北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

黄河流域生态系统演变特征、驱动机制与治理策略

杨洪国 李世东 田昕 王兵 董世魁 李伟 吴波 王成 余新晓 李飞 孙尚伟 徐卫刚 张劲松 何友均

Characteristics of ecosystem evolution, driving mechanisms and governance strategies in the Yellow River Basin

Yang Hongguo, Li Shidong, Tian Xin, Wang Bing, Dong Shikui, Li Wei, Wu Bo, Wang Cheng, Yu Xinxiao, Li Fei, Sun Shangwei, Xu Weigang, Zhang Jinsong, He Youjun

引用本文:
杨洪国, 李世东, 田昕, 王兵, 董世魁, 李伟, 吴波, 王成, 余新晓, 李飞, 孙尚伟, 徐卫刚, 张劲松, 何友均. 黄河流域生态系统演变特征、驱动机制与治理策略[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):1–12. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250303
Yang Hongguo, Li Shidong, Tian Xin, Wang Bing, Dong Shikui, Li Wei, Wu Bo, Wang Cheng, Yu Xinxiao, Li Fei, Sun Shangwei, Xu Weigang, Zhang Jinsong, He Youjun. Characteristics of ecosystem evolution, driving mechanisms and governance strategies in the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):1–12. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250303

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250303

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析

Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估

Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin

北京林业大学学报, 2024, 46(7): 90–100. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230047

黄河流域生态空间网络特征

Characteristics of spatial ecological network in the Yellow River Basin of northern China

北京林业大学学报, 2022, 44(12): 142–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210159

库布齐沙漠地区生态系统格局演变及其驱动力分析

Evolution and driving forces of ecosystem pattern in Kubuqi Desert of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 108–123. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200242

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化

Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200272

基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估

Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model

北京林业大学学报, 2024, 46(11): 103–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240123

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250303

黄河流域生态系统演变特征、驱动机制与治理策略

杨洪国[1]　李世东[2]　田　昕[3]　王　兵[4]　董世魁[5]　李　伟[6]　吴　波[6]　王　成[7]
余新晓[8]　李　飞[9]　孙尚伟[1]　徐卫刚[6]　张劲松[7]　何友均[10]
（1. 中国林业科学研究院，北京 100091；2. 国家林业和草原局科学技术司，北京 100714；3. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；4. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所，北京 100091；5. 北京林业大学草业与草原学院，北京 100083；6. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所，北京 100091；7. 中国林业科学研究院林业研究所，北京 100091；8. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；9. 北京林业大学马克思主义学院，北京 100083；10. 中国林业科学研究院林业科技信息研究所，北京 100091）

摘要:揭示黄河流域生态系统的长期演变过程及其驱动机制是深刻认识区域生态安全格局演变的重要前提。本研究整合国家林业和草原局陆地生态系统定位观测研究站网长期监测数据、多源遥感产品、统计资料及历史文献，采用历史回溯与空间分析相结合的方法，系统分析该流域在古代、近代和现代 3 个历史阶段的演变特征，甄别其主导驱动因素，并提出针对性的保护与恢复策略。(1)演变过程大体可划分为 3 个阶段：古代相对稳定与缓慢退化阶段，该阶段生态系统以自然驱动为主，人类活动影响有限，森林、草地与湿地覆盖较广；近代快速退化阶段，人口增长与农业垦殖导致林草植被严重破坏，荒漠化扩展，生态系统服务显著下降；现代生态恢复与局部改善阶段，生态工程的实施促使植被覆盖率逐步回升，森林、草地和湿地面积呈“U”形变化，而荒漠化生态系统则经历了“倒 U”形演变，农田质量提升与城市生态功能增强亦是现代阶段的积极变化。(2)黄河流域生态系统总体上经历了“自然稳定—人为干扰退化—逐步恢复”的演变过程，反映了自然系统与人为干扰的互动特征，是从人类干扰造成的无序失衡逐步走向人与自然和谐的有序平衡态势，也体现了近期生态修复努力的积极成效。(3)古代生态系统演变主要受气候变化、地震、人口增长与战争等因素影响，其中气候是自然主导因子，人口增长与垦殖是植被退化的主要人为原因；近代极端气候事件与战争叠加加剧生态破坏；现代阶段，气候变化与人类活动共同驱动生态变化，人类活动包括林业生态工程、水利水保措施、工农业用水及城市化等，其影响具有明显的区域性和时段差异。(4)按照“分区施策、分类治理、系统协同”的思路，针对分区生态治理、水土保持与荒漠化、湿地修复、农田优化、城市生态 5 大重点领域，提出了针对性治理策略。总之，未来应进一步加强气候变化与人类活动耦合机制研究，优化生态恢复路径，为实现流域人与自然和谐共生提供科学支撑。

关键词：黄河流域；生态系统；格局演变；治理策略
中图分类号：Q148　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0001−12
引文格式：杨洪国，李世东，田昕，等. 黄河流域生态系统演变特征、驱动机制与治理策略［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：1−12. Yang Hongguo, Li Shidong, Tian Xin, et al. Characteristics of ecosystem evolution, driving mechanisms and governance strategies in the Yellow River Basin［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 1−12.

Characteristics of ecosystem evolution, driving mechanisms and governance strategies in the Yellow River Basin

Yang Hongguo[1]　Li Shidong[2]　Tian Xin[3]　Wang Bing[4]　Dong Shikui[5]　Li Wei[6]　Wu Bo[6]
Wang Cheng[7]　Yu Xinxiao[8]　Li Fei[9]　Sun Shangwei[1]　Xu Weigang[6]　Zhang Jinsong[7]　He Youjun[10]
(1. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Department of Science and Technology, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;
3. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

收稿日期: 2025−08−06　**修回日期:** 2025−11−30
基金项目: 国家林业和草原局林草科技创新发展研究项目(2023132030)。
第一作者: 杨洪国，正高级工程师。主要研究方向：湿地生态。Email：yanghg@caf.ac.cn　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院。
责任作者: 李世东，高级工程师。主要研究方向：森林生态。Email：eastworld@sohu.com　地址：100714 北京市东城区和平里东街 18 号国家林业和草原局科技司。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

4. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
5. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
6. Institute of Ecosystem Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
7. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
8. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
9. School of Marxism, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
10. Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Exploring the long-term evolutionary processes and driving mechanisms of the Yellow River Basin's ecosystems is a prerequisite for gaining a profound understanding of the evolution of regional ecological security landscape. This study integrated long-term monitoring data from the National Forestry and Grassland Administration's Terrestrial Ecosystem Research Network, multi-source remote sensing products, statistical data, and historical literature. Employing a method that combines historical retrospection with spatial analysis, it systematically analyzed the evolutionary characteristics of the basin across three historical periods, i.e. ancient, modern and contemporary times, identified the dominant driving factors, and proposed targeted conservation and restoration strategies. (1) The evolution process can generally be divided into three stages: a relatively stable and slowly degrading stage in ancient times, when natural drivers dominated and human impacts were limited, with broad coverage of forests, grasslands, and wetlands; a stage of rapid degradation in modern times, when population growth and agricultural reclamation led to severe vegetation destruction, desertification expansion, and significant decline in ecosystem services; and a stage of ecological restoration and partial improvement in contemporary times, when the implementation of ecological projects promoted gradual vegetation recovery, with forest, grassland, and wetland areas showing a "U"-shaped change, desertification experiencing an "inverted U"-shaped evolution, and improvements also evident in farmland quality and urban ecological functions. (2) Overall, the ecosystem of the Yellow River Basin has experienced an evolutionary process from natural stability, degradation due to human disturbance to gradual restoration, reflecting the interactive nature of natural systems and human interference. This trajectory represents a gradual shift from the disorderly imbalance caused by human disturbance toward an ordered equilibrium of harmony between humans and nature, and also demonstrates the positive outcomes of recent ecological restoration efforts. (3) In ancient times, ecosystem evolution was mainly influenced by climate change, earthquakes, population growth, and wars, with climate being the dominant natural factor and population expansion and reclamation being the main human causes of vegetation degradation. In modern times, extreme climate events combined with wars exacerbated ecological damage. In contemporary times, both climate change and human activities drive ecological changes. Human activities include forestry ecological projects, water and soil conservation measures, industrial and agricultural water use, and urbanization, whose impacts vary significantly across regions and times. (4) Guided by the principle of "zonal strategies, categorized management, and systemic coordination," targeted governance strategies have been proposed for five key areas: zonal ecological management, soil and water conservation and desertification control, wetland restoration, farmland optimization, and urban ecology. In conclusion, future efforts should strengthen research on the coupling mechanisms between climate change and human activities, optimize ecological restoration pathways, and provide scientific support for realizing harmonious coexistence between humans and nature in the basin.

Key words: the Yellow River Basin; ecosystem; pattern evolution; governance strategies

黄河是中国第二长河、世界第五长河，发源于青海省巴颜喀拉山脉，在山东东营入海，干流全长 5 464 km[1]。依据水文与地貌特征，黄河流域可划分为上、中、下游 3 段：上游与中游的分界点为内蒙古自治区托克托县河口镇，上游河段长约 3 472 km，占流域总面积的 53.8%；中游与下游则以河南省郑州市桃花峪为分界点，中游河段长约 1 206.40 km，占流域总面积的 43.3%；下游河段总长约 785.60 km，

面积占比仅为 2.9%[2]。本文所界定的黄河流域范围主要依据自然流域边界，并结合县级行政界线进行划定。整体大黄河流域总面积为 130.64 万 km^2，涉及 9 省（区）449 个县（市、区、旗）[3]。在气候变化与人类活动的共同作用下，黄河流域生态系统整体较为脆弱，面临水土流失、荒漠化以及水资源短缺等多重生态环境压力[4]。研究黄河流域生态系统演变的历史规律，并从森林、湿地、草地、荒漠、农田、城市等主要生态系统演变规律出发，探讨当前生态治理面临的关键问题，对推动黄河流域生态保护与可持续发展具有重要意义。

1　黄河流域生态系统演变过程

1.1　古代生态系统演变（1840 年以前）

古代时期以自然为主导，人类活动影响相对有限，生态系统相对稳定，森林、草地和湿地广泛分布。各历史阶段生态系统演变特点如下。

史前时期。中更新世（距今约 100 万至 10 万年）以来，青藏高原剧烈隆升，季节性冰川融水为黄河的形成提供了水动力条件。研究表明，约 60 万年前，黄河切穿李家峡，15 万年前切穿龙羊峡进入共和盆地，晚更新世切穿三门峡，干流最终进入黄淮海平原，形成现代黄河水系。黄河流域的森林分布格局基本奠定于仰韶温暖期（距今 8000—3000 年）[5]。

先秦时期。夏、商、西周时期，黄河流域整体气候条件较为优越，总体上以温暖湿润为主要特征，植被生长繁茂。黄土高原的植被分布状况大体以六盘山为界，以东为亚热带林区，以西为暖温带草原区，生态系统整体良好[5]。当时宁夏森林覆盖率约 29%，河南达 63%，四川约 80%[6]。春秋战国时期，农业垦殖与军事活动明显加强，长城一线逐渐成为农牧分界线，形成农耕区、牧区及半农半牧区。黄淮以南的稻作系统、以北的旱农—灌溉系统，以及西部内陆的草地畜牧系统 3 大农业体系逐步成型，为中国传统农耕文化的形成奠定了重要基础。大禹治水深刻影响了黄河流域农田生态，中上游西北地区存在小片荒漠，中下游分布较多天然湖沼，水土流失较轻。原始聚落逐渐发展为城市，黄河流域成为中华文明重要发源地，二里头遗址为迄今确认最早的王国都城遗址[7]。

秦汉时期。生态演变主要表现为森林减少、草地与湿地退化、荒漠化加剧、农田扩张与人均耕地资源缩减，以及城市逐步繁荣。耕地农业成为国家核心战略，关中、晋南、冀南平原地区的森林基本消失，仅少量留存于皇家及私人园囿（如汉武帝上林苑）。河西走廊、河套平原的森林与草地遭到严重破坏，华北平原基本转为农耕区，汉代人均耕地约 0.67 hm^2[8]。陂塘水利兴起，中下游湖沼数量增加，多以中小型为主，进一步改变了当地水文生态。郡县制推行后，城镇数量大增，咸阳与长安成为当时世界上最大城市之一[9]。

魏晋南北朝时期。森林和草地资源遭受破坏，水系的改造、荒漠化的加剧、农田的扩张以及城市的兴衰，共同塑造了这一时期的生态环境。该时期战乱频繁，少数民族内迁，人口减少，耕地荒废，灌木与草地恢复，农牧界线南移至渭河平原、汾河流域及河北中北部，阴山一带草地恢复为游牧民族重要牧场。水利工程如堤坝、渠道建设改变湿地生态，部分湿地转为农田或城镇用地，水生态系统失衡。河西走廊与鄂尔多斯高原沙质荒漠化显著，汉末乌兰布和沙漠初现，北魏时期毛乌素、库布齐地区出现荒漠化。下游城市衰落，上游的姑藏、统万城、平城等新兴城市兴起。

隋唐时期。森林、草地、湿地资源的开发和利用，农田的扩张以及城市的繁荣，黄河流域的生态系统经历了进一步的发展和变化。唐代在燕山、阴山、太行山北段及关中西部等地区出现大规模伐林，用于建设大型工程。均田制与屯田制推动农耕区扩展，河西走廊及西域垦殖显著，盛唐时人均耕地约 2 hm^2[8]。陇右、陕北与鄂尔多斯仍以畜牧业为主，但生态失衡加剧，毛乌素沙地与库布齐沙漠逐渐形成，湿地萎缩，湖沼数量减少。长安、洛阳、开封等城市再度繁荣，同时长江流域城市开始兴起。

宋元时期。黄河流域的生态环境继续恶化，森林资源遭受严重破坏，湿地的开垦减少了生物多样性，荒漠化加剧，严重影响了农业生产和居民生活。北宋时期齐鲁地区森林茂密，但至北宋末年遭严重破坏。宋代水利能力不足，河道泛滥改道频繁，生态破坏严重。元代修建运河连通南北水系，局部改善水利条件。为解决粮食压力，政府鼓励屯田与移民开荒，草地与湿地进一步退化。乌兰布和、库布齐沙漠扩展，鄂尔多斯荒漠化日益严重。黄河流域城市因军事、经济及水患原因衰落，但兴庆府、元大都（北京）等新兴城市崛起，北京成为全国政治中心[7]。

明清时期。人口快速增长导致西北、华北天然森林大幅度减少。明代初期山西、甘肃子午岭、六盘山、贺兰山森林覆盖率较高，至清代显著下降。明代屯田政策破坏黄土丘陵植被，土地沙化严重，大同地区出现卤碱地与沙碛，人均耕地约 0.67 hm^2[8]。明代修筑长城作为农牧分界，促使牧区南扩。唐代大陆泽、宋代巨野泽（梁山泊）等湖泊因黄河泛滥大幅萎缩甚至消失。腾格里沙漠南移，库布齐、毛乌素沙漠

扩张加剧荒漠化。洛阳、开封等城市因政治中心转移及黄河水患逐渐衰落。

1.2 近代生态系统演变（1840—1949 年）

近代黄河流域生态系统进一步退化，表现为森林锐减、草地退化、湿地缩减，荒漠化加剧，农田扩张与人均耕地资源缩减，以及城市逐步扩展。

森林面积减少。清末秦岭、子午岭、祁连山、阴山森林几乎破坏，山东荒山和次生林被持续开垦。青海、甘肃等 9 个省份森林面积由 1900 年的 4 567 万 hm^2 减少到 1949 年的 2 706.60 万 hm^2[10]。1947 年统计显示，西北林区（新、青、甘、陕及川部分）森林面积为 119.60 万 hm^2，森林材积量 1.76 亿 m^3；西南林区（川、康、黔、滇、桂等）为 629.76 万 hm^2，森林材积量为 15.70 亿 m^3；华北林区（晋、鲁、豫、冀）为 39.91 万 hm^2，森林材积量为 19 万 m^3[11]。

草地退化。晚清“移民实边”政策推动垦殖扩张，草地生态遭严重破坏。河套区域牧地被大量开垦；民国时期黄河中上游西北地区仅少数水草丰美之地可放牧，其余多为农田或因缺水成为荒漠。国民政府推动西北开发，鼓励畜牧，但未能改善草地状况。

湿地资源持续缩减。晚清以来，青海湖、哈拉诺尔湖面积缩小；民国时期，内蒙古仅存乌梁素海、居延海等较大湖泊，山西仅有运城盐湖，甘肃无大型湖泊湿地[12]，宁夏湖泊大幅减少，东平湖干涸。

荒漠化加剧。晚清以来，库布齐沙漠南扩，毛乌素沙地北蔓延，鄂尔多斯草地被沙漠吞没。民国时期，北方各省均受荒漠化影响，良田沙化，居民迁徙。宁夏平原受腾格里沙漠侵袭，陕西榆林地区荒漠化严重，陕西重大旱灾平均 6.8 年 1 次[13]。

耕地面积持续增加。耕地面积从 1700 年的 641 万 hm^2 增加到 1930 年的 883 万 hm^2[14]，森林被大量清除，山地、丘陵乃至黄土高原畜牧区转为农田，南泥湾由林草地变为湿地，后垦为农田。

城市化明显。全国城市化进程加快，但黄河流域城市相对衰落，沿海城市崛起。城市分布南北差异缩小，东西差异扩大，西安等古都人口减少。

1.3 现代生态系统演变（1949—2022 年）

进入现代，随着生态保护意识的增强和治理措施的实施，生态环境逐渐恢复和改善，呈现出林草植被覆盖率增加、水土流失减少、荒漠化减缓、农田与城市持续扩张的演变特点，即森林、草地和湿地呈“U”形演变，前期因农业开垦、城市扩张等原因减少，后期因植树造林、天然林保护工程、草地保护、退耕还湿、生态补水等措施，使得森林面积有所增加，草地和湿地生态系统得到一定程度的恢复。而荒漠生态系统则与之相反，呈“倒 U”形演变，前期因过度开发和不合理放牧导致荒漠化区域面积扩大，后期采取草方格沙障固沙等生态保护与修复措施，荒漠化趋势得到控制。农田面积略有减少，但农业结构调整和技术进步提升了农田生态系统的质量。城市用地因城镇化和工业化而增加，通过城市规划和城市森林绿地建设，城市生态系统的质量和生态服务功能得到提升。

1.3.1 数量演变

黄河流域各类型生态系统在自然因素和人类活动的共同作用下经历了复杂的变化[15−30]（图 1）。1990—2020 年，黄河流域森林面积由 440.52 万 hm^2 增加到 1 683.51 万 hm^2，森林覆盖率呈逐年上升的趋势；草地覆盖面积也呈增长趋势，由 8 962.44 万 hm^2 增加到 9 007.28 万 hm^2；湿地面积由 391.70 万 hm^2 扩展至 414.31 万 hm^2；荒漠化扩张态势虽然得到遏制，但总体形势依然严峻[31]，荒漠化总面积由 10 306.00 万 hm^2 减少到 8 416.00 万 hm^2；重度荒漠化区域面积从 1990 年的 4 095.00 万 hm^2 减少至 2020 年的 2 788.00 万 hm^2，非荒漠化区域面积 30 年间增加了近 1 倍[26−28]。农田面积由 2 727.73 万 hm^2 减少到 2 601.98 万 hm^2，不透水地表由 180.60 万 hm^2 增加到 428.16 万 hm^2。近 20 年，城镇化率呈现上升趋势，达 30% 以上[32]。

1.3.2 质量演变

近 40 年来，黄河流域生态系统质量显著改善，多项指标持续向好。流域内森林覆盖率、草原综合植被盖度稳步提高，湿地生态质量呈现“逐渐提升”趋势，荒漠化程度明显减轻，农田质量整体上升，而城市化进程所带来的影响则较为复杂。2000—2022 年，黄河流域植被覆盖度整体呈上升态势，平均值从 2000 年的 0.422 提高至 2018 年的峰值 0.492，2022 年略降至 0.47，仍明显高于初期水平，反映出生态保护与修复工作的积极成效[33]（图 2）。从各类型生态系统来看，森林覆盖率自第 4 次森林资源清查以来显著增长，由 5.85% 增至第 5 次的 8.39%，进一步提升至第 6 次的 13.62%，森林蓄积量也呈逐年递增趋势[19−23]；1990—2020 年，草地生物量鲜质量

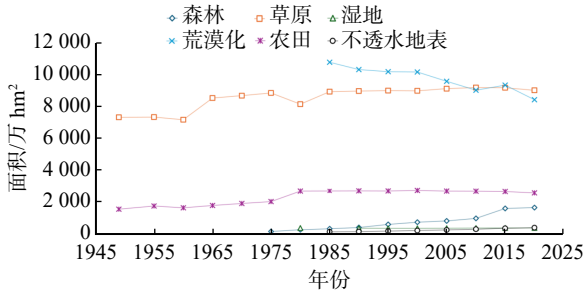


图 1 1949—2020 年黄河流域不同地类面积变化

Fig. 1 Changes in area of different land types in the Yellow River Basin from 1949 to 2020

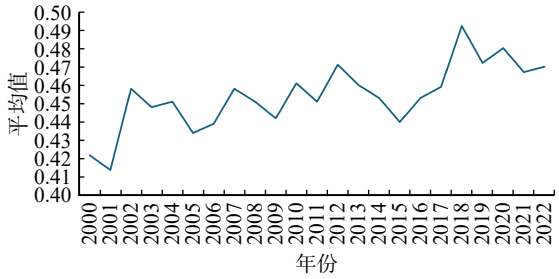


图 2　2000—2022 年黄河流域植被覆盖度平均值

Fig. 2　Average vegetation coverage in the Yellow River Basin from 2000 to 2022

保持在 5 418.68 ~ 6 025.79 kg/hm^2 之间，草地品质波动中有所提高[25,34]；湿地生态质量评估得分从 2000 年的 0.45 上升至 2020 年的 0.54，增幅达 20%；1980—2023 年，重度与中度荒漠化面积每 5 年平均分别减少 171 万 hm^2 和 161 万 hm^2，轻度及非荒漠化区域每 5 年平均增加 41 万 hm^2 和 191 万 hm^2，荒漠化治理成效显著[26−28]；黄河流域农田生态系统质量总体呈阶段性波动变化，具有显著的时空异质性，整体仍有较大提升空间；其中，部分区域近年来呈现改善趋势[35−36]。与此同时，城市化进程也带来一系列生态环境压力：水资源需求增加导致河流水位下降与湿地萎缩，工业和交通排放加剧城市空气污染，城市热岛效应对公众健康与区域气候产生负面影响。

1.3.3　结构演变

1985 年以来，黄河流域的国土时空格局变化加速（图 3）[37]，农业生产空间的快速减少和草地、林地生态空间的稳步增长反映了退耕还林还草政策的积极成效。从各生态系统类型来看，防护林与特用林面积占比逐年提高，其中防护林在第 9 次森林资源清查期间占比已达 63.83%；相反，用材林面积占比持续下降，同期降至 6.40% 的历史最低水平[15−23]，表

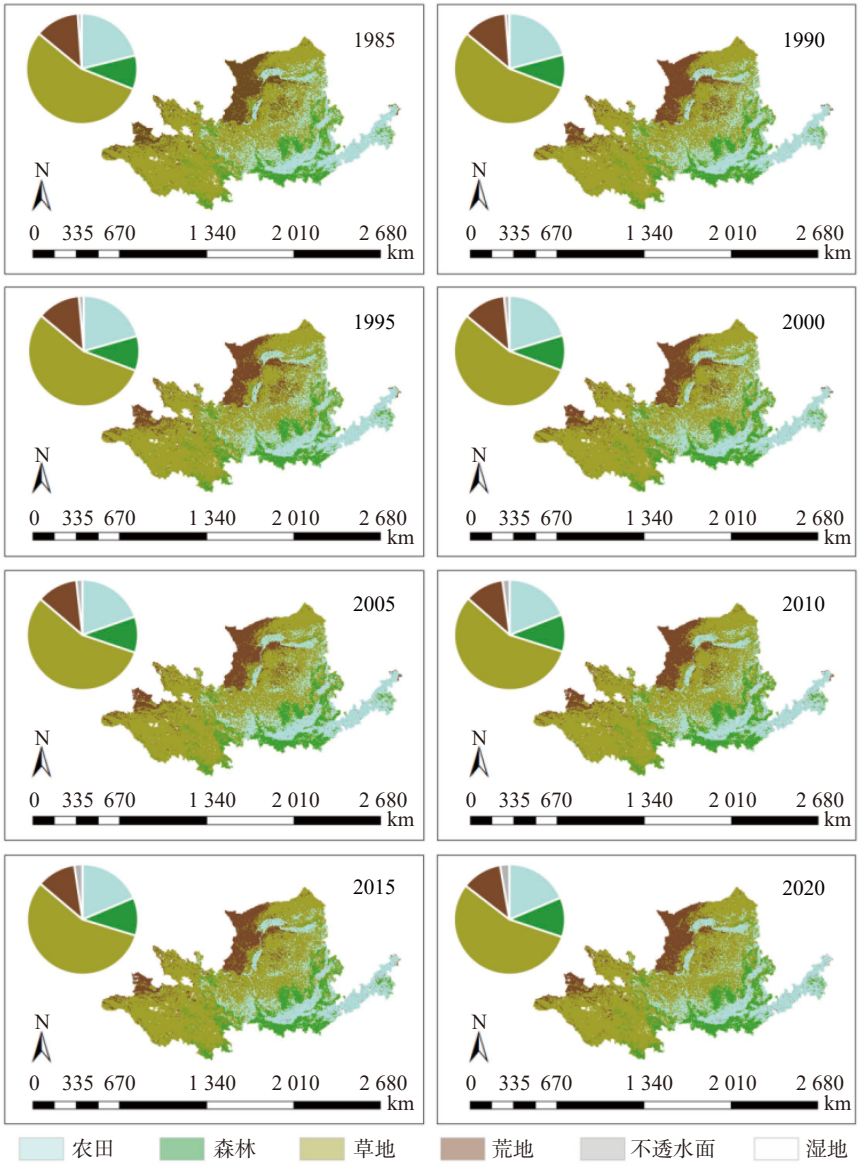


图 3　1985—2020 黄河流域国土空间时空格局分布

Fig. 3　Spatiotemporal pattern distribution of national land space in the Yellow River Basin from 1985 to 2020

明林业结构由经济导向逐渐转向生态功能优先。1990—2020 年，所有草地类型的综合植被盖度均呈增加趋势，增幅介于 1.04% 至 6.24%。其中，温性荒漠类、温性草原类、温性荒漠草原类、低地草甸类、高寒草原类和温性草原化荒漠类改善尤为明显，综合植被盖度分别由 1990 年的 27.88%、56.34%、31.79%、49.57%、64.12%、39.61% 上升至 2020 年的 33.29%、61.33%、36.73%、55.81%、68.95%、44.10%[25,34]。湿地斑块数量从 1980 年的 494 个略降至 1990 年的 468 个，2020 年又回升至 474 个，湿地生态系统破碎度呈先降后升的波动趋势[38]。重度荒漠化面积大幅减少，尤其在黄河“几字弯”区域，已由 1985 年近乎全域重度荒漠化状态改善至 2020 年几乎消失。1985—2022 年，小麦（*Triticum aestivum*）播种面积占比从 48.59% 下降至 28.11%，而玉米（*Zea mays*）和蔬菜占比显著上升，分别由 22.51% 增至 39.24%、由 4.31% 增至 13.91%[39]，反映农业向高效益作物转型。2003—2021 年，城市公园绿地面积与市域内大尺度片林均呈现稳步增长[32]，城乡人居环境逐步改善。

1.3.4 功能演变

1949—2022 年，黄河流域的生态系统功能发生了显著变化，整体呈现逐步改善的趋势。区域在水源涵养、固土、固碳、滞尘及生物多样性保护等方面的功能持续增强，高价值和较高级别生态空间范围明显扩大。从各生态系统类型来看，森林生物多样性维护功能不断提升，维护功能极强的区域面积占比从 2000 年的 6.16% 增至 2020 年的 17.88%[40]。在植被恢复过程中，高度人工干预的恢复方式使生物多样性比退化系统提升 151%，生态系统服务提升 45%[41]。草地水源涵养平均值维持在 46.83 ~ 93.56 mm，整体呈上升趋势[42]。湿地能值由 2000 年的 11.78×10^{23} sej 增加到 2020 年的 12.62×10^{23} sej，增长率为 7.13%。2000—2020 年，黄土高原北部风蚀区单位面积固沙量整体下降，但毛乌素沙地中南部防风固沙服务保有率上升了 0 ~ 20%，毛乌素沙地北部达拉特旗保有率上升了 50% ~ 70%，榆林北部风沙区、宁夏东部风沙区、甘肃庆阳保有率上升了 20% ~ 50%[43]。20 年间，农田食物供给服务总量由 2.58 亿 t/a 增加到 3.71 亿 t/a；城市公园绿地面积持续增加，居民出行 500 m 进入公园绿地的服务能力显著提升。1980—2000 年，黄河流域生态系统服务价值受人类活动引起的土地覆盖变化影响持续下降，于 2000 年跌至最低点；2000—2020 年则转为上升。耕地与未利用地面积减少，林地、草地、水域和建设用地面积增加，生态状况整体改善，推动服务价值回升（图 4）[44]。

2 驱动因素分析

2.1 古代主要驱动因素

在古代，黄河流域生态系统的演变主要受地震、气候变化、人口增长与农业开垦、战争与军事活动等多种因素驱动。其中，气候变化是驱动林草植被退化的主导性自然因素，而人口规模扩张及其伴随的垦殖活动则是造成林草植被破坏的最核心人为诱因。

（1）地震。黄河流域历史上重大决溢事件与华北平原地震活动显著相关[45]。公元 1303 年以来，共有 7 次≥8 级的特大地震，导致河流改道、水源枯竭、水质恶化、水土流失加剧和水利工程损毁，显著改变地表生态与局部气候[46]。

（2）气候变化。先秦时期气候较今温暖，黄河下游部分地区曾分布较为茂密的森林植被[47]；东汉至南北朝时期气候转寒进入寒冷期，竹类（Bambusoideae）等喜温植被的生长与分布受到明显限制[48]；隋唐气候转暖，梅（*Prunus mume*）、柑橘（*Citrus reticulata*）等作物北移，农业增产[49]；明代气候总体呈冷干状态，“河清”“河竭”现象频发；清代黄淮流域洪涝与改道加剧，部分地区农业生态持续恶化[50]。

（3）人口增长与农业发展。春秋以后，中游人口增加和农业垦殖不断扩大，自然植被遭破坏，河水含沙量逐渐增加[51]。铁制工具开始广泛使用,在一定程度上加速了对森林植被的破坏[52]。秦汉时期关中、长安一带较大规模的天然林已极为稀少。东汉人口减少使生态暂时恢复，水土流失减轻，黄河进入安流期。唐、宋时期人口达到高峰，农业区北扩严重破坏黄土高原北部林草植被，引发土地沙化，毛乌素沙地于此时形成。明清时期人口剧增加剧水土流失，成为环境变迁主因之一。从先秦至明清，人口阶梯式增长与农业扩展导致森林草原大面积减少，流域生态环境发生根本性变化。

（4）战争与军事屯田。在人类活动中，战争与军

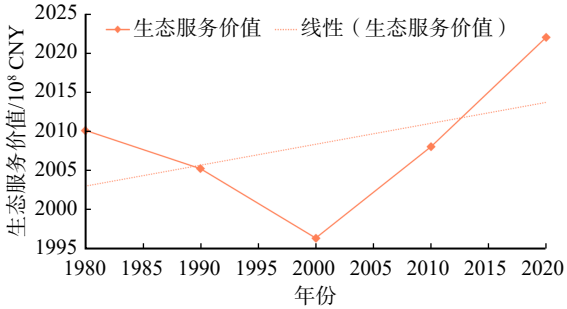


图 4 1980—2020 年黄河流域生态服务价值时空变化

Fig. 4 Spatiotemporal changes of ecosystem service value in the Yellow River Basin from 1980 to 2020

队屯田是影响古代黄河流域生态系统演变的第 2 大要素。自战国起，“烧荒防边”政策持续至明清，战乱频繁导致生态严重破坏。如安史之乱（755—763 年）重创黄河流域农业，宋与西夏战争期间，草场焚毁与森林过度利用加剧黄土高原植被退化。

（5）建材和薪炭消耗。作为建筑与能源主要来源，林木被大量砍伐。秦汉时期森林覆盖率下降约 5%[53]。两汉兴建宫室及冶炼手工业消耗巨量木材，平原森林殆尽，山地森林遭到大面积破坏，至东汉末年终南山已无法满足长安用材需求。宋代城建与宫室营造过度砍伐，导致西北森林锐减，生态环境恶化[54]。总体而言，古代建筑、矿冶等手工业的能源需求极大消耗林木资源，破坏林草生态，加剧水土流失。

2.2　近代主要驱动因素

在近代，极端气候事件与战争等因素相互叠加，显著加剧了黄河流域生态环境的破坏。频繁的厄尔尼诺现象引发水旱灾害频发，影响植被生长与农业生产。同时，人口增长、移民垦殖、军事活动、能源开发及战争等人为活动进一步导致森林植被减少与生态退化。极端气候在一定程度上影响了特定时期战争的爆发与发展，气候与人为破坏的共同作用加剧了区域生态系统的恶化。

（1）极端气候事件频发。1872—1891 年，6 个厄尔尼诺年导致黄河流域旱涝灾害频发。1922—1932 年，黄土高原遭遇 200 年一遇的持续性干旱，历时长达 11 年。其中，1928—1931 年旱情尤为严重，波及陕、甘、宁、晋等省（区），造成庄稼绝收、民生凋敝[55−56]。自 1855 年铜瓦厢决口至 1912 年清政府灭亡的 56 年间，山东省因黄河决口成灾达 52 年，决口共 263 次，年均 4.7 次，决口频率为改道前的 16 倍，对豫东、淮北平原的社会秩序与生态环境造成深远影响。

（2）人口增加与移民开垦。土地垦殖扩大了耕地种植面积和粮食产量，但毁林开荒、陡坡种植也引发了一系列生态问题。抗战时期，黄河泥沙量有 60% 来源于陕北黄河支流[57]。

（3）战争。清代 1840—1911 年，至少一半时间处于战争中，植被遭到大规模焚毁和砍伐，导致水文条件恶化、水灾频发。

（4）矿业开采。17 世纪 80 年代至 18 世纪 70 年代，矿业的较快发展[58]是以消耗大量森林为代价，加剧了自然灾害的发生。

（5）植树造林。晋察冀边区政府自 1938 年起推动植树造林，在一定程度上改善了生态环境，减轻了自然灾害，为革命发展提供了保障，也为新中国“绿化祖国”运动积累了经验。

（6）水利设施建设。民国时期，为应对旱灾并响应“开发西北、支持抗战”的号召，黄河流域及西北地区广泛兴修水利。国民政府通过颁布政策、设立专门机构、保障资金等措施，推动陕西黄土高原等地区农田水利建设取得显著成效[59]。

2.3　现代主要驱动因素

自 20 世纪 80 年代以来，黄河流域生态系统演变的驱动机制发生显著转变：此前气候变化为主导自然因素，之后人类活动的影响日益凸显，包括林业生态工程、水利与水保工程、工农业用水、社会经济发展与城市化等，特别是国家先后实施的“三北防护林”“天然林保护”“退耕还林还草”等重大生态工程，在生态保护与修复中发挥了关键作用。

（1）气候变化。1982—2019 年，气候因素对黄河流域归一化植被指数变化的贡献度为 82.74%[60]，其对黄河中上游分区间及干流径流量变化的贡献率在 −2.10% ~ 106.20% 之间，且存在明显的时空差异。1956—2005 年，降水减少是黄土高原输沙强度减弱的重要原因，二者在空间分布上表现一致。从中游 10 条主要支流来看，降水对径流变化的贡献率在 7.0% ~ 39.0%[61]。

（2）林业生态工程。自 1978 年起，国家推动了一系列生态修复工程，如“三北防护林”“天然林保护”“退耕还林”“三江源生态保护与建设”等，并在祁连山、黄土高原、南太行、泰山等重点区域开展山水林田湖草系统治理试点。这些工程显著提升了植被覆盖与森林蓄积，增强了生态系统服务功能。1990—2020 年，黄河流域森林覆盖面积增加了 20% 以上，森林覆盖率提高超过 2 个百分点。2000—2019 年，林业生态工程对该区域植被净初级生产力恢复的贡献率平均为 24.3%，最高可达 50% 以上[62]。由林业生态工程实施驱动的土地利用/覆盖变化已成为导致黄河上游和中游径流减少的主要因素之一。1951—2020 年，对比气候变化，土地利用/覆盖变化对上游、中游径流减少的影响程度为 112.73%、74.83%[63]。

（3）水利与水保工程。据黄河水资源公报统计，2020 年，黄河流域共有大、中型水库 224 座，年末蓄水量达 447.68 亿 m^3，显著发挥蓄水截流功能[63]。20 世纪 70 年代以来，中游地区大规模建设水库和淤地坝等工程，对减少泥沙量的贡献率达 61% ~ 97%[61]。然而，大坝拦水也导致下游水位下降、河道地貌改变、淹水范围收缩，部分湿地功能退化，旱生植被逐渐取代原有湿生和水生植物，造成湿地永久性流失[64]。

（4）工农业用水。近 50 年来，伴随区域经济持续发展，流域引水量不断增加，成为造成黄河入海径流量减少乃至断流现象频发的主要原因[65]。人类用水量增加对黄河流域年际陆地水储量变化的贡献作

用率为−75.5% ~ −25.8%[66]，表明用水量增加直接导致陆地水储量减少，威胁流域生态安全。人口增长还推升生活污水和工业废水排放，排水渠大量开挖破坏湿地连通性与结构，加剧湿地破碎化[67]。

(5)社会经济发展与城市化。城市化一直被视作生态环境演变的重要驱动力[68]。黄河流域横跨中西部生态过渡带，生态战略地位突出，但整体发展水平不高，干旱缺水、水土流失问题严峻，属于典型生态脆弱区，因而更易受城市化进程影响。目前，黄河流域已形成上游兰州—西宁城市群、中游关中平原城市群及下游山东半岛城市群等核心城市群。2001—2019 年，遥感生态指数显示，黄河流域整体变化不显著，年均增长率约为 7.6×10^{-5}/a[69]，但波动区间为 −0.026 ~ 0.026，反映出局部生态质量存在较大差异。近年来，多地推进森林城市建设，目前黄河流域共有 36 个城市获“国家森林城市”称号，涵盖甘、豫、青、鲁、晋、陕、内蒙古、宁夏 8 个省(区)，有效促进城市生态健康与可持续发展。

3 治理策略分析

基于黄河流域生态系统结构、功能演变特征及古今驱动因素分析，结合《中华人民共和国黄河保护法》《黄河流域生态保护修复与高质量发展规划纲要》等国家战略要求，立足流域生态脆弱、区域差异显著的现状，同时兼顾气候变化这一重要影响因素——其作为流域生态系统演变的关键驱动因子，未来仍将持续影响流域水源补给、水土流失、湿地演化等核心生态过程，按照“分区施策、分类治理、系统协同”的思路，针对分区生态治理、水土保持与荒漠化、湿地修复、农田优化、城市生态五大重点领域，提出针对性治理策略，推动流域生态系统质量持续提升，实现生态保护与经济社会高质量发展协同推进。

3.1 分区生态治理

结合黄河流域上、中、下游生态系统演变差异及核心问题，构建“上游保源、中游治土、下游护滩”的分区治理体系，强化全流域协同联动。上游聚焦水源涵养功能提升，针对祁连山、黄河源等区域草地退化、水源补给能力下降等问题，严格落实天然林保护、退耕还林还草工程，优选柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等抗旱耐寒乡土树种；推广无人机飞播与鱼鳞坑、水平沟等集水保墒技术；加强三江源、甘南等重点区域山水林田湖草沙一体化保护修复，严控过度放牧与无序开发，恢复高寒草甸、沼泽湿地生态功能，筑牢流域生态安全屏障。中游以黄土高原水土流失治理为核心，聚焦黄河“几字弯”荒漠化、坡耕地侵蚀等突出问题，统筹推进退耕还林还草与小流域综合治理，推广坡改梯、淤地坝工程，配套紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)等植物篱与土壤抗蚀剂，构建乔灌草复合防护体系；优化林草结构，持续提升防护林占比，推进退化林修复，遏制林草植被退化趋势，减少入黄泥沙量。下游重点强化黄河三角洲湿地保护与滩区治理，科学调控生态流量，推进河道清淤与生态护坡建设，严控湿地围垦与污染，恢复芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Acorus calamus*)等耐湿植被，提升湿地净化与生物多样性维护功能，同时优化农田与城市生态布局，推动生态廊道贯通。

3.2 水土保持与荒漠化治理

针对流域水土流失严重、荒漠化仍有反弹风险的现状，坚持“预防为主、防治结合、综合施策”，构建全方位水土保持与荒漠化治理体系。强化水土流失预防管控，严格划定生态红线，严控坡耕地开垦、矿山开采等破坏地表植被的人类活动，对重点水土流失区域实行封禁保护，依托“三北”工程攻坚战，推进毛乌素沙地、库布其沙漠等重点区域治理。优化治理技术模式，黄土高原地区推行“工程+生物”复合治理，结合淤地坝、梯田等工程措施与植被恢复措施，提升土壤抗蚀能力；沙化区域推广草方格沙障、灌木林带固沙技术，结合光伏提水灌溉，推动沙化土地逐步逆转，重点改善黄河“几字弯”区域生态状况，实现重度荒漠化区域全面缩减。建立“天空地”一体化监测网络，利用卫星、无人机与地面传感器，实时监测水土流失与沙化动态，精准开展补植补造与治理成效评估，健全治理长效机制，推动水土保持率与沙化土地治理率持续提升。

3.3 湿地生态修复

围绕流域湿地斑块破碎化、功能退化等问题，以“水文连通恢复、植被重建、污染防控”为核心，推进湿地系统性修复。优化湿地水资源调控，建设生态闸坝与渗滤池，打通湿地连通廊道，保障湿地基本生态用水，重点恢复黄河源、乌梁素海、黄河三角洲等重点湿地水文连通性，遏制湿地萎缩趋势。开展湿地植被修复，种植芦苇、香蒲等乡土耐湿植物，重建湿地植被群落，提升湿地净化水质、涵养水源与生物多样性维护功能；严控湿地周边工业污染、农业面源污染，推进湿地水质改善，减少人为干扰。健全湿地保护体系，完善湿地分级分类保护机制，加强湿地自然保护区建设，规范湿地开发利用活动，推动湿地斑块数量稳定回升，降低湿地生态系统破碎度，提升湿地能值与生态服务价值。

3.4 农田生态系统优化

立足流域农田生态系统质量中等、作物结构需

优化的现状，以“提质增效、绿色低碳”为目标，推动农田生态系统与农业生产协同发展。提升农田质量，推广土壤改良、节水灌溉技术，减少化肥、农药使用，完善农田林网布局，种植杨树（*Populus* spp.）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）等乡土树种，构建农田防护体系，降低农田退化风险，推动中、高等质量农田比例持续上升。优化作物种植结构，顺应农业向高效益转型趋势，合理压缩小麦种植面积，适度扩大玉米、蔬菜种植比例，因地制宜发展枸杞（*Lycium barbarum*）、黄芪（*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*）等特色经济作物，推动粮经饲统筹发展。强化农田生态管护，推行轮作休耕制度，改善农田土壤理化性质，提升农田食物供给服务能力；结合乡村绿化，完善农田周边生态廊道，促进农田生态系统与林草、湿地生态系统协同共生，提升农田生态系统稳定性与服务功能。

3.5　城市生态系统建议

针对城市化进程带来的水资源短缺、空气污染、热岛效应等生态压力，以“生态宜居、绿色低碳”为目标，优化城市生态空间布局，提升城市生态系统服务能力。扩大城市绿色空间，推进城市公园绿地、片林建设，完善城市绿化网络，推广屋顶绿化、垂直森林等技术，构建城市通风廊道，缓解城市热岛效应，提升居民出行 500 m 进入公园绿地的服务能力。推进城市生态治理，加强工业与交通排放管控，改善城市空气质量；优化城市水资源配置，推进雨水资源化利用与污水生态处理，推广人工湿地、厌氧发酵等技术，提升水资源循环利用效率。完善城市生态基础设施，推进农村污水、垃圾无害化处理，普及太阳能照明与智能垃圾分类，推动城乡人居环境协同改善；结合黄河文化，打造生态文旅融合场景，推动城市生态建设与文化传承有机结合，构建“城在绿中、人在景中”的宜居环境。

4　结论与展望

黄河流域生态系统演变历经了古代的相对稳定、近代的快速退化到现代的逐步恢复，呈现出明显的阶段性特征，即：古代相对稳定与缓慢退化阶段，生态系统以自然驱动为主，人类活动影响有限，森林、草地与湿地覆盖较广；近代快速退化阶段，人口增长与农业垦殖导致林草植被严重破坏，荒漠化扩展，生态系统服务显著下降；现代生态恢复与局部改善阶段，生态工程的实施促使植被覆盖率逐步回升，森林、草地和湿地面积呈“U”形变化，而荒漠化系统则经历了“倒 U”形演变，农田质量得到提升，城市生态功能逐步增强。总之，黄河流域生态系统经历了“自然稳定—人为干扰退化—逐步恢复”的演变过程，反映了自然系统与人为干扰的互动特征，是从人类干扰造成的无序失衡逐步走向人与自然和谐的有序平衡态势，也体现了近期生态修复努力的积极成效。

尽管本研究对黄河流域生态演变进行了系统梳理，但仍存在若干局限性，有待未来研究进一步深化。

（1）在古代和近代生态系统演变分析中，受历史数据缺失的限制，未能结合气候变化、战争、地震、重大历史事件等，按时间顺序定量揭示各生态系统的演变过程。

（2）在现代生态系统数量演变研究中，虽采用了森林连续清查、草原与湿地普查等地面数据以提高准确性，但多源遥感与地面监测的融合分析仍需加强。

（3）在结构演变过程研究中，未对森林、草原、湿地、荒漠等子系统内部结构变化开展深入讨论。

（4）在驱动因素分析中，尚未量化各类自然与人为因素的贡献率，难以明确关键影响因子及其作用程度。

基于上述不足，未来可在以下方向开展深入研究。

（1）加强多学科交叉融合，整合古环境重建数据、历史文献与遥感反演技术，重建长时序、高精度的生态系统演变序列，尤其注重气候事件、社会动荡等自然与人文因子的耦合分析。

（2）构建天地一体化监测体系，融合多源遥感与地面调查数据，提升生态系统结构与功能参数的提取精度，尤其应关注生态质量而不只是面积变化。

（3）深化生态系统结构–过程–功能研究，从景观格局、生物多样性、碳汇能力、水源涵养等角度，系统评估各类生态空间的演变效应与服务价值。

（4）开展驱动机制的定量解析，借助地理探测器、结构方程模型等统计方法，识别不同时期生态系统变化的主导因素，并估算其贡献率，为生态修复政策提供依据。

（5）加强生态恢复工程的成效评估与优化模拟，探索不同情景下黄河流域生态系统的演变路径，推动流域尺性的系统治理与适应性管理。

通过以上研究，可逐步构建更系统、更精准的黄河流域生态演变理论体系，为实现区域人与自然和谐共生的现代化治理提供科学支撑。

参　考　文　献

[1] 张向徐, 韩美, 徐婷, 等. 黄河干流生态健康评价研究 [J]. 地理学报, 2025, 80(3): 661−677.
Zhang X X, Han M, Xu T, et al. Ecological health assessment of the Yellow River mainstream [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(3): 661−677.

[2] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划: 2012—2030 年 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013: 1−3.

Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Comprehensive planning of the Yellow River Basin: 2012−2030[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2013: 1−3.

[3] 新华社, 中共中央国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(30): 15−35.
Xinhua News Agency, The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. Outline of ecological protection and high-quality development plan for the Yellow River Basin [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(30): 15−35.

[4] 曹云, 孙应龙, 陈紫璇, 等. 2000—2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4524−4535.
Cao Y, Sun Y L, Chen Z X, et al. Vegetation ecological quality change in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 and its response to extreme climate [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4524−4535.

[5] 朱士光. 历史时期黄土高原自然环境变迁及其对人类活动之影响 [J]. 干旱地区农业研究, 1985(1): 76−89.
Zhu S G. Changes in natural environment of the Loess Plateau during historical periods and their influence on human activities [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1985(1): 76−89.

[6] 中国林学会. 中国森林的变迁 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 132.
Chinese Society of Forestry. Changes of forests in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997: 132.

[7] 邹逸麟. 历史时期黄河流域的环境变迁与城市兴衰 [J]. 江汉论坛, 2006(5): 98−105.
Zou Y L. Environmental changes and urban rise and fall in the Yellow River Basin during historical periods [J]. Jianghan Tribune, 2006(5): 98−105.

[8] 马役军. 中国还有多少土地?[N]. 中国青年报, 1991.
Ma Y J. How much land does China still have?[N]. China Youth Daily, 1991.

[9] 马正林. 中国城市历史地理 [M]. 济南: 山东教育出版社, 1998: 199−220.
Ma Z L. Historical geography of Chinese cities[M]. Jinan: Shandong Education Press, 1998: 199−220.

[10] 何凡能, 葛全胜, 戴君虎, 等. 近 300 年来中国森林的变迁 [J]. 地理学报, 2007, 62(1): 30−40.
He F N, Ge Q S, Dai J H, et al. Forest changes in China over the past 300 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 30−40.

[11] 国民政府农林部. 中国之林业 [G]. 南京: 国民政府农林部, 1947: 6−21.
Ministry of Agriculture and Forestry of National Government. Forestry in China[G]. Nanjing: Ministry of Agriculture and Forestry of National Government, 1947: 6−21.

[12] 孔廷璋, 郑宇, 杜席珍. 中华地理全志 [M]. 上海: 中华书局, 1918: 452−457, 512−515.
Kong T Z, Zheng Y, Du X Z. Complete gazetteer of China [M]. Shanghai: Zhonghua Book Company, 1918: 452−457, 512−515.

[13] 徐建平, 戴建兵, 刘向阳. 中国环境: 近代卷 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 63.
Xu J P, Dai J B, Liu X Y. Environmental history of China : modern volume)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020: 63.

[14] 朱永超, 李晶, 任志远. 近 300 年来黄土高原地区耕地与人口变化趋势及相关分析 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2011, 39(3): 84−89.
Zhu Y C, Li J, Ren Z Y. Trends and analysis of cultivated land and population change in the Loess Plateau over the past 300 years [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2011, 39(3): 84−89.

[15] 国家林业总局. 国家森林资源统计 (1973—1776)[R]. 北京: 中国林业出版社, 1977: 30−51.
State Forestry Administration. National forest resource statistics (1973−1976)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1977: 30−51.

[16] 中华人民共和国林业部. 国家森林资源统计 (1974—1988)[R]. 北京: 中国林业出版社, 1989: 50−105.
Ministry of Forestry of the People's Republic of China. National forest resource statistics (1974−1988)[R]. Beijing: China Frestry Publishing House, 1989: 50−105.

[17] 中华人民共和国林业部. 国家森林资源统计 (1977—1981)[R]. 北京: 中国林业出版社, 1983: 50−81.
Ministry of Forestry of the People's Republic of China. National forest resource statistics (1977−1981)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1983: 50−81.

[18] 中华人民共和国林业部. 国家森林资源统计 (1989—1993)[R]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 194−195.
Ministry of Forestry of the People's Republic of China. National forest resource statistics (1989−1993)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1994: 194−195.

[19] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1994—1998)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 52−54.
State Forestry Administration. National forest resource statistics (1994−1998)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000: 52−54.

[20] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1999—2003)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 49−51.
State Forestry Administration. National forest resource statistics (1999−2003)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 49−51.

[21] 国家林业局. 国家森林资源统计 (2004—2008)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 76−78.
State Forestry Administration. National forest resource statistics (2004−2008)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009: 76−78.

[22] 国家林业局. 国家森林资源统计 (2009—2013)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 33−37.
State Forestry Administration. National forest resource statistics (2009−2013)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014: 33−37.

[23] 国家林业和草原局. 国家森林资源统计 (2014—2018)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 91−100.
National Forestry and Grassland Administration. National forest resource statistics (2014−2018)[R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 91−100.

[24] 中国经济社会大数据研究平台. 1949—1985 年社会经济数据 [DS]. 北京: 中国经济社会大数据研究平台, 2026.
China Social and Economic Big Data Research Platform. Socioeconomic data from 1949 to 1985 [DS]. Beijing: China Social and Economic Big Data Research Platform, 2026.

[25] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 生态系统类型空间分布数据集 (1980—2020)[DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统, 2023.
Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. Ecosystem type spatial distribution dataset (1980−2020) [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2023.

[26] Didan K. MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN grid V061[DS]. Washington: NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021.

[27] Schaaf C, Wang Z. MODIS/Terra + Aqua BRDF/Albedo daily L3 global-500 m V061[DS]. Washington: NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021.

[28] United States Geological Survey. Landsat 5 TM collection 2 Tier 1 [DS]. Reston: US Geological Survey, 2021.

[29] 余振, 金晓斌, 缪丽娟, 等. 1900—2016 年中国历史农田分布变化数据集 [DS]. 北京: 国家生态科学数据中心, 2022.
Yu Z, Jin X B, Miao L J, et al. Historical farmland distribution dataset in China (1900−2016)[DS]. Beijing: National Ecological Science Data Center, 2022.

[30] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 1985—2020 年全国 30 m 地表覆盖数据集 [DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统, 2023.
Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. National 30 m surface cover dataset (1985−2020) [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2023.

[31] 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 等. 近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议 [J]. 中国地质, 2021, 48(1): 1−20.
Wang Y, Chen R S, Guo C H, et al. Analysis on resource-environment pattern changes and geological work suggestions in the Yellow River Basin over the past 40 years [J]. Geology in China, 2021, 48(1): 1−20.

[32] 国家统计局. 中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报 [R]. 北京: 国家统计局, 2026.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on the national economic and social development of the People's Republic of China in 2025[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2026.

[33] NASA MODIS. MOD13Q1 (MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN grid) dataset (2000−2022) [DS]. Sioux Falls: USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2022.

[34] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 草原普查数据 (1980—2020)[DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统, 2023.
Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. Grassland survey dataset (1980−2020) [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2023.

[35] 张俊, 彭宇琦, 黄煦旸. 黄河流域耕地生态安全动态演进及时空异质性 [J]. 安徽农业大学学报 (社会科学版), 2023, 32(6): 51−61.
Zhang J, Peng Y Q, Huang X Y. Dynamic evolution and spatio-temporal heterogeneity of cultivated land ecological security in the Yellow River Basin [J]. Journal of Anhui Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023, 32(6): 51−61.

[36] 韩琭, 宋子言. 耕地生态安全动态评价及障碍因子诊断—以黄河下游沿黄县区为例 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 148−156,164.
Han L, Song Z Y. Dynamic evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land ecological security: a case study at counties along lower Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 148−156,164.

[37] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907−3925.

[38] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 全国 1 km 土地利用空间分布数据集 (1980—2020)[DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统, 2023.
Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. National 1 km land use spatial distribution dataset (1980−2020) [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2023.

[39] 中国科学院地理科学与资源研究所. 黄河流域发展数据库 (HBN) 1949—2022 年农作物播种面积数据 [DS]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2020. (2023−10−30).
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences. Crop Sown Area Dataset (1949–2022), Yellow River Basin Development Database (HBN) [DS]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2020. (2023−10−30).

[40] 李静, 李帅, 张英, 等. 2000—2020 年黄河流域生物多样性维护功能时空变化及驱动分析 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4780−4790.
Li J, Li S, Zhang Y, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of biodiversity conservation function in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 4780−4790.

[41] 吴舒尧, 黄姣, 李双成. 不同生态恢复方式下生态系统服务与生物多样性恢复效果的整合分析 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6986−6999.
Wu S Y, Huang J, Li S C. Integrated analysis of ecosystem services and biodiversity recovery under different ecological restoration strategies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6986−6999.

[42] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 生态系统服务功能数据集 (1980—2020)[DS]. 北京: 资源环境科学数据注册与出版系统, 2018.
Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences. Ecosystem service function dataset (1980−2020) [DS]. Beijing: Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2018.

[43] 王金凤, 刘小玲, 李庆, 等. 黄土高原北部风蚀区防风固沙服务时空分异及驱动因素 [J]. 中国沙漠, 2023, 43(4): 220−230.
Wang J F, Liu X L, Li Q, et al. Spatiotemporal differentiation and driving factors of windbreak and sand-fixation services in wind-eroded areas of the northern Loess Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4): 220−230.

[44] Yang M, Gao X, Siddique K H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive coercing relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159757.

[45] 王若柏. 黄河北流与华北平原地震活动 [J]. 灾害学, 1989(3): 20−25.
Wang R B. Northward flow of the Yellow River and seismic activity in the North China Plain [J]. Journal of Catastrophology, 1989(3): 20−25.

[46] 贾振文. 历史上黄河流域特大地震对水利工程及环境的影响 [J]. 人民黄河, 1990(3): 69−72.
Jia Z W. Impacts of catastrophic earthquakes in the Yellow River Basin on water conservancy projects and the environment in history [J]. People's Yellow River, 1990(3): 69−72.

[47] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究 [J]. 考古学报, 1972, 37(1): 15−38.
Zhu K Z. A preliminary study on climate change in China over the past five thousand years [J]. Acta Archaeologica Sinica, 1972, 37(1): 15−38.

[48] 关传友. 历史时期气候变化对西北地区竹林分布的影响 [J]. 农业考古, 2003(3): 208−210,239.
Guan C Y. Impact of historical climate change on bamboo forest distribution in Northwest China [J]. Agricultural Archaeology, 2003(3): 208−210,239.
[49] 葛全胜. 中国历朝气候变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 301–306.
Ge Q S. Climate change in successive Chinese dynasties[M]. Beijing: Science Press, 2010: 301–306.
[50] 朱士光. 清代黄河流域生态环境变化及其影响 [J]. 黄河科技大学学报, 2011, 13(2): 17−22, 29.
Zhu S G. Ecological environmental changes and their impacts in the Yellow River Basin during the Qing Dynasty [J]. Journal of Yellow River University of Science and Technology, 2011, 13(2): 17−22, 29.
[51] 王飞. 秦汉时期黄河中下游地区生态变迁考察 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.
Wang F. Ecological changes in the middle and lower Yellow River Basin during the Qin and Han dynasties[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2008.
[52] 王质彬. 黄河流域农田水利史略 [J]. 农业考古, 1985(2): 177−186.
Wang Z B. A brief history of farmland irrigation in the Yellow River Basin [J]. Agricultural Archaeology, 1985(2): 177−186.
[53] 高伟洁. 秦汉时代生态思想研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Gao W J. Research on ecological thought during the Qin and Han dynasties[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
[54] 马琴玉. 北宋对黄河流域植被的破坏及影响 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
Ma Q Y. Vegetation destruction and its impact in the Yellow River Basin during the Northern Song Dynasty[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.
[55] 史辅成, 王国安, 高治定, 等. 黄河 1922—1932 年连续 11 年枯水段的分析研究 [J]. 水科学进展, 1991(4): 258−263.
Shi F C, Wang G A, Gao Z D, et al. Analysis of the continuous 11-year drought period of the Yellow River from 1922 to 1932 [J]. Advances in Water Science, 1991(4): 258−263.
[56] 黄河流域及西北片水旱灾害编委会. 黄河流域水旱灾害 [G]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 5–6.
Editorial Committee of Flood and Drought Disasters in the Yellow River Basin and Northwest Region. Flood and drought disasters in the Yellow River Basin[G]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1996: 5–6.
[57] 袁文科. 沟坡之间: 明清以来黄河大北干流地区的环境与社会 [D]. 太原: 山西大学, 2023.
Yuan W K. Between gullies and slopes: environment and society in the main northern Yellow River since the Ming and Qing dynasties[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.
[58] 鲁克亮. 近代以来黄河下游水灾频发的生态原因 [J]. 哈尔滨学院学报 (社会科学), 2003, 24(11): 116−120.
Lu K L. Ecological causes of frequent flooding in the lower reaches of the Yellow River since modern times [J]. Journal of Harbin University (Social Science Edition), 2003, 24(11): 116−120.
[59] 刘晓娟. 民国时期国民政府在陕北黄土高原地区的农田水利建设研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
Liu X J. Study on farmland irrigation construction in the Loess Plateau of northern Shaanxi during the Republic of China period[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.
[60] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143−151.
Liu H, Liu F, Zheng L. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143−151.
[61] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近 50 年黄土高原水土流失的时空变化 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1129−1139.
Xin Z B, Xu J X, Yu X X. Spatiotemporal variation of soil erosion in the Loess Plateau over the past 50 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1129−1139.
[62] 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. Remote sensing assessment of ecological benefits of major ecological projects in China from 2000 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2133−2153.
[63] 孙莉茹, 毕华兴, 马志瑾, 等. 1951–2020 年黄河上中游径流变化特征及归因分析 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 82−92.
Sun L R, Bi H X, Ma Z J, et al. Runoff variation and attribution analysis in the upper and middle Yellow River from 1951 to 2020 [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 82−92.
[64] 刘继平. 河南省湿地现状与保护对策 [J]. 中南林业调查规划, 2014, 33(4): 35−37, 66.
Liu J P. Current status and protection strategies of wetlands in Henan Province [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2014, 33(4): 35−37, 66.
[65] 许炯心, 孙季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响 [J]. 水科学进展, 2003, 16(6): 690−695.
Xu J X, Sun J. Influence of precipitation change and human activities on runoff flux into the sea of the Yellow River over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2003, 16(6): 690−695.
[66] 谢京凯. 气候变异和人类活动对黄河流域水储量变化的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Xie J K. Impacts of climate variability and human activities on water storage changes in the Yellow River Basin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
[67] 梁晓文. 基于 GEE 的黄河流域湿地时空演变及驱动力分析 [D]. 郑州: 河南大学, 2021.
Liang X W. Spatiotemporal evolution and driving forces of wetlands in the Yellow River Basin based on GEE[D]. Zhengzhou: Henan University, 2021.
[68] 魏乐. 黄河上游城市群扩张的生态空间影响及多情景模拟 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
Wei L. Ecological spatial impacts and multi-scenario simulation of urban agglomeration expansion in the upper Yellow River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
[69] 陈浩. 黄河流域典型区域城市化与生态环境质量时空演化趋势及影响机制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
Chen H. Spatiotemporal evolution trends and impact mechanisms of urbanization and ecological environment quality in typical regions of the Yellow River Basin[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

（责任编辑 范 娟 李 契
责任编委 赵秀海）