

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.04.026

CSTR:32310.14.stbxb.2026.04.026

刘慧峰,郑璐璐,韩晓阳,等.黄河流域粮食主产区耕地生态安全时空变化及障碍因子[J].水土保持学报,2026,40(4):292-303.

Liu Huifeng, Zheng Lulu, Han Xiaoyang, et al. Spatiotemporal variations and obstacle factors of cultivated land ecological security in main grain-producing areas of Yellow River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4):292-303.

黄河流域粮食主产区耕地生态安全时空变化及障碍因子

刘慧峰¹, 郑璐璐¹, 韩晓阳², 程传鹏¹, 李元征³, 毛齐正³

(1.河南财经政法大学农业农村发展学院, 郑州 450046; 2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.河南财经政法大学城乡规划学院, 郑州 450046)

摘要: [目的] 揭示黄河流域粮食主产区耕地生态安全的时空变化规律,并识别其核心约束因子,以期为耕地资源可持续利用与生态安全提升提供理论依据与科学指导。[方法] 基于黄河流域 60 个地级市的 6 期面板数据,基于压力-状态-响应(PSR)模型,建立耕地生态安全综合评价指标体系,运用熵值法和综合指数法测算其安全水平并界定其等级,进而借助障碍度模型揭示制约其提升的关键障碍因子。[结果] 1)耕地生态安全指数由 2000 年的 0.28 上升至 2023 年的 0.43,增幅较为显著。生态安全等级从“较不安全”转向“临界安全”,但距离“相对安全”等级仍有较大差距,未来提升空间依然很大。2)耕地生态安全水平表现出明显的区域差异性,2000—2015 年,仅有 3 个城市的耕地生态安全处于“临界安全”。2023 年,45 个地市的耕地生态安全水平处于“临界安全”等级。3)从各准则层来看,河南、山东、四川和内蒙古四省份均呈响应障碍度下降的积极态势,但河南、山东、四川 3 个省的首要障碍因素为压力障碍度,而内蒙古则需重点破解“状态障碍度”的困局。4)制约耕地生态安全水平的主要障碍因子是人均耕地面积、农民可支配收入、第一产业占 GDP 比重、土地垦殖率和森林覆盖率。[结论] 黄河流域粮食主产区耕地生态安全总体呈持续改善态势,但整体水平偏低,耕地生态安全依然面临严峻挑战。研究结果可为不同地区推进分区治理与分类施策提供有力的科学支撑。

关键词: 黄河流域; 耕地生态安全; 压力-状态-响应(PSR)模型; 障碍因子; 时空变化

中图分类号:X826.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)04-0292-12

Spatiotemporal Variations and Obstacle Factors of Cultivated Land Ecological Security in Main Grain-Producing Areas of Yellow River Basin

Liu Huifeng¹, Zheng Lulu¹, Han Xiaoyang², Cheng Chuanpeng¹, Li Yuanzheng³, Mao Qizheng³

(1.School of Agriculture and Rural Development, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China;

2.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.School of Urban and Rural Planning,

Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: [Objective] To explore the spatiotemporal evolution patterns and main obstacle factors of cultivated land ecological security in the main grain-producing areas of the Yellow River basin, thereby providing a scientific reference for sustainable cultivated land use and improving ecological security. [Methods] Based on six-phase panel data from 60 prefecture-level cities in the Yellow River basin, the pressure-state-response (PSR) model was employed to construct an evaluation index system for cultivated land ecological security in the main grain-producing areas of the Yellow River basin. The entropy method and comprehensive index method were used to calculate the comprehensive index of cultivated land ecological security and classify its security level. The obstacle

收稿日期:2026-01-19

修回日期:2026-03-02

录用日期:2026-04-01

网络首发日期(www.cnki.net):2026-04-14

资助项目:国家自然科学基金面上项目(32471662);河南省教育强省项目(2025JYQS1290)

第一作者:刘慧峰(1990—),女,博士,讲师,主要从事农业资源环境研究。E-mail:liuhuifeng08@163.com

通信作者:韩晓阳(1987—),男,博士,副研究员,主要从事植被格局与土壤水碳关系研究。E-mail:xyhan11@nwf.edu.cn

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

degree model was then used to identify the key obstacle factors affecting cultivated land ecological security. [Results] 1) The cultivated land ecological security index increased from 0.28 in 2000 to 0.43 in 2023, representing a relatively significant increase. The ecological security level shifted from "relatively unsafe" to "critically safe", but there remained a considerable gap from the "relatively safe" level, indicating substantial room for future improvement. 2) The level of cultivated land ecological security exhibited significant regional differences. From 2000 to 2015, only three cities had cultivated land ecological security at the "critically safe" level. In 2023, 45 cities had cultivated land ecological security at the "critically safe" level. 3) From the perspective of criteria layers, the obstacle degree of response showed a positive declining trend in Henan, Shandong, Sichuan, and Inner Mongolia. However, the primary obstacle factor in Henan, Shandong, and Sichuan was the obstacle degree of pressure, whereas Inner Mongolia needs to focus on overcoming the obstacle degree of state. 4) Cultivated land area per capita, disposable income of farmers, share of primary industry in GDP, land reclamation rate, and forest coverage were the main obstacle factors affecting cultivated land ecological security. [Conclusion] Cultivated land ecological security in the main grain-producing areas of the Yellow River Basin shows an overall trend of continuous improvement, but the overall level remains low, and severe challenges persist. The research results can provide strong scientific support for promoting tailored governance and policy implementation in different regions.

Keywords: Yellow River basin; cultivated land ecological security; pressure-state-response (PSR) model; obstacle factor; spatiotemporal variation

Received: 2026-01-19

Revised: 2026-03-02

Accepted: 2026-04-01

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

耕地是国家粮食安全的基石,我国仅以全球9%的耕地,保障近20%全球人口的粮食供给^[1]。然而,其背后却是耕地资源的长期高强度利用,生态安全正面临严峻挑战。随着经济社会持续发展与居民膳食结构不断升级,粮食需求呈稳步增长态势,但国内粮食供需仍处于紧平衡状态,结构性短缺矛盾日益凸显,粮食安全的“紧平衡”格局尚未得到根本扭转^[2-3]。长期高强度的耕地利用模式,在满足短期产出的同时,造成耕地质量、水资源与生态系统的系统性透支,对区域生态安全构成持续压力^[4-5]。同时,耕地撂荒现象的频繁发生,正严重威胁着耕地资源的持续稳定利用^[6]。耕地生态安全已成为制约粮食安全与农业可持续发展的关键瓶颈,亟须统筹构建粮食生产与生态保护协调并重的“双安全”体系,以实现耕地资源的长期可持续利用。

耕地生态安全是保障粮食安全与推进生态文明建设的基石,科学评价其安全水平有助于推动耕地资源“保数量、提质量、护生态”协同目标的落地。为解决农业环境污染等难题,自2012年起,我国持续推进生态文明建设,并于2017年确立了耕地保护“数量-质量-生态”三位一体的理念^[7]。2024年中央一号文件^[8]明确提出,需加快构建并完善集耕地“数量、质量、生态”于一体的保护制度。在2025年颁布的《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》中^[9],重申并强化该

战略要求,并将生态治理纳入耕地保护整体框架,旨在实现耕地资源的系统化、全方位保护。作为生态系统服务的重要组成部分,耕地生态系统服务是指耕地生态资源在人类利用过程中维持合理功能结构、持续满足人类健康生存需求的能力^[10]。因此,开展耕地生态安全的研究,不仅对落实耕地“三位一体”保护与推动生态文明建设具有重要指导意义,还能更深入地缓解人地矛盾、改善农村环境、促进生态平衡。

以往关于生态系统服务价值的研究^[11-12]多聚焦于土地资源生态系统服务的整体性分析,但针对耕地资源生态系统服务的专项研究则相对匮乏。在国际领域,学者广泛依托地理信息系统、遥感影像、系统动态模拟等空间分析工具,并融合土地利用变化模型与生态阈值概念,对耕地潜在的生态风险进行模拟与预测研究。相较而言,国内在该领域的探讨相对较晚,现阶段的学术焦点主要集中在耕地质量的时空演变规律、土地退化追踪及综合评价指标体系的构建上,研究目标偏向于揭示耕地生态系统的动态演进特征。在方法体系上,诸多学者^[13-15]采用层次分析法、能值评估、生态足迹模型及耦合协调分析等多元技术,强化研究的定量分析与系统逻辑。而在研究视角选取上兼顾粮食供给、资源约束与耕地保护的同时,重点解析生态因素与社会经济变量的相互作用,跨学科的视角交叉进一步增强研究成果的现实针对性与政策参考价值。

随着耕地生态安全概念的日益深化,其影响因素的涵盖范围亦随之不断拓展。与之相适应,耕地生态安全的评价手段已从单一方法逐步演进为多模型的综合应用,常用的评估技术包括量子遗传投影寻踪模型^[16]、神经网络模型^[17]、DPSIR-TOPSIS 模型^[18]、生态足迹模型^[19]及 PSR 模型等^[20]。其中,PSR 模型是应用最为广泛的评估工具之一,该模型能够清晰地描述因果关联,凸显复杂社会-自然-经济系统下人与环境的互动关系。然而,目前关于耕地生态安全的探讨多聚焦在干旱区和东部沿海省份,而关于粮食主产区在耕地资源的科学配置与生态风险防范方面的研究则存在明显短板。黄河流域不仅是维系国家区域均衡协同、构筑生态与粮食双重防线的战略要地^[21],其辖区内的粮食主产区更充当着我国农业稳健发展的“压舱石”。2000 年,西部大开发战略全面启动,黄河流域作为该战略的重点覆盖区域,其城镇化与工业化进程显著加速,城市建设征收耕地面积亦随之急剧增加。同时,2000 年前后是中国农业政策的重要转折节点。一方面,1999 年退耕还林(草)工程启动试点,标志着生态建设正式纳入国家战略框架;另一方面,

2001 年中国加入 WTO,农业面临市场化与国际化的双重压力,石油农业模式加速形成。因此,本研究以 2000 年为研究起点,选取黄河流域粮食主产区 60 个地级市为研究单元,运用 PSR 模型系统评估 2000—2023 年区域耕地生态安全状况的动态变化规律,并进一步挖掘制约其水平的关键障碍因子,为实现耕地资源的可持续管理与政策优化提供理论依据。研究成果有助于深入揭示耕地生态系统服务的时空异质性及主要障碍因子,为黄河流域耕地生态系统的可持续保护与精准治理提供政策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

作为国家农产品供给的战略要地,黄河流域粮食主产区在 2024 年实现粮食总产 2.02×10^8 t,农作物种植规模达 3.26×10^7 hm²,分别占全国总量的 28.54% 与 27.33%。在兼顾经济基础与空间分布特征的前提下,本研究选取该流域内 60 座城市为研究样本(表 1),旨在剖析耕地生态安全水平的时空变化及空间分异成因,进而为构筑坚实生态防线、协同推进黄河流域可持续治理策略夯实理论基础。

表 1 黄河流域粮食主产区城市上、中、下游空间区位划分

Table 1 Classification of upper, middle, and lower reaches of prefecture-level cities in main grain-producing areas of Yellow River basin

区域	省份	城市名称
上游	四川	成都、自贡、攀枝花、泸州、德阳、绵阳、广元、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州、雅安、巴中、资阳
中游	河南	洛阳、焦作、三门峡
	内蒙古	呼和浩特、包头、呼伦贝尔、通辽、赤峰、乌兰察布、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌海
下游	河南	郑州、开封、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、濮阳、许昌、漯河、南阳、商丘、信阳、周口、驻马店
	山东	济南、青岛、淄博、枣庄、东营、烟台、潍坊、济宁、泰安、威海、日照、临沂、德州、聊城、滨州、菏泽

1.2 数据来源

采用的数据涵盖空间数据与统计数据两大类。空间数据层面,选用 CLCD 土地利用数据集^[22]。该数据集依托 Google Earth Engine 平台的所有可用 Landsat 影像,利用随机森林算法构建而成,空间分辨率为 30 m。高程(DEM)数据获取自地理空间数据云平台。坡度数据通过对 DEM 数据进行坡度分析获取,耕地破碎度则利用 Fragstats 软件计算得出。统计数据主要来源于黄河流域主要粮食产区的省级及部分地级市的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系构建 PSR 模型起源于区域环境发展分析,随后广泛应用于耕地生态安全评价。模型中, P 为压力,指人类活动对耕地生态系统的负担; S 为状态,表示受压力作用下的耕地系统现状; R 为响应,则是人类为应对状态变化而采取的措施。结合

黄河流域实际与已有研究^[23-24],本研究选取 18 个指标,分别对应压力、状态、响应 3 个子系统,构建黄河流域粮食主产区耕地生态安全评价指标体系(表 2)。

1.3.2 确定指标权重 在运用熵值法确定指标权重时,由于各指标在单位和量纲上存在差异,为保障评价的客观性,先对原始数据进行标准化处理。采用极差法进行数据标准化,随后计算权重,具体结果见表 2。

1.3.3 综合评价指数 根据各指标标准化值及其权重,采用加权求和法计算耕地生态安全综合指数,计算公式为:

$$E = \sum_{a=1}^n X_a \times W_a$$

式中: E 为耕地生态安全综合指数; n 为指标个数; X_a 为第 a 个指标的标准化值; W_a 为第 a 个指标的权重。

由于不同研究区域在耕地资源禀赋与生态环境

上存在显著差异,目前学界尚未就耕地生态安全评价结果的等级划分形成统一标准。在参考相关领域既有成果^[25-26]的基础上,结合研究区实际情况,将 60 个地级市的耕地生态安全状况依据综合指数数值大小划分为极不安全(综合指数 ≤ 0.2)、较不安全($0.2 <$ 综合指数 ≤ 0.4)、临界安全($0.4 <$ 综合指数 ≤ 0.6)、相对安全($0.6 <$ 综合指数 ≤ 0.8)、非常安全($0.8 <$ 综合指数 ≤ 1) 5 种类型。

表 2 黄河流域耕地生态安全评价指标体系
Table 2 Ecological security evaluation index system for cultivated land in Yellow River Basin

目标层	准则层	指标层	单位	趋向	权重
耕地生态 安全评价	压力	人口密度(C1)	人/hm ²	—	0.017 1
		人口自然增长率(C2)	%	—	0.048 2
		人均耕地面积(C3)	hm ² /人	+	0.191 6
		单位面积农膜负荷(C4)	kg/hm ²	—	0.013 6
		单位面积农药负荷(C5)	kg/hm ²	—	0.009 5
		单位面积化肥负荷(C6)	kg/hm ²	—	0.030 5
		城镇化率(C7)	%	—	0.030 6
	状态	复种指数(C8)	%	+	0.034 1
		土地垦殖率(C9)	%	+	0.072 1
		耕地细碎化程(C10)	number/hm ²	—	0.023 1
		耕地平均坡度(C11)	(°)	—	0.026 5
		单位耕地面积粮食产量(C12)	kg/hm ²	+	0.054 8
		第一产业占 GDP 比重(C13)	%	+	0.100 1
	响应	森林覆盖率(C14)	%	+	0.070 6
		单位耕地面积农业机械总动力(C15)	kWh/hm ²	+	0.047 3
		农业财政支出比例(C16)	%	+	0.044 0
		有效灌溉比(C17)	%	+	0.029 8
		农村居民人均可支配收(C18)	元	+	0.156 6

1.3.4 核密度(Kernel)估计法 核密度估计法是一种基于数据内在特征进行概率密度测算的非参数检验模型。选用高斯核函数拟合平滑的密度曲线,分析耕地生态安全的动态变化特征。

1.3.5 障碍度模型 在当前综合评价模型的相关研究中,障碍度模型已被广泛应用于诊断制约事物发展的关键因素^[27-29]。该模型具有操作简便的优势,通过测算各指标的障碍度值,能够定量识别核心障碍因子,进而为生态系统的可持续发展提供精准的针对性建议。为识别制约耕地生态安全的主要障碍度及关键障碍因子,通过 PSR 模型,从准则层与指标层测算影响耕地生态安全的主要障碍因子,并通过排序明确其影响程度,以系统解析制约耕地生态安全的关键维度与具体因素。

2 结果与分析

2.1 黄河流域粮食主产区耕地生态安全时间演变特征

由图 1 可知,从整体层面看,2000—2023 年黄河流域耕地生态安全平均值呈波动增长态势,由 0.28 增长至 0.43,增幅为 51.02%。耕地生态安全指数不断提升的原因可能在于 2000 年以后是中国农业政策从“数量导向”向“质量与生态导向”转型的历史时期。

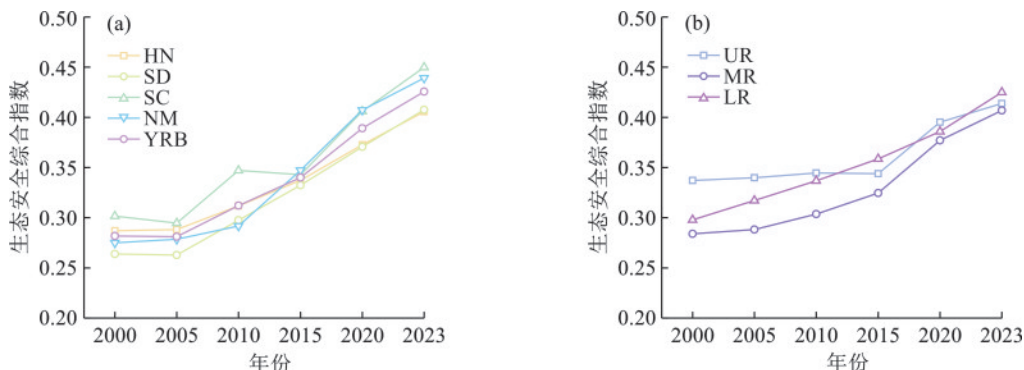
从动态变化来看,2000—2005 年处于工业化城镇化快速扩张、耕地生态压力急剧累积的阶段,生态安全指数处于下降期;2010 年以后,随着“黄河流域生态保护战略”的落地,生态安全指数不断提升。

从省级层面来看,四川耕地安全指数为 0.29~0.45,其水平高于河南、内蒙古、山东。从演变趋势来看,2000—2023 年各省份耕地生态安全指数呈波动上升态势,其中内蒙古的增长率最高,为 59.73%,河南省的增长率最低,为 41.35%,山东和四川的耕地生态安全指数增长率分别为 54.55% 和 49.20%。河南和山东的耕地生态安全等级在 2000—2020 年处于“较不安全”级别,2023 年处于“临界安全”级别。四川和内蒙古的耕地生态安全等级在 2000—2015 年处于“较不安全”级别,2020—2023 年处于“临界安全”级别。

从流域层面来看,黄河流域上、中、下游耕地生态安全指数均呈波动上升态势,但增幅差异显著。其中,中游地区增长率最高,达 43.31%;下游地区次之,增幅为 42.67%;上游地区增幅相对较低,为 22.74%。中游地区(内蒙古)历史上水土流失严重,生态本底较差,2000 年生态安全基数处于较低水平。1999 年退耕还林(草)工程实施后,该区域成为国家生态治理的重点,

推动耕地生态安全快速增长。下游地区(河南、山东)增幅接近中游水平,该区域农业集约化程度高,其耕地生态安全水平的提升,主要源于2015年后“化肥农药零增长行动”等环境规制政策的实施。上游地区(四

川)增幅相对平缓,该区域工业化与城镇化进程滞后,耕地长期保持低投入水平,生态安全指数在研究初期即高于中下游地区。然而,农业技术突破难度大,生态改善空间有限,因此增幅不如中下游地区显著。



注:HN、SD、SC、NM、YRB分别为河南、山东、四川、内蒙古、黄河流域;UR、MR、LR分别为上游、中游、下游。下同。

图1 2000—2023年黄河流域粮食主产区耕地生态安全的时间演变趋势

Fig.1 Temporal evolution trends of cultivated land ecological security composite index in main grain-producing areas of Yellow River basin from 2000 to 2023

为深入剖析耕地生态安全的时序演进特征,通过核密度估计分析其分布曲线的动态演变(图2)。在分布位置上,曲线整体向右移动,反映耕地生态安全水平具有稳步提升的趋势,与上述时序分析结果一致。从主峰演进态势来看,波峰高度在2000—2020年总体上升,2020—2023年出现小幅回落,反映区域内耕地生态安全水平的绝对差值逐渐扩大。从分布延展性来看,曲线呈现出明显的拖尾迹象,体现出各地市显著的空间差异,即个别城市与整体水平的差异正在扩大。从极化趋势来看,除2020年外,曲线始终维持“单峰”形态,表明黄河流域粮食主产区耕地生态安全未出现两极分化现象,低值区域正加速追赶高值区域,形成“低值追高、整体抬升”的趋同演进格局,区域发展协调性不断增强。

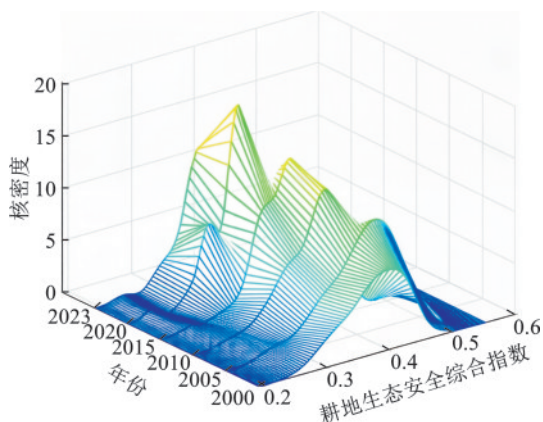


图2 黄河流域粮食主产区耕地生态安全核密度估计

Fig.2 Dynamic evolution of cultivated land ecological security composite index in main grain-producing areas of Yellow River basin

2.2 黄河流域粮食主产区耕地生态安全空间演变特征

由图3可知,2000—2015年河南、山东、四川和内蒙古多数城市的耕地生态安全指数为0.2~0.4,耕地安全水平处于“较不安全”级别。2000年,只有内蒙古东北部的呼伦贝尔市耕地生态安全指数 >0.4 ,其余城市生态安全指数均低于0.4,整体处于“较不安全”级别。表明研究初期黄河流域粮食主产区耕地生态安全水平普遍较低。2015年,除呼伦贝尔市外,河南省的商丘市、周口市首次进入“临界安全”级别。2020年,耕地生态安全水平显著提升,处于“临界安全”级别的城市增至19座,空间格局呈从“点状离散”向“连片集聚”的演进特征。该变化在河南省东部、山东省西部及内蒙古河套地区表现尤为明显,反映出生态治理政策的空间扩散效应初步凸显。2023年,耕地生态安全格局发生根本性转变,处于“临界安全”级别的城市达45座,占研究区城市总数的75%。仅15座城市仍处于“较不安全”,空间分布上呈“整体抬升、局部滞后”的格局,表明黄河流域耕地生态安全呈区域协同改善趋势,但仍需关注局部区域的治理。

从演进机制来看,2000—2015年的点状分布阶段,主要依赖于个别城市的自然禀赋优势(如呼伦贝尔市较低的开发强度)或局部政策试点(如河南部分产粮大县的生态农业探索)。2020年后的整体提升阶段,则与2015年“化肥农药零增长行动”全面实施及2019年黄河流域生态保护和高质量发展战略上升为国家战略密切相关。随着环境规制政策的强化和生态治理技术的推广,耕地生态安全改善效应由试

点城市向周边区域扩散。此外,尽管2023年绝大多数城市已迈入“临界安全”级别,但仍有部分城市(主要分布在山东半岛、河南部分传统农区及内蒙古工

业区)生态安全指数相对较低。因此,在整体向好的趋势下,仍需关注粮食主产区内部的局部洼地,实施差异化、精准化的生态治理策略。

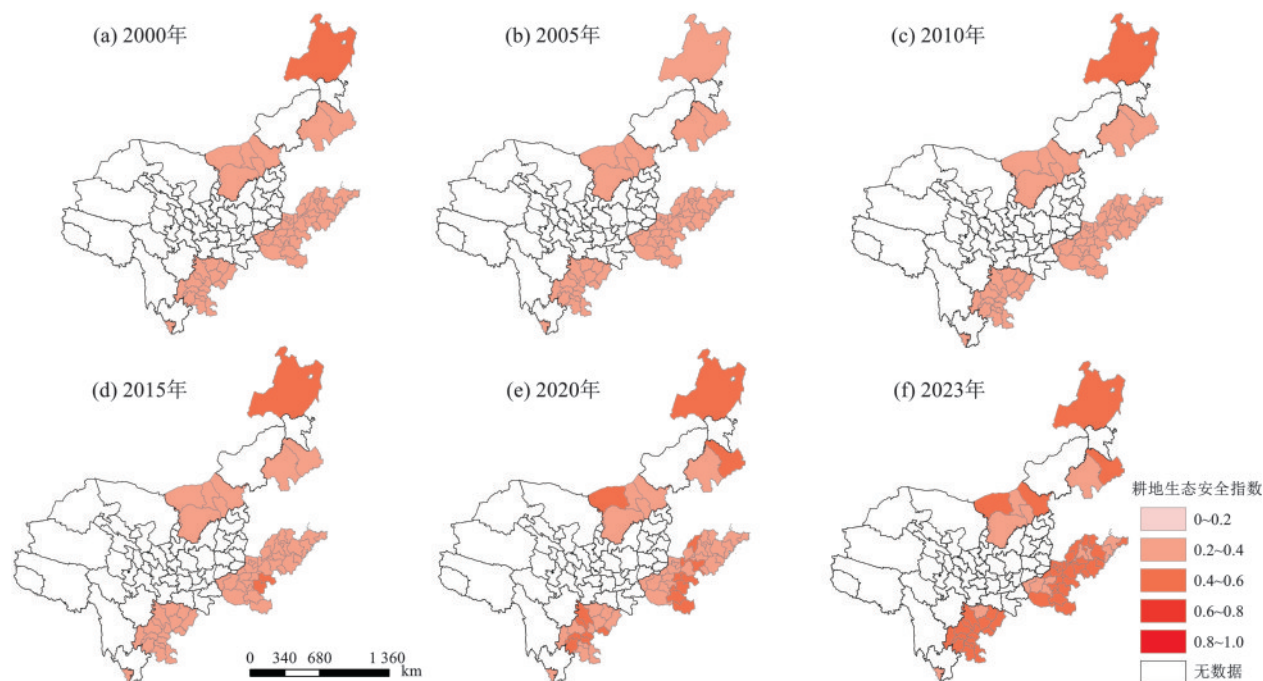


图3 2000—2023年黄河流域粮食主产区耕地生态安全空间分布格局动态变化

Fig.3 Spatial evolution of cultivated land ecological security composite index in main grain-producing areas of Yellow River basin from 2000 to 2023

2.3 黄河流域粮食主产区耕地生态安全障碍因子

2.3.1 准则层障碍因子分析 由图4可知,2000—2010年河南的首位障碍度为响应障碍度,而在2015—2023年转化为压力障碍度。就山东和四川而言,2000—2005年首位障碍度为响应障碍度,2010—2023年转化为压力障碍度。2000—2005年3省的首要障碍度均为响应障碍度,表明研究初期制约3省耕地生态安全的核心问题在于生态治理投入不足与生态治理政策响应滞后。然而,2015—2023年3省的首要障碍因素为压力障碍度,反映出随着工业化、城镇化快速推进及农业集约化水平提升,资源环境压力对耕地生态安全的制约作用凸显。压力障碍度与状态障碍度持续上升,其中状态障碍度增幅尤为显著,表明耕地质量退化、面源污染累积等状态类问题对耕地生态安全的阻碍作用不断增强。而响应障碍度呈现持续下降态势,说明随着国家对农业面源污染治理的重视程度不断提高,生态治理响应的有效性逐步凸显。

与上述3省不同,内蒙古压力障碍度与响应障碍度的作用均有所下降,降幅分别为10.70%和17.72%,而状态障碍度的作用大幅上升,增幅达32.81%。可能主要与内蒙古的资源禀赋与发展阶段

密切相关。首先,作为国家生态脆弱区,内蒙古较早实施退牧还草、生态移民等生态工程,加之工业化城镇化进程相对滞后,农业生产强度低于河南、山东等粮食主产省份,使得压力障碍度有所下降;另一方面,响应障碍度的大幅下降,说明国家生态补偿政策及京津风沙源治理等重大工程在内蒙古取得了显著成效,生态治理的响应效能持续提升。然而,由于生态环境本底脆弱、水土流失风险较高,致使状态障碍度不降反升,耕地质量退化问题反而成为制约生态安全的最主要障碍。

由图5可知,2000—2020年,以压力为首要障碍类型的城市数量从19座扩增至50座,以响应为首要障碍类型的城市则显著缩减,由40座缩减为4座,而以状态为首要障碍度类型的城市从1座增至6座。2023年,以压力为首位障碍的城市仍占据绝对主导地位,共47座,占总数的78.3%;首位障碍度为状态的城市增至10座,占比16.7%;而首位障碍度为响应的城市仅剩3座,占比5.0%。此演变趋势进一步说明,随着工业化、城镇化快速推进及农业集约化水平持续提升,资源环境压力已成为制约耕地生态安全的主要因素,而生态治理响应的有效性持续增强,其对耕地生态安全的阻碍作用逐步减弱。

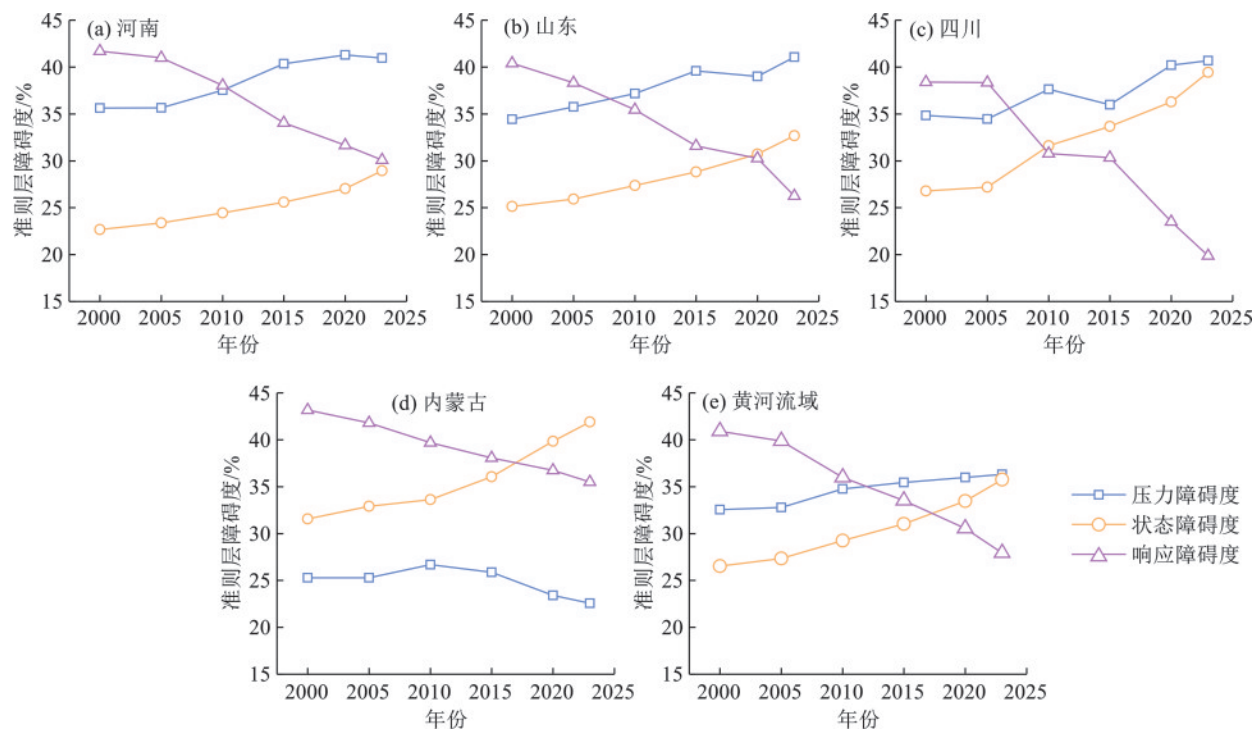


图 4 2000—2023 年黄河流域粮食主产区耕地生态安全的准则层障碍度

Fig.4 Obstacle degree of criterion layers for cultivated land ecological security in main grain-producing areas of Yellow River basin from 2000 to 2023

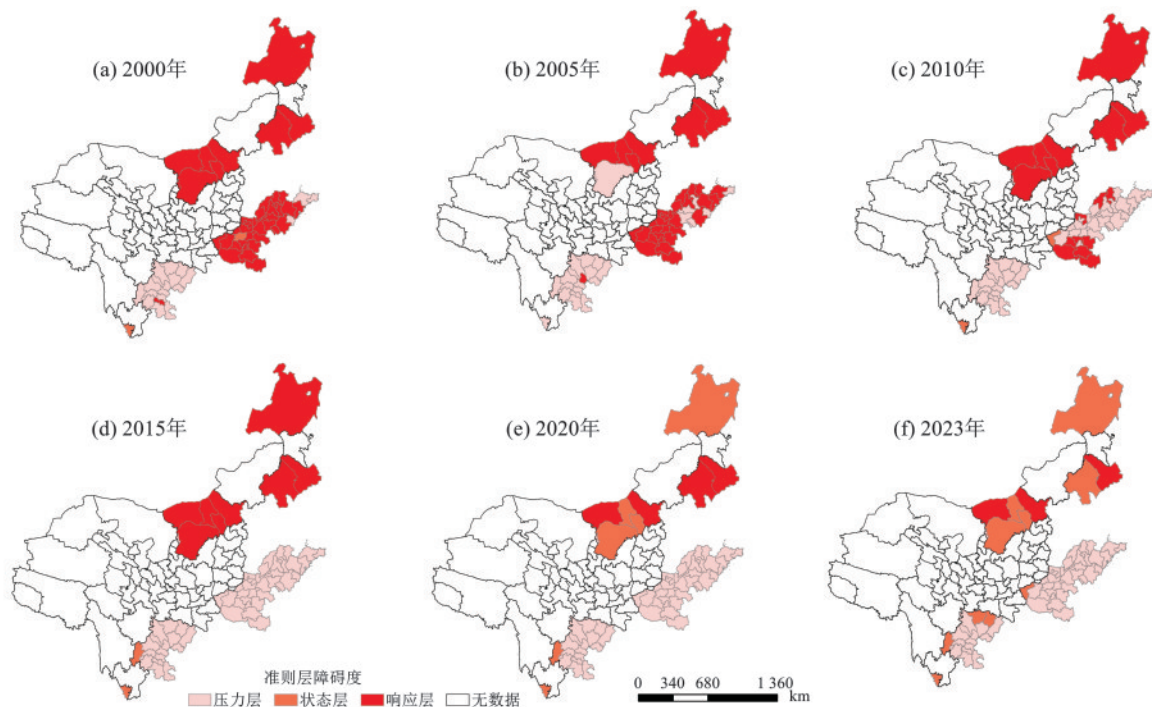


图 5 2000—2023 年黄河流域粮食主产区耕地生态安全的准则层障碍度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of criterion layer obstacle degree for cultivated land ecological security in main grain-producing areas of Yellow River basin from 2000 to 2023

以压力为首要障碍的 47 座城市主要分布于河南省东部、山东省西部、四川省成都平原及内蒙古河套平原等传统粮食生产核心区。该类区域农业集约化程度高,化肥、农药等生产要素投入强度大,同时承载着保障国家粮食安全的核心功能,资源环境压力

长期处于高位,成为制约耕地生态安全水平提升的关键因素。以状态为首要障碍的 10 座城市包括三门峡市、攀枝花市、广元市、雅安市、巴中市、呼伦贝尔市、呼和浩特市、鄂尔多斯市、赤峰市、包头市。从空间分布来看,该类城市主要集中于 2 类区域:一是内

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

蒙古高原生态脆弱区, 该区域生态环境本底脆弱, 水土流失、草原退化等问题突出, 耕地状态类指标是制约生态安全的主要因素; 二是川西山地丘陵区, 受地形复杂、耕地碎片化等因素影响, 局部地区耕地质量退化问题不容忽视。以响应为首要障碍度的城市大幅减少, 2023 年仅剩乌兰察布市、通辽市、巴彦淖尔市三座, 均集中分布于内蒙古中东部地区。尽管国家生态补偿政策及京津风沙源治理等重大工程在内蒙古取得显著成效, 但由于该区域生态脆弱性高、治理难度大, 部分地区仍存在生态治理响应效能滞后的现象。

2.3.2 指标层障碍因子分析 由图 6 可知, 从整体来看, 研究期内排名前 5 位的障碍因子相对稳定, 依次为人均耕地面积(C3)、农民可支配收入(C18)、第一产业占 GDP 比重(C13)、土地垦殖率(C9)和森林覆盖率(C14)。5 个因子可归为 3 大类: 资源禀赋类(C3, C9)表征区域耕地数量与开发强度, 经济结构类(C13, C18)反映农业依赖度与农户生计压力, 生态基底类(C14)则体现区域生态环境对耕地系统的支撑能力。黄河流域经济呈快速发展态势, 随着第一产业比重持续下降, 第二、三产业的迅速发展导致的建设用地增长与城市扩张, 直接降低人均耕地面积。同时, 为保障粮食供给, 部分地区提高土地垦殖率,

进一步加剧生态退化风险。建设用地增加、耕地过度垦殖及森林覆盖率下降导致的生态支撑能力减弱共同制约耕地生态安全水平的提升。

从各省份来看, 障碍因子构成既存在共性, 也呈现出显著的区域差异。2000—2015 年河南排名前 6 的障碍因子依次为人均耕地面积(C3)、农民可支配收入(C18)、第一产业占 GDP 比重(C13)、森林覆盖率(C14)、人口自然增长率(C2)和单位耕地面积粮食产量(C12)。2020—2023 年土地垦殖率(C9)和农业财政支出比例(C16)上升至前 6 位, 而人口自然增长率(C2)和单位耕地面积粮食产量(C12)则位居 6 位之后。表明河南早期的人口压力(C2)和粮食产量压力(C12)随着农业技术进步有所缓解, 但长期高强度的耕地开发导致较高的垦殖率(C9)和财政支农资金的配置效率(C16)成为新的制约点。山东排名前 4 位的障碍因子较为固定, 为人均耕地面积(C3)、农民可支配收入(C18)、第一产业占 GDP 比重(C13)及森林覆盖率(C14)。与河南相比, 山东的障碍因子组合更能凸显“沿海经济大省”的双重特征。一方面, 较高的工业化、城镇化水平加剧耕地资源的紧缺(C3); 另一方面, 尽管农业在区域经济中的占比相对较低(C13), 农户收入对农业的依赖程度(C18)却依然较强。

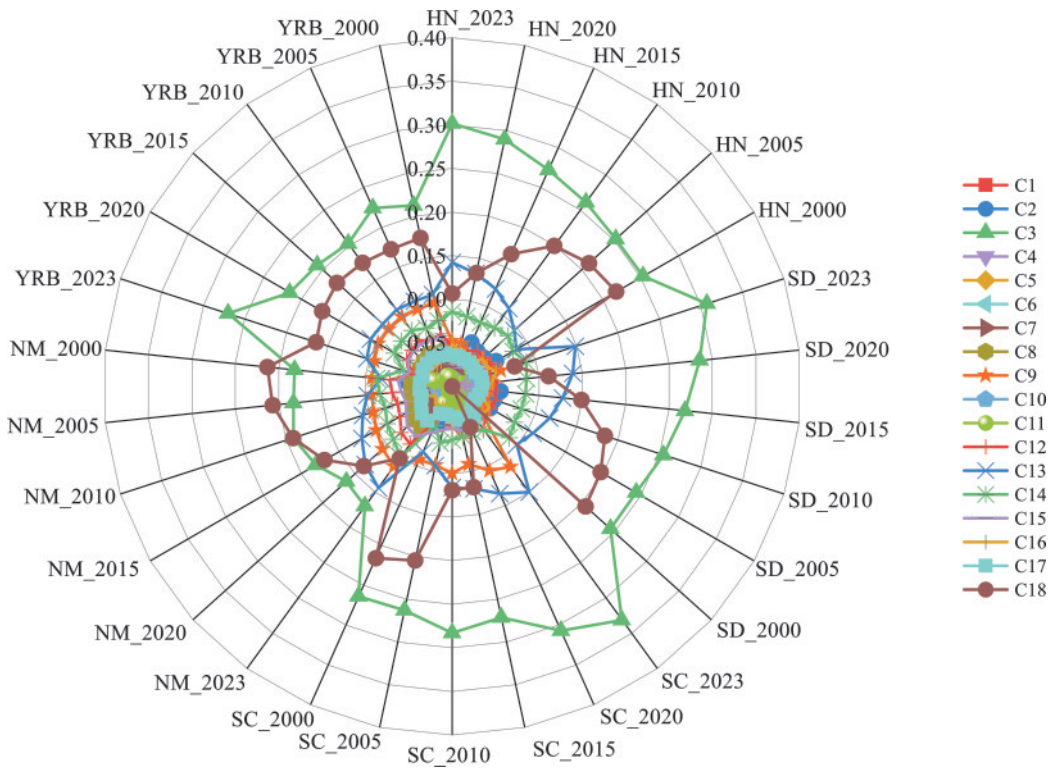


图 6 黄河流域粮食主产区耕地生态安全的主要障碍因子及其障碍度

Fig.6 Main obstacle factors and their obstacle degrees of cultivated land ecological security in main grain-producing areas of Yellow River basin

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

2000—2015年四川稳定位于前4位的障碍因子为人均耕地面积(C3)、第一产业占GDP比重(C13)、农民可支配收入(C18)和土地垦殖率(C9)。2020—2023年森林覆盖率(C14)取代农民可支配收入(C18)进入前4位。2000年,单位耕地面积农业机械总动力(C15)与人口自然增长率(C2)分别位列第5、第6位。2005—2010年森林覆盖率(C14)与单位耕地面积农业机械总动力(C15)占据该区间。2015—2023年单位耕地面积粮食产量(C12)升至第5位,C15位居第6位。与河南、山东等平原省份不同,作为典型的山地丘陵区,四川耕地碎片化程度高,农业机械化水平成为制约耕地生态安全的关键变量。就内蒙古而言,前6位障碍因子为人均耕地面积(C3)、第一产业占GDP比重(C13)、土地垦殖率(C9)、农民可支配收入(C18)、森林覆盖率(C14)和单位耕地面积粮食产量(C12)。2000—2005年首位障碍因子是农民可支配收入(C18);2010—2023年人均耕地面积(C3)成为首位障碍因子。该转换反映内蒙古发展阶段的跨越,研究初期,贫困与生计压力(C18)是主要矛盾。随着生态补偿政策和农业开发的推进,收入水平逐步提升,但广种薄收的粗放模式导致人均耕地资源的生态承载压力(C3)日益凸显。

3 讨论

3.1 耕地生态安全演变趋势与等级分析

黄河流域粮食主产区耕地生态安全水平总体呈显著改善趋势。从空间来看,处于“临界安全”级别的城市逐渐增加,表明耕地压力有所缓解,农业生态环境得到改善。该趋势与Zou等^[27]基于PSR模型对我国粮食主产区耕地生态安全的评估结果基本一致,2006—2018年耕地生态安全指数由0.64升至0.78,呈缓慢上升趋势;He等^[28]在恩施土家族苗族自治州的研究表明,2005—2018年耕地生态安全指数由0.40提升至0.69,安全等级依次跨越“较不安全-基本安全-较安全”3个阶段,呈持续改善态势;赵柯等^[29]针对宁波市的研究显示,其安全水平总体保持良好,变化幅度较小,整体呈平稳态势。现有研究^[30]表明,耕地生态安全总体呈小幅抬升态势,受多重因素协同驱动,如农业基础设施的持续升级、科学有序的土地整治项目实施^[31]、耕地保护与集约利用水平的同步提升^[32]、农户生态环保意识的显著增强^[33],以及政府主导的各项生态环境保护工程的落地见效。

本研究进一步显示,当前耕地安全水平处于“临界安全”级别,尚未达到“相对安全”和“非常安全”级别,仍处于预警状态。Zou等^[27]情景预测也指出,2019—2028年我国粮食主产区耕地生态安全指数可

能保持持续增长态势,但仍将处于“临界安全”区间,多数省份维持轻度预警等级。表明黄河流域虽已采取一系列生态保护措施,但耕地生态安全水平等级仍处于较低水平,尚未实现从量变到质变的根本性跨越。其主要原因在于长期高强度利用模式导致的耕地质量退化问题难以短期扭转。同时,粮食安全与生态保护目标间的矛盾尚未得到解决。因此,黄河流域仍需通过积极有效的管控措施严格限制耕地占用、加强生态知识宣传、持续推进生态文明建设,以提升耕地生态安全水平,进而推动耕地生态安全水平由“临界安全”向“相对安全”稳步迈进。

3.2 耕地生态安全的空间分异特征及其差异化治理路径

尽管区域整体生态安全水平持续提升,但局部滞后效应依然突出,空间分异特征仍然存在。该种空间异质性的形成,主要归因于各地区在发展历程、产业结构和地理环境上的本质差异^[10]。以乌海市为例,其耕地生态安全水平虽持续上升,但始终落后于其他区域,长期处于“较不安全”等级。作为典型的资源型工业城市,乌海市长期依赖煤炭等矿产资源的开采加工,工业活动对耕地生态系统的扰动强度大,导致土壤退化、植被破坏等问题累积,显著加剧耕地生态系统的承载压力。本研究表明,资源依赖型发展路径对耕地生态安全具有较大影响,即便在整体改善的背景下,局部区域仍可能因产业结构刚性而无法实现同步提升。与He等^[28]的研究结论一致,在恩施土家族苗族自治州内部,巴东县的耕地生态系统服务安全等级明显低于周边县市,主要原因在于其长期依赖资源密集型传统产业,加之经济发展水平相对滞后,导致区域清洁生产能力不足,生态治理投入与技术推广难以有效落地。由此可见,无论是资源型工业城市还是欠发达传统农区,经济结构单一化与生态治理能力弱化导致耕地生态安全改善面临结构性障碍。Zou等^[27]对我国粮食主产区的预测研究同样指出,尽管未来耕地生态安全整体呈改善态势,但空间分布的不平衡性仍将持续。本研究中,处于“较不安全”等级的城市主要集中于资源型工业区(如乌海市)、传统农区(如河南部分产粮大县)、山地丘陵区(如四川盆地)及生态脆弱区(如内蒙古部分牧区),反映出不同类型区域面临的治理难点各异。因此,为推动黄河流域粮食主产区耕地生态系统服务的可持续发展,亟须分类施策、精准治理。针对乌海市等资源型工业城市,推进工矿废弃地复垦与生态修复。针对四川盆地等山地丘陵区,应着力推进耕地宜机化改造。对于传统农区,需深化农业绿色转型。针对内蒙古牧区等生态脆弱区,

实施退化耕地改良与草原生态恢复,提升生态系统的自我修复能力。通过构建差异化的治理路径,缩小区域间生态安全差距,推动黄河流域耕地生态安全整体从“较不安全”向“相对安全”等级整体迈进。

3.3 关键障碍因子的时空演变规律与调控启示

河南、山东和四川3省压力障碍度逐渐成为首要障碍因子,主要源于人均耕地面积持续减少与人口密度不断增加的共同作用。Zhang等^[34]的研究指出,人口增长显著影响区域生态状况,直接加剧住房、交通和公共设施用地供需矛盾,显著降低土地生态安全;Liu等^[35]的研究指出,土地生态安全压力最大的城市往往是典型的工业化程度高、资源枯竭的城市。同时,状态障碍度增幅尤为显著,而响应障碍度呈稳步下降趋势。“压力上升-状态恶化-响应改善”的演变轨迹表明,过去20余年,黄河流域粮食主产区的生态治理响应能力已有实质性提升,但压力增加与状态退化的现象仍在持续。因此,未来需通过更具针对性的保护举措与更高强度的治理投入,推动生态安全水平实现实质性跃升。

与上述3省不同,作为幅员辽阔的生态脆弱区,内蒙古压力障碍度显著降低,未能成为制约耕地生态安全的首要因子。状态障碍度对耕地生态安全的约束效应相应增强,反映出生态基底脆弱性对耕地质量的制约作用正在凸显。与此同时,响应障碍度显著回落,主要得益于研究期内农业机械化水平的大幅提升,政策工具与技术推广的响应效率持续提高,从而弱化响应对生态安全格局的约束强度。

因此,未来黄河流域耕地生态安全治理的方面为:针对压力障碍度持续攀升的城市,需不断强化农业投入品减量增效的刚性约束,推动绿色生产技术与耕地保护政策深度融合;针对状态障碍度突出的内蒙古等生态脆弱区,将治理重心向耕地质量修复倾斜,实施差异化的本底修复工程。最后,在“临界安全”基础上构建动态预警与风险防控机制,防止局部波动演化为系统性风险。

本研究中,排名前5的指标层障碍因子呈现出相对稳定的特征,为人均耕地面积、农民可支配收入、第一产业占GDP比重、土地垦殖率及森林覆盖率。He等^[28]研究结果显示,阻碍耕地生态系统服务功能提升的首要障碍因子为人均耕地面积,其次为非农人口比例、第一产业GDP占比、人口密度和复种指数;Han等^[36]的研究亦指出,生态系统服务受社会经济指标的影响最为显著,与本研究的发现相契合;王立业等^[24]针对山东省耕地生态系统服务障碍因子的研究指出,为确保其稳定供给,亟须进一步出台精

准、持续的农业支持政策。基于前5位障碍因子的特点,未来需构建“政府主导-企业协同-农户参与”的多元共治体系。中央政府应将人均耕地面积、森林覆盖率等指标纳入粮食主产区高质量发展考核体系;地方政府应根据本区域主导障碍因子制定差异化行动方案;农产品相关企业应加快研发推广绿色农资产品;农户层面,通过生态补偿引导其主动保护耕地的意识。综上,开展耕地生态系统服务时空变异特征及障碍因子的研究,不仅有助于揭示区域耕地生态安全演变的深层机理,也为制定差异化的耕地保护政策提供科学依据,对于服务农业可持续发展具有重要的理论价值与实践意义。

4 结论

1) 耕地安全水平整体提升,但仍处于预警状态。2000—2023年黄河流域耕地生态安全指数呈持续上升态势,由“较不安全”等级提升至“临界安全”等级。然而,当前水平距离“相对安全”和“非常安全”仍有差距。因此,各级政府需将耕地生态安全纳入高质量发展考核体系,在“临界安全”基础上设定分阶段提升目标,力争早日迈入“相对安全”等级。

2) 空间异质性显著,局部地区滞后效应突出。2023年,研究区60个地市中仍有15个地市处于“较不安全”等级,主要集中于资源型工业区、传统农区、山地丘陵区及生态脆弱区。为此,亟须通过构建差异化的治理路径,不断缩小区域间生态安全差距。

3) 障碍因子演变呈现省际差异,需制定差异化的治理路径。河南、山东、四川3省压力障碍度居首位,表明工业化、城镇化及农业集约化带来的资源环境压力已成为核心制约。内蒙古状态障碍度大幅上升,反映出生态基底脆弱性对耕地质量的刚性约束。因此,需通过分类施策、精准治理,推动黄河流域粮食主产区耕地生态安全由“临界安全”向“相对安全”全面迈进。

参考文献:

- [1] 高延雷,王志刚.城镇化是否带来了耕地压力的增加?来自中国的经验证据[J].中国农村经济,2020(9):65-85.
Gao Yanlei, Wang Zhigang. Does urbanization increase the pressure of cultivated land? Evidence based on interprovincial panel data in China[J]. Chinese Rural Economy, 2020(9):65-85.
- [2] 朱晓华,张燕,朱媛媛.大食物观视角下中国耕地保护的分区调控与区间协同[J].地理学报,2023,78(9):2147-2162.
Zhu Xiaohua, Zhang Yan, Zhu Yuanyuan. Regional regulation and interregional coordination of cultivated land protection in China from the perspective of "Greater

- Food" approach [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78 (9):2147-2162.
- [3] 陈锡文. 当前农业农村的若干重要问题[J]. *中国农村经济*, 2023(8):2-17.
Chen Xiwen. Several important issues in current agriculture and rural areas [J]. *Chinese Rural Economy*, 2023 (8):2-17.
- [4] 孔祥斌. 中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(12):1-10.
Kong Xiangbin. The connotation and realization path of ecological governance of cultivated land protection in China [J]. *China Land Science*, 2020, 34(12):1-10.
- [5] Liu Linqi, Wang Xinyue, Meng Xuanzhu, et al. The coupling and coordination between food production security and agricultural ecological protection in main food-producing areas of China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154:e110785.
- [6] 梁琼丹, 方怒放. 中国近 30 a 耕地撂荒的时空动态及其驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(6):357-368.
Liang Qiongdan, Fang Nufang. Spatiotemporal dynamics and driving factors of cropland abandonment in China over past three decades [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(6):357-368.
- [7] Song Xiaoqing, Wang Xiong, Hu Shougeng, et al. Functional transition of cultivated ecosystems: Underlying mechanisms and policy implications in China [J]. *Land Use Policy*, 2022, 119:e106195.
- [8] 姜长云. 2024 年中央一号文件的突出亮点[J]. *农村金融研究*, 2024(2):3-13.
Jiang Changyun. Highlights of the No.1 central document in 2024 [J]. *Rural Finance Research*, 2024(2):3-13.
- [9] 姜春艳. 《加快建设农业强国规划(2024—2035 年)》印发[J]. *乡村科技*, 2025, 16(7):e1.
Jiang Chunyan. The plan for accelerating the construction of a powerful agricultural country (2024—2035) was issued [J]. *Rural Science and Technology*, 2025, 16(7):e1.
- [10] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(16):5090-5100.
Zhang Rui, Zheng Huawei, Liu Youzhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16):5090-5100.
- [11] He Yinjie, Wu Dafang, Liu Yanyan, et al. Review of research on evaluating the ecological security of cultivated land [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11:e1115058.
- [12] Lee C C, Qian Anqi. Regional differences, dynamic evolution, and obstacle factors of cultivated land ecological security in China [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2024, 94:e101970.
- [13] 韩杨. 中国耕地保护利用政策演进、愿景目标与实现路径[J]. *管理世界*, 2022, 38(11):121-130.
Han Yang. The policy evolution, vision goal and realization path of China's cultivated land protection and utilization [J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(11):121-130.
- [14] 王雨枫, 曹洪军. 东北地区城镇一体化时空分异及影响机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(3):145-150.
Wang Yufeng, Cao Hongjun. Spatiotemporal differentiation and influencing mechanism of regional urban integration of Northeast China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(3):145-150.
- [15] 姜坤, 柯新利, 王鹏飞. 面向粮食与生态“双安全”的中国耕地保护分区管控研究[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2025(5):190-201.
Jiang Kun, Ke Xinli, Wang Pengfei. Research on zoning-based regulation of farmland protection in China for the dual security of food and ecological [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2025(5):190-201.
- [16] 聂艳, 彭雅婷, 于婧, 等. 基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价[J]. *经济地理*, 2015, 35(11):172-178.
Nie Yan, Peng Yating, Yu Jing, et al. Evaluation on farmland ecological security in Hubei Province based on quantum genetic projection pursuit model [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(11):172-178.
- [17] Wu Li, Xie Binggeng. The variation differences of cultivated land ecological security between flatland and mountainous areas based on LUCC [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (8):e0220747.
- [18] 葛艳艳, 王伟, 樊骋. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省耕地生态安全评价及其障碍因子研究[J]. *山东农业大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(2):80-85.
Ge Yanyan, Wang Wei, Fan Cheng. Research on cultivated land ecological security resistance in Anhui Province based on dpsir-topsis model [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Social Science Edition)*, 2021, 23(2):80-85.
- [19] 崔宁波, 巴雪真. 黑龙江省耕地生态安全压力与农业经济发展的脱钩分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5):308-315.
Cui Ningbo, Ba Xuezheng. Decoupling analysis of pressure of cultivated land ecological security and agricultural economic development in Heilongjiang Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5):308-315.
- [20] 王燕辉, 陈卓, 曹禹, 等. 河北省近 20 年耕地生态安全动态

- 变化及阻力分析[J].水土保持研究,2017,24(1):194-199.
- Wang Yanhui, Chen Zhuo, Cao Yu, et al. Analysis on the dynamic change and resistance of cultivated land ecological security in the past 20 years in Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 194-199.
- [21] 薛选登, 韩欣茹. 黄河流域粮食主产区农业生态韧性时空演进及障碍因子诊断: 基于4省60个地级市的经验证据[J/OL]. 水土保持通报, 1-12[2026-07-07]. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.001>.
- Xue Xuandeng, Han Xinru. Spatiotemporal evolution of agro-ecological resilience and diagnosis of obstacle factors in main grain-producing areas of Yellow River basin: Empirical evidence based on 60 prefecture-level cities in four provinces[J/OL]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1-12[2026-07-07]. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.001>.
- [22] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data Discussions, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [23] 於冉, 余祺琪, 李雪, 等. 安徽省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2026, 34(3): 706-716.
- Yu Ran, Yu Qiqi, Lixue, et al. Evaluation of cultivated land ecological security and analysis of obstacle factors in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2026, 34(3): 706-716.
- [24] 王立业, 师春春, 张文信, 等. 2009—2019年山东省耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 138-145.
- Wang Liye, Shi Chunchun, Zhang Wenxin, et al. Evaluation of cropland ecological security and diagnosis of its obstacle factors in Shandong Province in 2009—2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 138-145.
- [25] 韩丽红, 潘玉君, 高敏, 等. 贵州耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 西南林业大学学报, 2023, 7(12): 68-73.
- Han Lihong, Pan Yujun, Gao Min, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor analysis of cultivated land in Guizhou Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2023, 7(12): 68-73.
- [26] Feng Yongjiu, Yang Qianqian, Tong Xiaohua, et al. Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1469-1479.
- [27] Zou Shangjun, Zhang Lu, Huang Xiao, et al. Early ecological security warning of cultivated lands using RF-MLP integration model: A case study on China's main grain-producing areas[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: e109059.
- [28] He Nan, Zhou Yong, Wang Li, et al. Spatiotemporal evaluation and analysis of cultivated land ecological security based on the DPSIR model in Enshi autonomous prefecture, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: e109619.
- [29] 赵柯, 李伟芳, 毛菁旭, 等. 基于PSR模型的耕地生态安全评价及时空格局演变[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 186-193.
- Zhao Ke, Li Weifang, Mao Jingxu, et al. Evaluation of cultivated land ecological security and spatial-temporal pattern evolution based on PSR model[J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 186-193.
- [30] Schiavon E, Taramelli A, Tornato A. Modelling stakeholder perceptions to assess Green Infrastructures potential in agriculture through fuzzy logic: A tool for participatory governance[J]. Environmental Development, 2021, 40: e100671.
- [31] Zhang Zhengfeng, Zhao Wei, Gu Xiaokun. Changes resulting from a land consolidation project (LCP) and its resource-environment effects: A case study in Tianmen City of Hubei Province, China[J]. Land Use Policy, 2014, 40: 74-82.
- [32] Wang Huan, Zhang Chao, Yao Xiaochuang, et al. Scenario simulation of the tradeoff between ecological land and farmland in black soil region of Northeast China[J]. Land Use Policy, 2022, 114: e105991.
- [33] Poltimäe H, Peterson K. Role of environmental awareness in implementing farmland conservation measures[J]. Journal of Rural Studies, 2021, 87: 58-66.
- [34] Zhang Xiaoqing, Huang Xinru, Li Guo, et al. Evaluating the land ecological security of urban areas in the Yangtze River basin in Hubei[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025, 7: e212.
- [35] Liu Chunxia, Wang Chaoxia, Li Yuechen, et al. Spatiotemporal differentiation and geographic detection mechanism of ecological security in Chongqing, China[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 35: e02072.
- [36] Han Baolong, Liu Hongxiao, Wang Ruasong. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 217-225.