

引用格式: 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 等. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1903-1914, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20231115002.

Bai X Y, Zhang S R, Ran C, et al. Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1903-1914, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20231115002. (in Chinese)

我国西南喀斯特生态修复的 十大问题与对策

白晓永^{1,3,4,5,6*} 张思蕊^{1,2} 冉晨^{1,2} 吴路华⁷ 杜朝超¹ 代磊¹ 杨兴艺¹ 李姿霖^{1,5}
薛盈盈^{1,5} 龙明康^{1,2} 李明会^{1,5} 杨姝^{1,5} 罗青^{1,5} 张小芸^{1,5} 沈晓倩^{1,5}
陈飞¹ 李琴¹ 邓元红¹ 胡泽银¹ 李朝君¹

1 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550081

2 中国科学院大学 北京 100049

3 贵州大学 资源与环境工程学院 贵阳 550025

4 重庆大学 环境与生态学院 重庆 400044

5 贵州师范大学 地理与环境科学学院 贵阳 550001

6 中国科学院地球环境研究所/中国科学院第四纪与全球变化卓越研究中心 西安 710061

7 铜仁学院 经济管理学院 铜仁 554399

摘要 西南喀斯特地区是美丽中国建设的重点和难点区域之一, 其中包括土壤侵蚀、坡耕地比例、水资源污染、岩溶干旱、生态修复、协同碳汇、城市化生态效应、石漠化治理指标、生物多样性及可持续性评估等方面的问题。文章将喀斯特地区生态修复实践过程中积累的知识综合成土壤侵蚀、坡耕地比例、水资源污染、岩溶干旱、生态修复、协同碳汇、城市化生态效应、石漠化治理指标、生物多样性及可持续性评估等10个方面的问题和解决措施。它们有助于解释在喀斯特生态修复方面实现可持续性所面临的挑战, 进而文章也指出了解决办法。它们构成了一套核心原则, 可以指导科学家、政策制定者和实践者应对喀斯特生态修复工程中的可持续性挑战。

关键词 喀斯特, 石漠化, 岩石风化碳汇, 土壤侵蚀, 气候变化, 生态系统服务, 生态修复

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20231115002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20231115002

*通信作者

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A类) (XDA23060100), 国家自然科学基金 (U22A20619、42077455、42367008), 中国科学院“西部之光-西部交叉团队”重点实验室专项 (xbzg-zdsys-202101), 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) (XDB40000000), 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑[2023]一般219, 黔科合成果[2022]重点010、黔科合基础-ZK[2021]一般192), 贵州省高层次创新型人才 (GCC[2022]015-1、2016-5648), 贵州省科技资助项目 (GZ2019SIG、GZ2020SIG)

修改稿收到日期: 2023年12月6日

中国西南喀斯特地区是世界上喀斯特连续分布面积最大、发育类型最齐全的片区,面积高达450 000 km²,其中石漠化土地总面积超过100 000 km²,占喀斯特面积的22.3%^[1]。受地上地下二元三维结构的岩溶背景控制,以及水土资源分布不均、水文变化迅速等问题的影响,喀斯特区域成土速率缓慢,水源涵养能力差,生态可恢复性低^[2,3]。同时,广泛的石漠化和复杂的地质背景作为一种负反馈,进一步限制了当地经济的发展,凸显了实现经济社会和自然生态系统可持续发展的紧迫性^[4]。该区域处于长江和珠江两大水系的上游,其生态建设决定着中下游地区的生态安全,在美丽中国建设和乡村振兴战略中占有重要地位^[5]。

经过多年努力,目前西南喀斯特地区植被覆盖率显著提升^[6],但是石漠化过程是一个多圈层交互作用的复杂过程,经济发展、解决贫困和保护生态系统三者之间平衡的问题仍没有得到系统有效解决。根据习近平总书记对中国喀斯特分布面积最大的省份(贵州)工作作出重要指示,即牢牢守住发展和生态两条底线的要求。喀斯特生态修复既有老问题又有新挑战,二者交织在一起,使得喀斯特石漠化治理面临着生态建设超前、基础研究落后的残酷现实;如果不扭转传统生态治理的惯性模式,可能会影响喀斯特生态建设甚至美丽中国整体战略目标的实现。深入推进西南喀斯特地区生态修复必须从单一要素片面治理走向系统全面调控,需要精准把控该地区岩石圈、土壤圈、水圈、生物圈、智慧圈等多圈层交互作用的关系(图1),从10个方面发力,以提升生态修复水平和能力。

1 中国喀斯特生态修复需关注的十大问题

1.1 忽视了土壤侵蚀标准模数过高而不适用于喀斯特地区的问题

喀斯特生态系统退化的核心问题之一是成土速率远低于土壤侵蚀速率的问题。在许多喀斯特地区,土

壤侵蚀和退化已被确认为严重的地质环境灾害^[7,8]。然而,现行土壤侵蚀风险评价标准存在区域适应性问题,地方政府和学者提出的标准并不完全适用于碳酸盐岩地区。

目前,国内一般将土壤容许流失量作为水土流失危害评价的判别指标,按照现行的SL 190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》,喀斯特地区的土壤容许流失量为500 t·km⁻²·a⁻¹,小于土壤容许流失量的区域都属于水土流失安全区。但前期研究发现^[9],中国喀斯特地区成土速率介于10—134.93 t·km⁻²·a⁻¹,平均值为18.59 t·km⁻²·a⁻¹,仅相当于土壤容许流失量500 t·km⁻²·a⁻¹的4%;按照SL 461—2009《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》的规定,喀斯特地区的土壤容许流失量为50 t·km⁻²·a⁻¹,该值仍然比目前研究的成土速率均值高了近2.5倍。上述标准适用于碳酸盐岩与碎屑岩互层区,但不适用于岩性较纯的碳酸盐岩地区和碳酸盐岩夹碎屑岩区(每1 000年形成4—17 mm土壤),其中连续性碳酸盐岩区仅为SL 461—2009中要求的1/10,碳酸盐岩夹碎屑岩区为SL 461—2009中要求的50%(表1)。尽管以往土壤侵蚀标准已从500 t·km⁻²·a⁻¹降到了50 t·km⁻²·a⁻¹,然而,根据目前成土速率的研究结果^[9],降低后的标准仍然远远大于喀斯特地区的成土速率。这意味着前期制定的土壤侵蚀标准模数均过高,从而导致了长期忽视喀斯特地区土壤侵蚀的风险;这也可能是引起喀斯特地区土壤退化和石漠化发生发展的原因^[5]。

1.2 忽视了喀斯特地区坡耕地比例过高而导致耕地保有量及基本农田保护任务偏重的问题

喀斯特山区地块破碎,人地矛盾尖锐,使农业向斜坡扩张,导致耕地以坡耕地为主(54.38%)^[10]。以贵州为例,该省山地丘陵占92.5%,是唯一没有平原支撑的省份^[11]。第三次全国国土调查结果显示,贵州耕地347.26×10⁴ hm²,坡耕地295.37×10⁴ hm²,占全省耕地面积的85.06%,其中19.8%的坡耕地坡度大于



图1 关于喀斯特生态修复的十大问题及其对策建议

Figure 1 Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in China

表1 不同土壤微度侵蚀标准对比

Table 1 Comparison of different soil micro-erosion standards

微度侵蚀标准*	SL 190 —2007	SL 461 —2009	研究结果
连续性碳酸盐岩(mm·ka ⁻¹)			3.95—4.45
碳酸盐岩夹碎屑岩(mm·ka ⁻¹)	400	40	17.45
碳酸盐岩与碎屑岩互层(mm·ka ⁻¹)			40.41
侵蚀模数(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	500	50	5—50

* 前在以往的任何一项土壤侵蚀分级分类标准里面都只有一个统一的标准，并没有分岩性来设置微度侵蚀标准，因此该表基于3种不同的岩性来设置土壤微度侵蚀标准

* In any of the previous soil erosion classification standards, there is only one unified standard, without considering different rock types to establish a micro-erosion criterion. Therefore, this table sets soil micro-erosion criteria based on three different rock types

25°，面积为 58.47×10⁴ hm²，占全国同级坡耕地 (420×10⁴ hm²) 的 14%。并且贵州省土地垦殖率为 25.73%，远高于同为生态文明试验区的江西 (18.5%)

和福建 (10.8%)，约为全国平均水平的 2 倍。从耕地保有量来看，贵州省为 23.81%，高于四川 (12.95%)、云南 (14.83%)、广西 (18.43%)、湖南 (18.74%) 等周边省份。由此看出，中国喀斯特地区耕地保有量及基本农田保护任务偏重，不符合喀斯特地区的实际情况。中国喀斯特地区耕地生产条件相对较弱，农业耕地资源不匹配会产生水土流失，山地灾害等威胁^[12,13]。

1.3 忽略了地表水与地下水转化频繁而导致水污染治理难以取得持续性成效的问题

我国喀斯特区域地下水资源量约为 2 034×10⁸ m³·a⁻¹，地下河达 3 000 多条，占全国地下水资源的 23%^[14]。地下水环境对外界环境干扰极度敏感，容易受到人类活动的影响。喀斯特区域由于其地表水与地下水剧烈交互，交互频率远高于非喀斯特地区，污染物易迁移和扩散^[15]。《2014 中国环境状况公报》显示，全国地下水严重污染的比例从 2000 年的 37% 增加

到2010年的60%，呈现增长趋势，仅西南岩溶区地下水污染点就达1 012处^[16]。同时，喀斯特人工深水“湖”泊的水体分层结构及污染规律与天然浅水湖泊存在差异，其对外入污染物的自净能力差，且存在易渗漏的问题^[17]。因此，在喀斯特生态修复中，水污染治理相当重要。但目前，人们更多关注对外来污染源的防治，忽略了喀斯特地区地表水与地下水转化频繁的问题，这将导致区域水污染治理难以取得持续性成效。

1.4 忽视了土壤干化及其对喀斯特生态系统的影响问题

土壤水仅占水圈总水量的1/100 000、淡水总储量的0.05%，容易被忽略，但是会影响到整个喀斯特地区生命的演化。近年来喀斯特工程性缺水问题频发，工程性缺水问题带来的干旱胁迫将会限制喀斯特生态环境的恢复和稳定发展，但这一严重问题却缺乏足够的关注。

植被降温效应可以作为衡量生态平衡的一个重要标准，但是喀斯特地区绿化的缓冲能力有限，特别是二氧化碳(CO₂)施肥对植被光合作用的影响受到氮、磷及水分有效性的限制^[18]。基于站点实测和再分析资料研究发现，喀斯特区土壤干化面积占64%以上；南方喀斯特和北方喀斯特的干化速率为 -0.327×10^{-3} — $-0.157 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其中南方喀斯特干化速度最快的地区是整个喀斯特地区的1.26倍^[19]。因此，低土壤水分供应和高大气饱和气压差被认为是中国喀斯特区域植被绿化胁迫的2个主要驱动因素^[20]，其会对生态平衡造成威胁。喀斯特地区工程性缺水会制约植被生长，其降温效应可持续性丧失，能量失衡，最终带来一系列极端气候。这将使得喀斯特地区本就脆弱的生态系统遭受打击，威胁人类的生存发展。

1.5 忽视了喀斯特生态修复受控于碳酸盐岩本底属性与气候变化影响的问题

喀斯特地区地质背景复杂，内部差异巨大，不同

区域的研究基础、重点问题、生态恢复措施显著不同。例如，热带和夏季湿润的温带岩溶区，其钙基底更利于地下蓄水，使其生态系统总初级生产力(GPP)比富硅区高约32%和13%；相反，在干旱草原和冬季干旱的温带岩溶区，富硅区的降水供水模式往往更能维持植被生长所需要的水分，使其GPP比富钙区高12%和7%。说明了植被生长受不同岩性控制^[21]。又如，喀斯特槽谷区易发生高位水资源泄露、干旱频发^[22]，而地势相对较低的洼地和盆地则是水的聚集区导致涝情^[23]，均会抑制植被生长。最后，基于净初级生产力，采用偏导数方法，设计了8种不同情景，分析了气候变化和人类活动对植被生产力变化的影响。结果发现，在人类活动多的南方喀斯特，由于太阳辐射的下降，气候变化导致的负贡献高达70.72%，抵消生态工程59.07%的积极作用，使植被净初级生产力(NPP)损失更大^[24]。生态修复忽略了喀斯特本底属性与气候变化影响，未考虑植被生长特点，片面追求林草面积的扩张，影响了生态修复成效，并对生态系统产生破坏，威胁人类的生存发展。

1.6 忽视了岩石风化碳汇及成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿问题

喀斯特生态系统退化的核心问题之一是忽视了岩石风化碳汇及成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿问题。喀斯特岩石吸收空气中的CO₂形成风化碳汇及风化成土，后者又作为植被生长的必需营养物质和水分的主要载体，支撑了植被光合碳汇潜力^[25]。然而，现行核算标准难以精准量化岩石风化碳汇和植被光合碳汇潜力，导致岩石风化碳汇及成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿机制欠缺。

中国喀斯特岩石风化碳汇(CO₂)总量57.793 7—64.515 7 Mt^[26,27]，中国陆地生态系统的植被光合碳汇(CO₂)0.70—0.95 Mt·a⁻¹^[28]，岩石风化碳汇及成土过程支撑的植被光合碳汇为我国乃至全球实现碳中和发挥了不可替代的作用。但是，忽视了岩石风化碳汇及

成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿问题,导致喀斯特地区巨大的碳汇能力没有得到应有的生态补偿。因此,各种不合理的土地资源开发利用仍然是喀斯特生态系统退化的最大威胁。

1.7 忽视了城市化进程可加速生态环境改善的问题

城市化意味着人口从农村向城市转移、城市扩张、土地利用变化和植被破坏。研究发现城市环境中植被生长普遍增强,增长了1.8倍,高度城市化地区植被增强指数趋近于0.22^[29]。然而,目前关于喀斯特地区城市化对生态环境影响的研究缺乏量化。此外,随着城市化进程加快,农村人口减少和农村耕地遗弃促进了植被恢复,已成为影响喀斯特地区人地矛盾的关键因素,并对生态修复产生巨大影响。Chang等^[30]发现南地区农村人口减少了480万人,农村迁移地区地上生物量(C)最高(0.015 Mt·km⁻²·a⁻¹)。在喀斯特生态修复中,城市化及其带来的农村人口减少导致人口压力降低,从而有效促进了喀斯特地区生态改善,影响着喀斯特生态系统结构,其带来的生态碳汇相当重要。但现有研究没有意识到喀斯特地区城市化及农村人口减少对实现碳中和目标的积极作用,这将阻碍生态治理和乡村振兴的推动并制约地区经济发展,导致喀斯特地区的生态修复难以取得持续性成效。

1.8 忽视了植被覆盖度作为石漠化治理成效评估指标的片面性和短视性问题

21世纪以来,喀斯特地区退耕还林和石漠化综合治理等生态修复工程很大程度上促进了植被覆盖度的提升,为缓解和治理石漠化作出了重要贡献^[31,32]。然而,植被覆盖度提高对生态系统服务的响应仍然不清。已有研究表明,喀斯特地区植被覆盖度提高的同时植被群落正在退化,严重威胁了生态系统的可持续发展^[33]。以往将植被覆盖度作为评价生态恢复成效的关键指标^[34],忽略了喀斯特地区缓慢的成土速率、独特的地表-地下水文结构等特征对植被恢复的不利影

响,造成生态系统服务功能下降、供需关系恶化、生态系统稳定性差、生物多样性锐减等一系列生态环境问题^[35]。因此,在促进植被覆盖度提升的同时如何协同生态系统服务功能提升,以及维持生态系统健康已成为喀斯特地区生态恢复过程中的关键问题。若不加以正视,将导致生态修复成效下降,生态系统服务功能提升滞后,供需关系失衡,以及生态服务不可持续等问题。

1.9 忽视了生物多样性热点区域与生态保护区不匹配及保护体系不健全的问题

中国西南喀斯特山区是全球36个生物多样性热点区域之一,拥有全国50%的鸟类和哺乳动物及30%以上高等植物,是地球上最大的生物多样性库之一^[36]。目前,中国受威胁的植物物种约占总物种10.8%;受威胁的脊椎动物物种(932种)占总数的21.4%,其中两栖动物占脊椎动物比例最高(43.1%)^[37]。从以上数据表明,中国物种都在面临着严重威胁,进而也说明了中国喀斯特山区大量物种数量也会受到相应的挑战。建立保护区是保护生物多样性的重要途径^[38],然而中国的自然保护区仅占国土面积的15.1%,受威胁哺乳动物栖息地总面积占其中的17.9%,鸟类占6.4%,植物占13.1%,两栖动物占10.0%,爬行动物占8.5%^[39]。说明目前自然保护区在规划中仅考虑物种与环境之间的单一关系,是片面的;长此以往,会导致水资源危机、自然灾害加剧等生态健康问题^[40]。

1.10 忽视了生态系统服务提升对区域可持续发展经济贡献的问题

如何坚守发展和生态两条底线已成为当今研究焦点,但目前这方面的研究较为匮乏,导致自然资源评估和生态补偿的误判。Hu等^[41]基于土地利用数据、价值当量系数和价值转移法,估算了中国喀斯特生态系统服务价值(ESV),发现中国喀斯特ESV总体呈收益状态,少部分地区呈损失状态。由于传统的国民核算系统的局限性,国际绿色经济核算体系和国内绿色

国内生产总值 (GDP) 核算体系都只降低了经济系统增长的资源和环境成本, 而不考虑生态系统提供的生态效益的缺点, 可能导致过度追求经济增长而破坏生态环境^[42]。Wu 等^[43]依据修改真实的进度指标 (GPI), 发现生态系统服务价值对于推进和稳定人类福祉的贡献为 20.54%, 但环境和资源的损耗大幅度降低了 GPI。因此, 如果忽视生态系统服务在生态建设与经济发展过程中的重要作用, 将生态恢复与生态产业发展、产业结构调整、民生改善剥离开来, 作为优势资源本底的 ESV 可能会因不合理的人类活动发生不可逆转的损耗, 进而制约经济社会发展, 甚至导致对国民经济和社会发展进步状况的误判。

2 推进喀斯特生态修复的对策建议

针对上述问题与挑战, 喀斯特生态修复需要从单一要素片面治理走到系统的全面调控, 就土壤侵蚀、坡耕地比例、水资源污染、岩溶干旱、生态修复、协同碳汇、城市化生态效应、石漠化治理指标、生物多样性及可持续性评估等 10 个方面提出可行的对策建议, 持续推进喀斯特地区生态安全和建设, 为喀斯特地区美丽中国和乡村振兴战略提供重要的理论支撑。

2.1 尽快修订基于碳酸盐岩风化成土速率的喀斯特地区土壤侵蚀风险评价标准

土壤侵蚀量低而土壤侵蚀风险就低的评价依据导致喀斯特地区土壤侵蚀风险日益严重, 急需基于成土速率制定适用于该地区的土壤侵蚀分类分级标准和风险评价方法; 而成土速率理论上是喀斯特地区土壤允许流失量的上限, 可将不同岩性背景下成土速率作为土壤侵蚀风险的最低阈值^[9] (表 2)。如果理论侵蚀量大于成土速率, 为危险区; 反之, 则为安全区; 两者相等, 则处于临界状态。

2.2 有序推进生态修复项目, 适当调减喀斯特地区耕地面积

首先, 在确保我国基本农田保护面积不减少的前

表 2 提出基于成土速率修订喀斯特地区土壤侵蚀风险评价标准的建议

Table 2 Comparison of different soil micro-erosion standards

不同侵蚀类型区	连续性碳酸盐岩	碳酸盐岩夹碎屑岩	碳酸盐岩与碎屑岩互层
微度侵蚀标准 (mm·ka ⁻¹)	4	17	40
侵蚀模数 (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	5	20	50

提下, 通过统筹调剂, 有序降低 25° 以上坡耕地的占比。其次, 将耕地结构调整与生态移民、土地整治等工作有机结合, 加大支持力度, 切实巩固我国生态修复成果^[44]。最后, 通过制定政策法规、加强宣传教育、开展科学规划、强化监督管理, 完善保障制度等方法 and 手段。加强喀斯特地区生态环境保护, 实现农业可持续发展和乡村振兴^[45]。

2.3 建立适合喀斯特地区地表-地下水污染协同防控技术体系

喀斯特地区地下水资源保护的难点之一在于污染物在喀斯特地表-地下二元结构中的多尺度迁移转化机理不清楚。因此, 急需加强喀斯特地表-地下“水”复合污染机制研究, 建立适合喀斯特的地表-地下“水”污染协同防控技术体系^[46]。进一步优化喀斯特流域水质监测预警系统, 研发喀斯特人工湖防渗漏技术, 定期开展岩溶水库渗漏定量预测和湖区渗漏性评价, 确保喀斯特水源地水质安全。

2.4 重视喀斯特工程性缺水导致的降温效应不可持续问题的监测预警及对生态修复的风险防控

工程性缺水将加剧喀斯特脆弱区的生态限制, 喀斯特脆弱区的生态平衡与降温效应密切相关, 急需加强干旱胁迫监测预警及对生态系统修复的风险防控。

- ① 构建不同时间空间尺度土壤水数据库, 精准掌握喀斯特土壤水动态来加强对生态系统修复的风险把控。
- ② 揭示地表岩土比例对喀斯特地区的水文过程或土壤水资源的影响^[19]。
- ③ 研究过去—未来喀斯特地区土壤水变化及喀斯特植被降温效应, 预测在气候变暖背景

下喀斯特植被降温效应的可持续性,以及在全球变暖背景下的极端干旱事件,进一步加强对喀斯特生态平衡的风险防控。

2.5 选择与岩性背景及气候变化相适应的植被类型与品种进行生态恢复

要因势利导进行生态恢复。①喀斯特区域不同地形内部差异很大,因此分区对指导植被恢复的空间布局、恢复方式具有指导意义。建议根据峰丛洼地型、槽谷型、高原型、峡谷型喀斯特地貌,进一步根据环境特征制定生态方案。②喀斯特地区生态修复要考虑岩性特点及相应的风化层储水能力进一步进行分区^[47],从而选择与岩性背景及气候变化相适的植被。③依据上述分区停止部分生态工程的实施,减少大面积的盲目人工造林,同时保护现存的天然林地和耕地资源,以更好地提供人类福祉,应兼顾生态、经济及社会效益,而不是短期的绿色扩增。

2.6 建立岩石风化碳汇和植被光合碳汇精准计量与能力提升的技术方法体系

针对岩石风化碳汇及成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿机制欠缺的问题,急需从大尺度的碳汇信息系统模拟、改进空间采样方法及精度等方面优化和构建岩石风化碳汇和植被光合碳汇核算模型,在阐明喀斯特地区碳汇变化响应机制的基础上,制定碳汇调查与效应评价行业标准。其次,利用土壤改良的方式提高土壤 CO_2 浓度和优化土壤水肥条件^[48,49],并筛选和培育高效固碳树种或水生光合植物,在加快岩石风化速率的同时提高区域植被和草本群落的固碳潜力,从而建立岩石风化碳汇和植被光合碳汇精准计量与能力提升的技术方法体系,为喀斯特地区开展岩石风化碳汇及成土过程对植被光合碳汇的支撑作用的生态补偿提供数智支撑。

2.7 有序推进城乡人口迁移并加强生态空间的修复和管理

农村人口减少对减轻生态系统压力、改善农村生

态环境具有重要意义^[50]。因此,政府部门应完善绿地网络体系,依法管理绿地,加强生态空间的修复和管理,加大地区教育资源的投入,吸引外来劳动力或留住高教育水平劳动力,创造更多的非农就业机会,吸引更多农业劳动力向城市转移,从而促进生态脆弱地区植被的改善、生态系统服务提升和喀斯特地区生态环境的可持续发展。

2.8 建立喀斯特石漠化治理成效评估的新指标

石漠化治理成功的标志应该是生物多样性、生态过程、土壤质量、水循环、经济社会等诸多要素的恢复和改善,而不仅以植被覆盖度的提升作为唯一评价标准。因此,既不能片面追求扩大森林面积,也不能过分减少石漠化面积。应立足于生态系统整体性和系统性,坚持以系统观念统筹“山水林田湖草沙”一体化治理。综合考虑生态保护和经济发展的平衡,多维度综合评价石漠化治理成效^[51],采取科学的治理措施,避免片面追求植被覆盖和过分减少石漠化面积所带来的潜在问题。

2.9 建立优先生态保护区精准识别和保护体系

生物多样性的有效保护问题亟待解决。①精准识别优先生态保护区,建立合理有效的保护区域,保护野生动物栖息地,恢复其生存环境。②划定植物保护区,降低气候变化和人类活动对植物的影响,保护野生植物栖息地的完整性,同时扩大现有自然保护区,以覆盖更多生态系统服务优先区域。③通过施有机肥,实行轮作等多元化农业模式,改善土壤环境,并协调土壤水、气、热为土壤生物创造更好更多的生存空间来减少干扰^[52]。通过地上与地下相结合,用系统的观点对生物多样性进行保护,实现人类与自然的和谐共生。

2.10 将生态系统服务或绿色GDP纳入政府考核范畴

实现生态、经济和人民福祉共同提升是当前生态文明建设过程中重要内容^[53]。未来急需守住发展和生态两条底线,将生态恢复与产业发展、产业结构调

整、民生改善结合起来,在生态环境承载力范围内合理配置农业-工业-服务业(旅游业),完善第一产业种植生产、深化第二产业加工生产、发展第三产业文旅融合,实现接“二”连“三”调控,建立喀斯特产业协调发展的新范式,从而提升生态发展的可持续性。同时,开展生态系统服务过程研究,构建综合生态经济总值核算框架,将生态和经济发展“双轮驱动”取代“单轮牵引”,把绿色GDP和生态系统服务价值指标同时纳入政府考核范畴,并融入生态环境规划与评估中,加大对生态资源的考核力度。

参考文献

- 1 王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨.中国岩溶,2002,21(2):101-105.
Wang S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification. *Carsologica Sinica*, 2002, (2): 101-105. (in Chinese)
- 2 Xu Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Runoff response to climate change and human activities in a typical karst watershed, SW China. *PLoS One*, 2018, 13(3): e0193073.
- 3 白晓永,王世杰,陈起伟,等.贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价.地理学报,2009,64(5):609-618.
Bai X Y, Wang S J, Chen Q W, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou Province. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 609-618. (in Chinese)
- 4 Li J X, Zhang H Q, Xu E Q. Quantifying production-living-ecology functions with spatial detail using big data fusion and mining approaches: A case study of a typical karst region in Southwest China. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109210.
- 5 白晓永,冉晨,陈敬安,等.中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望.科学通报,2023,68(19):2550-2568.
Bai X Y, Ran C, Chen J A, et al. Methods, progress and prospect for diagnosis of karst ecosystem health in China—An overview. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(19): 2550-2568. (in Chinese)
- 6 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: 44-50.
- 7 张素红,李森,李红兵,等.粤北石漠化地区土壤侵蚀初步研究.中国岩溶,2006,25(4):280-284.
Zhang S H, Li S, Li H B, et al. Preliminary research on soil erosion in karst rocky desertification land in North Guangdong Province. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(4): 280-284. (in Chinese)
- 8 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策.中国水土保持,2008,(12):40-45.
Cao J H, Jiang Z C, Yang D S, et al. Soil loss tolerance and prevention and measurement of karst area in Southwest China. *Soil and Water Conservation in China*, 2008, (12): 40-45. (in Chinese)
- 9 Li Q, Wang S J, Bai X Y, et al. Change detection of soil formation rate in space and time based on multi source data and geospatial analysis techniques. *Remote Sensing*, 2020, 12 (1): 121.
- 10 Wang K L, Zhang C H, Chen H S, et al. Karst landscapes of China: Patterns, ecosystem processes and services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2743-2763.
- 11 朱孟,周忠发,蒋翼,等.基于贵州高原地貌分区的降水时空异质性特征.水土保持研究,2020,27(3):181-189.
Zhu M, Zhou Z F, Jiang Y, et al. Spatial and temporal heterogeneity of precipitation based on the landforms of Guizhou Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 181-189. (in Chinese)
- 12 罗光杰,王世杰,李阳兵,等.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.
Luo G J, Wang S J, Li Y B, et al. Spatio-temporal dynamics and ecological service function assessment of slope farmland in Karst areas of Guizhou Province, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (11): 233-243. (in Chinese)
- 13 王佳月,辛良杰,戴尔阜.中国典型山区农业水土资源匹配格局变化——以太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区为例.地理研究,2020,39(8):1879-1891.
Wang J Y, Xin L J, Dai E F. Spatio-temporal variations of the

- matching patterns of agricultural land and water resources in typical mountainous areas of China. *Geographical Research*, 2020, 39(8): 1879-1891. (in Chinese)
- 14 杜雪莲. 贵州喀斯特地区水资源研究进展. *科技创新导报*, 2015, 12(13): 96-97.
Du X L. Research progress of water resources in Guizhou karst area. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015, 12(13): 96-97. (in Chinese)
- 15 袁道先, 蒋勇军, 沈立成. *现代岩溶学*. 北京: 科学出版社, 2016.
Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C. *Modern karstology*. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- 16 肖琼. 《西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究》新书简介. *中国岩溶*, 2014, 33(2): 166.
Xiao Q. Brief introduction of the new book “*Study on Major Environmental Geological Problems and Countermeasures in Karst Rocky Mountain Area of Southwest China*”. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(2): 166. (in Chinese)
- 17 曾得峰, 周宗敏. 喀斯特区域水安全评价指标体系研究——以贵阳市为例. *环保科技*, 2007, 13(3): 1-6.
Zeng D F, Zhou Z M. Study on water security evaluation index system in Karst region—A case study of Guiyang City. *Environmental Protection and Technology*, 2007, 13(3): 1-6. (in Chinese)
- 18 Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, et al. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 2017, 356: 1180-1184.
- 19 Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Vegetation greening intensified soil drying in some semi-arid and arid areas of the world. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292-293: 108103.
- 20 Madadgar S, AghaKouchak A, Farahmand A, et al. Probabilistic estimates of drought impacts on agricultural production. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(15): 7799-7807.
- 21 Zhu X R, Liu H Y, He W Q, et al. Regolith water storage patterns determine vegetation productivity in global karst regions. *Geoderma*, 2023, 430: 116292.
- 22 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 等. 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.
- Jiang Y J, Liu X M, He S Y, et al. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7092-7097. (in Chinese)
- 23 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践. *地球学报*, 2008, 29(3): 355-365.
Yuan D X, Zhang C. Karst dynamics theory in China and its practice. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 355-365. (in Chinese)
- 24 Wu L H, Wang S J, Bai X Y, et al. Climate change weakens the positive effect of human activities on karst vegetation productivity restoration in Southern China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106392.
- 25 Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, et al. Limitations of soil moisture and formation rate on vegetation growth in karst areas. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151209.
- 26 Zeng S B, Liu Z H, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. *Nature Communications*, 2019, 10: 5749.
- 27 Xiong L A, Bai X Y, Zhao C W, et al. High-resolution data sets for global carbonate and silicate rock weathering carbon sinks and their change trends. *Earth's Future*, 2022, 10(8): e2022EF002746.
- 28 Chen Y Z, Feng X M, Tian H Q, et al. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in China after 2010: A turning point resulting from climate and human interaction. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5848-5864.
- 29 Peng X, Jiang S C, Liu S G, et al. Long-term satellite observations show continuous increase of vegetation growth enhancement in urban environment. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165515.
- 30 Chang J Y, Yue Y M, Tong X W, et al. Rural outmigration generates a carbon sink in South China karst. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2023, 47(5): 655-667.
- 31 Song W Q, Feng Y H, Wang Z H. Ecological restoration programs dominate vegetation greening in China. *Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157729.
- 32 Wang Z J, Liu S J, Li J H, et al. Remarkable improvement of ecosystem service values promoted by land use/land cover

- changes on the Yungui Plateau of China during 2001–2020. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109303.
- 33 Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 245-253.
- 34 Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in Southwest China during recent decade. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- 35 Qi X K, Li Q A, Yue Y M, et al. Rural–urban migration and conservation drive the ecosystem services improvement in China karst: A case study of Huanjiang County, Guangxi. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 566.
- 36 Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, et al. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(2): 210-220.
- 37 蒋志刚. 中国生物多样性红色名录: 脊椎动物. 北京: 科学出版社, 2021.
- Jiang Z G. China's Red List of Biodiversity: Vertebrates. Beijing: Science Press, 2021.
- 38 Currie D J, Paquin V. Large-scale biogeographical patterns of species richness of trees. *Nature*, 1987, 329: 326-327.
- 39 Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, et al. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *PNAS*, 2017, 114(7): 1601-1606.
- 40 He L, Shen J, Zhang Y. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1115-1125.
- 41 Hu Z Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Changes in ecosystem service values in karst areas of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301:107026.
- 42 Ma G X, Wang J N, Yu F, et al. Framework construction and application of China's Gross Economic-Ecological Product accounting. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 109852.
- 43 Wu L H, Wang S J, Bai X Y, et al. Accelerating the improvement of human well-being in China through economic growth and policy adjustment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19: 12566.
- 44 戴尔阜, 王亚慧, 马良, 等. 中国典型山地土地利用变化与资源生态效应. *自然杂志*, 2018, 40(1): 33-40.
- Dai E F, Wang Y H, Ma L, et al. Land use change and its ecological effects in typical mountainous areas in China. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 33-40. (in Chinese)
- 45 潘伯娟, 张迅, 谢元贵, 等. 粮食安全下贵州山区土地整治垦造水田现状及优化对策分析. *绿色科技*, 2022, 24(19): 151-155.
- Pan B J, Zhang X, Xie Y G, et al. Analysis on the current situation and countermeasures of land consolidation and reclamation paddy land based on the background of food security in mountainous areas of Guizhou Province. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(19):151-155. (in Chinese)
- 46 郎贇超, 刘丛强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征. *水科学进展*, 2005, 16(6): 826-832.
- Lang Y C, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Chemical compositions of surface and ground waters of Guiyang City: Discussion of water-rock interaction and contamination in karstic hydrological system. *Advances in Water Science*, 2005, 16 (6): 826-832. (in Chinese)
- 47 Chen F, Wang S J, Bai X Y, et al. Assessing spatial-temporal evolution processes and driving forces of karst rocky desertification. *Geocarto International*, 2021, 36(3): 262-280.
- 48 Liu Q, Meki K, Zheng H, et al. Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change. *Biochar*, 2023, 5(1): 1-25.
- 49 Wu Q F, Lian R Y, Bai M X, et al. Biochar co-application mitigated the stimulation of organic amendments on soil respiration by decreasing microbial activities in an infertile soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(6): 793-807.
- 50 张信宝, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. *地球与环境*, 2013, 41(1): 1-6.
- Zhang X B, Wang S J, Bai X Y, et al. Relationships between the spatial distribution of karst land desertification and

- geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province. *Earth and Environment*, 2013, 41(1): 1-6. (in Chinese)
- 51 Liu S L, Dong Y H, McConkey K R, et al. Scientific concept and practices of life community of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands, and deserts in China. *Ambio*, 2023, 52(12): 1939-1951.
- 52 张卫信, 申智锋, 邵元虎, 等. 土壤生物与可持续农业研究进展. *生态学报*, 2020, 40(10): 3183-3206.
- Zhang W X, Shen Z F, Shao Y H, et al. Soil biota and sustainable agriculture: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3183-3206. (in Chinese)
- 53 Meng F X, Guo J L, Guo Z Q, et al. Urban ecological transition: The practice of ecological civilization construction in China. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142633.

Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China

BAI Xiaoyong^{1,3,4,5,6*} ZHANG Sirui^{1,2} RAN Chen^{1,2} WU Luhua⁷ DU Chaochao¹ DAI Lei¹ YANG Xingyi¹
LI Zilin^{1,5} XUE Yingying^{1,5} LONG Mingkang^{1,2} LI Minghui^{1,5} YANG Shu^{1,5} LUO Qing^{1,5} ZHANG Xiaoyun^{1,5}
SHEN Xiaoqian^{1,5} CHEN Fei¹ LI Qin¹ DENG Yuanhong¹ Hu Zeyin¹ LI Chaojun¹

(1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

4 College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

5 School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

6 CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Institute of Earth Environment,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

7 School of Economics and Management, Tongren University, Tongren 554399, China)

Abstract The karst areas in southwest China are one of the key but difficult areas targeted in the “Beautiful China” construction initiative, which focuses on soil erosion, proportion of farmland, water pollution, karst drought, ecological restoration, carbon sink, ecological effects of urbanization, rocky desertification management indicators, and biodiversity and sustainability assessment. The study synthesizes the knowledge accumulated during ecological restoration practice in karst areas into 10 problems and solutions that are strong, universal and empirically supported. These problems and solutions help to explain the challenges of achieving sustainability in karst ecology restoration and thus point to solutions. They constitute a core set of principles that can guide scientists and governments in addressing sustainability challenges in karst ecological restoration project.

Keywords karst, rocky desertification, rock weathering carbon sink, soil erosion, climate change, ecosystem services, ecological restoration

白晓永 中国科学院地球化学研究所生态环境与资源利用研究中心主任、研究员、博士生导师。主要研究领域:喀斯特生态水文过程、生态修复、全球变化方面等。E-mail: baixiaoyong@vip.gyig.ac.cn

BAI Xiaoyong Ph.D. in physical geography, Professor and Doctoral Supervisor of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Director of Research Center of Ecological Environment and Resource Utilization. His research focuses on karst ecohydrological processes, ecological restoration, global changes, etc. E-mail: baixiaoyong@vip.gyig.ac.cn

■责任编辑:岳凌生

*Corresponding author