

DOI: 10.20103/j.stxb.202312182752

肖杰,方若男,熊康宁,杨依玲,黄云婷.农林生态系统功能优化对石漠化生态修复的作用.生态学报,2024,44(21):9708-9722.

Xiao J, Fang R N, Xiong K N, Yang Y L, Huang Y T. Scientific approaches to enhance agroforestry ecosystem functions in the ecological restoration of karst desertification regions. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9708-9722.

农林生态系统功能优化对石漠化生态修复的作用

肖 杰^{1,2}, 方若男², 熊康宁^{2,*}, 杨依玲², 黄云婷²

¹ 贵州工程应用技术学院生态工程学院, 毕节 551700

² 贵州师范大学喀斯特研究院 / 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550025

摘要: 农林生态系统模仿自然生态系统的组配, 结合多年生木本植物、农作物和/或畜禽养殖, 有效地促进石漠化区退化生态系统的恢复, 提供了重要的物质产品和生态服务。农林生态系统能否持续地供给物质产品和生态服务的关键问题, 取决于对其生态系统功能的优化和生态产品供给能力的提升。将关系到农林生态系统在石漠化治理中的持续性贡献和保护恢复生态价值的有效性。基于国内外相关综述和实证分析, 重点从内涵、关系和优化提升方案方面进行探讨。(1) 剖析了要素与性能在石漠化治理农林生态系统功能优化与生态产品供给能力提升中的内涵体现, 明确了要素与性能在石漠化治理农林生态系统的具体作用机理;(2) 总结了农林生态系统功能优化与生态产品供给能力提升的关系, 指出可持续地向不同利益群体提供生态产品是促进石漠化生态修复的重要环节;(3) 探讨了因果网络模型在石漠化治理农林生态系统中的应用, 并分析了要素与性能之间级联关系在构建优化提升方案实现途径中的可能性。本研究为科学推进石漠化综合治理提供实用价值和理论参考, 适用于其他生态脆弱区, 有助于探索优化生态系统功能并提升生态产品供给能力的相关问题。

关键词: 农林复合; 生态产品; 供给能力; 优化; 提升; 石漠化治理区

Scientific approaches to enhance agroforestry ecosystem functions in the ecological restoration of karst desertification regions

XIAO Jie^{1,2}, FANG Ruonan², XIONG Kangning^{2,*}, YANG Yiling², HUANG Yunting²

¹ School of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China

² School of Karst Science, Guizhou Normal University, State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550025, China

Abstract: Agroforestry ecosystems mimic the composition of natural ecosystems by combining perennial woody plants, crops, and/or livestock farming. This effectively promotes the restoration of degraded ecosystems in karst desertification areas, providing essential material products and ecological services. The key to whether agroforestry ecosystems can sustainably supply material products and ecological services lies in optimizing their ecosystem functions and enhancing of their capacity to supply ecological products. This will be related to the sustainable contribution of agroforestry ecosystems in karst desertification control and the effectiveness of protecting and restoring ecological values. Based on domestic and international relevant reviews and empirical analyses, the manuscript focuses on the discussion of the connotation, relationship, and optimization improvement scheme. (1) Analyzing the connotation of elements and performance in optimizing agroforestry ecosystem functions and enhancing ecological product supply capacity for karst desertification control, and clarifying the specific mechanisms by which these elements and performance roles contribute to such control; (2) Summarizing the relationship between optimizing agroforestry ecosystem functions and enhancing ecological product supply capacity, and highlighting that sustainably providing ecological products to various stakeholders is crucial for

基金项目: 贵州省科技计划重大专项(黔科合平台人才[2017]5411号); 贵州省哲学社会科学规划重大专项(21GZZB43)

收稿日期: 2023-12-18; **采用日期:** 2024-09-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiongkn@gznu.edu.cn

promoting ecological restoration in karst desertification areas; (3) Exploring the application of causal network modeling in karst desertification control within agroforestry ecosystem, and analyzed the cascading relationships between elements and performance to assess the feasibility of developing pathways for optimization and enhancement strategies. The research approach of this manuscript provides practical value and theoretical reference for scientifically advancing comprehensive karst desertification control. It is applicable to other ecotones and helps explore issues related to optimizing ecosystem functions and enhancing the supply capacity of ecological products.

Key Words: agroforestry; ecological products; supply capacity; optimization; enhancement; karst desertification control regions

生态产品的形成根本上依赖于生态系统中生物生产的关键作用^[1-2]。其中,生态系统功能的形成与生态产品供给能力的水平^[3],成为衡量生物生产作用的重要核心。随着生态脆弱区“变绿”工程的实施,荒漠化和沙化土地面积及严重程度显著减少^[4],但部分地区生态系统质量问题凸显^[5-7]。如生境退化^[8]、自然资源禀赋重视不足^[9-10]和生物同质化^[11]等问题阻碍了生态产品的全面供给。为扭转这一局面,国家发改委和自然资源部联合印发的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》(下称“双重”总体规划)纲领性文件指出,中国生态保护与修复须从单一目标转向系统性和综合性,提升区域生态系统整体功能(图1)。这成为中国积极响应联合国生态系统恢复十年计划的重要生态文明建设行动^[12]。关键在于解决导致生态产品供给不足及其品质低下的根本原因:生态系统功能退化和生态产品供给能力不可持续性。优化生态系统功能与提升生态产品供给能力虽非新议题^[7, 13-14],但行动滞后。在“双重”总体规划期间,亟须正视该问题,通过应对环境外部性,保护生态系统功能和完整性,保障生态产品的价值实现。



图1 “双重”规划体现围绕生态系统功能优化的示意图

Fig.1 China's Master Plan for Major National Projects to Protect and Restore Important Ecosystems (2021—2035) reflects a schematic diagram centred around the optimisation of ecosystem functions

为响应“双重”总体规划目标,生态脆弱区已开展大量保护和修复工作^[15-17],但在优化生态系统功能和提升高品质生态产品供给方面仍相对罕见。全球生态恢复趋势表明,多数生态治理工程在提高植被覆盖率方面取得显著成效^[18],并逐渐重视人工林(草)的修复优势,但未能解决功能退化、供给能力下降及生物多样性锐减的问题^[19-21]。例如,黄土高原的治理工程强调生态恢复效益,但未充分考虑植被生态功能的可持续性^[22],青藏高原实施的围栏禁牧措施影响了物种迁徙^[23]。石漠化综合治理也面临类似挑战^[24-25]。因此,科

学推进石漠化治理成为迫切目标,需促进生态产品与特色产业的结合^[26–27],包括恢复生态系统功能,提升生态产品价值,寻求自然恢复为主的多元化解决方案^[28–29]。这些倡议与石漠化特征相关,如生态环境脆弱性、不合理人类活动、气候影响、土地退化形式、土壤特殊性、石漠化演变及治理复杂性^[30–32]。因此,基于自然的解决方案对于科学推进石漠化治理、优化生态系统功能和提升生态产品供给能力变得越来越迫切。

研究表明,石漠化区的林草植被保护修复未能充分转化生态资源优势,偏向于生态恢复效益,忽视了物质产品和生态服务能力的提升^[33–36],同时,该区域的边际土地和受治理土地面临生态保护修复与耕地稳产和粮食供给保障的权衡^[37–38]。因此,基于自然的解决方案(Nature-Based Solutions, NBS)的采用,在石漠化治理中协同多方利益尤为重要。NBS 通过将生态过程纳入人类影响的环境,并结合工程与技术实现可持续发展与生态系统服务供给^[39],从而为深入了解石漠化综合治理的需求提供了深刻洞见。鉴于可持续发展的迫切需求,农林生态系统的生态、社会和经济效益展示了其作为 NBS 的潜力^[40]。多年的农林生态系统研究表明,这些系统具备满足石漠化治理 NBS 需求的潜力^[41–42]。一是通过坡改梯实现生态农业立体化,增加生态服务供给,确保粮食安全^[43–46]。如针对喀斯特地区独特的土地退化形式及土壤特性,贵州关岭-贞丰花江喀斯特高原峡谷区通过组合不同农林生态系统实现了生态恢复与粮食安全及生计多样化的协调性^[41, 47]。广西平果龙河屯喀斯特峰丛洼地区则采用“粮-果-经-林”措施促进了生态恢复与农业结构调整^[48]。二是综合策略利用边际土地填补林草植被保护修复措施的空缺,实现水土保持、生态资源增量和社会经济效益目标^[44, 49–51]。如贵州兴义市、毕节市、四川筠连县及印度尼西亚 Gunungkidul 县等石漠化区通过各自地域特色发挥了农林生态系统的生态与社会经济效益^[52–56],减少了人类活动对表层喀斯特带的干扰,降低了石漠化的严重程度。这些案例表明农林生态系统能够最小化石漠化治理中的权衡,并放大生态与社会经济的多元共益。因此,以农林生态系统的 NBS 优势为引领,通过优化生态系统功能,提升生态产品供给能力,科学推进石漠化治理,其中要素与性能的优化和提升至关重要(图 2)。

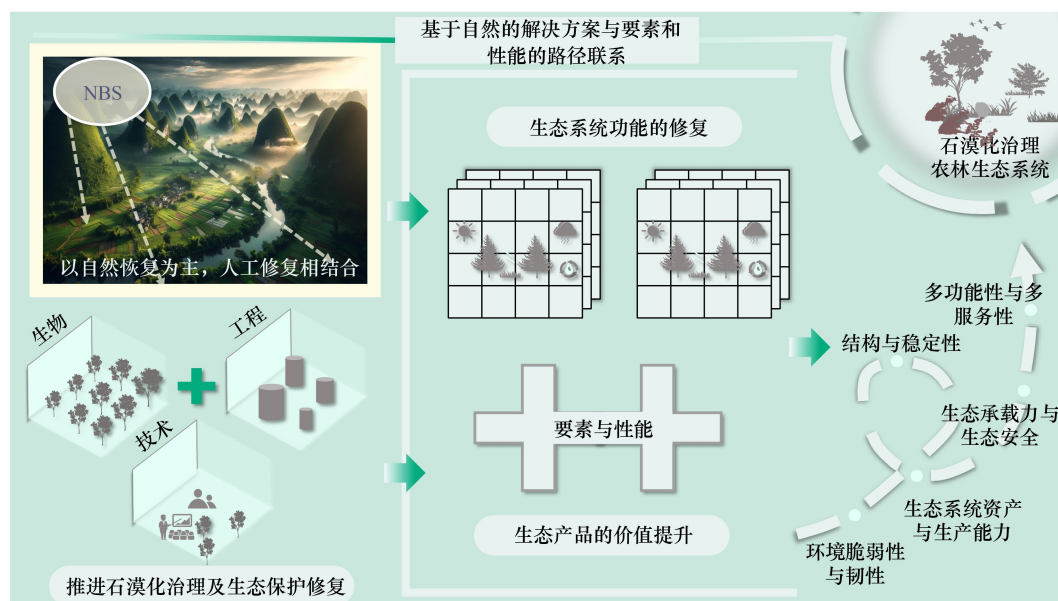


图 2 基于自然解决的方案(NBS)在石漠化治理体现生态系统功能与生态产品供给能力应用示意图

Fig.2 A schematic diagram illustrating the application of Nature-Based Solutions (NBS) in karst desertification control, highlighting ecosystem function and the capacity to provide ecological products

随着研究深入,生态系统功能和生态产品供给能力之间的联系仍未清晰揭示。例如,在党和政府提倡的“保护优先、自然恢复为主”的方针下,需要将喀斯特地区丰富的生态资源转化为促进区域发展的优势^[28],实现生态保护与经济的双赢。强调了绿水青山转变金山银山过程的重要性,而在转化过程中生态系统功能

的优化和供给能力的提升则是核心。然而,植被覆盖的“变绿”速度过快,但土壤固持和水源涵养等关键服务恢复滞后^[57-58],影响石漠化治理和生态服务的可持续性^[59],此外,气候变化和人类活动强度引起的生态系统服务供给波动,导致供需矛盾^[60-62],表明了提升生态产品供给能力的迫切性。

总结来看,优化要素与性能已成为生态系统功能和生态产品供给能力研究的热点,脆弱性与韧性^[63]、结构与稳定性^[64]、生态系统资产与生产能力^[65-66]、以及相关驱动因素对多功能性与多服务性之间影响^[67]等方面得到证实,但仍存在以下不足:现有研究较多从单要素及性能机理相关的论证和总结,而忽视了从系统性和综合性角度,整合要素与性能探讨农林生态系统的内在机理与规律^[68]。石漠化治理农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的内涵及二者关系尚未得到明确回答。据此,本文以石漠化治理农林系统为研究对象,结合理论和案例,重点回答石漠化治理农林系统如何体现生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的内涵及二者之间的关系,要素与性能如何实现等问题,以期为保护修复实践者和相关决策者提供参考依据。

1 农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的内涵

1.1 农林生态系统概念及生态系统功能及生态产品供给能力的解构

为回答本文第一个问题,理解石漠化治理农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的内涵和关系之前,还需对相关定义和概念进行梳理和诠释。首先,与普遍认知中将农业和林业视为两个独立生态系统构成的广义农林概念不同,农林生态系统(Agroforestry ecosystem)的定义具有特定的区别性。该生态系统基于多年生木本植物,将农作物和/或畜禽养殖融入至少一种以上的成分,形成时间序列清晰、层次分明且以生态相互作用的农林生态系统^[69-70]。这种半自然生态系统通过结合生物生产与人类社会生产劳动,有效地提供了多样化的物质产品和生态服务^[27,71-72]。因此,在图3中,内半圆代表农林生态系统,作为提供这些物质产品和生态服务(内半圆的外沿)的物理承载实体核心。

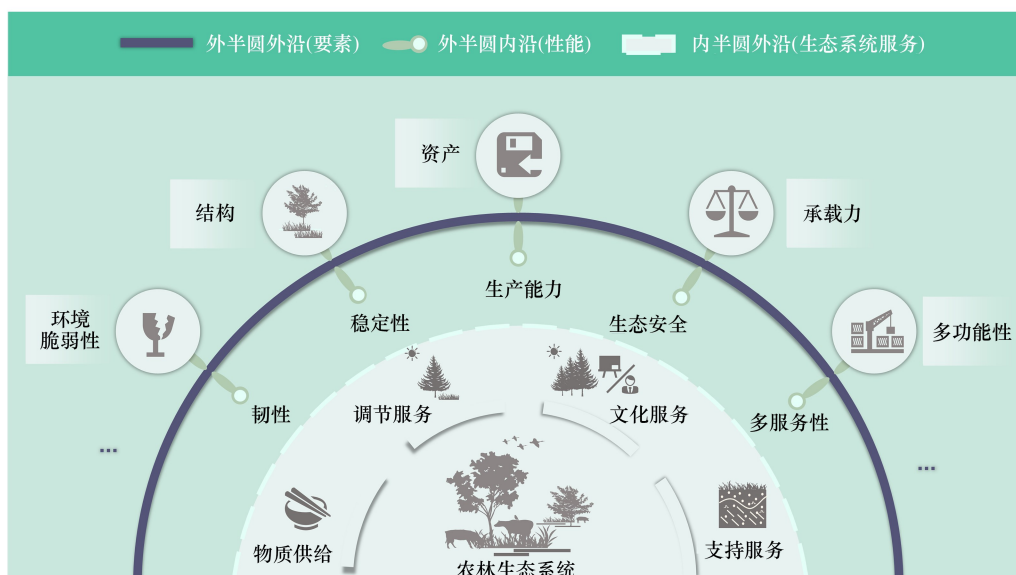


图3 要素与性能的关系示意图

Fig.3 Element and performance relationship diagram

其次,农林生态系统满足人类需求物质产品和生态服务的能力,需要通过生态系统生态学的视角,从生态系统功能和生态产品供给能力两个方面进行考量。本文依据 de Groot 等学者^[73]提出的定义,将生态系统功能视为自然过程和组分提供直接或间接满足人类需求的物质产品和生态服务的能力。与传统生态学定义不同^[74-75],该定义强调生态系统功能是生态过程的子集,而非自然属性。一方面,通过系统性和综合性的角度剖析该定义的内涵。依据 de Groot 等学者^[3]的补充阐述,即自然过程和组分是生态系统中生物群落和环境条

件通过物质和能量的普遍驱动力所进行的复杂相互作用的结果。因此,将农林生态系统的自然过程和组分拆分为环境脆弱性、结构、资产、承载力和多功能性(生物地球化学及物理的生态过程)等要素(外半圆的外沿),作为理解生态系统功能的运作要素,并视为农林生态系统功能优化的对象。另一方面,又据 de Groot^[76]、Heink 和 Jax 等学者^[77]的观点,人类的使用不应不可逆地损害生态系统的完整性和其自然过程及组成部分,应当不超过生态系统整体运作能力的界限内进行可持续利用。生态系统功能的可持续性利用水平退化会导致生态系统提供的物质产品和生态服务的能力下降。生态产品供给能力水平下降问题可通过与运作要素相对应的性能划分和理解。包括韧性、稳定性、生产能力、生态安全和多服务性(人与自然共同需求的多种生态服务的共同供给)等性能(外半圆的内沿)。这表明,由这些性能组成的可持续利用水平能有效评估和反映生态产品供给能力的当前状况,成为生态产品供给能力提升的对象。通过这种划分,使生态系统功能和生态产品供给能力的关系理解更加清晰具体,同时为优化生态系统功能和提升生态产品供给能力提供实用性和可操作性的指导。

1.2 农林生态系统功能优化的内涵

依据上述内容,石漠化治理农林生态系统功能优化的内涵变得清晰。即结合石漠化防范和治理的需求及复杂性,在表层喀斯特带的退化生境上,通过优化由参与治理多年生木本植物和农作物等相互依存组成部分构成的系统整体效能。这种优化关注石漠化治理农林生态系统功能如何直接或间接地满足人类需求的产品与服务。自然生态系统具备提供产品和服务的功能,但生态恢复和管理的半自然生态系统也可以成为优化生态系统功能的对象。以往研究表明,农林生态系统模拟自然生态系统的运作方式,其组分通过自然选择逐渐发展,增强了对环境变化的适应能力和可持续性^[78]。因此,农林生态系统也具备通过自然生态系统的环境脆弱性、结构、资产、承载力和多功能性等要素的相互作用,从而构成优化其生态系统功能的基础条件^[68]。

上述观点可通过相关研究逐一阐释和论证。按照 de Groot 等学者根据生态系统功能对自然过程和人类利益的作用和贡献,对生态系统功能分类的划分依据^[3],生态系统功能可以分为支持功能、调节功能、产出功能和信息功能。在石漠化治理中,农林生态系统的这四类功能及其相互作用可以通过干扰传递途径来阐明。(1)支持功能。与未治理土地相比,农林生态系统通过光合作用固碳和生物固氮改善土壤特性^[43]。如不同治理模式中,农林治理模式下土壤碳氮含量是对照及其他模式的 1.08—2.53 倍,且多样性指数更高^[79]。然而,气候变化和人类活动对喀斯特干旱、土壤水分和养分分布的影响^[80],加剧了生态恢复的盲目性和经济效益的短视追求^[81],使得养分循环、水循环及生境对外部环境变化更加敏感,增加了环境脆弱性。(2)调节功能。由于环境脆弱性导致喀斯特生态系统恢复生境的资源条件变化^[82]影响农林生态系统的物种组成和层次结构,削弱调节功能^[52],如小气候调节、土壤保持和病虫害控制。如与林草间作果园模式相比,单作经果林地缺乏必要的植物篱保护措施,导致调节及支持服务效益降低了 21.13%—558.94%^[53]。(3)产出功能。环境脆弱性增加导致生态调节作用减弱,物种组成和结构变化使生态资源和生态系统资产存量改变^[54],引起农林生态系统承载力过载,损害其产出功能,如食物、木材和药材的生产。如与合理物种组配相比,仅选择藤本与草本植物组合模式的投入产出比欠佳^[83],削弱了产出功能。(4)信息功能。在前述各个组分相互作用的基础上,生物多样性与喀斯特水文地质条件、土壤及生境特化密切相关^[84],共同支持多重生态过程。如生物多样性的减少与石漠化环境的负面互动,导致农林生态系统对环境恢复景观美学、乡土知识传播和旅游休闲等信息功能的支持能力下降^[85—86]。因此,通过调理环境脆弱性、优化结构、重组生态系统资产、重构承载力和优化多功能性等措施,可以加强农林生态系统的功能运作,巩固其生态产品形成的物质基础。

通过上述例子可见,石漠化治理中的农林生态系统适应干扰能力和可持续性是有条件的,不宜视为一劳永逸的措施。气候变化、人为干扰和表层喀斯特带资源与环境条件的限制^[87—89],以及碳酸盐岩露头对植被种类、生产力和生长形态的约束^[90],使农林生态系统难以通过单一农艺管理措施解决这些问题。这种半自然生态系统功能需优化和维护,确保其长期效能。与非喀斯特区相比,农林生态系统在治理喀斯特退化环境中的恢复机制研究尤为重要。将喀斯特水文地质背景、农林生态系统的土地生产力改良及物种与生境保护恢复特

性结合,关注表层喀斯特带石漠化资源与环境限制条件,通过调整物种组成和结构配置,促进对农林生态系统功能优化的理解。

因此,作为生物有机整体,农林生态系统提供支持、调节、产出和信息等多种功能,其要素是生产和维持生态产品的物质基础。环境脆弱性、结构、生态系统资产、承载力和多功能性的调控和优化对于提供物质产品和生态服务至关重要。归纳了农林生态系统功能优化内涵的要点:(1)重视生态系统为生产主体的基础,对农林生态系统整体及组成部分进行优化,阐明了生态系统功能优化与生态系统过程的自然属性优化调整的边界关系;(2)基于生态系统生产主体运作条件,对农林生态系统生物生产功能运作环境、内部结构组成、资产、承载力和多功能性等要素进行优化,明确了生物生产功能优化与生物生理机体功能优化的边界关系;(3)从强调人地关系的平衡和调和上,将农林生态系统生物生产劳动为主与人类社会生产劳动的投入为辅相结合进行整体功能优化,诠释了兼顾生态保护和生产功能相平衡的优化与纯粹生产功能优化的边界关系。

1.3 农林生态产品供给能力提升的内涵

农林生态产品供给能力提升的内涵旨在提高石漠化治理农林生态系统功能的可持续利用水平。该提升关注农林生态系统功能运作要素相对应的性能,是否能够直接或间接地可持续供给石漠化生态脆弱区的产品与服务。相关学者^[91]通过经济学视角认为,生态产品生产能力和社会资源配置能力可视为生态产品的供给能力的组成部分,但本文将重点放在农林生态系统功能运作要素与其相应性能上。关注其在可持续性利用水平上的表现,以衡量和描述生态产品的供给能力,还强调重视农林生态系统参与治理恢复石漠化生态系统的整体生物生产的物质本性,深入探讨农林生态系统中与要素相对应的韧性、稳定性和生产能力等内在的动态和机制,以及如何通过自然选择满足人类社会需求的物质产品和生态服务。在此基础上,关注以健康度和完整性为代表的生态安全,作为保障生态产品供给能力的核心基础,探究农林生态系统中生物多样性如何维持支持、调节、产出和信息等功能,提升其提供多个物质产品和生态服务的能力,促进农林生态系统生物体及其环境条件的保护与提升。因此,生产能力的提高和社会资源配置的优化对于生态产品供给能力的维护和提升至关重要,然而,提升农林生态系统功能运作要素的性能是理解生态产品供给能力可持续性的关键。

相关实例可以逐一阐释这些观点。为调理环境脆弱性对农林生态系统的影响,需采取措施提升其韧性^[92]。包括优化生物组分(耐旱和喜钙乡土物种)与石漠化生境恢复条件(缓坡土壤养分变化和碳酸盐岩露头屏障作用)的相互关系及稳定性^[93]。例如,可通过调整碳酸盐岩露头周围物种数量、大小和组成结构来改变生境的配置^[94],推动农林生态系统资产存量的重组。有效利用生态系统资产存量是提升农林生态产品生产能力的关键。维护农林生态系统资产可通过提高其健康度和完整性,重构承载力,从而保障生态安全。在此基础上,探讨生物多样性与多功能性和多服务性之间的驱动关系^[95-96],利用不同物种的生态位互补效应进行功能分组,加强农林生态系统生物多样性及其多功能性的探究^[67],有助于提升农林生态系统提供多种物质产品和生态服务的能力。因此,提升韧性、稳定性、生产能力、生态安全和多服务性是持续增强农林生态产品供给能力的关键途径,也是科学改善石漠化整体生态系统质量的方法之一。

上述例子展示了石漠化治理中农林生态系统功能优化对提升生态产品供给能力的协同作用。提升农林生态产品供给能力应优先考虑保护生物体组分及其生境条件^[97-98],这与生态系统功能运作要素密切相关^[99-100]。本质上,这是对生态系统功能运作性能的维护和提升。与非喀斯特区相比,重点在于了解农林生态产品供给能力在石漠化治理中的状况和服务水平。将碳酸盐岩露头、裂隙、表层喀斯特带等含水及养分储存介质,乡土物种深根、抗旱耐碱的适宜性与微生物生境生态位特化相联系,可增强对石漠化治理中农林生态产品供给能力提升的理解。如前所述,资源约束与环境限制条件对石漠化区的影响,突显了特化环境对农林生态产品供给能力提升的重要性。

在石漠化治理恢复环境下,忽视农林生态系统功能运作性能的提升,仅从生产能力和社会资源配置的角度探讨生态产品供给能力是不足的。提升农林生态系统功能运作性能是维护生物多样性和支撑生态产品供给的核心^[101]。因此,归纳了农林生态产品供给能力提升内涵的要点:(1)从生物体的保护角度出发,提升农

林生态系统作为生态产品供给主体及其运作要素的性能,阐明了生物体及其环境条件的保护修复与生物体生理生长状况维护的边界关系;(2)从生态产品供给能力角度出发,提升农林生态系统将生态资源转化为生态产品的可持续性,明确了生态产品的生态价值提升与有限关注其社会经济价值提升之间的边界关系;(3)从人地关系角度出发,重视农林生态系统生物生产的可持续性提升,诠释了关怀责任与命运共同体在促进生态产品供给能力提升方面与效用功利价值观念的边界关系。

2 农林生态系统功能优化与生态产品供给能力提升的关系

与当前研究围绕单要素优化及性能提升方面相比^[63-67],生态系统功能优化与生态产品供给能力提升的关系认知立足于3个事实:(1)生态系统功能的优化是原因,生态产品供给能力的提升是结果。需要将农林生态系统的要素与性能结合起来^[68,93],才能从整体上优化生态系统功能和提升生态产品供给能力;(2)两者关系中偏废其一不可。生态系统功能是生态系统的生物生产作用,生态系统功能的健康状态是提供稳定和可持续生态产品的基础^[102-103]。反之,可能会破坏生态系统的平衡,影响生态产品的供给。(3)通过生态系统功能和生态产品供给能的优化和提升,实现农林生态系统持续地向不同利益群体提供生态产品。对这两者之间的关系优化与提升既满足小农利益群体生计多样化的需求,也兼顾了保护利益群体对生物多样性的保护^[104-105]。因此,基于3个事实的关系认知回答了本文提出的第二个问题。

2.1 优化农林生态系统功能是生态产品供给能力提升的物质基础

农林生态系统在生物生产过程中的优化基于对石漠化治理需求的科学理解和对现有治理工作继承性的考量。从生物生产运作出发,对石漠化治理进行环境脆弱性诊断和调理,选择合适组分和配置群落以优化生态系统结构,改善土地生产力。深入探索多功能性驱动因素,优化耐旱乡土植物配置^[82,106],减少生态位重叠,提升生物多样性利用资源的效率。有效管理农林生态系统资产存量,识别关键干预点^[107]。包括环境脆弱性、物种组成、结构和生态过程都与生物生产实体紧密相关^[108],决定生态产品供给的质量和效率。例如,调节功能和支撑功能是生产功能和信息功能的基础^[3],重构生态承载力确保系统健康和完整性。因此,提升农林生态产品供给能力的关键在于重视并优化生物生产者的功能效用。

2.2 提升农林生态产品的供给能力是维持生态系统功能的持续运转

生态产品供给能力的提升围绕石漠化治理区农林生态系统生物生产的性能进行。农林生态产品的供给能力难以提升时,生态系统中的韧性、稳定性、生产能力、生态安全以及多服务性等各方面性能提升面临挑战。正视表层喀斯特带脆弱性及石漠化基底条件,通过优化农林生态系统功能协同提升生态产品的供给能力。此基础上,继续围绕环境脆弱性的诊断结果,提出增强韧性的策略。这包括根据生态系统结构的稳定性提高农林生态系统群落配置技术水平,分析农林生态系统资源存量的生产能力评估生态系统资产的重组情况。维持并提升以健康度和完整性构成的农林生态系统安全,保障其多功能性和多服务性等方面发挥的最大承载极限。因此,提升农林生态系统的生物生产的性能,确保其在面对喀斯特脆弱环境时的持续健康和生态价值最大化。

3 整合要素与性能实现优化提升方案的途径

明确石漠化治理中农林生态系统功能优化及生态产品供给能力提升的关系,指向了一个核心认识:整合优化生态系统功能的要素及提升生态产品供给能力的性能是科学推进石漠化治理中亟待解决的关键科学问题之一。要素与性能关联到如何更有效地实现生态系统功能的优化和生态产品供给能力的提升,对于保护和恢复石漠化治理农林生态系统,推进农林生态产品价值实现机制显得至关重要。本节基于理论基础、原则条件和模型应用进行深入探讨,回答如何实现整合要素和性能的优化提升方案的第三个问题,试图提供系统而综合的视角,增进对石漠化治理农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的理解。期望这些认识转化为有效的生态系统功能保护和恢复的行动,为石漠化以及其他类似生态脆弱区的生态系统恢复提供重要的启

示和借鉴。

3.1 理论依据

相关研究为认识整合要素与性能实现生态系统功能的优化和生态产品供给能力的提升提供了理论铺垫。郑华等^[109]学者呼吁加强生态系统功能如何形成、维持和变化的理解,尤其是生态系统功能属性的“非线性”和“阈值”特征的深入,但对生态系统功能自身属性(要素与性能)的整体运作缺乏系统性和综合性的探讨。这主要依据热力学能量守恒和熵增定律在揭示生态系统具有开放性、涌现性和层次整体性的属性上进行考虑^[110—111]。生态系统必然受到外部环境扰动的因素波及,进而影响生态系统功能的发挥^[112]。这一观点受到众多学者的支持^[113—114],他们认为外部压力的相互作用是驱动内部因素影响生态系统完整性和生态系统服务变化。暗含了石漠化治理农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的解决线索,可通过级联框架的链式结构将要素与性能串联起来。

该链式结构可通过相关理论支撑推论。鉴于石漠化治理资源和环境条件的限制,可利用生态系统演变理论^[115]探索农林生态系统如何减少环境脆弱性并增强韧性。在石漠化治理环境中,考虑物种生态幅和生态位应对气候变化、表层喀斯特带特性及保护修复活动的影响。明确环境脆弱性后,根据资源供给能力和环境适宜性理论^[116]分析农林生态系统在环境脆弱性约束下的结构与稳定性。依据生态系统资产和生态产品生产的组织结构和生态过程理论^[117],关注农林生态系统资产及其生产能力,强调生态资源的可持续管理和利用。基于生物种群增长与生态环境容量理论和生态系统健康与风险理论^[118—119],聚焦农林生态系统资产作为生态系统组成、结构和过程的物质载体,重构和维护最大生物种群规模的承载能力,提升生态安全。当承载力和生态安全得到维护和保障时,依据生物多样性影响生态系统多功能机制的理论^[120—121],优化农林生态系统以提供多种生态功能,增强满足人类物质产品和生态服务需求的能力,凸显生物多样性在维持和提供必需生态服务及促进人类福祉方面的关键作用。这些理论依据明确了要素与性能在优化提升方案中的重点和边界。

3.2 原则条件

根据原则条件界定整合要素与性能优化提升方案的目标和适用范围,旨在优化石漠化治理农林生态系统功能及提升生态产品供给能力。这包括增强生态系统韧性、优化结构提升稳定性、重组资产及提高生产能力,同时保障生态安全、重构承载力并提升生物多样性为核心的多功能性及服务供给。区域案例已经表明,农林生态系统在喀斯特退耕还林区成为优先选择^[46],该方案主要适用于喀斯特石漠化区、非石漠化区以及其他生态脆弱区中退耕还林区域,尤其是喀斯特退耕还林区,通过推广植物篱和生物田埂的形式采用农林业进行表层喀斯特带水土保持和石漠化土地改良^[42—43]。并整合非封山育林区边际土地中的庭院花园(Homegardens)和农用造林(Agrisilvicultural)等多种类型的生态资源,形成土地共享利用模式,控制不可持续农业活动,保护封林区的生态恢复。适用具体范围包括表层喀斯特带生境、多年生木本植物、农作物和畜禽养殖等物种的组成、结构和功能生产等多个生态系统组成部分的优化提升。实施方案时,应考虑特定区域的生态特征和社会经济因素,以确保有效实施和达到目标。

3.3 因果网络模型的应用:深化级联框架

级联框架及其结构对分析生态系统相关主题或解决相关环境问题具有重要意义。随着理论依据和原则条件的厘清,整合要素与性能体现了级联框架的链式结构思路。理解级联框架存在不同的理解差异,但大多数研究强调生物物理结构和过程与人类福祉之间的密切联系,为整合要素和性能提供了基本的理论支撑。Haines-Young 和 Potschin 等学者^[122]开发的“瀑布模型”从因果链角度识别生态系统的功能特性、服务产生及其价值,为后续的实证研究和应用分析提供了“原型逻辑”和“初代模板”的基础。随后,通过更深入地研究生态过程在生态系统服务提供中的作用^[123],对生态系统服务供需关系的探索^[124]和生态系统服务的可持续性再度关注^[125],对级联框架的理解得以加深。这些研究揭示了级联框架的基本原理在于探讨生态系统的组织和运作方式,理解和评估生态系统服务如何被提供以及如何实现其潜在用途和附加价值。因此,该框架的可迭代更新属性,为理解和整合要素与性能,以实现石漠化治理农林生态系统功能优化及生态产品供给能力提

升方面提供了条件。

随着级联框架的应用逐渐成熟,其在分析复杂的社会环境因果关系时,应对相关因素和条件的动态变化、指导政策制定和解决系统性问题等方面存在局限性^[126—128]。增强型因果网络环境问题分析模型(Enhanced the driving force-pressure-state-impact-response modal, e-DPSIR)的结合可克服该局限性引起系统性不足的问题^[129],提供了更全面和动态的管理和分析工具。相较于级联框架中结合 DPSIR 模型^[130],e-DPSIR 模型在描绘驱动力、压力、状态、影响和响应之间的复杂相互作用更为明确,它能够通过查看其中多个因果链的因果网络来解决要素与性能等指标之间的关系,避免忽视关键指标在分析性问题解决逻辑中的功能,按照“发生了什么,为什么会发生,怎么样去处理,作出什么样的反应”的因果逻辑关系实现量化分析,全面地理解和管理石漠化治理农林生态系统功能优化,并对生态产品供给能力提升提供指导。

本文根据石漠化治理农林生态系统绘制了理解该因果网络在级联框架中的应用路径。图 4 的左侧展示级联框架以瀑布形式有效地强调农林生态系统功能的运作要素和生态产品供给能力性能之间的生成和传递过程,但在捕捉背后的复杂社会、经济和环境驱动力方面可能存在一定局限。图 4 右侧显示,为弥补这一缺陷,e-DPSIR 模型被引入该框架,自上而下地描绘了驱动力、压力、状态、影响和响应之间的复杂相互作用的因果网络。特别是在石漠化治理恢复环境背景下,e-DPSIR 模型帮助识别表层喀斯特带资源和环境的限制条件,以及人类活动对农林生态系统状态的影响。这种影响涉及生态系统本身运作方式,包括环境脆弱性、结构、生态系统资产、承载力和多功能性,还涉及其生态产品的供给和质量。

级联框架可能不够充分地描述农林生态系统功能的要素和生态产品供给能力的性能随时间变化的动态

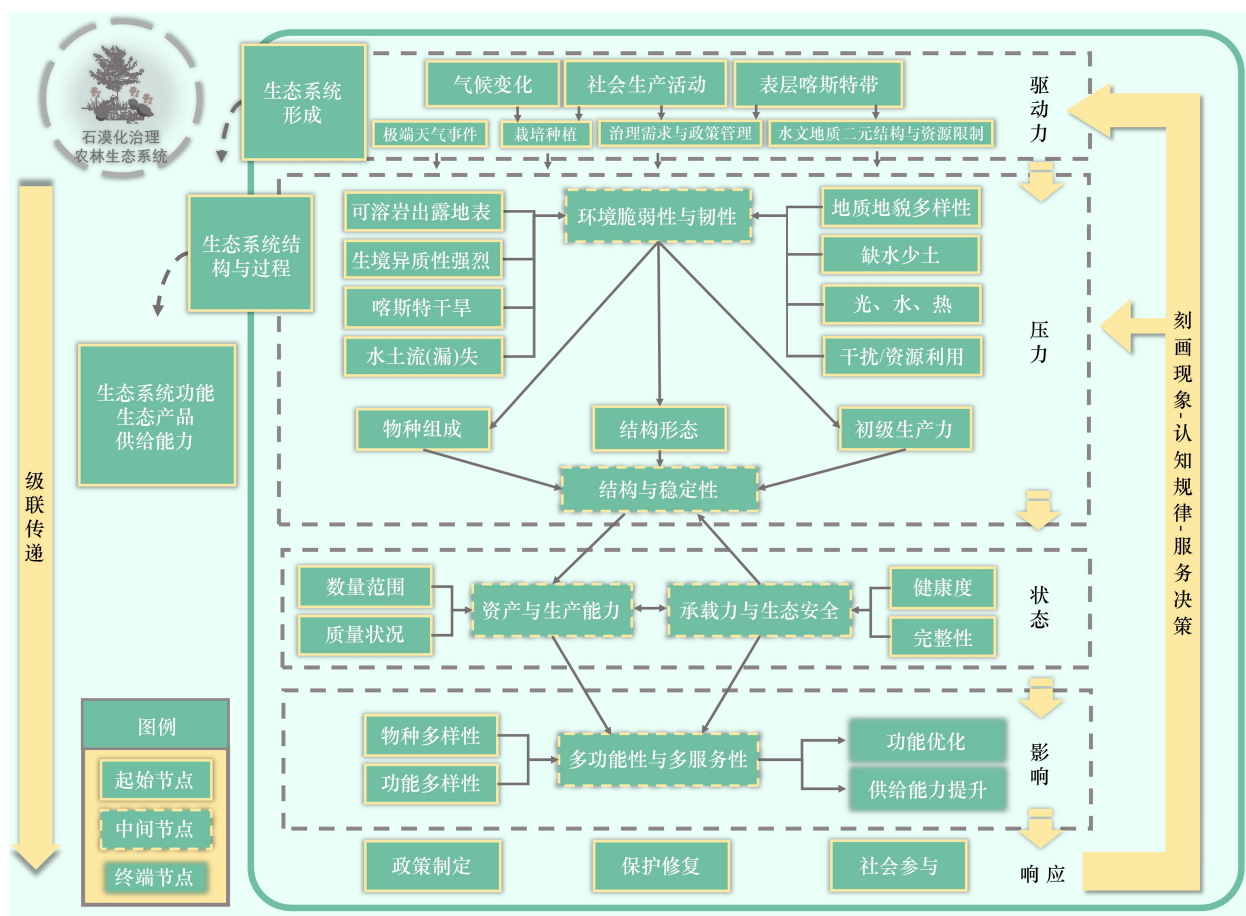


图 4 将因果网络模型与级联框架结合起来实现现象-规律-决策的研究路径示意图

Fig.4 Diagram illustrating the research pathway that combines the causality network model with the cascade framework to achieve the study of phenomena, laws, and decision-making

特性,特别是在石漠化治理恢复环境和人类活动干扰引起的变化方面。图 4 所示的驱动力层和压力层的多因素交互作用起始节点出发,e-DPSIR 模型通过强调时间和空间的动态变化,增强了对农林生态系统功能及其生态产品供给能力随环境和社会变化趋势的把握。这在应对由气候变化、社会生产活动、表层喀斯特带等驱动极端天气事件、相关木本植物及作物的栽培种植、农艺管理措施、石漠化治理需求与政策管理,以及水文地质与资源限制条件尤为关键。该框架从压力-状态-影响三个层面的中间节点和终端节点展现了环境脆弱性和韧性、结构与稳定性、生态系统资产与生产能力、承载力与生态安全和多功能性与多服务性等要素和性能,按照级联的因果路径构成了有助于分析和跟踪的整体网络关系。

在政策制定和管理决策方面,级联框架可能不足以直接指导具体的决策实施。相比之下,e-DPSIR 模型自上而下地为“响应”层面提供更加明确的决策思路(图 4),制定和评估针对特定环境问题和潜在环境情景的政策和管理措施。例如,政策制定者、小农经营者以及生态保护和修复实践者可以利用 e-DPSIR 模型评估特定环境驱动力和压力(如表层喀斯特带环境脆弱性下水土流(漏)失负面效应^[131]、特有干旱及养分的空间异质性^[132—133]、碳酸盐岩露头受辐射增温^[134]、洼地小气候资源异质性^[135]等)对农林生态系统整体运作状态(如物种组成、结构和过程等)的影响结果,并据此制定相应的管理策略。级联框架在全面识别和解决农林生态系统功能退化和生态产品供给能力下降的根本原因方面可能有所不足。运用 e-DPSIR 模型提供系统性的方法进行探索分析,有助于识别造成功能退化和供给能力下降的根本原因,为这些问题提供更全面的解决方案。

4 结论与展望

本文从系统性和综合性角度探讨了如何通过整合要素与性能,优化和提升石漠化治理农林生态系统功能及其生态产品供给能力,对巩固石漠化区生态恢复成效及提升生态系统整体质量具有重要意义。首先,阐释了农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的内涵,即在表层喀斯特带退化生境上,优化多年生木本植物和农作物等组成部分,提升农林生态系统功能的可持续性。明确了要素和性能优化的重点。其次,揭示了功能优化和供给能力提升的关系,指出要素是提升供给能力的基础,性能提升确保功能持续运转。强调了功能优化和供给能力提升在管理中的重要性,并与 NBS 联系,凸显其在石漠化治理中的应用。最后,提出将生态系统服务级联框架与 e-DPSIR 模型结合,整合要素与性能优化提升方案,通过现象-规律-决策分析,提升资源环境限制和社会经济驱动力及压力因素分析的深入性。此方案有助于更好地理解农林生态系统在科学推进石漠化综合治理提供关键见解和科学路径的重要性,也为其他生态脆弱区对生态系统功能与生态产品供给能力关系的理解提供了科学参考。

为更好地整合要素与性能级联关系,增进对农林生态系统功能优化与生态产品供给能力提升在石漠化治理中的理解,需要一个更广泛的概念框架,未来需综合考虑以下关键问题和发展方向:(1)机理研究,亟须通过不同尺度探索表层喀斯特带不同石漠化发生程度中,要素与性能相互作用对农林生态系统功能优化和生态产品供给能力提升的影响。(2)评价体系。根据石漠化治理不同农林生态系统和表层喀斯特带资源与环境条件,应有效整合要素与性能的指标,实现对其生态系统功能和生态产品供给能力的客观实际评估。(3)优化提升方案,针对性地将要素与性能的驱动因素与不同利益群体需求结合,可提出石漠化治理农林生态系统功能与生态产品供给能力的优化提升方案。(4)优化提升方案的适应性调整评估。在实施方案时,应考虑不同尺度、地域和阶段的适应性,促进生态产品价值向经济价值的转换,确保效果和可持续性。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997: 3-6.
- [2] 张林波,虞慧怡,郝超志,王昊,罗仁娟.生态产品概念再定义及其内涵辨析.环境科学研究,2021,34(3):655-660.
- [3] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics, 2002, 41(3): 393-408.

- [4] 国家林业和草原局.我国首次实现所有调查省份荒漠化和沙化土地“双逆转”.(2022-12-31)[2024-9-18]. <https://www.forestry.gov.cn/search/80293>.
- [5] 张云芝, 胡云锋, 韩月琪, 战胜. 全球主要生态退化区和研究热点区的空间分布与演变. 生态学报, 2021, 41(19): 7599-7613.
- [6] Zhang J Z, Fu B J, Stafford-Smith M, Wang S, Zhao W W. Improve forest restoration initiatives to meet Sustainable Development Goal 15. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(1): 10-13.
- [7] Wu X, Lü Y H, Zhang J Z, Lu N, Jiang W, Fu B J. Adapting ecosystem restoration for sustainable development in a changing world. *The Innovation*, 2023, 4(1): 100375.
- [8] Zheng L, Wang Y, Li J F. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: a multi-temporal dimensional comparison between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of China. *Land Use Policy*, 2023, 125: 106463.
- [9] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, Li Y J, Feng Y H, Wang S, Wei F L, Zhang L W. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China's Loess Plateau. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 336.
- [10] Liu Y Y, Lian J J, Chen H S. Assessment of the restoration potential for ecological sustainability in the Xijiang River Basin, Southwest China: a comparative analysis of Karst and non-Karst areas. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168929.
- [11] Gao G F, Li H, Shi Y, Yang T, Gao C H, Fan K K, Zhang Y H, Zhu Y G, Delgado-Baquerizo M, Zheng H L, Chu H Y. Continental-scale plant invasions reshuffle the soil microbiome of blue carbon ecosystems. *Global Change Biology*, 2022, 28(14): 4423-4438.
- [12] Fu B J, Liu Y X, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad033.
- [13] 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.
- [14] Xu Z H, Peng J. Ecosystem services-based decision-making: a bridge from science to practice. *Environmental Science & Policy*, 2022, 135: 6-15.
- [15] 鄢继尧, 赵媛. 近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望. 南京师大学报: 自然科学版, 2020, 43(4): 74-85.
- [16] Wei Y J, Zhen L, Du B Z. The evolution of desertification control and restoration technology in typical ecologically vulnerable regions. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(5): 775-785.
- [17] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 姚彩萍, 牛亚毅. 中国生态脆弱区全球变化风险及应对技术途径和主要措施. 中国沙漠, 2022, 42(3): 148-158.
- [18] Mo L D, Zohner C M, Reich P B, Liang J J, de Miguel S, Nabuurs G J, Renner S S, van den Hoogen J, Araza A, Herold M, Mirzaghali L, Ma H Z, Averill C, Phillips O L, Gamarra J G P, Hordijk I, Routh D, Abegg M, Adou Yao Y C, Alberti G, Almeyda Zambrano A M, Alvarado B V, Alvarez-Dávila E, Alvarez-Loayza P, Alves L F, Amaral I, Ammer C, Antón-Fernández C, Araujo-Murakami A, Arroyo L, Avitabile V, Aymard G A, Baker T R, Balazy R, Banki O, Barroso J G, Bastian M L, Bastin J F, Birigazzi L, Birnbaum P, Bitariho R, Boeckx P, Bongers F, Bouriaud O, Brancalion P H S, Brandl S, Brearley F Q, Brienen R, Broadbent E N, Bruelheide H, Bussotti F, Cazzolla Gatti R, César R G, Cesljar G, Chazdon R L, Chen H Y H, Chisholm C, Cho H, Cienfiala E, Clark C, Clark D, Colletta G D, Coomes D A, Cornejo Valverde F, Corral-Rivas J J, Crim P M, Cumming J R, Dayanandan S, de Gasper A L, Decuyper M, Derroire G, DeVries B, Djordjevic I, Dolezal J, Dourdain A, Engone Obiang N L, Enquist B J, Eyre T J, Fandohan A B, Fayle T M, Feldpausch T R, Ferreira L V, Finér L, Fischer M, Fletcher C, Frizzera L, Gianelle D, Glick H B, Harris D J, Hector A, Hemp A, Hengeveld G, Hérault B, Herbohn J L, Hillers A, Honorio Coronado E N, Hui C, Ibanez T, Imai N, Jagodziński A M, Jaroszewicz B, Johannsen V K, Joly C A, Jucker T, Jung I, Karminov V, Kartawinata K, Kearsley E, Kenfack D, Kennard D K, Kepfer-Rojas S, Keppel G, Khan M L, Killeen T J, Kim H S, Kitayama K, Köhl M, Korjus H, Kraxner F, Kucher D, Laarmann D, Lang M, Lu H C, Lukina N V, Maitner B S, Malhi Y, Marcon E, Marimon B S, Marimon-Junior B H, Marshall A R, Martin E H, Meave J A, Melo-Cruz O, Mendoza C, Mendoza-Polo I, Miscicki S, Merow C, Monteagudo Mendoza A, Moreno V S, Mukul S A, Mundhenk P, Nava-Miranda M G, Neill D, Neldner V J, Nevenic R V, Ngugi M R, Niklaus P A, Oleksyn J, Ontikov P, Ortiz-Malavasi E, Pan Y D, Paquette A, Parada-Gutierrez A, Parfenova E I, Park M, Parren M, Parthasarathy N, Peri P L, Pfautsch S, Picard N, Piedade M T F, Piotta D, Pitman N C A, Poulsen A D, Poulsen J R, Pretzsch H, Ramirez Arevalo F, Restrepo-Correa Z, Rodeghiero M, Rolim S G, Roopsind A, Rovero F, Rutishauser E, Saikia P, Salas-Eljatib C, Saner P, Schall P, Schelhaas M J, Schepaschenko D, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Schöngart J, Searle E B, Seben V, Serra-Diaz J M, Sheil D, Shvidenko A Z, Silva-Espejo J E, Silveira M, Singh J, Sist P, Slik F, Sonké B, Souza A F, Stereńczak K J, Svenning J C, Svoboda M, Swanepoel B, Targhetta N, Tchebakova N, ter Steege H, Thomas R, Tikhonova E, Umunay P M, Usoltsev V A, Valencia R, Valladares F, van der Plas F, Do T V, van Nuland M E, Vasquez R M, Verbeeck H, Viana H, Vibrans A C, Vieira S, von Gadow K, Wang H F, Watson J V, Werner G D A, Wiser S K, Wittmann F, Woell H, Wortel V, Zagt R, Zawila-Niedzwiecki T, Zhang C Y, Zhao X H, Zhou M, Zhu Z X, Zo-Bi I C, Gann G D, Crowther T W. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 2023, 624: 92-101.
- [19] 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.
- [20] Tian L, Zhang B Q, Chen S Y, Wang X J, Ma X G, Pan B T. Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16): e2022JD036738.
- [21] Zheng L, Lu J Z, Liu H, Chen X L, Yesou H. Evidence of vegetation greening benefitting from the afforestation initiatives in China. *Geo-spatial*

- Information Science, 2024, 27(3): 683-702.
- [22] Han Q G, Zhang J S, Shi X J, Zhou D Q, Ding Y X, Peng S Z. Ecological function-oriented vegetation protection and restoration strategies in China's Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116290.
- [23] Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Wang J N, Tsunekawa A, Zhou H K, Liu Y, Li Y R, Liu S L. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [24] Jiang C, Yang Z Y, Liu C, Dong X L, Wang X C, Zhuang C W, Zhao L L. Win-win-win pathway for ecological restoration by balancing hydrological, ecological, and agricultural dimensions: contrasting lessons from highly eroded agroforestry. *Science of the Total Environment*, 2021, 774: 145140.
- [25] 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: 44-50.
- [26] 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.
- [27] 熊康宁, 肖杰, 朱大运. 混农林生态系统服务研究进展. *生态学报*, 2022, 42(3): 851-861.
- [28] 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.
- [29] 蔡运龙. 生态问题的社会经济检视. *地球科学进展*, 2020, 35(7): 742-749.
- [30] Febles González J M, Febles Díaz J M, Amaral-Sobrinho N M B, Zonta E, Maura Santiago A V. An approach to determine the neutrality of soil degradation in Karst regions. *Geoderma Regional*, 2023, 34: e00685.
- [31] Xu E Q, Zhang H Q. Human-desertification coupling relationship in a Karst region of China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(17): 4988-5003.
- [32] 白晓永, 冉晨, 陈敬安, 罗光杰, 陈飞, 肖碧琴, 龙明康, 李姿霖, 张小芸, 沈晓倩, 杨姝, 林心海, 李朝君, 张思蕊, 熊练, 王世杰. 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.
- [33] 杨苏茂, 熊康宁, 喻阳华, 刘兴宜, 董晓超. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整. *世界林业研究*, 2017, 30(3): 91-96.
- [34] 余梦, 李阳兵, 罗光杰. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势. *生态学报*, 2022, 42(10): 4267-4283.
- [35] Wang X F, Zhang X R, Feng X M, Liu S R, Yin L C, Chen Y Z. Trade-offs and synergies of ecosystem services in Karst area of China driven by grain-for-green program. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 101-114.
- [36] 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 吴路华, 杜朝超, 代磊, 杨兴艺, 李姿霖, 薛盈盈, 龙明康, 李明会, 杨姝, 罗青, 张小芸, 沈晓倩, 陈飞, 李琴, 邓元红, 胡泽银, 李朝君. 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.
- [37] Qiu S J, Peng J, Zheng H N, Xu Z H, Meersmans J. How can massive ecological restoration programs interplay with social-ecological systems? A review of research in the South China Karst region. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150723.
- [38] Zhao X Q, Xu Y F, Wang Q, Pu J W, Shi X Q, Huang P, Gu Z X. Sustainable agricultural development models of the ecologically vulnerable Karst areas in southeast Yunnan from the perspective of human-earth areal system. *Land*, 2022, 11(7): 1075.
- [39] Sowińska-Świerkosz B, García J. What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions*, 2022, 2: 100009.
- [40] Telwala Y. Unlocking the potential of agroforestry as a nature-based solution for localizing sustainable development goals: a case study from a drought-prone region in rural India. *Nature-Based Solutions*, 2023, 3: 100045.
- [41] 苏维词, 杨华. 典型喀斯特峡谷石漠化地区生态农业模式探析——以贵州省花江大峡谷顶坛片区为例. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 217-220.
- [42] 李先琨, 吕仕洪, 蒋忠诚, 何成新, 陆树华, 向悟生, 欧祖兰. 喀斯特峰丛区复合农林系统优化与植被恢复试验. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 92-98.
- [43] Wu Q L, Liang H, Xiong K N, Li R. Eco-benefits coupling of agroforestry and soil and water conservation under KRD environment: frontier theories and outlook. *Agroforestry Systems*, 2019, 93(5): 1927-1938.
- [44] 陈海, 朱大运, 陈浒, 文雅琴. 混农林对石漠化地区土壤环境的影响及其应用. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 13-18.
- [45] 熊康宁, 陈永毕, 陈浒, 兰安军, 隋喆. 点石成金: 贵州石漠化治理技术与模式. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011: 42-57.
- [46] Wang K L, Zhang C H, Chen H S, Yue Y M, Zhang W, Zhang M Y, Qi X K, Fu Z Y. Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2743-2763.
- [47] 但文红. 喀斯特峡谷农业可持续发展模式研究——以贵州省花江峡谷为例. *中国岩溶*, 1999, 18(3): 251-256.
- [48] 吕仕洪, 陆树华, 李先琨, 蒋忠诚, 向悟生, 覃家科, 区智. 广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 196-201.
- [49] Zou Z G, Zeng F P, Wang K L, Zeng Z X, Zhao L L, Du H, Zhang F, Zhang H. Emergy and economic evaluation of seven typical agroforestry

- planting patterns in the Karst region of Southwest China. *Forests*, 2019, 10(2): 138.
- [50] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 李瑞. 石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前沿理论与对策. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 11-18, 33.
- [51] Sulistiyowati E, Setiadi S, Haryono E. The dynamics of sustainable livelihoods and agroforestry in Gunungkidul Karst area, Yogyakarta, Indonesia. *Forest and Society*, 2023, 7(2): 222-246.
- [52] 蔡秋, 卢兰. 农林复合生态系统与喀斯特山区农业持续发展——以贵州省兴义市则戎乡为例. *生态农业研究*, 1998, 6(1): 57-59.
- [53] Cheng H T, Hu W, Zhou X H, Dong R S, Liu G D, Li Q F, Zhang X. Fruit tree legume herb intercropping orchard system is an effective method to promote the sustainability of systems in a Karst rocky desertification control area. *Forests*, 2022, 13(10): 1536.
- [54] 刘青山, 陈浒, 李林芝, 王存璐, 陈静, 杨乙未, 张红梅. 石漠化治理混农林业区土壤螨类群落的边缘效应. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(2): 370-377.
- [55] Ke S F, Yan R H, Qiao D, Zhu L F. Cost-benefit analysis of an agroforestry innovation on Karst land: replacing sweet potato by sealwort (*Polygonatum cyrtoneura*) under plum trees in Chunfeng Village, Sichuan Province, China. *Forests, Trees and Livelihoods*, 2018, 27(4): 217-229.
- [56] Suryanto P, Susila Putra E T. Traditional enrichment planting in agroforestry marginal land Gunungkidul, Java, Indonesia. *Journal of Sustainable Development*, 2012, 5(2): 77-87.
- [57] Zhang S H, Xiong K N, Qin Y, Min X Y, Xiao J. Evolution and determinants of ecosystem services: insights from South China Karst. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108437.
- [58] Zhang J, Wang Z Y, Zhuang D H, Fu Z Y, Wang K L, Chen H S. Evaluating the hydrological function of vegetation restoration in fragile Karst area: insights from the continuous surface and subsurface runoff monitoring. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: 105847.
- [59] 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): 6577-6585.
- [60] Pu J W, Zhao X Q, Huang P, Gu Z X, Shi X Q, Chen Y J, Shi X Y, Tao J Y, Xu Y F, Xiang A M. Ecological risk changes and their relationship with exposed surface fraction in the Karst region of Southern China from 1990 to 2020. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116206.
- [61] Peng J, Tian L, Zhang Z M, Zhao Y, Green S M, Quine T A, Liu H Y, Meersmans J. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a Karst landscape in China. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101199.
- [62] Jiang Y, Gao J B, Wu S H, Jiao K W. Mediation effect as the component to ecosystem? Establishing the chain effect framework of ecosystem services across typical Karst basin in China. *CATENA*, 2023, 221: 106761.
- [63] Tang J H, Xiong K N, Wang Q, Chen Y, Wu Q L. Village ecosystem vulnerability in Karst desertification control: evidence from South China Karst. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1126659.
- [64] Jiang S L, Xiong K N, Xiao J. Structure and stability of agroforestry ecosystems: insights into the improvement of service supply capacity of agroforestry ecosystems under the Karst rocky desertification control. *Forests*, 2022, 13(6): 878.
- [65] Huang Y T, Xiong K N, Xiao J. To achieve a win-win situation: reorganizing and enhancing agroforestry ecosystem assets and productivity to inform Karst desertification control. *Forests*, 2024, 15(3): 502.
- [66] Zhang S H, Xiong K N, Min X Y, Zhang S. Demographic shrinkage promotes ecosystem services supply capacity in the Karst desertification control. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170427.
- [67] Yang Y L, Xiong K N, Xiao J. A review of agroforestry biodiversity-driven provision of ecosystem services and implications for Karst desertification control. *Ecosystem Services*, 2024, 67: 101634.
- [68] Xiao J, Xiong K N. A review of agroforestry ecosystem services and its enlightenment on the ecosystem improvement of rocky desertification control. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158538.
- [69] Nair P K R. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 1985, 3(2): 97-128.
- [70] 洪传春, 刘某承, 李文华. 农林复合经营: 中国生态农业发展的有效模式. *农村经济*, 2015(3): 37-41.
- [71] Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 2009, 76(1): 1-10.
- [72] 潘康乐, 郭梁, 陈欣, 徐礼根, 唐建军. 农林复合生态系统服务功能研究进展. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(12): 1535-1544.
- [73] de Groot R S. Functions of nature: evaluation of nature in environmental planning, management and decision making. Groningen: Wolters-Noordhoff, 1992: 4-11.
- [74] Odum E P. The Strategy of Ecosystem Development: an understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [75] 冯剑丰, 李宇, 朱琳. 生态系统功能与生态系统服务的概念辨析. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1599-1603.
- [76] de Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 175-186.
- [77] Heink U, Jax K. Going upstream—how the purpose of a conceptual framework for ecosystem services determines its structure. *Ecological Economics*, 2019, 156: 264-271.
- [78] Young K J. Mimicking nature: a review of successional agroforestry systems as an analogue to natural regeneration of secondary forest stands//

- Montagnini F, ed. Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty. Cham: Springer International Publishing, 2017: 179-209.
- [79] 颜萍,熊康宁,檀迪,郭杰,陈航,胡晚枚. 喀斯特石漠化治理不同水土保持模式的生态效应研究. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2016, 34(1): 1-7, 21.
- [80] D'Ettorre U S, Liso I S, Parise M. Desertification in Karst areas: a review. *Earth-Science Reviews*, 2024, 253: 104786.
- [81] Yang L Y, Li Y B, Yu L M, Chen M, Zhang Y Y, Ren X. Characteristics of bare rocky land evolution in Karst Mountain areas of Southwest China based on socio-ecological system perspectives: the case study of Huajiang canyon. *CATENA*, 2024, 242: 108139.
- [82] Geekiyanage N, Goodale U M, Cao K F, Kitajima K. Plant ecology of tropical and subtropical Karst ecosystems. *Biotropica*, 2019, 51(5): 626-640.
- [83] 苏维词,潘真真,郭晓娜,杨吉,易武英,李艳丽,杨振华,谢珏军. 黔南 FAST 周边典型喀斯特峰丛洼地石漠化生态修复模式研究——以平塘县克度镇刘家湾周边为例. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 503-512.
- [84] Vilhar U, Kermavnar J, Kozamernik E, Petrič M, Ravbar N. The effects of large-scale forest disturbances on hydrology: An overview with special emphasis on Karst Aquifer systems. *Earth-Science Reviews*, 2022, 235: 104243.
- [85] 杜芳娟,熊康宁. 从生态美学的角度探析喀斯特石漠化景观的旅游价值. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(增刊): 23-26.
- [86] Yang Y L, Xiong K N, Xiao J, Huang Y T. Quantification of agroforestry ecosystem services in Karst desertification control. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, 2024, 6(3): 1-9.
- [87] Cai L B, Chen X, Huang R C, Smettem K. Runoff change induced by vegetation recovery and climate change over carbonate and non-carbonate areas in the Karst region of South-west China. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127231.
- [88] Zhao S, Pereira P, Wu X Q, Zhou J X, Cao J H, Zhang W X. Global Karst vegetation regime and its response to climate change and human activities. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106208.
- [89] Williams P. The role of the Epikarst in Karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [90] Li J, Zhang L J, Li Y F. Exposed rock reduces tree size, but not diversity. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 851781.
- [91] 何亚芬,潘依玲,谢花林,朱振宏,李哲,成皓. 区域生态产品供给能力评估及提升策略——以江西省为例. *农业现代化研究*, 2023, 44(5): 777-787.
- [92] Liu C N, Huang Y, Wu F, Liu W J, Ning Y Q, Huang Z R, Tang S Q, Liang Y. Plant adaptability in Karst regions. *Journal of Plant Research*, 2021, 134(5): 889-906.
- [93] Jiang S L, Xiong K N, Xiao J, Yang Y L, Huang Y T, Wu Z G. Agroforestry ecosystem structure and the stability improvement strategy in control of Karst desertification. *Forests*, 2023, 14(4): 845.
- [94] Nie Y P, Ding Y L, Zhang H L, Chen H S. Comparison of woody species composition between rocky outcrops and nearby matrix vegetation on degraded Karst hillslopes of Southwest China. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(3): 911-920.
- [95] 井新,贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系: 回顾与展望. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1094-1111.
- [96] Manning P, van der Plas F, Soliveres S, Allan E, Maestre F T, Mace G, Whittingham M J, Fischer M. Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(3): 427-436.
- [97] Ehrlich P R, Ehrlich A H. Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species. New York: Random House, 1981: 218-220.
- [98] Peterson M J, Hall D M, Feldpausch-Parker A M, Peterson T R. Obscuring ecosystem function with application of the ecosystem services concept. *Conservation Biology*, 2010, 24(1): 113-119.
- [99] Mace G M, Norris K, Fitter A H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(1): 19-26.
- [100] 范玉龙,胡楠,丁圣彦. 基于植物功能群的生态系统服务形成与维持机制研究. *生态学报*, 2024, 44(1): 60-66.
- [101] Jax K, Heink U. Searching for the place of biodiversity in the ecosystem services discourse. *Biological Conservation*, 2015, 191: 198-205.
- [102] Cerda R, Avelino J, Harvey C A, Gary C, Tixier P, Allinne C. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 2020, 134: 105149.
- [103] Notaro M, Gary C, Le Coq J F, Metay A, Rapidel B. How to increase the joint provision of ecosystem services by agricultural systems. Evidence from coffee-based agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 2022, 196: 103332.
- [104] Notaro M, Deheuvels O, Gary C. Participative design of the spatial and temporal development of improved cocoa agroforestry systems for yield and biodiversity. *European Journal of Agronomy*, 2022, 132: 126395.
- [105] Jezeer R E, Santos M J, Verweij P A, Boot R G A, Clough Y. Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield. *Ecosystem Services*, 2019, 40: 101033.
- [106] 郭柯,刘长成,董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 991-999.
- [107] Maseyk F J F, MacKay A D, Possingham H P, Dominati E J, Buckley Y M. Managing natural capital stocks for the provision of ecosystem services. *Conservation Letters*, 2017, 10(2): 211-220.
- [108] Mace G M, Hails R S, Cryle P, Harlow J, Clarke S J. REVIEW: Towards a risk register for natural capital. *Journal of Applied Ecology*, 2015,

- 52(3): 641-653.
- [109] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. 生态学报, 2013, 33(3): 702-710.
- [110] Odum H T. Environment, power, and society. New York: WILEY-INTERSCIENCE, 1971: 58-103.
- [111] Jørgensen S E, Mejer H. A holistic approach to ecological modelling. Ecological Modelling, 1979, 7(3): 169-189.
- [112] Glatthorn J, Annighöfer P, Balkenhol N, Leuschner C, Polle A, Scheu S, Schuldt A, Schuldt B, Ammer C. An interdisciplinary framework to describe and evaluate the functioning of forest ecosystems. Basic and Applied Ecology, 2021, 52: 1-14.
- [113] Honrado J P, Vieira C, Soares C, Monteiro M B, Marcos B, Pereira H M, Partidário M R. Can we infer about ecosystem services from EIA and SEA practice? A framework for analysis and examples from Portugal. Environmental Impact Assessment Review, 2013, 40: 14-24.
- [114] Hering D, Carvalho L, Argillier C, Beklioglu M, Borja A, Cardoso A C, Duel H, Ferreira T, Globevnik L, Hanganu J, Hellsten S, Jeppesen E, Kodeš V, Solheim A L, Nöges T, Ormerod S, Panagopoulos Y, Schmutz S, Venohr M, Birk S. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress—an introduction to the MARS project. Science of the Total Environment, 2015, 503: 10-21.
- [115] 徐兴良, 于贵瑞. 基于生态系统演变机理的生态系统脆弱性、适应性及突变理论. 应用生态学报, 2022, 33(3): 623-628.
- [116] 于贵瑞, 王秋风, 杨萌, 陈智. 生态学的科学概念及其演变与当代生态学学科体系之商榷. 应用生态学报, 2021, 32(1): 1-15.
- [117] 于贵瑞, 杨萌. 自然生态价值、生态资产管理及价值实现的生态经济学基础研究——科学概念、基础理论及实现途径. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1153-1165.
- [118] 赵东升, 张雪梅, 邓思琪, 于贵瑞. 区域资源环境承载力的评价理论及方法讨论. 应用生态学报, 2022, 33(3): 591-602.
- [119] Barrett G W, Odum E P. The twenty-first century: the world at carrying capacity. BioScience, 2000, 50(4): 363-368.
- [120] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. Nature, 2007, 448(7150): 188-190.
- [121] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45: 471-493.
- [122] Haines-Young R, Potschin M. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being//Raffaelli D G, Frid C L J. Ecosystem Ecology: a new synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 110-139.
- [123] Bell M D, Phelan J, Blett T F, Landers D, Nahlik A M, Van Houtven G, Davis C, Clark C M, Hewitt J. A framework to quantify the strength of ecological links between an environmental stressor and final ecosystem services. Ecosphere, 2017, 8(5): e01806.
- [124] Bruins R J, Canfield T J, Duke C, Kapustka L, Nahlik A M, Schäfer R B. Using ecological production functions to link ecological processes to ecosystem services. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, 13(1): 52-61.
- [125] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. Ecosystem Services, 2017, 25: 15-27.
- [126] Schröter M, Stumpf K H, Loos J, van Oudenhoven A P E, Böhnke-Henrichs A, Abson D J. Refocusing ecosystem services towards sustainability. Ecosystem Services, 2017, 25: 35-43.
- [127] Nassl M, Löffler J. Ecosystem services in coupled social-ecological systems: closing the cycle of service provision and societal feedback. Ambio, 2015, 44(8): 737-749.
- [128] Gerner N V, Nafó I, Winking C, Wencki K, Strehl C, Wortberg T, Niemann A, Anzaldúa G, Lago M, Birk S. Large-scale river restoration pays off: a case study of ecosystem service valuation for the emscher restoration generation project. Ecosystem Services, 2018, 30: 327-338.
- [129] Niemeijer D, de Groot R S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. Ecological indicators, 2008, 8(1): 14-25.
- [130] 张城, 李晶, 周自翔, 刘宪锋. 生态系统服务级联效应研究进展. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1633-1642.
- [131] 蒋忠诚, 李振伟, 罗为群, 蓝芙宁, 吴泽燕. 西南岩溶区水土流失研究进展与展望. 中国水土保持科学, 2024, 22(3): 1-11.
- [132] Yan Y J, Dai Q H, Yang Y Q, Yan L B, Yi X S. Epikarst shallow fissure soil systems are key to eliminating Karst drought limitations in the Karst rocky desertification area of SW China. Ecohydrology, 2022, 15(2): e2372.
- [133] Li Y, Liu Z Q, Liu G H, Xiong K N, Cai L L. Dynamic variations in soil moisture in an Epikarst fissure in the Karst rocky desertification area. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125587.
- [134] 李生, 薛亮, 王佳, 任华东, 姚小华, 冷秀汇, 武泽宇. 石漠化地区裸岩表面温度和空气温湿度动态变化. 生态学杂志, 2019, 38(2): 436-442.
- [135] Bátor Z, Valkó O, Vojtkó A, Tölgyesi C, Farkas T, Frei K, Hábcenzys A A, Tóth Á, Li G, Rádai Z, Dulai S, Barta K, Erdős L, Deák B. Environmental heterogeneity increases the conservation value of small natural features in Karst landscapes. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162120.