

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.018 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.018

李欣,陈新闻,董智,等.黄河流域生态工程研究现状、热点与导向[J].水土保持学报,2026,40(1):1-14.

LI Xin, CHEN Xinchuang, DONG Zhi, et al. Progress, research frontiers, and directions of ecological engineering research in Yellow River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):1-14.

黄河流域生态工程研究现状、热点与导向

李欣¹, 陈新闻^{1,2}, 董智^{1,2}, 李小倩^{1,2}, 王树梅¹, 陈阳¹, 付文玲¹

(1. 山东农业大学林学院, 泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018; 2. 山东省高等学校
黄河流域水土保持与林草生态保育协同创新中心, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 揭示黄河流域生态工程的研究热点、主题演变与发展脉络, 识别前沿方向与核心问题, 为工程优化布局、科学评估与生态保护高质量发展提供理论与实践支撑。[方法] 聚焦黄河流域生态工程, 基于CiteSpace文献计量系统梳理研究热点及发展趋势。[结果] 1) 黄河流域生态工程研究以中国科学院和西北农林科技大学为主, 傅伯杰、上官周平、刘国彬为该领域核心代表人物, 且国际影响力从2013年起逐渐提升。2) 研究内容涉及微观层面的生态过程机制及宏观层面的遥感监测、生态系统服务及驱动影响机制。3) 研究方法呈多尺度、多模型融合趋势, 正由生态修复迈向系统治理。4) 研究的趋势以人地系统耦合为核心, 加强工程效益评估以及未来风险预判。[结论] 未来研究应聚焦多尺度视角下黄河流域生态工程的人地系统耦合机制, 融合宏观格局与微观过程解析, 完善生态工程系统评估与韧性提升体系, 以推动相关理论创新与实践优化。

关键词: 黄河流域; 生态工程; 演变趋势; CiteSpace; 文献计量

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2026)01-0001-14

Progress, Research Frontiers, and Directions of Ecological Engineering Research in Yellow River Basin

LI Xin¹, CHEN Xinchuang^{1,2}, DONG Zhi^{1,2}, LI Xiaoqian^{1,2}, WANG Shumei¹, CHEN Yang¹, FU Wenling¹

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Co-Innovation Center for Soil-Water and Forest-Grass Ecological Conservation in Yellow River Basin of Shandong Higher Education Institutions, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the research hotspots, thematic evolution, and developmental trajectories of ecological engineering in the Yellow River basin, identify cutting-edge directions and core issues, and provide theoretical and practical support for optimized engineering layout, scientific evaluation, and the high-quality development of ecological protection. [Methods] Focusing on ecological engineering in the Yellow River basin, bibliometric analysis was conducted using CiteSpace to identify research hotspots and developmental trends. [Results] 1) Research on ecological engineering in the Yellow River basin has been primarily led by the Chinese Academy of Sciences and Northwest A&F University, with FU Bojie, SHANGGUAN Zhouping, and LIU Guobin as core representatives. Since 2013, the international impact of this research has steadily increased. 2) The research content involves ecological process mechanisms at the microscopic level and macroscopic aspects, including remote sensing monitoring, ecosystem services, and driving and influencing mechanisms. 3) Research methods have shown a trend toward multi-scale and multi-model integration, reflecting a shift from ecological restoration to systematic governance. 4) Research trends center on the coupling of human-earth systems, with

收稿日期: 2025-06-20 修回日期: 2025-08-29 录用日期: 2022-09-25 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-21
资助项目: 内蒙古自治区揭榜挂帅项目(2024JBGS0013-05); 国家自然科学基金项目(42177347); 国家重点研发计划项目(2024YFD1501004-05)

第一作者: 李欣(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事生态系统服务评价研究。E-mail: 18434761564@163.com

通信作者: 董智(1971—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治、生态修复与评价研究。E-mail: dongzhi@sdau.edu.cn

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

strengthened assessment of engineering benefits and future risk prediction. [**Conclusion**] Future research should focus on the coupling mechanism of human-earth systems in ecological engineering in the Yellow River basin from a multi-scale perspective, integrate the analysis of macroscopic patterns with microscopic processes, and further improve the systematic evaluation and resilience enhancement framework of ecological engineering to promote theoretical innovation and practical optimization.

Keywords: Yellow River basin; ecological engineering; evolution trends; CiteSpace; bibliometric

Received: 2025-06-20

Revised: 2025-08-29

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-10-21

黄河流域地处中国北方,横跨青藏高原、黄土高原和平原地区,是我国重要的生态屏障与经济发展带,其生态安全和可持续发展是中国生态文明建设的重要内容^[1]。由于黄河水沙关系失调,流域内人地关系不和谐及生态环境脆弱等特征,黄河流域整体面临水资源短缺、土地沙化盐碱化、水土流失等突出问题,生态承载力和生态可持续水平较低^[2]。为缓解生态压力,提升区域可持续发展能力,黄河流域自20世纪80年代起陆续开展多项重大生态工程。其中较早的代表性工程包括“三北防护林工程”“退耕还林还草工程”和“天然林保护工程”等,近年来,“黄河流域生态保护和高质量发展”战略的推进,进一步推动一系列区域性综合治理工程的实施^[1,3-4]。目前,黄河流域已实施大小生态工程数百项,涵盖水土保持、防沙治沙、水资源调控、生态修复与生物多样性保护等多个方面^[5-6]。生态工程的实施在一定程度上遏制生态退化趋势,改善部分区域的生态系统结构与功能,增强流域生态安全。但由于缺乏系统性、综合性评估,生态工程实施及运行暴露出一系列问题,如布局与生态格局不匹配、目标单一、与社会系统脱节、后期管护薄弱以及缺乏科学评估机制等问题^[7]。随着山水林田湖草沙系统修复理念的提出,关于工程的生态适宜性和可持续性,工程空间分布的合理性,工程与利益相关者的耦合性,修复成效评价与系统管理等问题成为当前生态工程研究的热点内容^[8-9]。然而,基于实地监测、试验模拟、小流域治理效益分析和项目区遥感解译等传统手段,难以在宏观尺度上系统揭示黄河流域生态工程的时空格局与研究演化趋势,在一定程度上制约了对工程全局性成效的认知。而以文献计量为代表的分析方法,正具备宏观把握、系统识别与综合归纳的优势,通过对工程实施以来众多研究文献的追溯与梳理,准确把握黄河流域生态工程的研究现状、热点与发展导向,以期为黄河流域生态工程的系统性研究提供有效支撑。

随着科研成果数量的持续增长,传统文献综述在知识整合与发展脉络识别方面逐渐暴露出主观性强、系统性弱等局限,文献计量分析作为一种以定量方法为基础的科学研究工具,能够有效挖掘大规模文献中的知识结构与演化路径,已成为多学科领域识别研究前沿与构建知识图谱的重要手段。CiteSpace是一款常用于科学计量研究的软件,具备操作简便、可视化表达清晰等优点,能够有效呈现学科发展的结构特征和演化轨迹^[10]。为全面把握黄河流域生态工程研究的整体格局与发展脉络,有必要借助文献计量方法对相关成果进行系统梳理与分析,不仅有助于揭示研究热点与演变趋势,也为未来生态工程的科学布局与政策制定提供有力支撑。

本文基于文献计量学方法,深入分析黄河流域生态工程研究的热点主题与发展导向,系统总结其研究特征,梳理演化路径,厘清其知识图谱与发展脉络,进而明晰未来研究的关键议题与趋势。研究旨在识别生态工程领域的前沿方向与核心问题,为黄河流域生态保护和高质量发展提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为深入揭示黄河流域生态工程研究的热点主题与演进趋势,本文系统搜集了相关中英文文献。中文文献来源于中国知网(<https://www.cnki.net/>),检索策略为TI(篇名)=(黄河流域+黄河+黄河上游+黄河中游+黄河下游+黄土高原+黄河入海口+黄河三角洲+黄河支流+黄河干流)与TS(主题)=(生态工程+生态修复工程+生态建设工程+生态治理工程+生态恢复工程+水土保持工程+植被恢复工程+人工生态措施+土地整治+土地复垦+退耕还林+退耕还草+三北防护林工程+天然林保护工程)联合检索,限定文献来源为北大核心、CSSCI、CSCD期刊。基本涵盖黄河流域重要生态功能区,如三江源、祁连山、秦岭、贺兰山、若尔盖、黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区、青藏高原、黄土高原、北方防沙带、黄河口海岸带、渭河、汾河、涑水河、乌

梁素海等。英文文献选自 Web of Science 核心合集,检索式为 TI=(“Yellow River basin” OR “Upper Yellow River” OR “Middle Yellow River” OR “Lower Yellow River” OR “Yellow River Tributaries” OR “Tributaries of the Yellow River” OR “Yellow River Main Stream” OR “Yellow River” OR “Yellow River mouth” OR “Loess Plateau” OR “Yellow River Delta”) and TS=(“Ecological Engineering” OR “Ecological Restoration Project” OR “Ecological Construction” OR “Ecosystem Restoration” OR “Soil and Water Conservation Project” OR “Habitat Restoration” OR “Land Rehabilitation” OR “Vegetation Restoration” OR “Desertification Control” OR “Afforestation Project” OR “Grain for Green program” OR “The Three North Shelter Forest Program” OR “The Natural Forest Protection Program”),文献类型限定为“article”与“review article”。中文文献最早发表于1950年,但早期多为工作总结和会议纪要,尚未形成系统的学术研究;英文文献起步较晚,最早发表于2002年。为提高分析的科学与相关性,在剔除与研究主题无关的文献后,确定中文文献的起始时间为2000年1月,英文文献为2009年1月,均截至2025年3月。最终纳入分析的文献共计1506篇,其中中文文献601篇,英文文献905篇。

1.2 统计方法

利用 CiteSpace6.4.R1 软件对所收集的文献进行知识图谱构建与定量分析,设置时间切片为1 a。节点类型依次选择机构、作者及关键词,节点裁剪方式选择 Pathfinder, Pruning sliced networks, Pruning the merged network。在开展关键词共现分析过程中构建 CNKI 关键词共现图谱与 WOS 关键词共现图谱,图谱中节点的大小反映相应关键词的出现频率,节点间连线的粗细代表关联的强弱。本文采用 CiteSpace 的 Timeline View 功能对关键词进行聚类分析,绘制关键词时序演化图谱,并选取前10个聚类进行展示。图谱中,节点大小表示关键词在对应年份的出现频率,节点越大表明其在该时期的研究热度越高。聚类编号依据每个聚类中所含关键词数量进行排序。聚类效果评价指标显示,CNKI与WOS数据的关键词聚类图谱均具有较高的 Modularity (Q值)和 Mean Silhouette (S值),其中Q值均>0.3,S值均超过0.7,表明聚类结构清晰,聚类内部一致性较高,整体聚类结果具有良好的可靠性和解释力。通过对关键词的聚类分析,可清晰地梳理出该领域内不同的研究热点与主

要方向。结合关键词的时序图谱,根据各聚类在时间轴上的延续长度及其节点规模的变化趋势,可对各研究主题的发展历程与演化趋势进行深入分析。

2 研究概况分析

2.1 发文数量及作者机构分析

黄河流域生态工程研究呈明显的演进轨迹,反映学术范式由区域响应逐步走向全球对话的跃迁过程(图1)。研究早期以国内学术资源为主导,文献产出规模较小且增长波动,代表性学者如刘国彬、穆兴民、上官周平等,主要依托中国科学院水利部水土保持研究所、西北农林科技大学等黄河流域科研单位,初步构建面向区域生态问题的技术体系(表1)。随着研究体系的逐步拓展,2009年起国际期刊开始收录相关成果,年平均增长率为12.3%,标志着国际学术对话机制的建立。此后国际发文量迅速增长,2013年首次超过国内发文数量,并于2022年达到峰值132篇,年平均增长率为24.7%。该阶段,傅伯杰、李占斌、李鹏等学者在国际学术平台上持续产出高影响力成果,其所在单位如中国科学院生态环境研究中心、西安理工大学、西北农林科技大学等,逐步形成具有全球传播力和协同效应的研究网络(表1)。近2 a,国际与国内文献数量同步回落,2024年分别降至115、28篇,显示出研究重心趋于深化、整合与质量提升,反映出生态工程研究从数量扩张阶段向内涵式发展阶段的转型趋势。

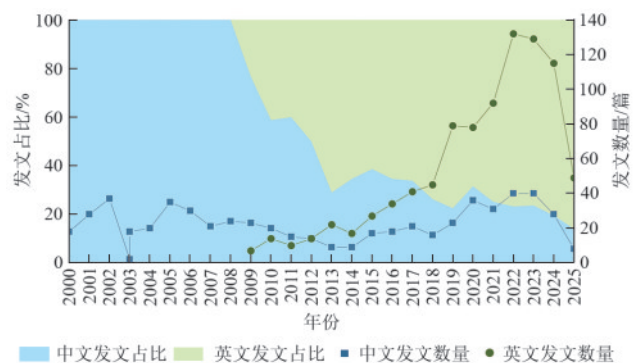


图1 2000—2025年国内外期刊文献发表数量

Fig. 1 Number of publications in domestic and international journals from 2000 to 2025

黄河流域生态工程研究格局的演进表现为以核心机构为节点的知识生产网络空间-结构演化(表2)。中国科学院系统(WOS发文472篇)水土保持研究所、生态环境研究中心、地理科学与资源研究所构成学术核心,主导全球生态工程研究;西北农林科技大学(WOS发文318篇)依托国家重点实验室,驱动区域生态治理理论创新;其他高校则依托野外生态定位站,在典型区域开展独具特色的生态治理

技术创新与效果评价。CNKI数据库凸显技术应用导向,黄河水利委员会、中国水利水电科学研究院等单位主导工程实践与评估。黄河流域生态工程研究

形成“基础研究(中国科学院/高校)-技术转化(管理部门)”双轨网络,在国家生态战略与全球治理需求驱动下持续重构知识体系。

表 1 黄河流域生态工程研究排名前 10 的作者及单位

Table 1 Top 10 authors and their affiliated institutions in ecological engineering research in Yellow River basin

排名	CNKI		WOS	
	作者	隶属单位	作者	隶属单位
1	刘国彬	中国科学院水利部水土保持研究所	傅伯杰	中国科学院生态环境研究中心
2	穆兴民	西北农林科技大学	李鹏	西安理工大学
3	上官周平	中国科学院水利部水土保持研究所	李占斌	西安理工大学
4	傅伯杰	中国科学院生态环境研究中心	邓磊	西北农林科技大学
5	冉大川	黄河水利委员会黄河水利科学研究院	上官周平	中国科学院水利部水土保持研究所
6	康玲玲	黄河水利委员会黄河水利科学研究院	刘国彬	中国科学院水利部水土保持研究所
7	姚文艺	黄河水利委员会黄河水利科学研究院	邵明安	中国科学院地理科学与资源研究所
8	王兵	西北农林科技大学	高光耀	中国科学院生态环境研究中心
9	姚顺波	西北农林科技大学	贾小旭	中国科学院地理科学与资源研究所
10	景可	中国科学院地理科学与资源研究所	韩新辉	西北农林科技大学

表 2 黄河流域生态工程研究排名前 10 的机构及发文数量

Table 2 Top 10 institutions and their publication counts in ecological engineering research in Yellow River basin

排名	CNKI		WOS	
	机构	发文数量/篇	机构	发文数量/篇
1	西北农林科技大学	45	西北农林科技大学	318
2	中国科学院大学	30	中国科学院水土保持研究所	251
3	黄河水利委员会	28	中国水利部	173
4	北京林业大学	21	中国科学院地理科学与资源研究所	89
5	中国矿业大学	16	北京师范大学	88
6	西北大学	10	中国科学院生态环境科学研究中心	83
7	北京师范大学	9	西安理工大学	69
8	中国水利水电科学研究院	8	北京林业大学	64
9	兰州大学	8	中国科学院地球环境研究所	49
10	陕西师范大学	6	陕西师范大学	39

2.2 生态工程的类型演进与区域分布特征

黄河流域的生态工程类型多样,涵盖水土保持、林草退化修复、生物多样性保护、土地沙化(荒漠化)治理、水源涵养、矿山修复及湿地保护等多个方面(图 2)。其实施区域广泛,如水土保持工程涉及黄河流域全域,三北防护林体系建设工程、天然林资源保护工程覆盖青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西等省区,退耕还林还草工程遍及黄河流域全域。野生动植物保护及自然保护区建设工程覆盖黄河流域内的自然保护区,京津风沙源治理工程则针对北部干旱草原沙化治理区、浑善达克沙地、农牧交错带沙化土地及燕山丘陵山地水源保护区,包括黄河上中游地区的主要沙源地。三江源自然保护区生态保护和建设工程集

中在青海省,废弃矿山治理涉及甘南黄河上游、内蒙古矿山、河南黄河三门峡段、青海祁连山南麓乐都片区等。湿地保护与修复工程则聚焦山东黄河河口、若尔盖湿地、黄河三角洲湿地等重要湿地区域。山水林田湖草沙生态保护修复工程更是统筹了乌梁素海、祁连山、秦岭、贺兰山、黄土高原、黄河三角洲等黄河中上游及京津冀水源涵养区^[11]。该工程的时间跨度从中华人民共和国成立初期至今,持续推进,明确不同生态问题的研究对象,使分析更具针对性。同时,科技部及相关部委对生态工程先后设立一批重大项目,如国家科技支撑计划、国家重点研发计划等,此类项目对生态工程的研究方向和内容起到重要的导向作用,共同推动黄河流域生态环境的显著改善。

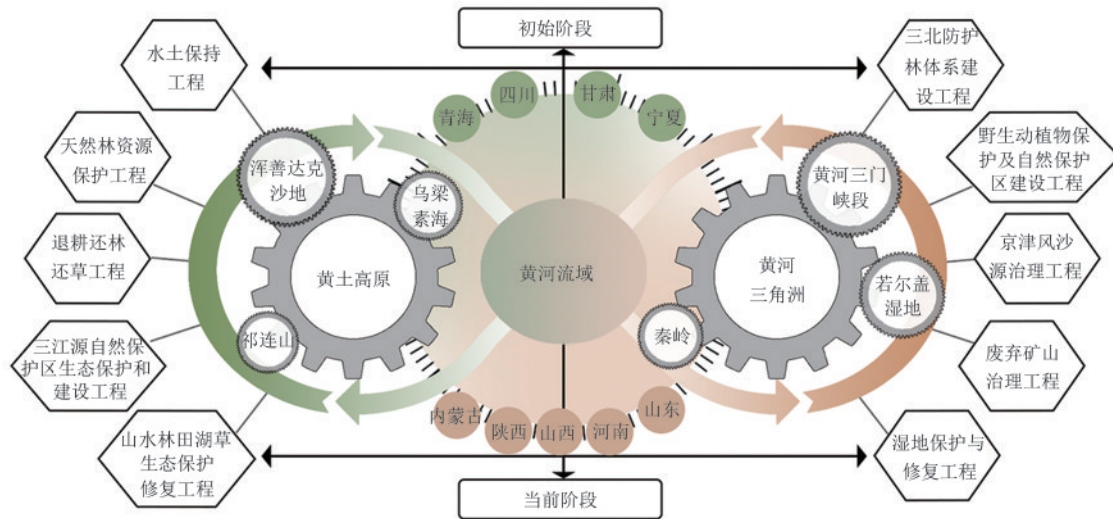


图 2 黄河流域生态工程相关研究框架

Fig. 2 Research framework related to ecological engineering in Yellow River basin

2.3 关键词聚类分析

CNKI 与 WOS 的时序图谱(图 3、图 4)显示,相关研究始于 2000 年前后,初期聚焦于黄土

高原地区的水土保持、小流域治理与生态恢复等主题,随后研究内容逐步拓展,呈多元化发展趋势。

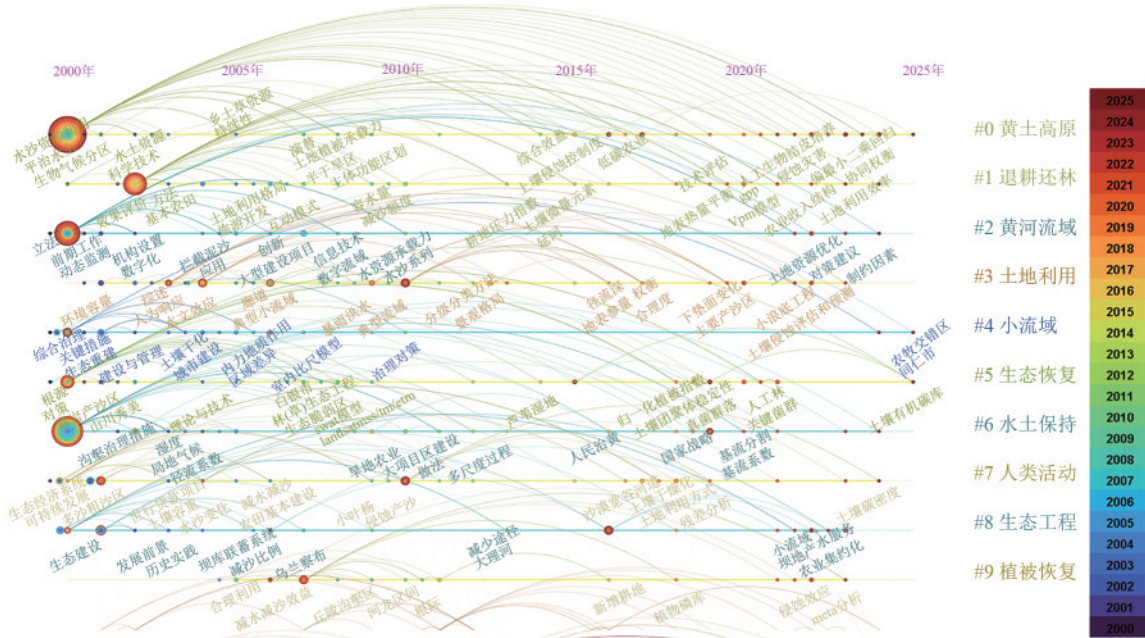


图 3 CNKI 关键词时序图谱

Fig. 3 Temporal keywords mapping in CNKI

研究区域主要集中在黄土高原和黄河三角洲。黄土高原因其独特地貌、生态退化严重及气候敏感性等特征成为生态工程实施的核心区域^[2],该区域早期研究以“黄土高原”“丘陵地区”“集水区”等关键词为主,聚焦地形地貌、水文过程和土地利用等自然地理要素,随后逐步拓展至系统治理。小流域作为治理基本单元,凭借空间尺度和治理实践优势,形成可复制的综合治理模式,研究从水土保持拓展至生态系统服务与区域协同发展,重点聚焦于选点规划与治理措施配置、治理模式构建与分类、综合效益评价

方法体系、典型区适应性策略及生态清洁小流域等新型治理路径的标准化建设^[12-13]。黄河三角洲作为新生湿地与生态敏感区,生态退化严重、湿地功能丧失问题突出,是生态工程的典型示范区。相关研究主要围绕湿地生态系统的恢复与重建、土地利用变化与生态系统功能演变,以及盐碱胁迫响应、植物萌发调控和微生物群落动态等生态系统微观机制展开,体现了从宏观生态恢复到微观生态过程解析的研究转型,凸显其在流域生态安全保障和生态功能提升中的关键作用^[14-15]。

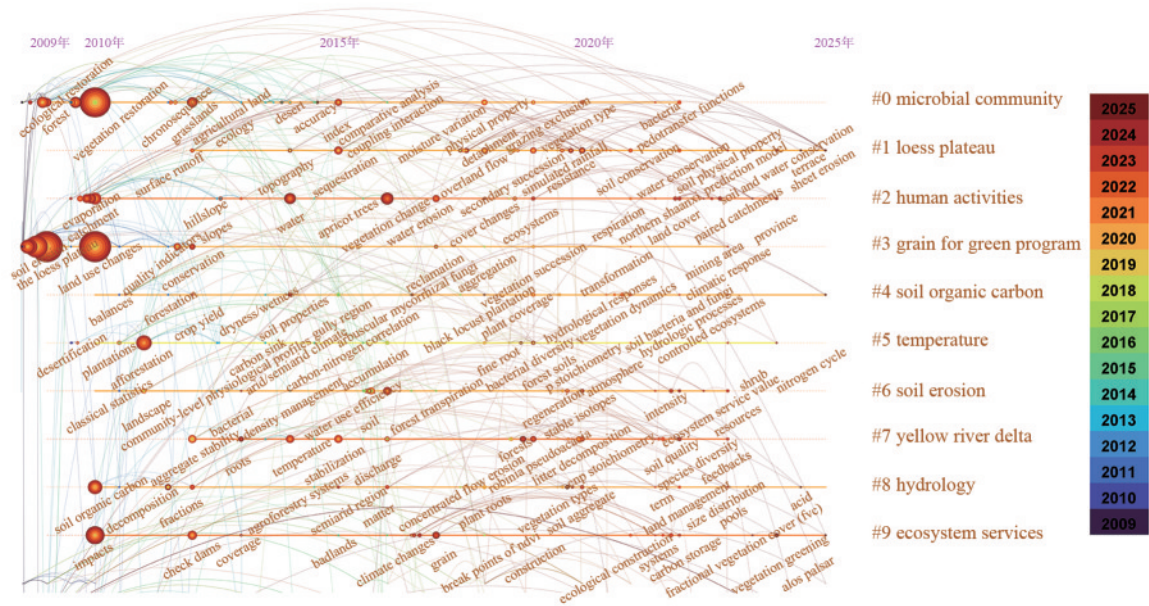


图 4 WOS 关键词时序图谱

Fig. 4 Temporal keywords mapping in WOS

研究内容主要聚焦“水土保持”“退耕还林”“土壤侵蚀”与“人类活动”。水土保持与土壤侵蚀治理研究与实践同步发展,2000—2005年侧重水土保持工程与治理体制完善;2006—2015年引入遥感与数字技术,关注流域一体化修复措施布设,包括工程、生物、农业及管理等多种手段的协同应用,同时开展生态效益与情景分析;2017年至今,融入国家生态文明战略,拓展至国土空间整治与资源优化,方法趋向模型化、定量化与智能化^[16]。

退耕还林工程研究早期(2000—2015年)聚焦土壤改良、水土保持、植被恢复等直接生态效应;中期拓展至生态系统服务、生物多样性维持及碳储量提升;近期则深化为可持续性评估、生态系统健康监测与动态调控^[1,17],其核心手段“植被恢复”与“生态恢复”的内涵也发展为涵盖结构、过程、功能与可持续性的系统性过程。

人类活动的相关研究早期(2000—2010年)聚焦植被建设、退耕还林、土地利用变化之类的高强度干预,近年则转向生态修复及可持续管理的绿色调控;气候变化研究自2010年兴起,后期关注干旱胁迫等影响机制;水文过程作为自然-社会系统耦合纽带,在气候变化与人类活动双重影响下成为生态风险与适应性管理的核心,在技术推动下向高精度与过程解析深化^[18],相关聚类虽起步晚但增长迅速。三者高度交融,跨学科方法与综合模型促进机制交叉与学科融合。

国际研究中更多的是阐述生态工程的碳汇驱动机制,聚焦“微生物群落”与“土壤有机碳”,揭示生态工程通过改善微环境重塑微生物群落及其多样性变化,代

谢活性增强及残体形成等方式驱动土壤有机碳的积累与稳定,是提升土壤碳汇功能的关键微观机制^[19-20]。

3 生态工程研究的多尺度特征

生态工程研究贯穿地块、小流域到区域等多尺度体系,体现出微观机制与宏观格局的联动特征。为清晰阐述其多尺度研究结构,研究通常将其划分为微观和宏观两个层面,该种划分有助于在分析中聚焦不同尺度下的核心科学问题。微观层面主要针对地块、坡面尺度,强调过程与机制基础;宏观层面则面向流域、区域尺度,侧重于综合效应与可持续性。在此体系中,小流域尺度具有承上启下的关键作用。其连接地块尺度的生态过程与区域尺度的生态格局,既整合微观层面的水、土、养分等过程,也通过出口处的径流、泥沙输出等汇聚响应,直接作用于宏观系统的输入端,是实现尺度过渡与效应传导的核心单元。由于小流域既包含生态过程的细节,又体现区域响应的聚合,其研究内容常常可根据目标被归入宏观或微观范畴,从而在两类尺度间发挥桥梁作用。

在微观层面,研究着重揭示水土流失的起始环节、径流泥沙物质输移、土壤养分循环的源汇单元、土壤-植被互作及植被恢复的直接响应机制。通过长期定位观测和过程模拟,微观研究不断深化对水土流失动力学、土壤与植被互作、植物功能响应等生态过程的理解,推动恢复生态学在功能重建与系统调控方向上的理论进展。在宏观层面,研究关注生态工程时空格局演变、生态系统服务多维评价、气候变化与人类活动耦合影响及生态工程在大尺度上对生态系统结构与功能的综合影响,其内容涵盖区域水

3.1 微观研究

1) 水土流失与养分迁移机制

作为评估生态工程防护效益和揭示地表系统机制的关键,研究以样地尺度为核心,解析水动力过程驱动土壤颗粒剥离搬运及伴随的氮磷等养分迁移损失^[21]。核心关键词“土壤侵蚀”体现领域关注点,研究常结合实地观测、径流小区与数值模拟,探讨降雨强度、坡度、植被覆盖等因子对侵蚀强度的调控^[22-23]。“地表径流”作为侵蚀的直接驱动,与“泥沙输移”共同构成评估工程削减泥沙负荷的关键过程。“养分流失”研究正从定量评估转向迁移循环机制解析,关注工程干预下养分保持能力、植被生长响应及养分在径流中的输出特征,为效益评估提供支撑^[21]。

2) 土壤-植被的互作机制

旨在阐明工程措施如何通过调控土壤与植被互作提升土壤质量、增强植被恢复稳定性并强化生态系统功能。关键词“土壤有机碳”频现,反映其在评估工程碳汇功能与土壤改良中的重要性,其稳定化机制与分解动力学常关联“微生物活性”“酶活性”以阐明碳的微生物转化路径^[24-25]。黄河流域干旱和半干旱特征使得“土壤水分”与“入渗”成为工程核心成效指标;“氮循环”“磷动态”则紧密关联土壤养分利用效率,是退化生态系统肥力恢复的关键维度^[26]。“植物性状”“根系功能”等关键词体现植被对土壤环境的适应与调控作用,为宏观模型构建及工程优化设计提供微观理论数据支撑。

3) 植物响应与群落构建机制

关注生态工程在小尺度上对植被组成、结构与功能演变的影响,评估早期响应特征与可持续性基础,为优化设计和提升稳定性提供依据。“群落构建”研究揭示恢复初期演替路径,特别关注人工林与自然恢复方式下构建速率和组成的差异^[27-28]。“物种相互作用”通过功能性状和空间格局的解析,对群落结构与功能恢复具有决定性影响。柠条锦鸡儿、柽柳等优先种的水分利用效率与光合适应,是评估工程增强抗逆性与功能稳定性效果的重要指标,指导干旱区物种配置^[29-30]。

3.2 宏观研究

1) 景观格局特征

黄河流域广阔的尺度、复杂的地貌及长期实施的退耕还林还草、水土保持和流域综合治理等生态工程,使区域景观格局变化成为评估工程成效与指导决策的关键。研究通过遥感与GIS监测“土地利用/覆被变化”和“植被覆盖”等基础指标,揭示工程对土地利用结构与生态空间的重塑作用^[17]。景观格

局变化不仅是工程成效的直接反应,更深刻影响区域水文过程、气候调节及生态系统服务等关键功能^[31]。其多尺度空间特征及动态演变已成为生态研究重要议题,是理解生态系统演变与评估工程效益不可或缺的基础支撑。

2) 生态系统服务评价与管理

该方向为工程成效检验与策略优化提供科学依据,推动治理从工程导向转向系统管理。研究量化区域尺度生态系统服务,评估工程对生态过程与调节能力的提升效应,支撑治理措施制定^[32]。水资源相关服务尤为重要,“土壤持水量”“产水量”“水分利用效率”等关键词频现^[33]。生态工程改变区域水分循环与分布,提升生态系统结构与功能的同时,也可能加剧“生态需水”增加与“可供水”减少的矛盾,引发水资源承载力风险^[34]。因此,生态效益提升与水资源的合理配置成为研究热点与挑战。当前已构建以“生态系统服务”为核心的效益评价体系,强调空间异质性与过程动态,并广泛应用遥感监测及InVEST、CASA、FLUS等模型方法进行空间量化、情景模拟,支撑生态空间管控与工程布局优化,体现“功能评估-机制解析-情景预测”的系统化转向,为区域统筹治理与高质量发展提供科学基础。

3) 气候变化与人类活动的影响

在干旱频发、水资源紧张、极端气候加剧及人类干扰背景下,研究关乎工程稳定性、韧性及区域生态-社会经济可持续性^[35]。研究以“气候变化”和“人类活动”为核心起点,遵循“驱动力-影响-响应”路径,探索其对区域生态系统的复合影响机制。近年来,上游升温、干旱加剧制约植被恢复与土壤水分供应,成为工程成效的重要限制;同时,过度垦殖、工程扰动、灌溉引水等人类活动加剧生态系统脆弱性,在极端气候频发下诱发灾害风险,削弱工程稳定性与区域生态韧性^[36-37]。关键词“动态”“时空格局”反映研究正从静态识别向多维度、全过程的适应性治理深化,推动构建气候与人为双重风险管理导向的生态治理路径。

3.3 研究前沿变化分析

根据黄河流域生态工程研究的关键词突现分析(图7、图8),结合政策实践与技术演进,其研究前沿聚焦于初步治理与基础建设、系统修复与功能提升、机制深化与多元过程及前沿探索与高质量发展4个阶段(图9)。黄河流域各类生态工程类型多样,实施时间跨度大,既包括20世纪中期启动的淤地坝和三北防护林工程,也涵盖1999年后大规模推进的退耕还林、水土保持工程,以及新时代推动的山水

林田湖草沙一体化保护修复实践。该类工程在实施时间上虽呈先后推进的趋势,但在实际研究中往往表现为主题上的继承与方法上的耦合,呈现出时间上的交叉演进和阶段性聚焦。因此,本研究以 2000 年以来的整体研究热点和关键词演变为时间

框架进行划分,该划分更能体现生态工程研究在政策响应、技术路径和理论框架方面的整体演进脉络,反映出从工程驱动的生态恢复到多目标协同的高质量发展转型过程中,研究主题与方法体系的持续深化与拓展。

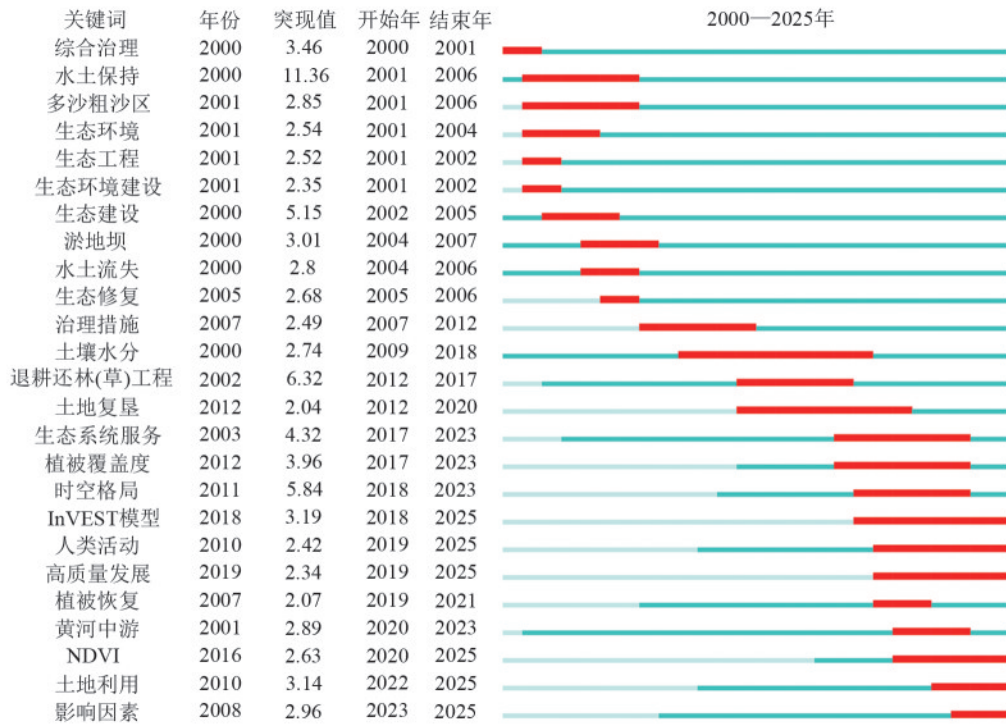


图 7 CNKI关键词突现图谱

Fig. 7 Keywords burst mapping in CNKI

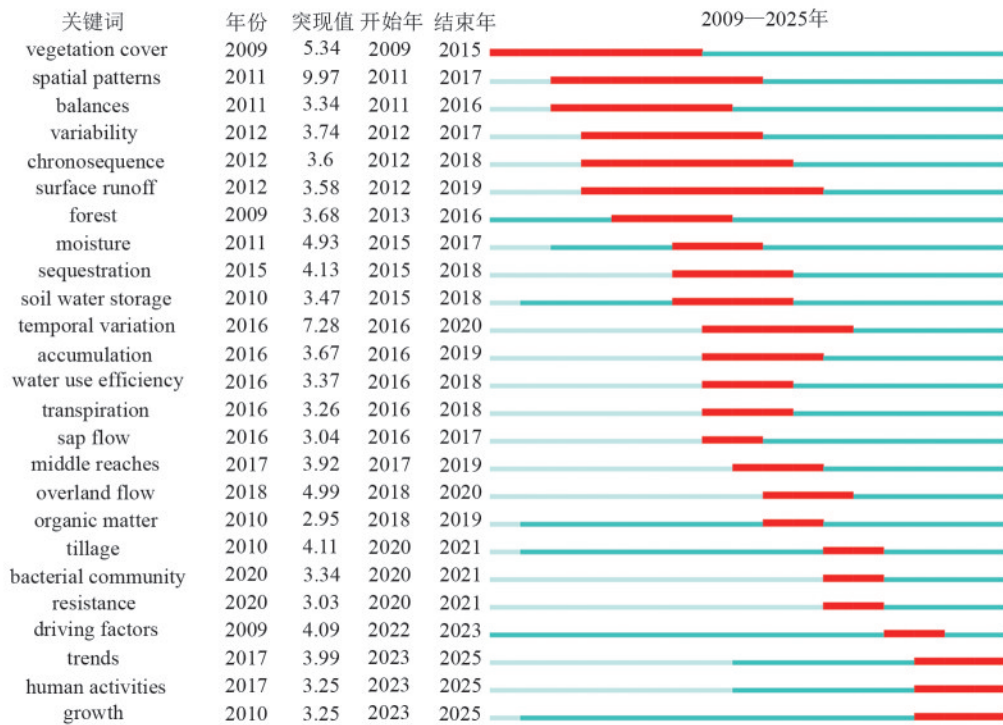


图 8 WOS关键词突现图谱

Fig. 8 Keywords burst mapping in WOS

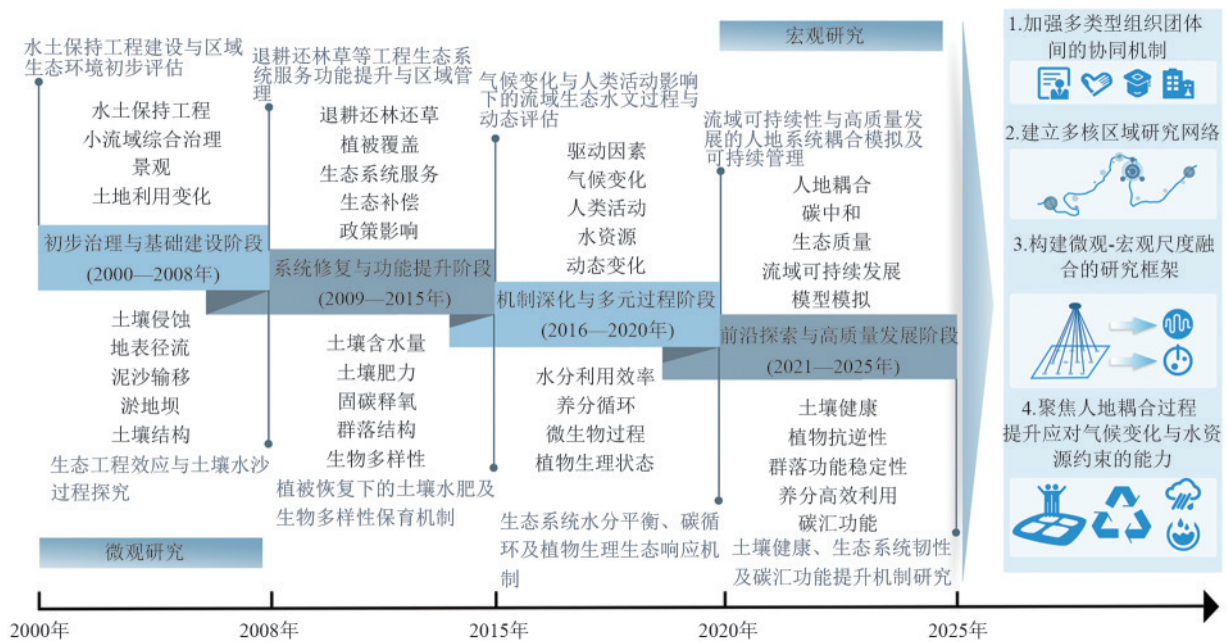


图9 黄河流域生态工程研究发展历程

Fig. 9 Development history of ecological engineering research in Yellow River basin

1) 初步治理与基础建设阶段(2000—2008年), 主要以水土流失控制与生态结构重建为核心。研究导向增强实践性, 聚焦于多沙粗沙区治理效益、梯田与淤地坝防护效益。

2) 系统修复与功能提升阶段(2009—2015年), 从单一修复转向生态系统服务综合提升, 重点放在生态系统的多功能性与可持续性提升上。研究方法也由微观试验扩展到空间分析, 如英文文献中 vegetation cover 和 spatial pattern 的高强度突现, 也使研究在尺度和精度上取得提升。此阶段体现从“修复破坏”到“提升功能”的认识跃迁。

3) 机制深化与多元过程阶段(2016—2020年), 主要以微观机制解析与多学科交叉为主, 关注生态-水文-生物协同, 如水分利用效率优化的研究、微生物驱动碳汇机制及植被响应与干旱胁迫的动态关联, 凸显对生态系统内部运作机制、时空动态和生物多样性的关注。此阶段遥感、地统计方法、生态模型等技术手段的应用逐渐成为研究热点。同时, 随着气候变化问题日益突出, 干旱、温度等环境因素对生态系统的影响也受到更多关注。在此背景下, 生态工程研究逐步与气象、水文、生物等相关学科产生交集。此阶段的研究内容更加多元, 也为生态管理提供更加具体的分析工具和技术基础。

4) 前沿探索与高质量发展阶段(2021—2025年), 主要面向“双碳”目标与智慧治理, 强化人地系统耦合模拟。InVEST模型、高质量发展, 以及驱动特征和人类活动成为显著突现性的词汇, 研究已进入生

态工程-人地关系-社会经济的耦合分析与预测评估阶段。尤其在“双碳”目标、乡村振兴与区域协调发展的政策推动下, 研究更加关注生态工程在支持区域发展、提升社会韧性和应对未来变化方面的作用。建模、情景模拟和系统分析成为主要手段, 生态工程研究正逐步从生态视角扩展到系统治理和可持续发展的战略层面。

4 结论与展望

4.1 结论

基于CiteSpace对黄河流域生态工程研究的可视化分析, 发文趋势由本土探索转向国际引领, 国内研究侧重政策实践, 聚焦本土治理, 国际研究侧重方法和机制的解析, 强化学术前沿输出, 目前国内外发文趋稳, 进入学科发展成熟期。研究发现, 该领域已形成以生态地理环境研究为背景的中国科学院和以地域为背景的西北农林科技大学两大研究力量, 与傅伯杰、上官周平、刘国彬等学者形成高影响力合作网络。在演化路径上, 研究主题由黄土高原的水土保持等早期议题, 逐步拓展至涵盖微观过程, 如土壤与植被的相互作用、微生物驱动的碳汇过程, 以及宏观议题, 如景观格局演变、生态系统服务、气候与人类活动的耦合效应等复杂体系; 明晰未来研究的关键议题与趋势, 从单一工程效应分析到多尺度生态响应识别到系统韧性机制解析, 标志着研究从结构修复转向人地系统综合治理。本研究旨在厘清该领域的知识图谱与发展脉络, 并针对当前研究瓶颈提出具有针对性的策略建议。

4.2 展望

当前黄河流域生态工程研究存在机构协作割裂、区域研究失衡、尺度衔接薄弱、系统风险预警能力不足等问题。类似的问题也普遍存在于全国其他生态关键区域,亟须深化工程效益长周期评估、人地系统耦合下的区域服务能力多尺度解析,以及多要素扰动情景下的工程风险模拟(图9)。

4.2.1 加强多类型组织团体间的协同机制 行政管理机构、公益组织与科研系统在研究目标、方法体系与评价导向上存在显著差异。公益组织通常聚焦生态保护的公平性与公众参与,强调生态工程的人文关怀与社会影响;而高校与科研院所则多聚焦于理论深化与方法创新,导致学术研究成果在实际生态工程中的落地性具有滞后性。建立跨部门联合攻关平台,整合高校理论建模、科研院所技术研发与流域机构工程实践,推动成果转化;设立流域级生态工程创新联盟,通过政策试点验证模型,强化落地效能^[38]。

4.2.2 建立多核区域研究网络 黄河流域生态工程研究呈现“黄土高原核心化、边缘区域碎片化”的空间失衡。现有研究高度集中于黄土高原区,已形成成熟体系,但对上游水源涵养区、中游生态-经济过渡带及下游河口湿地的系统性关注不足,制约对全流域生态复杂性的认知。以黄河三角洲为例,虽因盐碱化治理与人类活动干扰引发国际关注,但尚未形成深度研究集群,仍处于学术边缘^[39-40]。类似的不均衡格局在全国其他生态重点区亦普遍存在,如长江上游生态屏障研究集中于三峡库区,中下游平原地带则相对薄弱;西南喀斯特区以典型石漠化斑块为主,缺乏对整体生态系统联动效应的评估;青藏高原研究多聚焦高寒草甸退化,忽视工程后期生态服务的综合效应。构建跨流域“多核联动-功能互补”的研究网络,不仅是推动黄河流域格局优化的需要,也有助于提升全国生态工程布局的系统认知能力^[41-42]。因此,未来强化对关键节点和典型区域的系统研究,推动从“热点集中”到“格局优化”的转变。整体性识别流域内多尺度物质输移与生态廊道关联,解析水源涵养、荒漠化防治、碳汇增强的跨尺度效应,构建极端气候下工程失效风险预警模型。通过强化多节点系统研究,推动从单点治理向流域生态网络转型,提升对黄河流域生态工程综合成效、空间溢出效应及系统韧性的认知,同时也为其他流域的分区整合与联动治理提供参照路径。

4.2.3 构建微观-宏观尺度融合的研究框架 目前,宏观与微观研究间仍存在尺度衔接不足、数据整合

薄弱的问题,跨尺度协同不足导致研究成果相互割裂,缺乏系统性耦合与机制联动,制约生态工程整体效益的准确评估与调控策略的科学制定^[43]。未来应构建多尺度系统建模框架,建立融合微观机制与宏观效应的统一理论框架,明确尺度转换的数学表达与边界条件。开发基于人工智能和复杂系统科学的跨尺度动态模型,实现非线性相互作用的高效模拟与预测。构建多源异构数据整合平台,制定跨尺度数据语义标准与元数据规范,解决微观与宏观数据的结构异质性问题。揭示跨尺度级联机制,通过网络科学与敏感性分析,辨识从微观过程到宏观功能的级联路径与枢纽变量,试验结合模型,定量解析尺度间非线性阈值和反馈回路。

4.2.4 聚焦人地耦合过程,提升应对气候变化与水资源约束的能力 气候变化与人类活动作为影响生态系统结构与功能演变的两大核心驱动因素,在黄河流域该典型的气候敏感区与水资源紧张区呈显著的叠加效应与非线性交互机制,导致生态工程面临更高的不确定性与风险挑战。水资源作为连接自然系统与社会系统的核心纽带,尤其在黄河流域应被优先纳入生态工程设计与评估的关键变量与切入点。构建“水资源-生态功能-社会需求”动态耦合模型,以多尺度交互机制解析量化气候变化与人类活动对流域水循环的叠加效应,揭示其对生态工程韧性阈值的非线性影响。集成气候模式与社会经济发展路径,预演不同决策下生态工程的可持续性,基于情景模拟优化算法生成动态调控策略,实现多目标约束下的生态工程协同优化。推行水资源刚性约束下的精准生态修复,建立单位水资源生态增益等量化指标体系,替代单一植被覆盖率目标^[44]。研发低耗水植被配置模型、雨水资源化工程等,实现“以水定绿”的精准空间落地。此外,在青藏高原高寒草原、长江中下游湖泊区、西北荒漠绿洲带等区域,类似的人地系统非线性耦合机制与气候资源约束也高度显著,生态工程同样面临复杂的适应与调控需求。未来可推动构建全国尺度下生态系统响应的评估框架,识别各区域生态工程韧性的临界机制,形成具有情景弹性的调控方案,增强生态工程对气候极端事件的抵御与自适应能力^[45-46]。同时还应将生态工程纳入流域碳汇交易机制,量化其水资源成本与碳汇收益的平衡点,强化对生态工程在碳汇功能、生态调节能力及社会服务价值等多维度的综合效益评估^[47-48]。推动生态工程从被动修复转向主动适应,最终实现水资源硬约束下“自然-社会”系统的协同演进。

参考文献:

- [1] 段绪萌,韩美,孔祥伦,等.退耕还林(草)工程前后黄河流域生态系统碳储量时空演变与模拟预测[J].环境科学,2024,45(10):5943-5956.
DUAN X M, HAN M, KONG X L, et al. Spatiotemporal evolution and simulation prediction of ecosystem carbon storage in the Yellow River basin before and after the grain for green project [J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5943-5956.
- [2] 刘昌明,田巍,刘小莽,等.黄河近百年径流量变化分析与认识[J].人民黄河,2019,41(10):11-15.
LIU C M, TIAN W, LIU X M, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 11-15.
- [3] 纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J].林业科学,2022,58(11):31-48.
JI P, SHAO Q Q, WANG M, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001—2020[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(11): 31-48.
- [4] 李源,王晓荟,万宇轩,等.三方演化博弈下生态工程质量监管机制[J].生态学报,2025,45(12):5824-5838.
LI Y, WANG X H, WAN Y X, et al. Research on the quality supervision mechanism of ecological engineering under the three-party evolutionary game [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5824-5838.
- [5] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 122-129.
- [6] ZHANG Y H, HU Z Q, HAN J Z, et al. Spatiotemporal relationship between ecological restoration space and ecosystem services in the Yellow River basin, China[J]. Land, 2023, 12(4): e730.
- [7] 李静,徐斌,刘昭君.黄河流域林业生态治理的政策演进与展望[J].林草政策研究,2024,4(1):41-47.
LI J, XU B, LIU Z J. Policy development and countermeasures for increasing forests contribution to ecological governance of the Yellow River basin[J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2024, 4(1): 41-47.
- [8] LYU R F, CLARKE K C, ZHANG J M, et al. Dynamics of spatial relationships among ecosystem services and their determinants: Implications for land use system reform in northwestern China[J]. Land Use Policy, 2021, 102: e105231.
- [9] FENG W L, LIU Y S, CHEN Z F, et al. Theoretical and practical research into excavation slope protection for agricultural geographical engineering in the Loess Plateau: A case study of China's Yangjuangou catchment[J]. Journal of Rural Studies, 2022, 93: 309-317.
- [10] 崔彩贤,沈霖,远佳怡,等.黄土高原土壤调控原理与应用研究知识图谱:基于CiteSpace的文献可视化分析[J].水土保持学报,2024,38(1):396-408.
CUI C X, SHEN L, YUAN J Y, et al. Knowledge graph of principles and applications of soil control in the Loess Plateau: Literature visualization analysis based on CiteSpace [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 396-408.
- [11] 田美荣,冯朝阳,王世曦,等.近70年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J].环境工程技术学报,2023,13(5):1787-1797.
TIAN M R, FENG C Y, WANG S X, et al. Ecological restoration of the Yellow River basin in the last 70 years and systematic restoration thinking [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1787-1797.
- [12] 贺国凯,王凯博,任宗萍,等.黄土高原典型小流域水土保持土壤碳库演变特征及其碳汇潜力[J].水土保持学报,2024,38(6):161-169.
HE G, WANG K, REN Z, et al. Evolution characteristics of soil and water conservation carbon pool and its carbon sink potential in typical small watershed of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 161-169.
- [13] 魏采用,鞠学良,杨阳,等.基于文献计量分析的中国小流域综合治理现状研究[J].人民珠江,2021,42(9):47-53.
WEI C Y, JU X L, YANG Y, et al. Research progress of comprehensive control of small watershed in China based on bibliometrics analysis [J]. Pearl River, 2021, 42(9): 47-53.
- [14] CAO Q, WANG X, CHU X, et al. Effects of vegetation restoration age on soil C: N: P stoichiometry in Yellow River Delta coastal wetland of China [J]. Chinese Geographical Science, 2024, 34(6): 1045-1059.
- [15] JIANG Y X, WANG Y Z, ZHOU D M, et al. The impact assessment of hydro-biological connectivity changes on the estuary wetland through the ecological restoration project in the Yellow River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 758: e143706.
- [16] 姚文艺.新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位[J].人民黄河,2019,41(12):1-7.
YAO W Y. Development opportunity and scientific positioning of soil and water conservation of the Yellow River in the new era [J]. Yellow River, 2019, 41(12): 1-7.
- [17] 黄麟,曹巍,祝萍.退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征[J].生态学报,2020,40(12):4041-4052.
HUANG L, CAO W, ZHU P. The regional variation characters of ecological effects of the Grain for Green Project [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4041-4052.
- [18] WANG W, LUO Y, WANG X L, et al. Improving

- Liao's model for investigating soil water response to vegetation restoration in the middle Yellow River basin, China[J].*Ecological Indicators*,2023,157:e111260.
- [19] ZHAO L, WANG W Q, XU S Q, et al. The comparison of gut bacteria communities and the functions among the sympatric grasshopper species from the Loess Plateau [J].*Frontiers in Microbiology*,2022,13:e806927.
- [20] LI H W, WU Y P, LIU S G, et al. The Grain-for-Green project offsets warming-induced soil organic carbon loss and increases soil carbon stock in Chinese Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: e155469.
- [21] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].*中国科学院院刊*,2017,32(1):11-19.
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J].*Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2017,32(1):11-19.
- [22] 谢乐,侯鹏,周涛,等.黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响[J].*生态学报*,2025,45(10):4940-4951.
XIE L, HOU P, ZHOU T, et al. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau [J].*Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45 (10):4940-4951.
- [23] ZHANG X X, SONG J X, WANG Y R, et al. Threshold effects of vegetation coverage on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis[J].*Geoderma*,2022,412:e115720.
- [24] ZHAO Q Z, SHI P, LI P, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in the Loess Plateau: A meta-analysis [J].*Land Degradation and Development*, 2023, 34(7):2088-2097.
- [25] 孙宏伟,闫美芳.黄河流域煤矿区土壤有机碳库的修复及其影响因素:基于Meta分析[J].*环境科学*,2025,46(3):1690-1702.
SUN H W, YAN M F. Soil carbon restoration and its influencing factors in coal mining areas of Yellow River basin: A meta-analysis[J].*Environmental Science*,2025, 46(3):1690-1702.
- [26] 高德新,张伟,任成杰,等.黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征[J].*生态学报*,2019,39(10):3622-3630.
GAO D X, ZHANG W, REN C J, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil and leaves during the recovery process of typical vegetation on the Loess Plateau[J].*Acta Ecologica Sinica*,2019,39(10):3622-3630.
- [27] WANG K, WANG X X, FEI H Y, et al. Changes in diversity, composition and assembly processes of soil microbial communities during *Robinia pseudoacacia* L. restoration on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*,2022,14(5):561-575.
- [28] WANG X, WANG Z C, ZHANG Z J, et al. Natural restoration exhibits better soil bacterial network complexity and stability than artificial restoration on the Loess Plateau, China [J].*Journal of Environmental Management*, 2023,346:e119052.
- [29] YANG F, LV G H. Metabolomic analysis of the response of *Haloxyton ammodendron* and *Haloxyton persicum* to drought[J].*International Journal of Molecular Sciences*,2023,24(10):e9099.
- [30] 张振杰,于露,王红梅.荒漠草原向灌丛转变过程两种优势植物定植土壤水分阈值特征[J].*生态学报*,2022,42(19):8061-8072.
ZHANG Z J, YU L, WANG H M. Characteristics of soil moisture threshold for the seedling establishment of two dominant plants in desert grassland-shrubland transition[J].*Acta Ecologica Sinica*,2022,42(19):8061-8072.
- [31] 员学锋,施林童,杨悦,等.陕北黄土丘陵沟壑区人类活动和植被覆盖对关键生态系统服务的影响[J].*应用生态学报*,2024,35(12):3235-3246.
YUAN X F, SHI L T, YANG Y, et al. Impacts of human activities and vegetation cover on key ecosystem services in the loess hilly-gully region of northern Shaanxi, China [J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12):3235-3246.
- [32] 邵全琴,刘树超,宁佳,等.2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J].*地理学报*,2022,77(9):2133-2153.
SHAO Q Q, LIU S C, NING J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing [J].*Acta Geographica Sinica*,2022,77(9):2133-2153.
- [33] DENNEDY-FRANK P J, GORELICK S M. Insights from watershed simulations around the world: Watershed service-based restoration does not significantly enhance streamflow [J].*Global Environmental Change*, 2019,58:e101938.
- [34] 莫兴国,刘苏峡,胡实.黄河源区气候-植被-水文协同演变及成因辨析[J].*地理学报*,2022,77(7):1730-1744.
MO X G, LIU S X, HU S. Co-evolution of climate-vegetation-hydrology and its mechanisms in the source region of Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(7):1730-1744.
- [35] 赵瑜琦,赵鹏云,许泽海,等.2002—2022年气候变化和人类活动对山西省植被恢复的贡献[J].*应用生态学报*, 2025,36(1):219-226.
ZHAO Y Q, ZHAO P Y, XU Z H, et al. Contribution of climate change and human activity to vegetation recovery in Shanxi Province from 2002 to 2022 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2025,36(1):219-226.
- [36] JIAN S Q, ZHANG Q K, WANG H L. Spatial-tempo-

- ral trends in and attribution analysis of vegetation change in the Yellow River basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): e4627.
- [37] QIN G X, MENG Z Y, FU Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 834: e155479.
- [38] 赵宏媚, 赵文华, 姚建建. 高校有组织科研核心要素响应机制研究 [J]. *科学学研究*, 2024, 42(10): 2130-2137.
ZHAO H M, ZHAO W H, YAO J J. Research on the core elements and response mechanism of organized research in universities [J]. *Studies in Science of Science*, 2024, 42(10): 2130-2137.
- [39] 张金萍, 肖宏林. 黄河流域灌区农业用水研究发展历程与展望 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 9-17.
ZHANG J P, XIAO H L. Past, current and future prospect for research on agricultural water use in irrigation districts in the Yellow River basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10): 9-17.
- [40] 岳辉, 刘英. 基于RS和GIS的黄河口海岸线演变及土地利用研究 [J]. *测绘工程*, 2018, 27(2): 13-19.
YUE H, LIU Y. Coastline evolution and land use of Yellow River estuary based on RS and GIS [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2018, 27(2): 13-19.
- [41] 吴恬静, 刘焱序, 王壮壮, 等. 中国重大生态工程区生态系统恢复力变化趋势与影响因素 [J]. *生态学报*, 2025, 45(18): 9000-9010.
WU T J, LIU Y X, WANG Z Z, et al. Trends and influencing factors of ecosystem resilience in major ecological project areas in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(18): 9000-9010.
- [42] HAN C, SONG M X, TANG Q, et al. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2023, 227: e107099.
- [43] 赵志龙, 胡曾曾, 许丰伟, 等. 社会-生态系统干旱脆弱性与适应性治理的概念及研究进展 [J]. *环境科学与管理*, 2024, 49(9): 5-10.
ZHAO Z L, HU Z Z, XU F W, et al. Concept and progress of drought vulnerability and adaptive governance of social-ecological systems [J]. *Environmental Science and Management*, 2024, 49(9): 5-10.
- [44] LI Y R, ZHANG X C, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: e143676.
- [45] 郑国强, 李润杰, 罗静, 等. 新时期青藏高原生态保护修复策略路径: 以青海省为例 [J]. *自然资源学报*, 2024, 39(12): 2783-2797.
ZHENG G Q, LI R J, LUO J, et al. Study on ecological protection and restoration strategies of Qinghai-Tibet Plateau in the New Era: Take Qinghai Province as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(12): 2783-2797.
- [46] 王凯歌, 郑慧慧, 徐艳, 等. 社会-生态系统结构研究进展与网络化探索 [J]. *地理科学进展*, 2022, 41(12): 2383-2395.
WANG K G, ZHENG H H, XU Y, et al. Research progress of social-ecological system structure and networking exploration [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(12): 2383-2395.
- [47] 王夏晖, 王波, 柴慧霞, 等. 探索新时期科学实施生态工程有效路径 筑牢人与自然和谐共生的美丽中国基石 [J]. *环境保护*, 2023, 51(24): 45-49.
WANG X H, WANG B, CHAI H X, et al. The exploration of an effective path to scientifically implement ecological engineering in the New Era to lay a solid foundation of building a beautiful China featured by harmonious coexistence between man and nature [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(24): 45-49.
- [48] 李贝, 张起明, 温倩倩, 等. 以延安市为例探讨城镇化与生态工程共同作用下的“三生空间”变化特征及其生态环境效应 [J]. *中国环境监测*, 2025, 41(3): 125-135.
LI B, ZHANG Q M, WEN Q Q, et al. The spatial changes and eco-environment effects of production-living-ecology spaces under the joint action of urbanization and ecological engineering: A case study of Yan'an City, China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(3): 125-135.