

DOI: 10.20103/j.stxb.202311092432

岳跃民, 王克林, 罗为群, 韦霄, 李德军, 张伟, 吴协保. 人地耦合视角下喀斯特石漠化地区生态系统服务提升. 生态学报, 2024, 44(18): 8159-8164.  
Yue Y M, Wang K L, Luo W Q, Wei X, Li D J, Zhang W, Wu X B. Improving ecosystem services in rocky desertification areas of South China karst from the perspective of coupling human and natural systems. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8159-8164.

## 人地耦合视角下喀斯特石漠化地区生态系统服务提升

岳跃民<sup>1,2</sup>, 王克林<sup>1,2,\*</sup>, 罗为群<sup>3</sup>, 韦霄<sup>4</sup>, 李德军<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>5</sup>, 吴协保<sup>6</sup>

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 广西喀斯特生态过程与服务重点实验室, 环江 547100

3 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004

4 广西壮族自治区中国科学院广西植物所, 桂林 541006

5 广西壮族自治区产业技术研究院, 南宁 530012

6 国家林业和草原局中南调查规划院, 长沙 410014

**摘要:** 针对喀斯特石漠化治理转型面临恢复效果区域差异大、生态功能稳定性弱、忽视社会系统与生态系统的协同等问题, 系统梳理了当前我国石漠化治理存在的主要挑战与科技需求, 提出从侧重自然生态系统转向社会-生态系统的整体性视角, 以区域生态系统服务整体提升为目标, 聚焦喀斯特关键带地上-地下耦合过程, 加强石漠化与社会-生态过程的互馈机制、功能微生物-钙协同促进土壤碳氮高效固持机理、基岩生境植被恢复关键带水分养分保障机制等研究, 突破喀斯特社会-生态系统耦合、岩溶多界面蓄水-保土协同增效、岩土组构与生态位互补的植被群落改造、生物固氮与有机废弃物高效利用的种养协调、生态-岩溶过程协同的固碳能力提升等关键技术, 形成喀斯特生态产品供给能力提升与农业产业转型协同的绿色发展模式, 有助于实现喀斯特区域人地耦合与生态系统服务整体提升, 为西南喀斯特地区石漠化治理工程与乡村振兴提供科技支撑。

**关键词:** 喀斯特; 石漠化; 社会-生态过程; 关键带; 生态系统服务提升

## Improving ecosystem services in rocky desertification areas of South China karst from the perspective of coupling human and natural systems

YUE Yuemin<sup>1,2</sup>, WANG Kelin<sup>1,2,\*</sup>, LUO Wei-qun<sup>3</sup>, WEI Xiao<sup>4</sup>, LI Dejun<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>5</sup>, WU Xiebao<sup>6</sup>

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

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Guangxi Key Laboratory of Karst Ecological Processes and Services, Huanjiang 547100, China

3 Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

4 Guangxi Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China

5 Guangxi Institute of Industrial Technology, Nanning 530012, China

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

**Abstract:** The Chinese government has taken significant ecological restoration measures to address the challenges of rocky desertification and poverty in South China karst. Nevertheless, despite the ongoing reduction of rocky desertification and the rapid growth in vegetation coverage, the sustainability of “greening” in the karst region remains uncertain due to its fragile geological background. To effectively address the challenges and technological demands associated with regional variations in restoration effects, the instability of ecological functions, and the neglect of the synergy between social and ecological systems in the context of karst rocky desertification treatment, the primary focus of early-stage measures has shifted from

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFF1300700); 国家自然科学基金项目(41930652, U20A2048)

**收稿日期:** 2023-11-09; **采用日期:** 2024-08-11

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

solely natural ecological systems to the coupling human and natural systems. The overarching objective is to strengthen the overall provision of ecosystem services. This endeavor encompasses the analysis of the social-ecological feedback mechanisms underlying rocky desertification treatment, the synergistic interplay between functional microorganisms and calcium in facilitating efficient soil carbon and nitrogen retention, the mechanisms governing water and nutrient supply in karst critical zones for vegetation restoration in rocky habitats. Then, the corresponding key technologies development breakthroughs will focus on the integration of karst social-ecological systems. Additionally, collaborative technologies development efforts will be made to enhance water retention and soil conservation in multi-interface karst, reconstruct vegetation communities based on rock-soil composition and ecological niche complementarity, coordinate cropping and breeding through the combination of biological nitrogen fixation and the efficient utilization of organic waste, and enhance carbon sequestration capacity through the synergy of ecological and karst processes. These pivotal technologies aim to form a comprehensive socio-ecological solution for the integration of ecosystem services improvement and rural revitalization. This project will provide scientific and technological support for karst rocky desertification treatment program and rural revitalization initiatives in South China karst.

**Key Words:** Karst; rocky desertification; socio-ecological processes; critical zone; ecosystem services improvement

全球喀斯特面积约 2200 万  $\text{km}^2$ , 占全球陆地总面积的 15%, 喀斯特地貌分布面积中超 5 万  $\text{km}^2$  或占总面积 20% 以上的国家有 88 个, “一带一路” 沿线国家喀斯特分布占近 2/3<sup>[1-3]</sup>。以滇桂黔为中心的我国西南喀斯特地区是全球三大喀斯特分布区 (美国东部、欧洲地中海沿岸、中国西南部) 中面积最大、最集中连片分布区 (约 54 万  $\text{km}^2$ ), 也是长江和珠江上游生态和水资源安全屏障。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, 水文过程复杂且时空异质性高, 岩-土-水-气-生具有独特的、相互紧密联系的界面过程及其响应与反馈机制<sup>[4-6]</sup>。该区社会经济发展水平低, 高强度人口压力下石漠化与贫困高度重叠。我国政府长期重视石漠化治理, 特别是“十三五” 国家重点研发计划喀斯特峰丛洼地、断陷盆地、高原、槽谷石漠化综合治理等项目支持下, 在喀斯特生物地球化学循环、岩溶风化成土过程、水土流失/漏失、地表-地下水文过程、岩溶碳循环等理论研究基础上, 突破了表层岩溶带水资源高效利用、土壤流失/漏失阻控、耐旱植被群落优化、植被复合经营等技术, 培育了替代型草畜畜牧业、特色经济林果、林下中草药等生态衍生产业, 提出了石漠化治理与生态产业扶贫的协同发展模式, 建立了喀斯特峰丛洼地、断陷盆地、高原、槽谷等石漠化治理示范基地, 形成了喀斯特生态治理的全球典范, 科技支撑国家《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五” 建设规划》(2016—2020) 和精准脱贫攻坚战的实施<sup>[3, 7-11]</sup>。

人为扰动破坏转向大规模人工造林与自然恢复下, 西南八省区喀斯特石漠化面积由 2005 年的 12.96 万  $\text{km}^2$  持续净减少到 2021 年的 6.74 万  $\text{km}^2$ , 其中, 喀斯特峰丛洼地区石漠化消减最快, 近 15 年减少了 53.6%<sup>[12]</sup>。西南喀斯特区也成为近 20 年来全球植被覆盖“变绿” 的热点区之一, 以全球陆地面积的 0.36% 贡献了全球植被地上生物量增加最快地区的 5%, 也使该区具有较强的生态恢复固碳能力, 2002—2017 年西南地区植被地上生物量固碳 (1.76PgC) 抵消了同期该区人为碳排放 (约 7PgC) 的 25%, 西南地区贡献了 2010—2016 年我国陆地生态系统碳吸收的 32%, 是国家“双碳” 目标的重要潜力贡献区<sup>[13-17]</sup>。同时, 西南喀斯特地区曾是全国最大面积的集中连片贫困区, 2010—2020 年西南八省喀斯特区消除绝对贫困人口约 2900 万, 消除绝对贫困后, 也是我国巩固拓展脱贫攻坚成效、实施乡村振兴战略的主战场, “十四五” 期间全国 160 个国家乡村振兴重点帮扶县, 西南地区占 96 个, 也成为新时代推动西部大开发的关键。

另一方面, 石漠化治理的核心是调整人地矛盾, 大规模生态修复下西南喀斯特地区人为干扰方式发生显著变化, 由传统毁林开垦、高强度耕作扰动转向大规模生态保护与修复, 区域人为扰动显著减少<sup>[4, 18-19]</sup>。同时, 快速城镇化背景下, 西南喀斯特分布八省区 2000—2020 年农村人口减少了 10211 万人 (占 1953—2020 年农村减少总人口的 95%), 2015 年西南地区城镇人口首次超过农村人口, 特别是外出务工下大规模城-乡人口

流动的发生,使农村人口及农村地区实际人口压力显著缓解,由人地关系紧张向人地关系均衡转变,农村发展过程与生态修复进程促进喀斯特区社会-生态系统转型,西南喀斯特地区面临人地关系拐点来临的新形势,亟需进一步关注喀斯特地区自然-社会系统的互馈与耦合过程,推进喀斯特区域可持续生态恢复<sup>[20-22]</sup>。

## 1 石漠化治理存在的主要问题与挑战

受碳酸盐岩脆弱地质背景制约(地上-地下二元水文地质结构,成土缓慢、土层浅薄,降水渗漏迅速,植被石生旱生、对人类活动响应极为敏感等),加上全球变化背景下西南喀斯特区极端干旱、洪涝等极端气候事件加剧的影响,在实现石漠化治理初步“变绿”基础上,当前西南喀斯特石漠化治理面临新的问题与挑战:

(1)石漠化防治任务依然艰巨,发生的风险依然较高。截止2021年底,西南八省喀斯特区仍有6.74万 $\text{km}^2$ 石漠化,且主要集中分布于长江、珠江上游(占93.6%),严重影响两江水资源与生态安全;同时,潜在石漠化土地面积达17.6万 $\text{km}^2$ ,占喀斯特土地面积的36.5%，“二次”石漠化发生风险高。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》目标治理长江上中游和湘桂喀斯特地区石漠化近4万 $\text{km}^2$ ,石漠化防治任务艰巨。

(2)不同地质背景制约下恢复效果区域差异大,部分喀斯特区森林景观恢复困难。喀斯特区是湿润半湿润区,但岩土组构的差异影响植被恢复的类型与质量,特别是土壤丰量、土壤-植被系统矿质养分制约部分喀斯特区森林景观恢复。恢复初期植被生长较快,自然恢复条件下,初步“变绿”的低矮灌丛及草丛正向演替缓慢;而连片种植的单一人工林生态功能稳定性差,部分区域造林不成林,特别是白云岩坡地造林保存率低,树木生长缓慢,生长状况差,基岩生境植被恢复的可持续性差<sup>[23-25]</sup>。

(3)石漠化治理技术与模式的系统集成及区域针对性与可持续性不足,缺乏多要素协同治理。当前石漠化治理主要考虑水、土、植被等单一要素,没有充分考虑多要素关联下的石漠化区域分异及喀斯特地表-地下二元水土运移的特殊性,也忽略了水-土-气-生-岩-人的系统集成,多要素耦合机制研究的缺失直接导致了部分治理项目未能达到预期效果<sup>[26]</sup>。同时,目前的石漠化治理技术多侧重于局部“复绿”,较少关注人地矛盾的区域分异和社会发展需求,治理模式的区域针对性与可持续性考虑不足,大范围推广应用困难。

(4)造林并不等于恢复,“变绿”也不等于功能恢复。大规模造林与自然恢复下,西南喀斯特地区植被快速复绿也导致蒸散发增加、土壤水分养分保障能力下降,变绿过程、与干旱导致的森林死亡并存,影响区域“变绿”的稳定性与持续性<sup>[27-28]</sup>。一方面,由于碳酸盐岩脆弱地质背景制约(先天不足),喀斯特岩土组构影响中后期植被水分养分保障,“变绿”后、自然恢复演替缓慢,不同植被恢复类型间差异大。另一方面,大规模造林存在一定的负效应(后天失调),地质背景制约连片造林存在土壤水分损耗风险,特别是全球气候变化下的极端干旱、岩溶干旱加剧,进一步制约水分损耗及区域“变绿”的持续性<sup>[15,29]</sup>,亟需由关注“变绿”转向生态系统服务功能稳定性与持续性提升。

(5)石漠化区粮食安全与生态安全矛盾极为突出,乡村振兴科技帮扶任务艰巨。喀斯特石漠化区人均耕地面积不到0.5亩,有限的耕地大多属于旱涝不保收的贫瘠山地。但喀斯特区水热资源相对丰富,石漠化治理与脱贫攻坚过程以开发非粮的特色农林产品为主,发展了牧草、桑苗、特色经林果药等保护性种植产业,效益是传统种粮的2倍以上,初步实现了喀斯特区生态环境改善和产业发展的协同。当前以粮为核心的耕地“非粮化”、“非农化”整改复耕,对喀斯特生态脆弱区而言,可能面临退耕还林复耕风险,不利于脱贫攻坚成效巩固。作为特殊地质背景制约的生态脆弱区,亟需统筹石漠化治理、耕地保护与特色产业发展,提升喀斯特区优质生态产品供给能力。

## 2 石漠化治理转型的科技需求

面向国家生态修复“双重”规划、乡村振兴及新时代推动西部大开发的重大需求,西南喀斯特石漠化地区在实现石漠化治理初步“变绿”基础上,生态修复与石漠化治理面临转型,亟需从前期治理侧重自然生态系统

结构与单一功能恢复转向生态系统服务与产品供给同步提升,从侧重自然生态系统转向社会-生态系统的整体性视角。聚焦喀斯特关键带地上-地下耦合过程,需进一步加强植被中后期恢复过程中关键带水分养分保障机理解析,形成喀斯特生态产品供给能力提升与农业产业转型协同的绿色发展模式,实现喀斯特区域人地耦合与生态系统服务整体提升<sup>[23,30-32]</sup>。

#### (1) 石漠化与社会-生态过程的互馈机制

研究人为干扰变化与石漠化演变的互馈机制,量化石漠化治理的生态系统服务及社会经济变化,辨析气候变化及城镇化、人口变化驱动下石漠化治理存在问题与风险,构建社会-生态大数据平台模拟人地耦合演变,揭示人类活动类型、特征及强度,明确生态系统服务提升类型区与重点空间。

#### (2) 峰丛洼地关键带水土资源生态调控技术

构建喀斯特峰丛洼地关键带结构-水土过程观测平台,阐明峰丛洼地流域不同地貌单元水文-泥沙连通机制及其植被影响,研发岩溶空隙介质系统多界面水资源涵养与水土耦合调控技术,形成技术规范,并开展应用示范。

#### (3) 岩生境植被改造与可持续恢复技术

阐明复杂岩土环境中植被恢复对水分、养分的利用规律,探索喀斯特自然保护地生态产品价值实现途径,研发基于岩土组构-生态位互补的植被结构改造技术,构建基岩生境药用与名贵植物复合配置模式,并开展试验示范,精准提升重建群落质量、功能和稳定性,实现特色混农林产业可持续发展。

#### (4) 保护性耕作与种养协调绿色生产技术

筛选具备高效固氮功能的固氮微生物及豆科牧草以及农业副产物腐熟和作物病虫害防控的功能微生物,研究功能微生物-钙协同促进土壤碳氮固持机理,研发牧草生物固氮高效调控与农业副产物新型肥料化利用技术,构建种养协调绿色生产模式,开展应用示范。

#### (5) 生态系统服务整体提升与乡村振兴融合模式

阐明峰丛洼地景观格局优化及生态功能权衡与协同机制,研发生态-岩溶过程相互促进的人工干预增汇技术、生态系统服务整体提升的乡村景观优化配置技术,提出生态产品供给能力提升与农业产业转型的系统性解决方案,建立乡村振兴示范区。

### 3 面向人地耦合的石漠化地区生态系统服务提升

#### 3.1 总体目标

以喀斯特石漠化地区生态系统服务整体提升为目标,阐明喀斯特石漠化治理的社会-生态系统互馈机制、植被恢复过程中关键带水分养分保障机理、石漠化区生态系统服务权衡与协同提升机制,突破喀斯特社会-生态系统耦合、岩溶空隙介质多界面蓄水-保土协同增效、岩土组构-生态位互补的植被群落改造、种养协调的生物固氮与有机废弃物高效利用、生态-岩溶过程协同的固碳增汇能力提升等关键技术,形成生态系统服务提升与乡村振兴融合的社会-生态综合解决方案,为西南喀斯特地区石漠化治理工程与乡村振兴提供科技支撑。

#### 3.2 研究思路

针对石漠化治理转型面临恢复效果区域差异大、生态功能稳定性弱、忽视社会系统与生态系统的协同等问题,基于社会-生态系统整体性视角,按照“识别效应-解析机理-提升技术-集成示范”思路,形成固碳、土壤保持、水源涵养、生物多样性等功能提升与农业转型升级的系统方案,实现区域人地耦合与生态系统服务整体提升。按照“机理-技术-示范”贯通式研究的要求,在机理机制方面,聚焦生态系统及小流域尺度变化环境下生态功能稳定性与生态系统服务提升机理及区域尺度社会-生态过程的互馈机制;在共性关键技术研发方面,重点突破水土资源耦合调控、基岩生境植被可持续恢复及农业产业提质等关键技术;在示范应用方面,开展针对不同服务提升类型区及问题的多过程、多要素的小流域集成示范,提出山水林田湖草人一体化、生态保护修复与农业协同的区域发展模式。

依托中国喀斯特生态系统系统野外观测研究站联盟(共 14 个喀斯特生态野外站、含 4 个国家站),充分挖掘喀斯特区域生态长期观测与联网研究优势,区域尺度,利用遥感、古生态重建、人地耦合模拟等方法揭示历史时期及当前石漠化演变与区域人为干扰变化的关系,厘清治理社会生态问题与风险,明确生态系统服务提升类型区与重点空间(图 1)。小流域尺度:综合运用地球物理探测、同位素示踪、原位模拟降雨等技术探明坡地-洼地-落水洞水文-泥沙运移过程。生态系统/样地尺度:基于长期样地解析不同岩土组构植物水分养分利用及群落构建机制,基于微生物多组学、同位素标记等方法揭示功能微生物与钙协同提升土壤碳氮固持机理。多尺度集成示范:针对服务提升不同类型区,基于多要素、多过程集成与景观格局优化开展提升技术集成示范,通过山水林田湖草人一体化理念及自然-社会过程尺度匹配,实现区域示范推广。

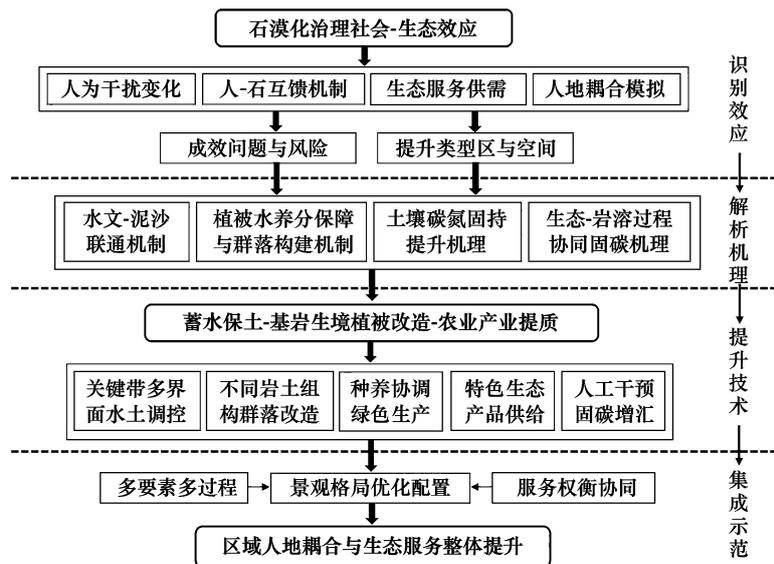


图 1 人地耦合视角下石漠化地区生态系统服务提升

Fig.1 Improving ecosystem services in rocky desertification areas with coupling human and natural systems

#### 4 研究展望

在喀斯特石漠化地区实现初步“变绿”基础上,巩固与拓展前期石漠化治理成效,从侧重自然生态系统结构与单一生态功能恢复研究转向社会-生态的整体性视角,进一步聚焦生态功能恢复的稳定性和生态系统服务提升机理,更加关注石漠化治理调控主体“人”的变化,解析石漠化区初步“变绿”后、如何提升喀斯特关键带水源涵养、养分供给功能以维持植被可持续恢复的水分养分需求,明晰如何提升喀斯特高钙、岩土组构生境恢复植被的稳定性和生产功能,以实现石漠化治理转型过程中生态系统服务与产品供给的协同提升。

预期将揭示石漠化治理的社会-生态系统互馈机制,明晰基岩生境植被恢复过程中关键带水分养分保障机理,探明功能微生物-钙协同提升土壤碳氮固持机理,厘清石漠化区生态系统服务权衡与协同提升机制。在上述机理与机制研究基础上,研发形成喀斯特社会-生态系统耦合、岩溶空隙介质多界面蓄水-保土协同增效、岩土组构-生态位互补的植被群落改造、生物固氮与有机废弃物高效利用的种养协调、生态-岩溶过程协同的固碳能力提升等技术体系,形成喀斯特石漠化地区固碳、土壤保持、水源涵养、生物多样性等功能提升与农业转型升级的系统方案,将实现喀斯特区域人地耦合与生态系统服务整体提升

人地耦合视角下实施的保护性耕作与种养协调绿色生产,契合在生态环境大保护的前提下、从耕地资源向整个国土资源拓展的“大食物观”,有助于推动喀斯特生态脆弱区食物来源多元化发展,是“绿水青山就是金山银山”的生态友好思想的延续与发展。研究揭示植被恢复过程喀斯特关键带的水分、养分保障机制,研发基于岩土组构-生态位互补的植被结构改造及生物固氮与有机废弃物高效利用的种养协调技术,将推动喀

斯特区单一人工林的生态集约化及农业绿色发展。从前期关注小流域生态修复示范,转向山水林田湖草人一体化、生态保护修复与农业协同的区域发展模式示范,提出特色生态产品持续供给与生态衍生产业发展的社会-生态综合解决方案,有助于破解区域“变绿”与“变富”矛盾,为西南喀斯特地区石漠化综合治理、“双碳”目标与乡村振兴提供科技支撑与示范样板。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘丛强等. 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.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 王克林, 岳跃民, 陈洪松. 西南喀斯特区域石漠化治理与生态系统服务提升. 北京: 科学出版社, 2024.
- [ 4 ] 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): 7432-7440.
- [ 5 ] 张信宝. 关于中国水土流失研究中若干理论问题的新见解. 水土保持通报, 2019, 39(6): 302-306.
- [ 6 ] 张君, 陈洪松, 付智勇, 聂云鹏, 连晋姣, 覃常, 文振兴. 西南喀斯特小流域关键带含水介质分布特征. 土壤学报, 2023, 60(4): 969-982.
- [ 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 ] 蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕. 我国岩溶地区碳汇研究进展与展望. 中国岩溶, 2022, 41(3): 345-355.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 国家林业和草原局. 中国岩溶地区石漠化状况公报. 2022.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [ 15 ] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [ 16 ] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [ 17 ] Zhang X M, Brandt M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Fensholt R. The carbon sink potential of Southern China after two decades of afforestation. *Earth's Future*, 2022, 10(12): e2022EF002674.
- [ 18 ] Zhang X X, Brandt M, Tong X W, Ciais P, Yue Y M, Xiao X M, Zhang W M, Wang K L, Fensholt R. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 321-328.
- [ 19 ] Chang J Y, Yue Y M, Tong X W, Brandt M, Zhang C H, Zhang X M, Qi X K, Wang K L. Rural outmigration generates a carbon sink in South China Karst. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2023, 47(5): 655-667.
- [ 20 ] 张云华. 我国人地关系拐点来临, 结构性均衡初现. 中国发展观察, 2022(4): 59-62.
- [ 21 ] Fu B J. Coupling human and natural systems for sustainable development. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad086.
- [ 22 ] Tedesco A M, López-Cubillos S, Chazdon R, Rhodes J R, Archibald C L, Pérez-Hämmerle K V, Brancalion P H S, Wilson K A, Oliveira M, Correa D F, Ota L, Morrison T H, Possingham H P, Mills M, Santos F C, Dean A J. Beyond ecology: ecosystem restoration as a process for social-ecological transformation. *Trends in Ecology & Evolution*, 2023, 38(7): 643-653.
- [ 23 ] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 曾馥平. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. 中国科学院院刊, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [ 24 ] 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 1974-1981.
- [ 25 ] Gómez-González S, Paniw M, Blanco-Pastor J L, García-Cervigón A I, Godoy O, Herrera J M, Lara A, Miranda A, Ojeda F, Ochoa-Hueso R. Moving towards the ecological intensification of tree plantations. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(7): 637-645.
- [ 26 ] Peng J, Xu D M, Xu Z H, Tang H, Jiang H, Dong J Q, Liu Y X. Ten key issues for ecological restoration of territorial space. *National Science Review*, 2024, nwae176.
- [ 27 ] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 14-27.
- [ 28 ] Hammond W M, Williams A P, Abatzoglou J T, Adams H D, Klein T, López R, Sáenz-Romero C, Hartmann H, Breshears D D, Allen C. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forest. *Nature Communications*, 2022, 13, 1761.
- [ 29 ] Deng K Q, Jiang X W, Hu C D, Chen D L. More frequent summer heat waves in southwestern China linked to the recent declining of Arctic sea ice. *Environmental Research Letters*, 2020, 15, 074011.
- [ 30 ] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64-69.
- [ 31 ] Fu B J, Liu Y X, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad033.
- [ 32 ] Yue Y M, Wang L, Brandt M, Zhang X B, Wang K L. A social-ecological framework to enhance sustainable reforestation under geological constraints. *Earth's Future*, 2024, 12, e2023EF004335.