保土集水与植被恢复的适应性石漠化治理技术与模式, 评估了石漠化治理显著加速区域植被生长与恢复的固碳效应。但目前石漠化治理面临着治理成效巩固困难、治理技术与模式缺乏区域针对性、大规模低效人工林亟待改造、社会人文驱动机制不清等问题。未来喀斯特生态恢复应聚焦石漠化治理提质增效, 从侧重单一生态要素、单一生态过程的研究向多要素综合、多过程综合以及喀斯特地表-地下过程耦合、景观格局与生态过程耦合、生态过程与生态系统服务耦合、自然与人文过程耦合等陆地表层系统集成的方向发展, 为我国西南喀斯特地区石漠化治理与扶贫开发成效巩固、乡村振兴与美丽中国战略的实施提供科技支撑。

关键词: 喀斯特; 石漠化; 生态治理; 恢复成效; 人地耦合

The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects

WANG Kelin^{1,2}, YUE Yuemin^{1,2}, CHEN Hongsong^{1,2}, WU Xiebao³, XIAO Jun^{1,2}, QI Xiangkun^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, DU Hu^{1,2}

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

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

3 Central South Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Changsha, 410014, China

Abstract: Chinese government is doing increased efforts to protect ecosystems. The area of rocky desertification in Southwest China karst is undergoing continuous net reduction with the strengthening measures for the comprehensive control of rocky desertification treatment. Thus, the social and ecological conditions of this area are transforming from the previous high pressure of human disturbance to large-scale natural recovery and artificial afforestation. Hence, changes in rocky desertification treatment are also required. Given the need for scientific methodology and technical support for the comprehensive treatment of rocky desertification, current studies have revealed the degradation mechanisms of human disturbances to the fragile karst ecosystem, and conducted preliminary exploration of the restoration mechanisms of ecosystem structure and function improved by ecological management. On the basis of these studies, breakthroughs have occurred in the water and soil conservation and adaptive vegetation recovery technologies and measures for rocky

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-036); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502400); 国家自然科学基金重点基金项目(41930652)

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

desertification treatment. The effects of conservation and restoration on increased vegetation recovery and carbon sequestration in China karst areas that have been identified. In terms of the sustainability of karst ecological restoration, however, rocky desertification treatment faces new problems, such as the difficulties in the consolidation of ecological restoration and poverty alleviation, the lack of technology and measures targeted to karst ecosystem, the improvement for structures and functions of widely inefficient plantations, and the human factors behind the ecological restoration of karst ecosystem. Therefore, ecological conservation and restoration in China karst should focus on improving the quality and efficiency of rocky desertification treatment, pay more attention to the transformation from a single ecosystem component and process to the combination and integration of multiple components and processes, and couple the surface and subsurface processes of karst ecosystem, landscape patterns and processes, ecosystem processes and services, natural and social processes. The future karst ecology research will provide the scientific foundation for the consolidation of rocky desertification treatment and poverty alleviation, and the implementation of Beautiful China and Rural Revitalization strategies.

Key Words: karst; rocky desertification; ecological restoration; restoration effects; coupled natural and human systems

全球喀斯特面积 2200 万 km^2 , 占地球陆地面积 15%, 为世界约 1/4 的人口提供饮用水源, 是地球表层系统的重要组成部分^[1-2]。喀斯特占我国国土总面积的 1/3, 连片裸露区集中分布于我国西南部(约 54 万 km^2 , 其中位于滇黔桂的峰丛洼地类型, 面积最大 12.5 万 km^2) 岩溶发育最强烈、人地矛盾最尖锐, 巨大人口压力及高强度农业活动影响下, 该区石漠化与贫困区高度重叠, 是典型的生态脆弱区^[3-5]。我国高度重视喀斯特生态退化与石漠化治理, “十五”期间, 就将“推进黔、桂、滇岩溶地区石漠化综合治理”列为国家目标, 国家“十一五”规划纲要中, 将石漠化地区综合治理作为生态保护重点工程。2008 年国务院正式批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》(2006—2015 年), 明确了石漠化治理的目标、任务和政策措施, 石漠化治理作为一项系统的综合工程正式展开。2016 年, 《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》正式发布, 进一步巩固石漠化治理成果, 突出治理重点。国家“加大生态系统保护力度、实施重要生态系统修复工程、加强石漠化综合治理”背景下, 喀斯特地区石漠化面积由 2005 年的 12.96 万平方公里减少到 2016 年的 10.07 万 km^2 (尤其峰丛洼地区消减最快, 近 10 年减少了 30%), 植被覆盖显著增加, 喀斯特生态保护与修复已取得阶段性成效^[6-7]。

十九大报告提出“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”, 进一步明确了建设生态文明、建设美丽中国的总体要求。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。当前, 由于劳务输出、城镇化及大规模生态保护与建设工程的影响, 喀斯特地区高强度人口压力正逐步缓解, 面临着由高强度农业耕作向大规模自然恢复与人工造林的转变。喀斯特石漠化面积呈现“持续净减少”的趋势, 石漠化治理也面临着转型^[7]。

新形势下, 如何提升喀斯特区生态恢复质量、巩固扶贫成果、增强生态恢复与扶贫开发的可持续性? 成为喀斯特生态保护与修复面临的现实需求。在喀斯特区初步“变绿”和石漠化面积持续净减少基础上, 如何提升喀斯特生态系统服务、实现石漠化治理的提质与增效? 如何有效调控喀斯特生态系统格局-过程-服务、构建喀斯特地区人与自然和谐的新依从关系, 成为当前喀斯特生态治理面临的挑战^[6, 8]。亟需解析高强度人为干扰向大规模自然恢复与人工造林转变背景下喀斯特生态系统退化/恢复机理, 梳理喀斯特石漠化综合治理技术与模式, 把握石漠化治理的区域生态恢复效应, 为西南喀斯特地区生态恢复与扶贫开发成效巩固、乡村振兴与美丽中国战略的实施提供科技支撑。

1 石漠化综合治理工程概况

国务院于 2008 年 2 月批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2008—2015 年)》(以下简称《规划大

纲》)。《规划大纲》明确了石漠化综合治理工程建设的目标、任务和保障措施,确定了“以点带面、点面结合、滚动推进”的工作思路,重点采取农业、林业及水利工程等措施综合治理石漠化,石漠化治理开始作为一项独立的、系统工程和综合治理的思路全面展开(表 1)。

试点阶段:2008—2010 年,国家安排专项资金在 100 个石漠化县开展岩溶地区石漠化综合治理试点工程,累计安排中央预算内专项投资 22 亿元,整合了其他中央专项投资及地方投资上百亿元,明显加大了投入力度。截止到 2010 年底,经过 3 年的奋斗,100 个试点县实施石漠化综合治理 1.6 万 km²以上,451 个县初步完成 3.03 万平方公里的石漠化治理任务,实现了《规划大纲》确定的到 2010 年的阶段性目标。试点县治理工作以潜在石漠化土地为重点,采取综合措施,大大减缓了石漠化扩展的速度。

推广阶段:2011 年,石漠化综合治理工程正式实施,工程规模将由“十一五”期间的 100 个县扩大到 200 个石漠化治理重点县,2012 年扩大至 300 个县,2014 年已扩大至 316 个县。截止到 2015 年,316 个重点县已累计完成中央预算内专项投资 119 亿元,地方投资 20.1 亿元,完成岩溶土地治理面积 6.6 万 km²,石漠化治理面积 2.25 万 km²。在专项投资的带动下,451 个石漠化县积极整合退耕还林、天然林保护、长江防护林、珠江防护林、农业综合开发、土地整治等相关方面的中央资金规模达 1300 多亿元,初步完成石漠化治理面积 4.75 万 km²。

表 1 石漠化综合治理工程任务投资累计完成情况表(2008—2015 年)

Table 1 The invest and areas for rocky desertification treatment from 2008 to 2015

治理情况 Governance		单位 Unit	总计 Total	贵州	云南	广西	湖南	湖北	四川	重庆	广东
治理县个数 Counties		个	316	78	65	77	32	28	16	16	4
治理岩溶面积 Karst area		万 km ²	6.60	2.21	1.18	1.38	0.56	0.50	0.32	0.33	0.11
治理石漠化面积 Rocky desertification		万 km ²	2.25	0.72	0.66	0.32	0.11	0.19	0.09	0.11	0.06
植被建设和保护 Vegetation conservation and restoration		万 hm ²	222.09	70.90	65.15	31.84	10.54	18.35	8.70	11.00	5.61
林业措施	封山育林育草	万 hm ²	157.92	40.55	48.59	29.26	6.76	15.15	4.98	7.64	4.99
Forestry measures	人工造林	万 hm ²	53.54	24.29	15.37	2.08	3.3	2.21	3.02	2.7	0.57
农业措施	草地建设	万 hm ²	10.63	6.06	1.19	0.5	0.48	0.99	0.7	0.66	0.05
Agricultural measures	棚圈建设	万 hm ²	280.59	115.55	43.64	56.52	23.85	20.56	13.68	6.79	
水利措施	坡改梯	hm ²	21785.07	8322.66	8468.08	1558.26	541	1034.6	1111.97	741.8	6.7
Water conservancy measures	排灌沟渠	万 km	1.08	0.33	0.11	0.29	0.14	0.06	0.08	0.05	0.02

成效巩固与深入推进阶段:2016 年 1 月,在《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015 年)》到期之际,国家发改委会同国家林业局、农业部、水利部印发了《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》(2016—2020),明确提出开展石漠化治理要以绿色发展为基本理念,坚持保护优先、自然修复为主,在巩固一期工程建设成果基础上,集中治理范围,突出建设重点,集中使用中央预算内专项资金,对长江经济带、滇桂黔石漠化集中连片特殊困难地区为主体的 200 个石漠化县实施重点治理,以小流域为中心,突出林草植被保护与建设,兼顾区域农业生产、草食畜牧业发展,实现“治石”与“治贫”相结。

2 喀斯特生态系统退化/恢复机理

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,其水文过程响应快,生物地球化学循环周期短,二元水文地质结构保水固土能力差、水土漏失严重,地表-地下过程耦合对人为干扰响应更为敏感^[3-6]。研究发现人为干扰是小流域尺度喀斯特土壤养分和水分格局存在特殊的“空间倒置”现象的主要原因,未受人类扰动影响的原生林生态系统的土壤养分和水分则表现出与非喀斯特地区相似

的“注积效应”^[9]。人为干扰导致的植被破坏影响了喀斯特土壤-植被系统的物质、能量平衡,诱发了土壤-植被系统的逆向演变,导致水土流失加剧,灌丛被人为开垦为耕地后,喀斯特石灰土表层有机碳更易流失,也加剧了地表侵蚀产沙量及土壤的垂直漏失^[10-13];而地表土壤侵蚀、落水洞或竖井等垂直管道上覆土被的塌陷、泥沙直接进入开放裂隙、落水洞等地下通道、土壤沿未开放的具有突变界面的张性节理裂隙流失以及地下水侵蚀裂隙填充土壤导致坡地土壤整体蠕移-坍塌等是喀斯特土壤地表流失、地下漏失的主要途径^[11-14]。人为干扰造成了土壤微生物利用底物和微生境的改变,也造成了氨氧化菌和纤维素分解菌丰度增加,固氮菌丰度减少,不利于土壤碳氮固持^[15-16]。水文过程方面,人为干扰通过土地利用方式改变了下垫面水文特性,进而影响到降水的产汇流过程,提高了同等降水强度下的产流量,增加土壤流失的风险^[17-19]。

生态工程的实施加快了喀斯特地区植被的恢复速率,植被恢复突变时间与工程实施的时间密切相关^[20-21];生态治理措施提高了喀斯特生态系统服务价值,提升了喀斯特水土保持功能及固碳功能,显著改善了农民生计的多样性^[10, 22-26]。随着耕地减少及草地和林地的增加,喀斯特典型退化流域泥沙沉积量与水资源量协同变化,而生态系统净生产力与水资源量和泥沙沉积量为此消彼长的权衡关系^[27],提出喀斯特地区生态保护与建设工程的实施不能单方面追求林地或草地等面积的增加,要权衡不同生态系统服务之间的关系,提升单位面积生态系统服务功能^[6, 28]。不同恢复阶段,发现植被恢复初期土壤 C 和 N 之间的耦合受制于土壤 N 固定能力的不足,植被恢复可显著提升土壤 C 固定,但人工恢复的碳汇效应远低于自然恢复^[29-30]。

3 石漠化治理适应性技术与模式集成

国外喀斯特区人口压力舒缓,以保育为主(生态旅游、洞穴探险等),人地矛盾不突出,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、地质灾害防治等方面^[31-32]。而我国西南喀斯特地区人类活动以高强度农业活动为主,人地矛盾尖锐,社会经济发展水平低,生态恢复在国际上缺乏可借鉴的科学经验和科技。我国西南喀斯特区实施了全球喀斯特区最大的生态修复与保护工程,在生态学、生物地球化学、生态水文学等领域颇有建树,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,突破了喀斯特水资源高效利用(地下水探测与开发、表层岩溶水生态调蓄与调配利用、道路集雨综合利用等)、水土流失阻控与肥力提升(土壤流失/漏失阻控、土壤改良、耕地肥力提升等)、适应性植被修复(喀斯特适生植物种筛选与培育、耐旱植被群落优化配置、植被复合经营等)及生态衍生产业培育等石漠化治理技术 50 余项,形成喀斯特生态治理的全球典范,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^[6, 33-39]。

在上述石漠化治理技术的基础上,根据喀斯特区域差异,综合考虑喀斯特生态资源优势与产业发展特色,以区域生态服务功能提升兼顾居民收入水平提高为目标,以生态环境问题和社会问题为共同导向,权衡生态与经济在区域内的重要性,因地制宜采取兼顾生态效益与经济效益、短期效益与长期效益的石漠化区域治理措施,初步集成形成了可复制、可推广、区域针对性较强的石漠化综合治理模式(图 1):

(1)喀斯特石山坡麓灌木林及人工林地提质与改造模式。该模式适用于水热资源丰富但利用率低,石多土少,难以发展速生林、经果林,人地关系相对宽松的亚热带喀斯特地区。主要目标是改造灌木林和人工林的林相,提高林地效益,改善石山坡麓区经济效益低下的状况。改造灌木林和人工林,间种适宜石生环境的珍贵高值树种,如红豆杉、柚木和降香黄檀等,改变林地经济效益低下、水热资源得不到充分利用的现状,改善灌木林和人工林结构和稳定性,解决石漠化治理和退耕还林过程长期效益与短期效益之间的矛盾,提高长期经济效益。

(2)喀斯特土地集约化利用的立体生态农业发展模式。该模式适用于人口密度大,土地资源匮乏,人均坝地面积低、山地面积比例较大的喀斯特石山区。目标是充分利用坡顶(石质坡地)—坡腰(土石混合坡地)—坡麓(土质坡地)—洼地(土层较厚)的有限土地资源。该方法基于垂直分带治理的石漠化治理思

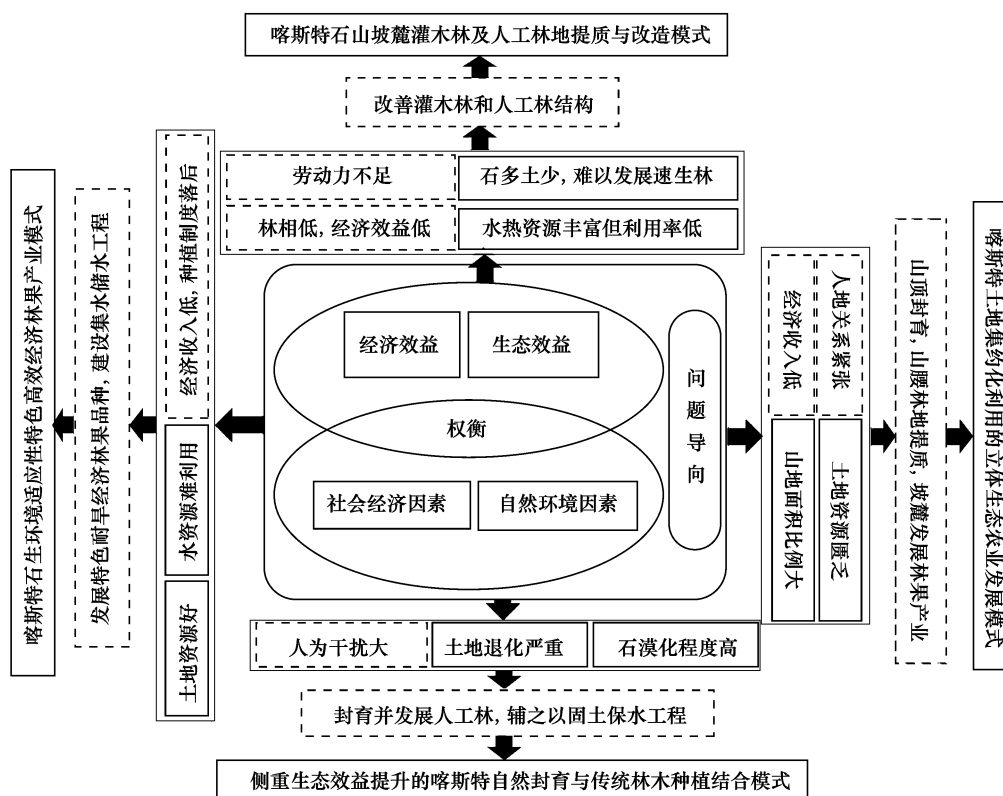


图1 石漠化治理技术与模式集成

Fig.1 The integrated technology and measures for rocky desertification treatment

路^[40],山顶采用封山育林的方式恢复,山腰间种石山适生的生态高效林木和高经济附加值林,低洼地区和坡麓发展喀斯特特色林果药等产业。通过垂直空间的合理布局,形成山体之中农、牧、林紧密结合、相互支持的立体生态农业格局,能兼顾石漠化治理的长中短效益,获得较大的经济效益和生态效益。

(3)喀斯特石生环境适应性特色高效经济林果产业模式。该模式适用于具有较好的水热资源,土层相对较厚,但利用效率低下、以传统农耕模式种植大豆、玉米为主的石山区。目标是充分利用区域土地资源优势,解决用水问题。在土多的坡麓坡脚,筛选适宜当地种植且需水量不高的特色经济林果品种,如无患子、苏木、火龙果、澳洲坚果等,有针对性地发展农产品深加工和生态旅游,培育喀斯特生态衍生产业。同时发展坡面路池工程,拦蓄坡面雨水,配合屋顶集雨水池,开发利用表层岩溶水和基岩裂隙水等方式,有效解决经济林灌溉用水和人畜饮水问题,避免和减轻林果产业发展带来的水土流失。

(4)侧重生态效益提升的喀斯特自然封育与传统林木种植模式。该模式适用于人为干扰程度大、生态功能低下、石漠化严重等不适合继续发展农林经济的石山区,主要目标为迅速恢复植被覆盖,提高生态效益。选用耐干旱瘠薄、喜钙、岩生、速生、适用范围广、经济价值高的乔灌木、藤和草进行生态修复,如任豆、香椿、女贞等喀斯特石生环境适生植物,并进行封育,禁止砍伐,同时辅之以适当的固土保水工程措施,形成人工造林和自然封育相结合的综合治理模式,促进石漠化严重地区植被覆盖的快速增加,提高石漠化土地治理效果,具有较好的生态效益。

4 石漠化治理的区域生态恢复效应

大规模生态保护与建设背景下,西南喀斯特区石漠化格局演变的总体趋势已由 2011 年以前的持续增加转变为持续净减少,石漠化程度减轻、结构改善,特别是重度石漠化减少明显^[7]。现有研究发展了大区域尺

度生态工程成效识别与厘定方法,阐明了西南喀斯特地区植被恢复演变特征与生态工程的实施具有较好的一致性,发现近 30 年来气候变化对喀斯特地区植被恢复的影响有限,植被恢复主要分布在生态工程实施面积较大的区域,工程实施前后、喀斯特地区植被生长季叶面积指数(LAI)变化速率由 $0.01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增加到 $0.02 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.05$),植被地上生物量固碳速率由 $0.14 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增加到 $0.3 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$);工程实施后、仅滇桂黔三省植被地上生物量固碳达到 4.7 Pg C (2012 年),增加了 9% ($+0.05 \text{ Pg C a}^{-1}$),相比 2010—2050 年中国森林 14.95 Pg C 的固碳潜力,生态工程背景下西南喀斯特地区可能有巨大的固碳潜力,喀斯特地区生态工程对我国碳汇能力的提升具有重大贡献^[41-43]。全球尺度上,中国西南喀斯特地区是全球植被覆盖和地上植被生物量增加最快的地区之一,其中,中国西南八省区植被覆盖度从 1999 年的 69% 增加到 2017 年的 81%,而地上植被生物量 1999—2012 年平均增加了 4%,占全球植被地上生物量增加最快地区 ($P < 0.05$) 的 5% (图 2)^[44]。

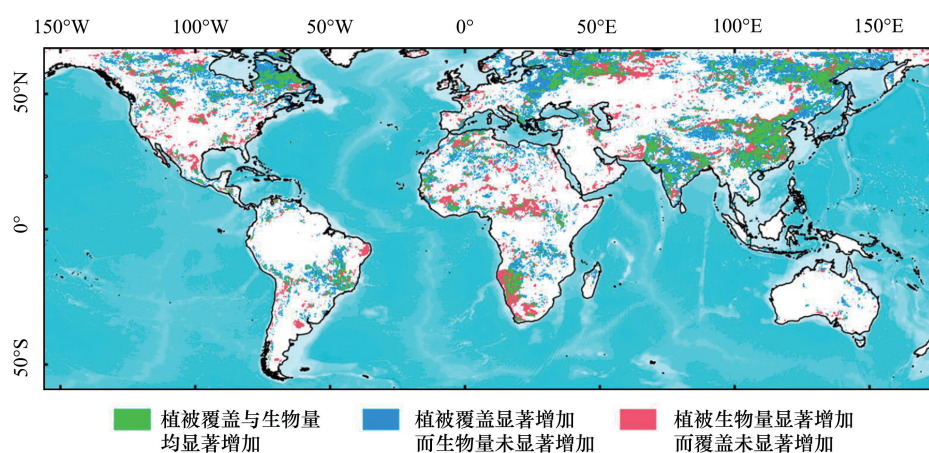


图 2 全球尺度喀斯特植被覆盖与地上生物量恢复趋势

Fig.2 The increased vegetation cover and aboveground biomass in China karst at global scale

国际科学界也高度肯定中国喀斯特生态治理成效,2018 年 1 月 9 日,《自然》子刊(Nature Sustainability)发表我国西南喀斯特区石漠化治理植被恢复评估成果,1 月 25 日,《自然》针对该研究发表长篇评述,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石漠化治理加快西南喀斯特地区植被恢复的积极成效^[45]。同时,喀斯特石漠化区贫困人口削减与脱贫攻坚成效明显,滇桂黔农村贫困人口从 2010 年的 2898 万减少到 2017 年的 858 万,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。

5 石漠化治理存在的主要问题

在国家“十一五”、“十二五”科技支撑计划课题及“十三五”4 个国家重点研发计划项目(峰丛洼地、高原、断陷盆地、槽谷)的支持下,我国喀斯特系统研究在喀斯特生态要素观测、生态过程、水文地质、土壤侵蚀、生物地球化学、生态水文、植被生态生理、生态系统服务等领域进行了较为深入的专项研究,为喀斯特生态系统优化调控与管理奠定了坚实基础^[6,36-38]。然而,受可溶性碳酸盐岩地质背景制约(地上-地下水土二元结构、成土慢且土层浅薄不连续、水文过程响应快、生物地球化学循环周期短等)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、治理技术与模式缺乏区域针对性、水资源利用效率低且季节性缺水严重、土壤生态功能恢复滞后、植被群落稳定性欠佳、生态恢复可持续性差等问题。

在喀斯特生态恢复研究方面,以往对喀斯特表生过程研究的纵深观测尺度一般只到土壤层和表层岩溶带,缺乏从地球表层系统科学角度进行整体性、系统性综合观测与集成分析。同时,由于喀斯特景观异质性

高、地域差异大,目前仍缺乏较为系统的大尺度地面观测数据。研究领域偏重自然过程,而在喀斯特生态恢复与石漠化面积削减过程中,劳务输出(外出务工)、城镇化发展、脱贫攻坚、异地扶贫搬迁等社会共同治理模式也缓解了喀斯特地区高强度的人口压力,使人为开发利用与破坏对喀斯特脆弱生态系统的干扰强度显著减弱,社会人文发展过程减轻了对土地的依赖,也促进了喀斯特地区的生态恢复^[46-48]。当前研究对社会人文因素的影响关注不够,难以深入认识喀斯特表层地球系统的形成、演化、功能、服务及其社会人文驱动机制。

西南喀斯特地区是我国最大面积的连片贫困区,近年来扶贫开发与发展特色产业过程中,部分区域大规模种植经济林果、速生用材林等人工林,喀斯特地区形成了大面积的人工林(广西 2001—2015 年完成退耕地造林达 24 万 hm^2),显著加快了喀斯特地区植被覆盖度和生物量的增加,提高了区域木材蓄积量,但人工林树种相对单一,生物多样性保育功能低下,病虫害发生率增高,但受喀斯特区土层浅薄、土壤总量有限、矿质养分不足的制约难以持续^[49-51]。同时,大面积人工林也影响生物多样性、土壤水分、养分固持等生态服务功能的恢复人工造林导致的森林覆盖增加将显著促进陆面蒸散发,也可能造成区域土壤水分下降^[49,52]。而自然恢复条件下区域林地虽恢复相对较慢,但耗水量低、土壤碳固碳速率快^[29]。因此,亟需辨析不同措施、特别是大规模人工造林与自然恢复的差异,厘清自然恢复与人工造林的区域尺度生态服务效应,为人工林可持续改造与建设、区域生态服务提升提供科学依据。

6 未来研究展望

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,当前,西南喀斯特地区大规模生态保护与建设取得显著的阶段性成效,石漠化实现了由面积增加向“持续净减少”的转变,面临着石漠化治理转型,从前期侧重遏制面积扩张、增加植被覆盖转向提升生态系统服务能力、增强恢复的可持续性。另一方面,由于外出务工、城镇化、贫困减缓等的影响,喀斯特地区高强度人口压力正逐步缓解,面临着由高强度农业耕作向大规模自然恢复与人工造林的转变。

在国家“保护优先、自然恢复为主”的方针及“加大生态系统保护力度、实施重要生态系统修复工程、加强石漠化综合治理”的背景下,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初步恢复的基础上,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治理面临的重大挑战。

面对新的需求与挑战,喀斯特生态恢复研究需要提高喀斯特生态系统要素观测的频率及自动化水平,由要素过程研究向系统化的“表层地球系统科学”研究转变,从侧重单一生态要素、单一生态过程的研究向多要素综合、多过程综合以及景观格局与生态过程耦合、生态过程与生态系统服务的耦合、自然与人文过程的耦合等转变,从喀斯特地表过程研究向地上-地下过程耦合及喀斯特关键带过程系统集成转变,由生态系统尺度到小流域、样带与区域尺度拓展。同时,面向“一带一路”沿线 50 多个喀斯特分布国家的喀斯特景观生态保育与生态治理需求,加强我国喀斯特基础研究经验输出与生态治理技术转移,发挥我国在全球喀斯特系统研究方面的核心辐射带动作用。另一方面,加强喀斯特生态治理管理制度创新,建立社会资本投入生态治理的引导机制,提升社会组织和公众参与生态保护与建设的积极性,为我国西南喀斯特地区石漠化治理与扶贫开发成效巩固、乡村振兴与美丽中国战略的实施提供科技支撑。

参考文献 (References):

- [1] Van Beynen P E. Karst Management. Dordrecht: Springer, 2011.
- [2] Sweeting M M. Karst in China: Its Geomorphology and Environment. Berlin Heidelberg: Springer, 1995.
- [3] 曹建华, 袁道先. 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 国家林业和草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报. (2018-12-14). <http://www.forestry.gov.cn/main/58/20181214/161610004885051.html>.
- [8] 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.
- [9] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 陈洪松, 王克林, 韦国富. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101.
- [10] Liu S J, Zhang W, Wang K L, Pan F J, Yang S, Shu S Y. Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2015, 521-522: 52-58.
- [11] Feng T, Chen H S, Polyakov V O, Wang K L, Zhang X B, Zhang W. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: comparison of RUSLE model with ^{137}Cs measurements. *Geomorphology*, 2016, 253: 217-224.
- [12] Fu Z Y, Chen H S, Xu Q X, Jia J T, Wang S, Wang K L. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: implications of field rainfall simulation experiments. *Hydrological Processes*, 2016, 30(5): 795-811.
- [13] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. 农业工程学报, 2012, 28(16): 121-126.
- [14] Wei X P, Yan Y E, Xie D T, Ni J P, Loáiciga H A. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 721.
- [15] Chen X B, Su Y R, He X Y, Liang Y M, Wu J S. Comparative analysis of basidiomycetous laccase genes in forest soils reveals differences at the cDNA and DNA levels. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 321-331.
- [16] Liang Y M, He X Y, Chen C Y, Feng S Z, Liu L, Chen X B, Zhao Z W, Su Y R. Influence of plant communities and soil properties during natural vegetation restoration on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a karst region. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 57-65.
- [17] Xu X L, Liu W, Scanlon B R, Zhang L, Pan M. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6123-6129.
- [18] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, Wang K L, Liu W, Zhang X Y. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064002.
- [19] Li Z W, Xu X L, Yu B F, Xu C H, Liu M X, Wang K L. Quantifying the impacts of climate and human activities on water and sediment discharge in a karst region of southwest China. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 836-849.
- [20] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 陈琼, 严祥. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例. 生态学报, 2011, 31(12): 3255-3264.
- [21] Tong X W, Wang K L, Brandt M, Yue Y M, Liao C J, Fensholt R. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of southwest China. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 357.
- [22] 罗光杰, 王世杰, 李阳兵, 白晓永. 岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估. 农业工程学报, 2014, 30(11): 233-243.
- [23] Huang W, Ho H C, Peng Y Y, Li L. Qualitative risk assessment of soil erosion for karst landforms in Chahe Town, Southwest China: a hazard index approach. *CATENA*, 2016, 144: 184-193.
- [24] Zheng H, Su Y R, He X Y, Hu L N, Huang D Y, Li L, Zhao C X. Modified method for estimating the organic carbon density of discontinuous soils in peak-karst regions in southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(6): 1743-1755.
- [25] Zhang J Y, Dai M H, Wang L C, Su W C. Household livelihood change under the rocky desertification control project in karst areas, Southwest China. *Land Use Policy*, 2016, 56: 8-15.
- [26] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H, Wang J, Yue Y M, Qi X K. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5307-5317.
- [27] Tian Y C, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Xu Y. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1297-1308.
- [28] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [29] Hu P L, Liu S J, Ye Y Y, Zhang W, Wang K L, Su Y R. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 387-397.
- [30] Liu X, Zhang W, Wu M, Ye Y Y, Li D J. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical karst catchment. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(1): 60-72.
- [31] De Waele J, Gutiérrez F, Parise M, Plan L. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology* 2011, 134(1/2): 1-8.
- [32] Gutiérrez F, Parise M, De Waele J, Jourde H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.
- [33] 胡宝清, 陈振宇, 饶映雪. 西南喀斯特地区农村特色生态经济模式探讨——以广西都安瑶族自治县为例. 山地学报, 2008, 26(6):

684-691.

- [34] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 2008, 28(2): 811-820.
- [35] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 张信宝, 王世杰, 孟天友. 石漠化坡耕地治理模式. 中国水土保持, 2012, (9): 41-44.
- [41] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [42] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [43] He N P, Wen D, Zhu J X, Tang X L, Xu L, Zhang L, Hu H F, Huang M, Yu G R. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1575-1584, doi: 10.1111/gcb.13479.
- [44] Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al - Yaari A, Wang K L, Fensholt R. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China karst during recent decade. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1017-1028.
- [45] Macias-Fauria M. Satellite images show China going green. *Nature*, 2018, 553(7689): 411-413.
- [46] 蔡运龙, 蒙古军. 退化土地的生态重建: 社会工程途径. 地理科学, 1999, 19(3): 198-204.
- [47] 张信宝. 贵州石漠化治理的历程、成效、存在问题与对策建议. 中国岩溶, 2016, 35(5): 497-502.
- [48] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [49] Delang C M, Yuan Z. China's Grain for Green Program- A Review of the Largest Ecological Restoration and Rural Development Program in the World. Cham: Springer Press, 2015.
- [50] Hua F Y, Wang X Y, Zheng X L, Fisher B, Wang L, Zhu J G, Tang Y, Yu D W, Wilcove D S. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme. *Nature Communications*, 2016, 7: 12717.
- [51] 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.
- [52] Cao S X, Chen L, Shankman D, Wang C M, Wang X B, Zhang H. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.