



DOI: 10.20103/j.stxb.202410112467

王聪,张守红,杜自强,张超,刘广全,吕一河.黄土高原小流域生态系统综合治理与生态系统服务的协同提升.生态学报,2025,45(8):4072-4077.

黄土高原小流域生态系统综合治理与生态系统服务的协同提升

王 聪¹,张守红³,杜自强⁴,张 超⁵,刘广全⁶,吕一河^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

3 北京林业大学水土保持学院,北京 100083

4 山西大学黄土高原研究所,太原 030006

5 西北农林科技大学水土保持研究所,杨凌 712100

6 中国水利水电科学研究院,北京 100038

摘要:黄土高原一直是全球水土流失最为严重的地区之一。尽管多年来的治理工作取得了积极成效,但在新形势下,区域生态系统综合治理仍面临着新挑战。为制定黄土高原生态系统综合治理与生态系统服务协同提升的系统解决方案,根据“十四五”国家重点研发计划“典型脆弱生态保护与修复”专项项目申报指南的要求,中国科学院生态环境研究中心牵头,联合 8 家单位共同申报了“黄土高原小流域山水林田湖草沙综合治理与生态系统服务协同提升技术及示范”项目,并通过评审,获准立项。项目以黄土丘陵沟壑区为重点,以生态系统服务协同提升为目标,依托典型小流域,开展包括机理机制、技术研发示范和综合集成的全链条系统研究,提出山水林田湖草沙综合治理的系统解决方案并进行应用示范。项目的实施将为推动黄土高原小流域山水林田湖草沙综合治理的理论与实践发展提供技术支撑和科学依据。

关键词:系统治理;景观格局优化;生态系统服务协同提升;黄土高原

为应对人类造成的生态系统退化、生物多样性丧失和气候变化,生态恢复科学和实践正在迅速发展^[1-2]。《生物多样性公约》《联合国防治荒漠化公约》、联合国可持续发展大会(2012)和联合国生态系统恢复十年计划(2021—2030)等^[3-6]全球政策和倡议为推动生态系统恢复提供了强有力的支持。在全球环境变化与生态危机加剧背景下,需要更加系统化的治理策略,以应对未来的复杂挑战。

系统化治理策略需重点关注多目标的协同、治理措施的合理布局以及技术的集成与创新。不同生态修复与保护项目往往设置了不同的治理目标^[7],但通常对目标的系统性、完整性考虑不足。比如,一些项目主要旨在解决环境问题,如通过植树造林实现碳固存,或通过植被恢复应对因盐碱化或土壤侵蚀导致的生产能力下降^[8];另一些项目则是出于立法要求,着重开发或采矿后的修复^[9];还有部分项目则专注于恢复当地重要的生态系统或物种。然而,片面治理目标引导下的行动可能会导致生态系统功能失调,限制了生态修复与保护项目提供均衡的生态系统服务。伴随全球社会-生态变化,生态修复与保护面临新的挑战,需重新审视自然保护与人类之间关系的变化^[10],生态治理应向多重目标转变,综合考虑人类福祉、景观多功能性等方面的影响^[2,11-13],全面纳入多种生态系统服务。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF1305100)

收稿日期:2024-10-11; 网络出版日期:2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@cees.ac.cn

在以往生态治理实践中,一些项目实施范围局限于局部地区或者部分优先区域。然而,局部地区或景观斑块更容易受到边缘效应及多重干扰因素的协同影响^[14];而优先区域的生态治理往往忽略了景观连通性和渗透性的影响,妨碍了特定治理目标(如水土保持)的实现及整体治理效率的协同^[15]。治理的多重目标转变需超越以局地为重点的干预措施^[16],并转向更大尺度及不同景观综合体上的综合^[17]。因此,治理措施布局将起到关键作用,合理空间布局可提升景观连通性,促进不同景观单元之间的结构优化和功能协同,提高治理措施的整体成效。然而,景观斑块之间的空间动态演变使得制定适应性治理措施变得更加复杂。因此,在生态治理措施布局时需综合考虑景观单元组成、格局和生态过程,及其对生态系统服务、可持续生计和社会经济发展的影响,以系统应对当前面临的生态退化与可持续发展挑战。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,新中国成立以来,开展了长期的水土流失综合治理。以小流域为基本单元的坡面生物措施及沟道工程措施取得积极成效^[18],径流和输沙量显著降低,尤其是黄河含沙量从 1.6×10^9 t 降至不足 0.1×10^9 t^[19]。在水土保持和退耕还林(草)工程的推动下,黄土高原生态治理进入新时期。2016年9月,财政部、原国土资源部与环境保护部联合发文,明确以“山水林田湖草是一个生命共同体”为重要理念指导山水林田湖草生态保护修复实践,为黄土高原等生态脆弱区和生态环境受损区开展山水林田湖草沙系统保护和综合治理提供了重要指引^[20]。作为生态系统综合治理的主体,山水林田湖草沙生命共同体中不同要素在地表过程作用下形成一个景观综合体,其功能和结构受到人类活动和环境变化的影响^[21]。因此,在谋划和开展生态修复与保护行动时应考虑不同景观要素之间的相互作用,整合各要素并促进其协同,促进其在时间和空间上的动态优化配置^[21]。流域具有完整的地表过程,因而是山水林田湖草沙系统治理的基本单元,如黄土高原丘陵沟壑区的小流域长期以来是水土流失治理的基本单元^[18],虽然该区域在以往的治理中强调坡面生物措施和沟道工程措施结合,但治理措施中仍存在人工林营建不合理、梯田淤地坝等设施功能薄弱、经济林管理粗放等现象^[22]。从山水林田湖草沙系统治理的角度来看,黄土高原小流域生态系统综合治理中存在生态修复措施整体性不强、系统性不足、生产功能弱、可持续性发展能力低等问题^[23],需要从治理理念到技术研发的全链条优化与提升。

生态系统综合治理不仅需要应对高度异质性和快速变化的景观^[24-26],还需在此过程中实现多层次的社会-生态系统恢复目标,这也是新时期黄土高原生态系统综合治理面临的重要挑战。在黄土高原前期生态治理取得积极成效的背景下,该地区生态系统综合治理应从以下方面开展深化研究:(1)探索优化水土保持措施的空间布局和提升技术水平的有效路径,实现水源涵养、土壤保持、固碳等多功能的协同增效;(2)开展生态系统功能协调与多目标治理策略研究,优化流域景观配置,实现生态效益与生产效益的协同提升,促进区域可持续发展;(3)研发适应区域特点的多尺度生态修复技术,开展试验示范和推广应用,为区域生态修复提供系统解决方案。

“十四五”国家重点研发计划“典型脆弱生态保护与修复”重点专项 2023 年度申报指南充分关注了上述科技研发需求,纳入了“黄土高原小流域山水林田湖草沙综合治理与生态系统服务协同提升技术及示范”项目。根据指南要求,中国科学院生态环境研究中心作为牵头单位,联合北京林业大学、山西大学、西北农林科技大学、中国水利水电科学研究院等 8 家单位申报了该项目,并通过评审、获批立项(项目编号:2023YFF1305100)。本项目以黄土丘陵沟壑区为重点,旨在发展黄土高原山水林田湖草沙系统治理的理论和体系,促进小流域生态系统优化配置,实现水源涵养、土壤保持、固碳和产品供给等多项生态系统服务的协同提升。

1 项目研究目标与内容

项目的总体目标是:以黄河中游黄土丘陵沟壑区为重点(图 1),以生态系统服务协同提升为目标,依托典型小流域,研发经济林地力提升技术、水土流失精准防控和林田坝草多目标优化配置技术、生态与生产功能协调的生态系统管理与土地优化调控技术,形成山水林田湖草沙综合治理的系统解决方案并应用示范。

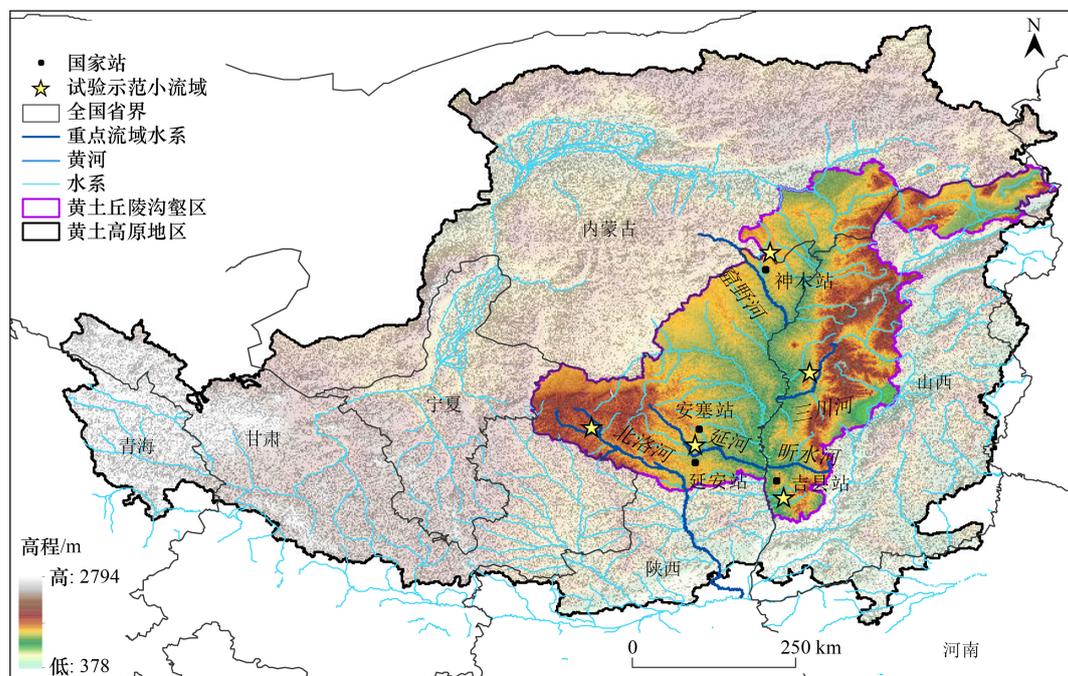


图1 项目研究区及试验示范小流域和主要野外台站分布示意图

Fig.1 Distribution of the study area, experimental small watersheds, and major field stations

黄土丘陵沟壑区根据《黄土高原地区综合治理规划大纲 2010—2030》划定

项目的主要研究内容:在黄土丘陵沟壑区,根据土壤侵蚀特征、土地利用格局与治理目标,选择典型小流域,开展包括机理机制、技术研发示范和综合集成的全链条系统研究,重点研究梁峁-沟坡-沟道-小流域水沙多尺度调控机理,小流域山水林田湖草系统结构与功能耦合关系,多重生态系统服务动态关联机制及尺度效应等方面的科学问题,研发经济林土壤微生物培肥及绿肥地力提升、坡面-沟道水土流失精准防控、小流域生态与生产功能多目标协同提升的土地优化配置等关键技术,发展山水林田湖草沙系统治理的技术体系。

围绕项目的研究目标和研究内容,结合黄土丘陵沟壑区不同小流域自然地理特征、土地利用格局和治理需求的差异,选择昕水河、三川河、延河等流域的五个典型小流域作为试验示范区,开展观测实验、机理研究和技术研发,并进一步在区域尺度上进行系统集成。项目任务具体分解为5个课题:(1)昕水河小流域林田坝草结构与生态系统服务协同优化技术;(2)三川河小流域基于生产功能的景观格局优化与生态功能提升技术;(3)延河小流域林果固土保肥与生态生产功能综合提升技术;(4)北洛河风水复合侵蚀小流域固土保水增碳及综合治理技术;(5)黄土丘陵沟壑区综合治理技术优化与生态服务提升方案。

2 项目研究方案

本项目的实施采取“机理机制研究-技术研发示范-区域系统集成”的系统设计框架(图2)。对于机理机制研究,重点研究梁峁-沟坡-沟道-小流域水沙多尺度调控机理、小流域山水林田湖草系统结构与功能耦合关系以及多重生态系统服务动态关联机制及尺度效应。对于技术研发示范,重点研发经济林土壤微生物培肥及绿肥地力提升技术、坡面-沟道水土流失精准防控技术及小流域生态与生产功能多目标协同提升的土地优化配置技术。从研究任务的具体落实上,项目实行分总结合,地块-坡面/沟道-小流域-区域尺度层层递进,聚焦于景观格局与水土过程、生态系统服务耦合协调和系统提升。从研究方法上,采用定位观测、野外实验、室内培育、数据集成、模型模拟、系统分析等手段,支撑项目的全链条研究。项目研究布局上,以黄土丘陵沟壑区为对象,按土壤侵蚀类型和山水林田坝草多要素分布特征,在黄河中游的主要一级支流昕水河、三川河、延河等

流域选择 3 个典型水蚀小流域进行研究与示范;同时,在北洛河和窟野河选择“一主一辅”2 个典型风水复合侵蚀小流域进行研究与示范。

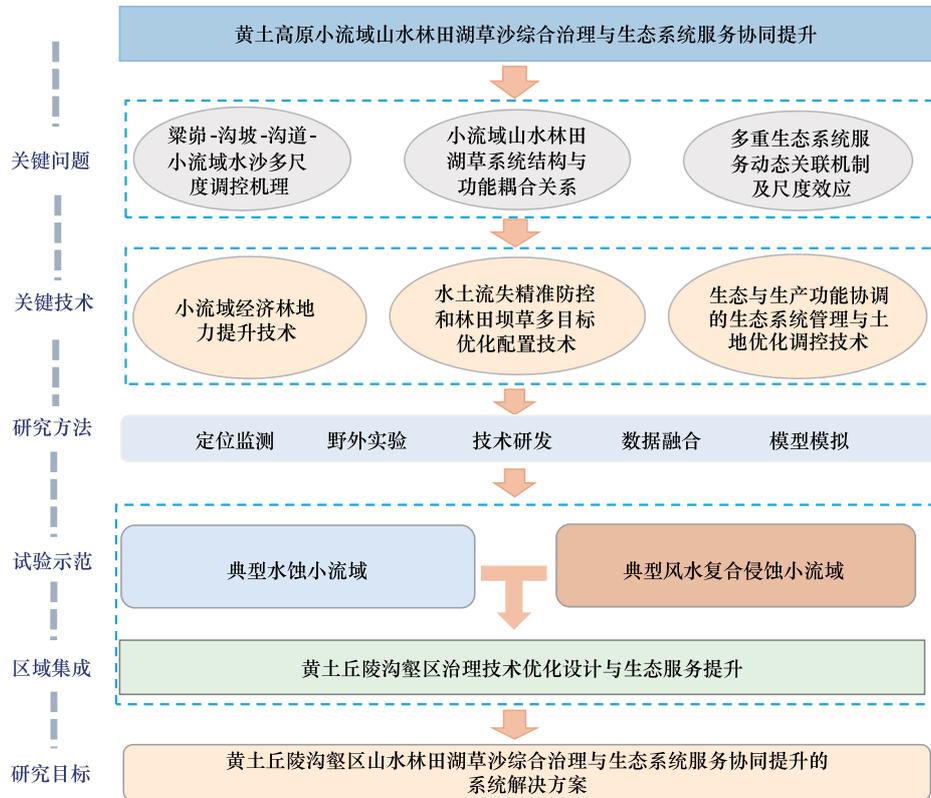


图 2 项目研究总体思路框架图

Fig.2 Framework of the overall research concept for the project

3 项目研究技术难点

项目的技术难点主要体现在以下三个方面。第一,黄土高原小流域经过多年治理已取得明显成效,但是在流域治理模式向综合体系构建转变的过程中,更加强调景观格局优化和不同措施的协同作用。同时,地块、坡面和沟道的复杂立地条件及土壤侵蚀强度差异,使得以土壤容许流失量和水资源承载力为基础,研发多尺度水土流失精准控制与土地利用优化配置技术体系,成为本项目需要突破的基础性技术难点。第二,黄土丘陵沟壑区小流域山水林田湖草系统具有高度复杂性,结构与功能耦合关系受时空尺度效应的影响,生态系统服务之间经常表现为多重非线性关系。因此,如何根据黄土丘陵沟壑区小流域的类型划分,以及各治理技术模式适宜性、有效性空间分异规律的定量分析,研发面向生态系统服务协同提升的山水林田湖草沙综合治理技术体系,成为本项目需要突破的应用性技术难点。第三,区域模型系统研发方面,项目组拟基于多智能体时空图神经网络深度强化学习方法,实现黄土丘陵沟壑区土地生态与生产功能空间优化。然而,在复杂地形下,设计并有效训练能够处理时空变化的多智能体神经网络,确保其能够实现土地功能的最优空间配置,这在空间模型和算法技术上也具有较高难度。

4 项目的创新性及预期成效

项目的创新性主要体现在以下几个方面:首先,项目强调在提升景观生态功能^[27]的同时,优化景观单元之间的水平空间布局,协同提升景观整体功能。通过研发地块尺度经济林果适水改土地力提升技术及侵蚀沟

水土流失精准控制技术,有效增强景观单元的生产功能和水土保持功能。同时,结合林田坝草的多目标优化配置技术,将进一步系统提升小流域的生态功能与生产功能的协调发展,推动黄土丘陵沟壑区山水林田湖草沙综合治理技术体系创新。其次,项目以山水林田坝草等要素的耦合模式为抓手,定量揭示小流域景观格局变化对生态系统功能与服务的影响机理^[28-29]。通过对山水林田坝草要素、水土保持措施和生态修复治理技术的观测实验与定量模拟,揭示其对生态系统服务的作用路径、影响强度、空间变异和效应阈值,是对面向综合治理技术研发的基础理论拓展和深化。最后,项目以“分布格局-耦合机制-结构优化-功能提升”为主线,通过基于类型区划和各技术模式适宜性、有效性空间分异规律的定量分析,研发区域尺度山水林田湖草沙综合治理模式的优化设计和集成模拟系统,形成生态系统服务协同提升的优化设计方案和综合技术工具,是对区域尺度综合治理数字智能化技术的提升。

项目将推动黄土高原小流域综合治理与生态修复科技创新,为山水林田湖草沙综合治理提供范例。首先,通过对流域内林田坝草的优化设计,促进固碳、生态多样性维持、水源涵养等多功能协同提升和治理措施多类型高效配置,提高以小流域为基本治理单元的整体生态功能及生态多样性、稳定性与可持续性;同时,建立的“土地利用变化-生态功能演变-功能耦合机制-优化配置设计”模型系统,形成面向区域的山水林田湖草沙系统治理的技术模式评估、优选和规划设计工具,能够有效支撑治理实践。其次,项目将为提升黄土高原土地生产能力开展技术研发示范,服务于果业绿色高效可持续发展和小流域综合治理中生态与生产功能的协调。项目研发的集雨补灌和土壤质量提升等新技术,将有效解决限制区域林果产量提升的干旱缺水和土壤肥力低等问题,促进产量提升,增加经济效益。通过地方特色经济林果在小流域综合治理中的技术研发和优化利用,将促进小流域生态与生产功能的协同提升,推进乡村振兴及农村生态环境综合治理^[30]。最后,黄土高原是《黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》的关键区之一。通过系统开展土流失机理研究、坡面-沟道水土流失精准防控技术、小流域林田坝草优化配置技术和山水林田湖草沙综合治理与生态系统服务协同提升技术的研发与示范,将为黄土高原生态屏障生态保护和修复重大工程建设的深化实施提供技术工具和科学依据。

参考文献(References):

- [1] Suding K N. Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42: 465-487.
- [2] Fischer J, Riechers M, Loos J, Martin-Lopez B, Temperton V M. Making the UN decade on ecosystem restoration a social-ecological endeavour. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(1): 20-28.
- [3] CBD (Secretariat of the United Nations Convention on Biological Biodiversity). Contribution of ecosystem restoration to the objectives of the CBD and a healthy planet for all people. Abstracts of posters presented at the 15th meeting of the Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice of the Convention on Biological Diversity, 2011, Montreal, Canada. Technical Series No. 62. SCBD, Montreal.
- [4] UN (United Nations General Assembly). Rio + 20: the future we want. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/733FutureWeWant.pdf> (accessed 14 Sep 2024).
- [5] UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). Zero net land degradation: a sustainable development goal for Rio+20. UNCCD Secretariat Policy Brief. UNCCD, 2013, Bonn, Germany.
- [6] United Nations Environment Agency Resolution 73/284: United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021—2030) <https://undocs.org/A/RES/73/284> Date: 2019.
- [7] Perring M P, Standish R J, Price J N, Craig M D, Erickson T E, Ruthrof K X, Whiteley A S, Valentine L E, Hobbs R J. Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere*, 2015, 6(8): 1-25.
- [8] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [9] Carrick P J, Erickson T E, Becker C H, Mayence C E, Bourne A R. Comparing ecological restoration in South Africa and western Australia: the

- benefits of a ‘travelling workshop’. *Ecological Management & Restoration*, 2015, 16(2): 86-94.
- [10] Mace G M. Whose conservation? *Science*, 2014, 345(6204): 1558-1560.
- [11] Mastrangelo M E, Weyland F, Villarino S H, Barral M P, Nahuelhual L, Laterra P. Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2014, 29(2): 345-358.
- [12] 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.
- [13] Crossman N D, Bryan B A. Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 654-668.
- [14] Ewers R M, Didham R K. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, 81(1): 117-142.
- [15] Shackelford N, Hobbs R J, Burgar J M, Erickson T E, Fontaine J B, Laliberté E, Ramalho C E, Perring M P, Standish R J. Primed for change: developing ecological restoration for the 21st century. *Restoration Ecology*, 2013, 21(3): 297-304.
- [16] Hobbs R J, Higgs E, Hall C M, Bridgewater P, Chapin F S III, Ellis E C, Ewel J J, Hallett L M, Harris J, Hulvey K B, Jackson S T, Kennedy P L, Kueffer C, Lach L, Lantz T C, Lugo A E, Mascaro J, Murphy S D, Nelson C R, Perring M P, Richardson D M, Seastedt T R, Standish R J, Starzomski B M, Suding K N, Tognetti P M, Yakob L, Yung L. Managing the whole landscape: historical, hybrid, and novel ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(10): 557-564.
- [17] Menz M H M, Dixon K W, Hobbs R J. Hurdles and opportunities for landscape-scale restoration. *Science*, 2013, 339(6119): 526-527.
- [18] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. *生态学报*, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [19] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [20] 张笑千, 王波, 王夏晖. 基于“山水林田湖草”系统治理理念的牧区生态保护与修复——以御道口牧场管理区为例. *环境保护*, 2018, 46(8): 56-59.
- [21] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 刘前媛, 林坚. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. *生态学报*, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [22] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [23] 吴钢, 赵萌, 王辰星. 山水林田湖草生态保护修复的理论支撑体系研究. *生态学报*, 2019, 39(23): 8685-8691.
- [24] 董淑龙, 马姜明, 辛文杰, 丁苏雅, 黎露. 漓江流域森林景观格局时空变化特征及驱动因素. *广西科学*, 2023, 30(5): 972-992.
- [25] 李凤, 周文佐, 邵周玲, 周新尧, 付小丽. 2000—2018年西秦岭景观格局变化及生态系统健康评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1338-1352.
- [26] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1-10.
- [27] 李月辉, 胡远满, 王正文. 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程与景观生态学. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 249-256.
- [28] 赵金羽, 萨娜, 付晓, 郑拴宁, 吴钢, 何霄嘉, 陆兆华, 桑卫国. 以疏勒河流域为例的“山水林田湖草”生态修复多尺度耦合框架及方法. *生态学报*, 2023, 43(10): 3841-3854.
- [29] 宋敏敏, 张青峰, 吴发启, 吴秉校, 吴骏. 黄土沟壑区小流域景观格局演变及生态服务价值响应. *生态学报*, 2018, 38(8): 2649-2659.
- [30] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策. *中国科学院院刊*, 2020, 35(7): 875-883.