

黄河流域粮食主产区农业生态韧性 时空演进及障碍因子

薛选登, 韩欣茹

(河南科技大学 商学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: [目的] 探究农业生态韧性水平时空演进特征及主要障碍因子, 为实现粮食安全和农业高质量发展提供科学参考。[方法] 基于2008—2022年黄河流域60个地级市面板数据, 构建“抵抗与驱动—适应与重构—创新与发展”三维农业生态韧性评价体系, 综合运用熵值法、Dagum基尼系数、探索性空间数据分析(ESDA)及障碍度模型对农业生态韧性进行测度。[结果] ①黄河流域粮食主产区农业生态韧性整体上呈波动上升的时序变化趋势和“东高西低、北强南弱”的非均衡空间分布特征。②总体空间差异较小, 区域差异是总体差异的主要来源。③空间上呈显著的集聚特征, 以H-H和L-L聚类模式为主, 局部空间关联格局较稳定。④适应与重构能力是阻碍农业生态韧性提升的主要维度; 农业科技投入水平和农村居民用电水平是主要的障碍因子。[结论] 黄河流域粮食主产区可通过实施分区农业生态建设, 加强区域生态协同治理, 建立低碳农业发展机制, 提高农业生态韧性。

关键词: 黄河流域; 粮食主产区; 农业生态韧性; 时空演进; 障碍度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0309-11

中图分类号: X321, F323.22

文献参数: 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[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 309-319. Xue Xuandeng, Han Xinru. Spatiotemporal evolution of agro-ecological resilience and obstacle factors in main grain-producing areas of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 309-319.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.001

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.001

Spatiotemporal evolution of agro-ecological resilience and obstacle factors in main grain-producing areas of Yellow River basin

Xue Xuandeng, Han Xinru

(Business School, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics of agro-ecological resilience and the main obstacle factors were investigated, in order to provide scientific references for the realization of food security and high-quality agricultural development. [Methods] Based on panel data from 60 prefecture-level cities in the Yellow River basin from 2008 to 2022, a three-dimensional agro-ecological resilience evaluation system of “resistance and driving, adaptation and reconstruction, innovation and development” was developed. The entropy weight method, Dagum Gini coefficient, exploratory spatial data analysis (ESDA), and obstacle degree model were employed to quantify and analyze the agro-ecological resilience. [Results] The agro-ecological resilience of the main grain-producing areas in the Yellow River basin showed the following characteristics: ① Overall, a fluctuating upward temporal trend was observed, along with an uneven spatial distribution characterized by ‘higher in the east and lower in the west, stronger in the north and weaker in the south’. ② In terms of regional differences, the overall spatial variability was small, and inter-regional differences were the main source of total variation. ③ In terms of spatial clustering, significant clustering characteristics were observed, dominated by H-H and L-L clustering patterns, and the local spatial correlation patterns remained relatively stable. ④ Regarding

收稿日期: 2025-04-01

修回日期: 2025-07-18

采用日期: 2025-07-18

资助项目: 国家社会科学基金青年项目“高技术制造业产业链创新链融合发展韧性评估与提升路径研究”(23CJY020); 河南省社科规划项目“风险叠加背景下河南省粮食供给韧性动态演化及提升路径研究”(2024BJJ00437)

第一作者: 薛选登(1971—), 男(汉族), 河南省三门峡市人, 博士, 教授, 主要从事农业经济与区域经济方面的研究。Email: xue69519@163.com。

obstacle factors, the capacity for adaptation and reconstruction was the main dimension constraining the improvement of agro-ecological resilience. Specifically, the level of agricultural technology investment and rural residential electricity consumption were the main obstacle factors. [Conclusion] The main grain-producing areas in the Yellow River basin can improve agro-ecological resilience by implementing region-specific agro-ecological development, strengthening regional ecological collaborative governance, and establishing a low-carbon agricultural development mechanism.

Keywords: the Yellow River basin; main grain-producing areas; agro-ecological resilience; spatiotemporal evolution; obstacle degree

长期以来,党中央、国务院高度重视农业农村生态环境保护工作,强调稳住农业基本盘,筑牢“三农”压舱石。黄河流域作为中国重要的生态安全屏障和农业生产基地,担负着国家生态保护和农业生产的双重任务。由于长期以来粗放型的农业生产经营模式,伴随着农业生产快速增长的同时,也带来水土流失、农业面源污染等诸多环境问题,对农业生态系统造成巨大冲击,加之黄河流域生态本底脆弱^[1],致使黄河流域生态安全、粮食安全面临严峻挑战。因此,探讨农业系统在面对外部压力对生态资源的过度攫取时,如何保证其功能与结构的稳定性,对于维护国家粮食安全、提升黄河流域生态系统稳定具有重要意义。

韧性(resilience)一词起源于拉丁文 *resilire*,意为“恢复原始稳定发展状态的能力”^[2-4]。韧性最早应用于力学与物理学科,随着研究的深入,大致经历了从工程韧性到生态韧性再到演化韧性的演变过程^[5]。Holling C. S.^[6]首次将“韧性”引入生态学领域并将其定义为工程韧性。后来 Alberti M^[7]等根据人类生态学的观点,提出了生态韧性的概念, Carl F.^[8]、Pickett S T. A. 等^[9]进一步指出,生态韧性涵盖了一种动态适应、持续学习和自我优化的能力。而演化韧性最早用于行为心理学,后引入区域经济学领域,强调系统结构的功能适应转化^[10]。然而,从农业视角研究生态韧性比较匮乏,仅有少数观点出现在农业韧性的综合研究中。部分学者认为农业生态韧性是农业生产系统与环境系统之间协调发展的重要衡量标准,体现了农业生产系统在面临自然环境变化时的适应、化解和应对能力^[11-12]。在以往的研究中,多数学者从抵抗力、适应力、恢复力、重构力等维度构建韧性评价体系^[13-15]。另有学者构建“规模-密度-形态”三维韧性评价体系^[16]。部分学者在考虑 PSR 模型的基础上逐步拓展到 DSPIR 综合评价生态韧性水平^[17-18]。在研究方法方面,主要采用熵权法、主客观综合赋值法对韧性水平进行测度,采用核密度估计法、莫兰指数、GIS 空间分析技术、探索性空间数据分析(ESDA)、重心-标准差椭圆、泰尔指数、Dagum 基

尼系数、地理探测器模型、时空地理加权回归模型(GTWR)、STIRPAT 模型、障碍度模型、空间计量面板模型等探究韧性水平的时空演变格局及影响因素。

通过对现有研究成果进行分析,发现仍有可拓展的空间。从研究区域来看,相关研究多集中于国家、省级、流域层面,缺乏黄河流域粮食主产区地级市的研究。从研究视角来看,现有研究多从城市维度探讨生态韧性的提韧路径,缺乏从农业视角定量研究生态韧性。从指标体系构建来看,现有研究关于生态韧性指标体系构建维度过于单一,缺乏考虑指标间的层次关系以及各研究区域之间的异质性。从研究内容来看,现有文献多考虑韧性时空演变特征与影响因素,忽略农业生态韧性区域差异及空间关联特征。鉴于此,本研究以黄河流域粮食主产区 60 个地级市(不包括自治州、盟)为基本单元,基于“抵抗与驱动能力-适应与重构能力-创新与发展能力”三维度构建农业生态韧性综合评价指标体系,运用熵值法对 2008—2022 年黄河流域粮食主产区农业生态韧性进行测度,并结合核密度估计、莫兰指数、Dagum 基尼系数及其子群分解法分析其时空格局、区域差异来源及动态演化特征,利用障碍度模型揭示障碍因子对农业生态韧性的阻碍程度,为优化农业发展格局、协同保障国家粮食安全与农业绿色低碳转型提供决策参考。

1 研究区概况

黄河流域是保障国家区域协调发展与生态安全、粮食安全的关键区域^[19]。作为中国农业的重要支柱,2024 年黄河流域粮食主产区生产粮食 2.02×10^8 t,占全国粮食总产量的 28.54%;粮食播种面积 3.26×10^7 hm²,占全国粮食播种面积的 27.33%。本研究综合考虑黄河流域各行政单元区域经济发展水平、地理位置差异,选取黄河流域粮食主产区 60 个地级市为研究样本(表 1^[11,20]),全面揭示农业生态韧性的时空演变特征及空间差异来源,为筑牢生态屏障,实现黄河流域高质量和可持续发展目标提供决策支撑。

表1 黄河流域粮食主产区地级市上、中、下游区段划分
Table 1 Classification of prefecture-level cities in main grain-producing areas of Yellow River basin into upper, middle and lower reaches

区域	省份	地级市名称
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

2 指标选取与研究方法

2.1 指标体系构建

借鉴学术界已有研究成果及对农业生态韧性内涵的理解^[13-15, 21-22],将农业生态韧性定义为农业系统通过自我调整与适应,实现生态系统稳定和可持续发展的能力。该能力使农业系统能够主动抵御外界风险冲击,并最大限度吸收其影响,驱动系统不断调整,演化至新的均衡状态。主要表现为农业生态系统在面对外界冲击时的抵抗与驱动能力、适应与重构能力、创新与发展能力。本研究依据科学性、系统性、全面性、合理性及可得性原则,建立包含3个准则层,24个指标的农业生态韧性综合评价体系(表2)。

(1) 抵抗与驱动能力。该维度用于表征驱动韧性状态改变和抵御外部干扰并维持基础生产状态不变的能力。共选取10个指标,主要涵盖化学投入物、水资源利用、城镇化水平、农业用电、农业机械化水平、植被覆盖度等方面。其中, X_1 — X_6 为负向指标,代表资源消耗和农业环境污染压力。

(2) 适应与重构能力。该维度用于表征农业生态系统通过结构调整与资源优化,主动适应新均衡状态并实现系统重构的能力。选取的9个指标中,农业碳吸收水平反映生态系统固碳能力;农业经济基础及粮食生产能力反映系统的适应能力;复种指数、有效灌溉率、畜禽粪污综合利用率分别表征土地利用强度、田间用水管理水平及废弃物循环利用情况;农业产业结构多元化水平、劳动和土地生产率共同反映系统的转型潜力。

(3) 创新与发展能力。该维度用于表征农业系统通过技术进步、政策支持实现创新发展的内生动力,通常表现为知识积累、技术革新^[13]、创新投入、政府支持等。选择农村居民文化程度、农村互联网普及率、农业科技投入水平、环境规制力度、财政支农

力度5个指标反映创新与发展能力。

2.2 数据来源

本研究原始数据来源于2009—2023年《河南省统计年鉴》《山东省统计年鉴》《四川省统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《水资源公报》《水土保持公报》、EPS数据库及部分地级市统计年鉴。其中碳排放总量参考李波等^[23]整理的碳排放系数进行测算,农业碳吸收总量参考田云等^[24]、陈罗焯等^[25]、杨果等^[26]的碳汇测算结果。对于部分缺失数据采用线性插值法进行补充。本研究采用狭义农业口径,不含林、牧、渔业,部分统计数据按农业产值占农林牧渔业总产值比重予以计算剥离。

2.3 研究方法

(1) 熵值法。为避免主观因素对权重确定的干扰,消除量纲影响,客观确定指标效用值,本研究运用熵值法对黄河流域粮食主产区2008—2022年农业生态韧性进行综合评价分析。计算步骤参考文献^[27]。

(2) Kernel密度估计法。核密度估计是直接从样本数据特性出发,估计数据集的概率密度函数的非参数方法。本研究通过高斯核密度函数构建平滑的连续密度曲线,反映黄河流域粮食主产区农业生态韧性动态演进规律。计算步骤参考文献^[1, 28]。

(3) Dagum基尼系数及其分解法。采用Dagum基尼系数及其分解法将总体区域差异分解为区域内差异贡献、区域间净值差异贡献及超变密度贡献,进一步分析黄河流域粮食主产区农业生态韧性差异来源。计算步骤参考Dagum C^[29]的研究。

(4) 探索性空间数据分析(ESDA)。采用全局Moran's I 衡量农业生态韧性的空间自相关性,描述其整体空间单元的平均关联程度;采用局部空间自相关的莫兰散点图揭示韧性水平的局部空间集聚规律。

(5) 障碍度模型。为进一步明确阻碍黄河流域粮食主产区农业生态韧性的主要障碍维度及障碍因子,本研究引入障碍度模型对农业生态韧性准则层、

指标层因子进行障碍度测算及大小排序,分析各障碍维度及障碍因子对农业生态韧性的影响程度,计算步骤参考王松茂等^[30]的研究。

表 2 黄河流域粮食主产区农业生态韧性综合评价指标体系及权重
Table 2 Comprehensive evaluation indicator system and weights of agro-ecological resilience of main grain-producing areas in Yellow River basin

目标层	准则层	指标层	指标说明	属性	权重
农业生态韧性	抵抗与驱动能力 (0.254 3)	X_1 化肥施用强度/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农用化肥施用量/农作物播种面积	-	0.007 6
		X_2 农膜施用强度/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农用塑料薄膜施用量/农作物播种面积	-	0.000 6
		X_3 柴油施用强度/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农用柴油施用量/农作物播种面积	-	0.004 9
		X_4 农药施用强度/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农药施用量/农作物播种面积	-	0.007 7
		X_5 农业碳排放强度/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农业碳排放量/农作物播种面积	-	0.004 1
		X_6 农业用水强度/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	农业用水量/农作物播种面积	-	0.003 7
		X_7 城镇化率/%	城镇常住人口/常住人口	+	0.039 0
		X_8 农村居民用电水平/($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{人}^{-1}$)	农村用电量/农村常住人口	+	0.106 7
		X_9 农业机械化水平/($\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农业机械总动力/农作物播种面积	+	0.065 2
		X_{10} 植被覆盖度/%	归一化植被指数 ^[31]	+	0.014 8
	适应与重构能力 (0.443 8)	X_{11} 农业碳吸收水平/(10^4 t)	农作物碳吸收总量 ^[24-26]	+	0.083 6
		X_{12} 农业经济基础/%	农业总产值/地区生产总值	+	0.056 2
		X_{13} 粮食生产能力/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	粮食产量/农作物播种面积	+	0.008 0
		X_{14} 复种指数/%	农作物播种面积/耕地面积	+	0.045 9
		X_{15} 有效灌溉率/%	有效灌溉面积/农作物播种面积	+	0.044 5
		X_{16} 农业废弃物再利用水平/%	畜禽粪污综合利用率	+	0.038 7
		X_{17} 农业产业结构多元化水平/%	1-农业总产值/农林牧渔业总产值	+	0.018 8
		X_{18} 农业劳动生产率/($10^4 \text{ 元} \cdot \text{人}^{-1}$)	农业总产值/农业从业人员	+	0.084 8
		X_{19} 农业土地生产率/($10^4 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	农业总产值/农作物播种面积	+	0.063 3
		创新与发展能力 (0.301 9)	X_{20} 农村居民文化程度/(年)	农村居民平均受教育年限	+
	X_{21} 农村互联网普及率/%		开通互联网宽带业务行政村/行政村	+	0.038 5
	X_{22} 农业科技投入水平/(10^4 元)		地方财政科学技术支出×(农业总产值/地区生产总值)	+	0.165 1
	X_{23} 环境规制力度/%		环保词汇/工作报告总词数	+	0.044 7
	X_{24} 财政支农力度/%		农林水事务支出/一般公共预算支出	+	0.015 0

3 结果与分析

3.1 黄河流域粮食主产区农业生态韧性时序演进特征

运用熵值法对黄河流域粮食主产区 60 个地级市 2008—2022 年农业生态韧性进行测算。由图 1 可以看出,研究期内农业生态韧性均值呈波动增长态势,由 2008 年的 0.208 8 增长至 2022 年的 0.331 3,增幅为 58.67%,年均增长率 3.35%。从省域层面来看,各省农业生态韧性呈波动上升态势,且均在 2015—2017 年呈现小幅度波动下降。其中内蒙古的年均增长率最高,为 3.88%,山东的年均增长率最低,为 2.98%。从流域层面来看,黄河流域下游地区凭借完善的水利设施及高度集约化的农业生产模式,其韧

性水平显著高于中上游地区。中上游地区韧性差值呈“发散—收敛”交替出现的波动趋势。同时,研究区各维度均值总体上呈增长态势,创新与发展能力增幅最大,为 114.48%,适应与重构能力始终显著高于其他维度,抵抗与驱动能力与创新与发展能力维度的差值趋于收敛。

为进一步揭示黄河流域粮食主产区农业生态韧性的动态演进趋势,对研究区农业生态韧性进行核密度估计(图 2)。结果表明,黄河流域粮食主产区农业生态韧性的分布曲线中心总体呈右移趋势,表明韧性水平持续增长;研究期内核密度曲线主峰峰值单调递减,波峰形态由“陡峭”演变为“扁平”,说明研究区内部农业生态韧性水平绝对差异呈扩大趋势;核密度曲线存在右拖尾现象且分布延展性呈现一定

程度拓宽趋势,表明各地市间韧性水平空间差异趋于扩大,即存在个别城市与地区内平均水平差异逐

渐增加的现象;整体核密度曲线呈现单峰分布,不存在明显的极化特征。

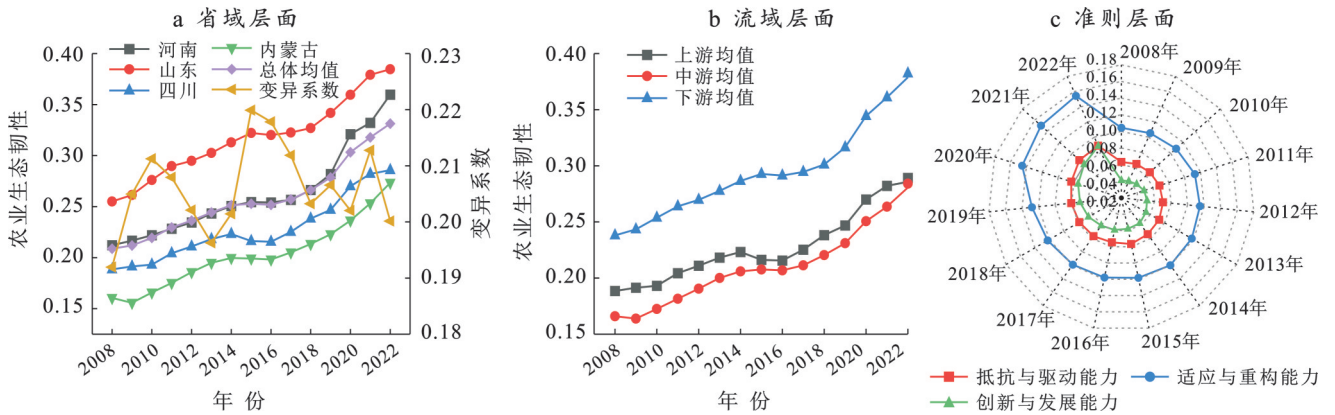


图1 2008—2022年黄河流域粮食主产区农业生态韧性时间演进趋势
Fig.1 Temporal evolution trends of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

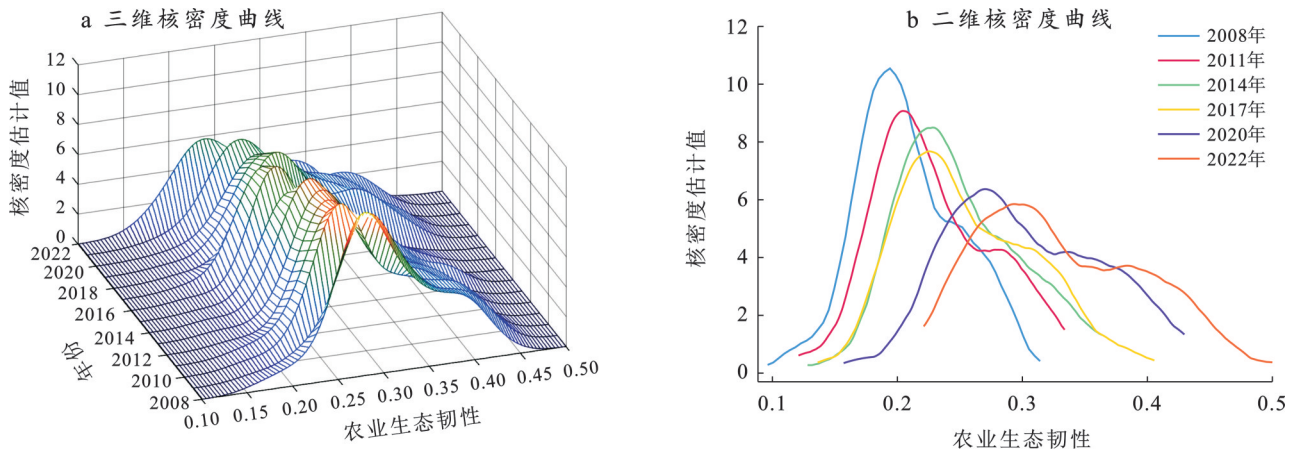


图2 黄河流域粮食主产区农业生态韧性分布动态演进

Fig.2 Dynamic evolution of agro-ecological resilience distribution in main grain-producing areas of Yellow River basin

3.2 黄河流域粮食主产区农业生态韧性空间演进特征

3.2.1 农业生态韧性空间动态演进

运用 ArcGIS 10.8 软件对黄河流域粮食主产区农业生态韧性进行空间动态演进可视化分析,并采用自然间断点法将 60 个地级市农业生态韧性按照数值大小划分为:低值韧性区(韧性值 ≤ 0.150)、较低韧性区($0.150 < \text{韧性值} \leq 0.225$)、中等韧性区($0.225 < \text{韧性值} \leq 0.300$)、较高韧性区($0.300 < \text{韧性值} \leq 0.375$)、高值韧性区(韧性值 > 0.375)5 种类型(图3)。

图3表明,研究期内黄河流域粮食主产区农业生态韧性呈“东高西低,北强南弱”的空间分异格局。高值区由“点状零星分布”向“带状连续扩展”演进,呈“东部沿海向内陆延伸,平原向山区梯度递减”的规律。其中,山东、河南因其优越的水热条件和高度产业化的农业体系,形成了较稳定的高韧性区;而内蒙古、四川水土流失频发,韧性提升受限。

各地级市韧性等级显著提升,韧性水平经历“低韧均衡—梯度分化—高值集聚”的演化过程。具体表现在:①2008—2013年为低韧均衡阶段,中等、较低韧性区占总区域的80%以上,无高值韧性区。这可能是由于2008年国际金融危机后,地方政府重经济轻生态,加之长期粗放的农业生产模式,环境污染问题日益严重。②2013—2018年为梯度分化阶段,山东、河南地级市韧性跃升,形成“鲁豫核心圈”,内蒙古较低韧性区由7个降至3个,四川省6个地级市从较低韧性区向中等韧性区跃升。这主要得益于“十三五”规划的实施,国家对农村污染环境的治理与生态保护力度显著增强。③2018—2022年为高韧性集聚阶段,研究区韧性等级显著提升,较高、高值韧性区占总区域的60%,无低值、较低韧性区。这是由于黄河流域生态保护和高质量发展战略实施后,各地完善生态环境治理相关政策,健全农业环境污染监管机制。

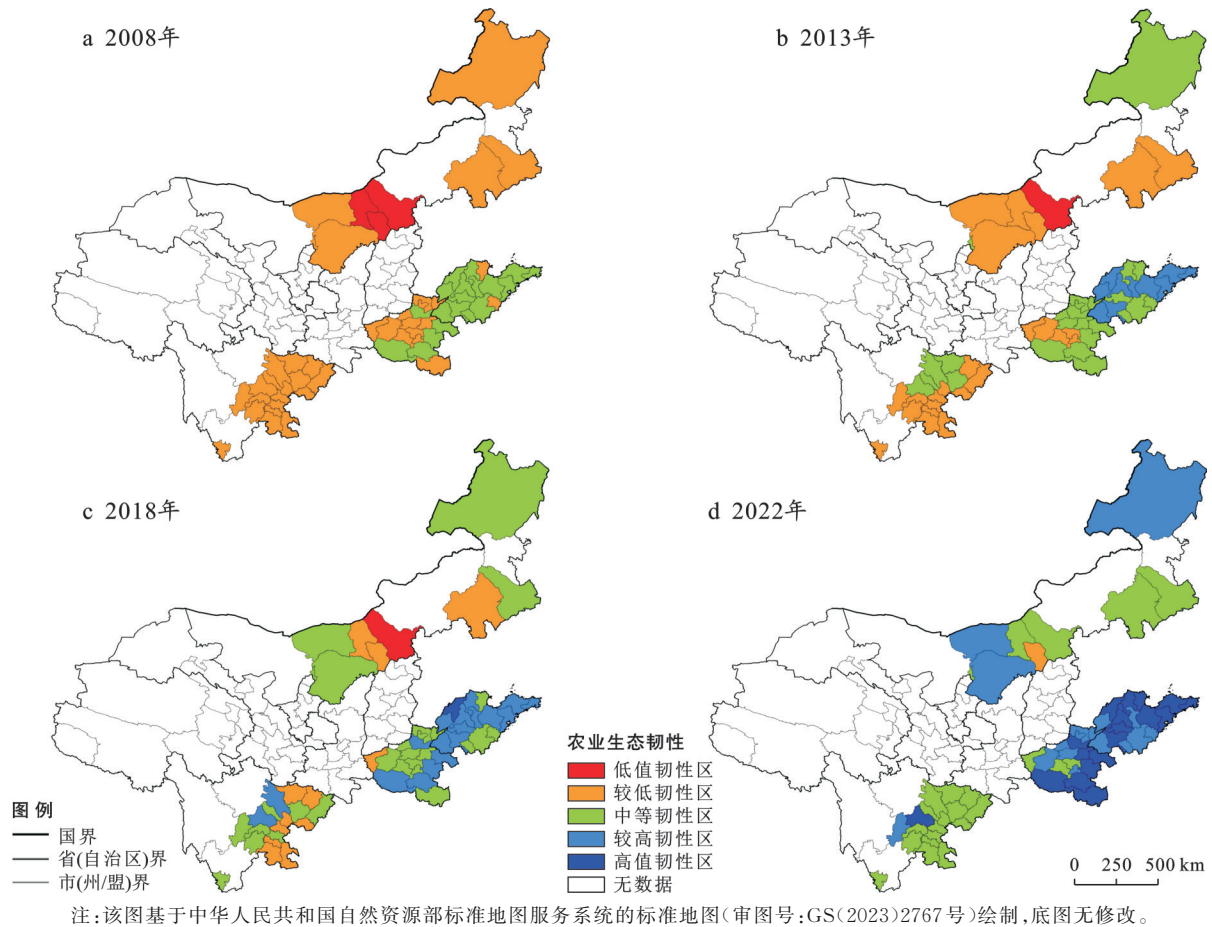


图3 2008—2022年黄河流域粮食主产区农业生态韧性空间格局演变

Fig.3 Spatial pattern evolution of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

3.2.2 农业生态韧性空间差异与来源分解

从总体差异来看,研究期内黄河流域粮食主产区总体基尼系数呈“N-W”型波动态势(图4)。2008—2015年呈“N”型波动上升趋势,2015年基尼系数达到峰值(0.121),随后波动下降至0.112,降幅7.44%。表明随着黄河流域生态保护修复力度加强与黄河流域生态保护和高质量发展战略的实施,总体非均衡程度有所缓解。

区域内差异(表3)表明,农业生态韧性基尼系数均值排序为:内蒙古(0.090 5) > 河南(0.079 2) > 山东(0.057 8) > 四川(0.052 1)。其中,河南省农业生态韧性基尼系数总体呈“先波动,后上升”的发展态势。2019年增速加快,2022年增长至0.104,增幅为42.47%。山东省农业生态韧性基尼系数呈倒“U”型变化趋势,区域内非均衡程度表现为先扩大后缩小。四川省农业生态韧性基尼系数总体呈阶梯式增长态势,年均增长率为3.93%。内蒙古农业生态韧性基尼系数则呈震荡下降趋势,由2008年的0.094降至2022年的0.080,年均递减率为1.15%。总体上,河南、四川两省区域内差异趋于扩大,山东、内蒙古区域内差异趋于缩小。

区域间基尼系数均值排序为:山东—内蒙古(0.132 1) > 山东—四川(0.111 9) > 河南—内蒙古(0.105 3) > 河南—山东(0.089 6) > 河南—四川(0.078 8) > 四川—内蒙古(0.071 1)。其中,河南—山东、四川—内蒙古区域间差异均呈小幅度波动;河南—四川、河南—内蒙古、山东—四川、山东—内蒙古区域间差异分别呈平稳增长,“U”型、倒“V”型波动降低的发展态势。可以看出,山东—内蒙古农业生态韧性存在较大差异,四川—内蒙古农业生态韧性差异相对较小。

从区域差异贡献度均值来看,区域间差异(76.81%) > 区域内(15.12%) > 超变密度(8.08%),表明4个省份区域间差异是研究区农业生态韧性空间差异的主要来源。

3.2.3 农业生态韧性空间关联特征

研究期内全局 Moran's I 均为正值(表4),并呈“W-V”型波动变化,波动区间在[0.408 3, 0.541 8]。经检验,各年份全局 Moran's I 均在1%水平上差异显著。表明研究区韧性水平在空间分布上呈现显著的空间集聚效应,存在高-高集聚、低-低集聚的分布特征。

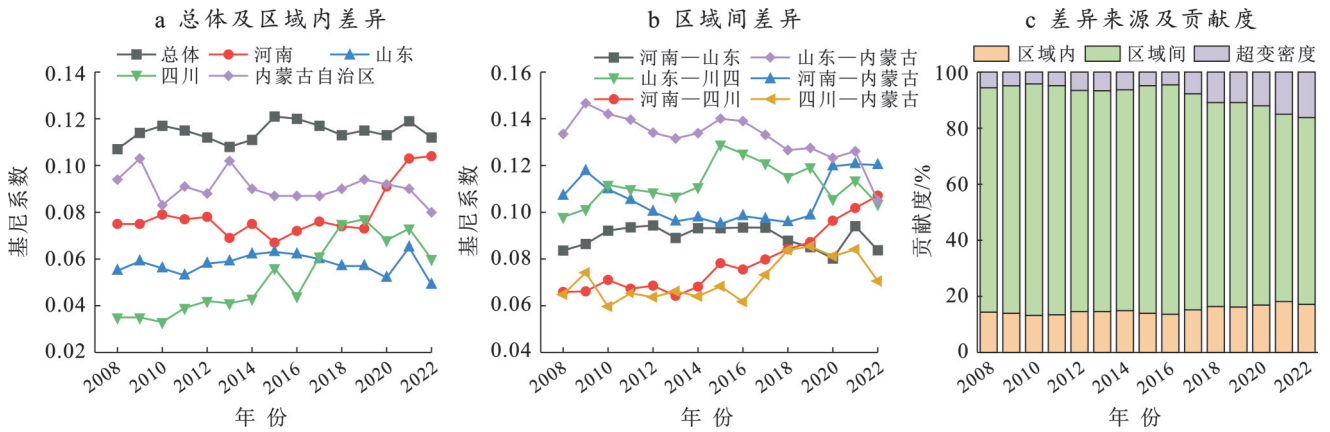


图 4 2008—2022年黄河流域粮食主产区农业生态韧性基尼系数变化及贡献度

Fig.4 Variations in Gini coefficient and contribution rate of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

表 3 2008—2022年黄河流域粮食主产区农业生态韧性基尼系数及贡献度
Table 3 Gini coefficients and contribution rates of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

年份	总体	区域内差异				区域间差异						贡献度/%		
		河南	山东	四川	内蒙古	河—山	河—川	河—内	山—川	山—内	川—内	区域内	区域间	超变密度
2008	0.107	0.075	0.055	0.035	0.094	0.084	0.066	0.107	0.098	0.134	0.065	14.392	80.012	5.595
2009	0.114	0.075	0.059	0.035	0.103	0.086	0.066	0.118	0.101	0.147	0.074	13.990	81.130	4.879
2010	0.117	0.079	0.056	0.033	0.083	0.092	0.071	0.110	0.112	0.142	0.060	13.194	82.610	4.197
2011	0.115	0.077	0.053	0.039	0.091	0.094	0.067	0.105	0.110	0.140	0.065	13.453	81.692	4.855
2012	0.112	0.078	0.058	0.042	0.088	0.094	0.069	0.100	0.109	0.134	0.064	14.571	78.906	6.523
2013	0.108	0.069	0.059	0.041	0.102	0.089	0.064	0.096	0.107	0.132	0.066	14.600	78.720	6.680
2014	0.111	0.075	0.062	0.043	0.090	0.093	0.068	0.098	0.111	0.134	0.064	14.924	78.756	6.320
2015	0.121	0.067	0.063	0.056	0.087	0.093	0.078	0.095	0.129	0.140	0.068	13.964	81.199	4.836
2016	0.120	0.072	0.062	0.044	0.087	0.094	0.076	0.098	0.125	0.139	0.062	13.629	81.811	4.560
2017	0.117	0.076	0.060	0.061	0.087	0.093	0.080	0.097	0.121	0.133	0.073	15.178	77.093	7.730
2018	0.113	0.074	0.057	0.075	0.090	0.088	0.084	0.096	0.115	0.127	0.084	16.354	72.771	10.876
2019	0.115	0.073	0.057	0.077	0.094	0.085	0.087	0.099	0.119	0.127	0.085	16.216	72.893	10.890
2020	0.113	0.091	0.052	0.068	0.092	0.080	0.096	0.120	0.106	0.123	0.081	16.922	71.054	12.024
2021	0.119	0.103	0.065	0.073	0.090	0.094	0.102	0.121	0.114	0.126	0.084	18.156	66.814	15.031
2022	0.112	0.104	0.049	0.060	0.080	0.084	0.107	0.120	0.103	0.105	0.071	17.182	66.622	16.195

注:河—山、河—川、河—内、山—川、山—内、川—内分别代表河南—山东、河南—四川、河南—内蒙古、山东—四川、山东—内蒙古、四川—内蒙古。下同。

表 4 2008—2022年黄河流域粮食主产区农业生态韧性全局Moran's I检验结果
Table 4 Global Moran's I test results of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

年份	全局莫兰指数	Z统计量	p值	年份	全局莫兰指数	Z统计量	p值
2008	0.493 5	8.878 4	0.000	2016	0.541 8	9.723 9	0.000
2009	0.470 6	8.485 6	0.000	2017	0.500 6	9.013 3	0.000
2010	0.520 9	9.334 7	0.000	2018	0.446 6	8.041 3	0.000
2011	0.532 7	9.548 5	0.000	2019	0.469 4	8.443 9	0.000
2012	0.496 6	8.983 9	0.000	2020	0.427 2	7.702 3	0.000
2013	0.502 5	9.065 2	0.000	2021	0.408 3	7.363 7	0.000
2014	0.488 5	8.804 1	0.000	2022	0.436 3	7.860 5	0.000
2015	0.532 3	9.562 8	0.000				

为进一步揭示研究区内农业生态韧性局部空间关联特征,计算局部莫兰指数并绘制 2008, 2013, 2018, 2022 年黄河流域农业生态韧性莫兰散点图(图 5)。可以看出,样本点基本分布在第一、三象限,各地区集聚模式较稳定但存在空间异质性。

高-高集聚区(H-H)主要包括山东全部地级市、河南部分地级市。主要是由于山东、河南两省农业产业链条较完整且经济发展水平较高。低-低集聚区(L-L)主要分布于四川、内蒙古,这些地区生态本底脆弱,水土流失、干旱等生态问题频发,且产业结构

相对单一,致使农业生态韧性较低且陷入弱者恒弱的困境。低-高集聚区与高-低集聚区(L-H, H-L)在研究区内呈“点状+块状”零散分布;在数量上由 2008 年的 8 个地级市增加到 2022 年的 12 个地级市。其中鄂尔多斯、安阳、雅安均从 L-L 集聚跳跃至 H-L 集聚。

这种变化可能与这些地区近年来采取生态治理措施、产业结构调整及外部政策支持等因素有关,使其自身从低值韧性跃升至高值韧性,但辐射带动效应滞后,邻近地区仍处于低韧状态。

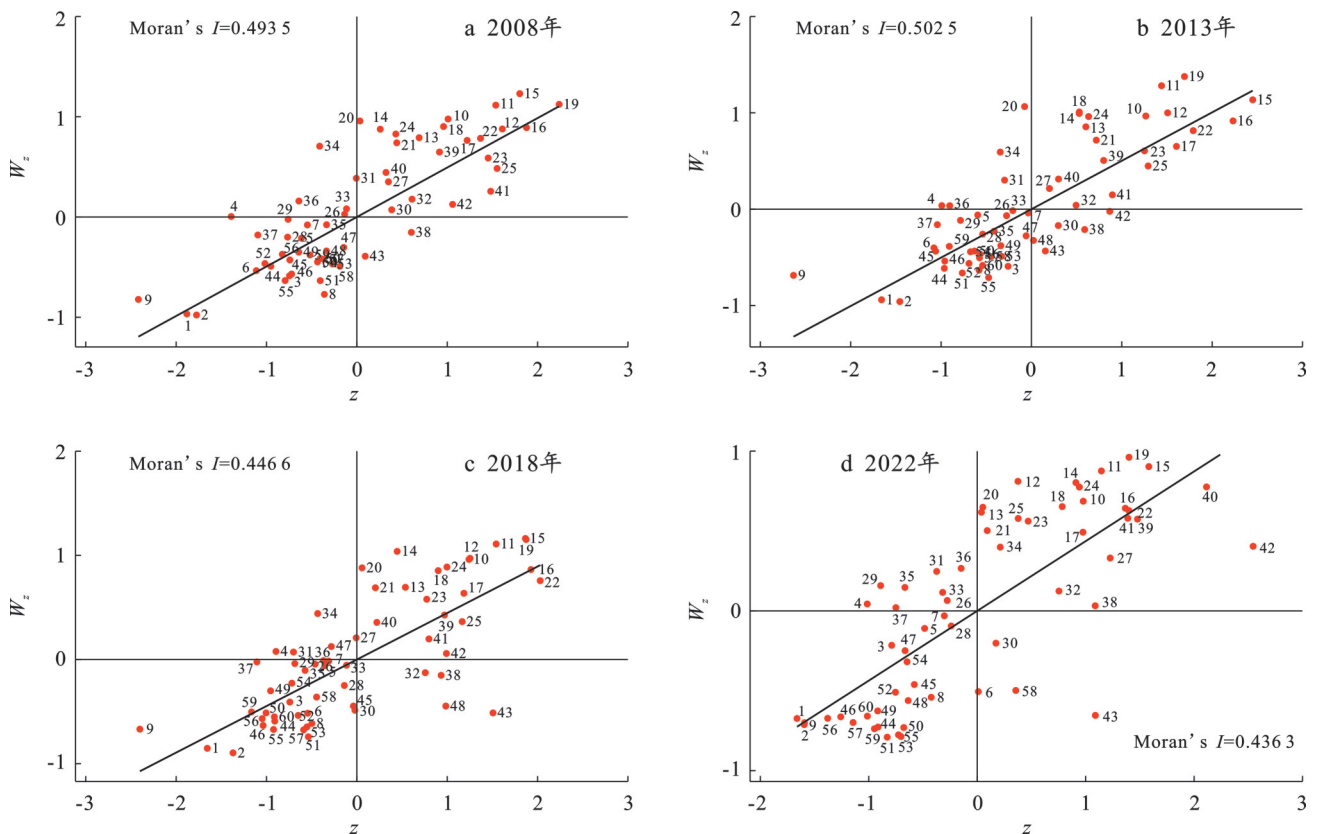


图 5 2008—2022 年黄河流域粮食主产区农业生态韧性莫兰散点图

Fig.5 Moran scatterplots of agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

3.3 黄河流域粮食主产区农业生态韧性障碍因子识别

3.3.1 准则层障碍因子识别

研究期内,各准则层障碍度均值表现为:适应与重构能力(43.27%)>创新与发展能力(32.55%)>抵抗与驱动能力(24.17%)。因此,黄河流域粮食主产区农业生态韧性提升需重点关注适应与重构能力、创新与发展能力的改善和提升,构建农业生态安全屏障。

从各准则层来看,①抵抗与驱动能力障碍度均值呈波动增长特征(图 6),增幅为 3.20%,表明该因素对农业生态韧性的阻碍作用逐渐增强。该准则

层对各省份的阻碍程度排序为:四川>河南>山东>内蒙古。②适应与重构能力障碍度均值呈倒“V”型发展态势,其对研究区农业生态韧性的阻碍程度由强变弱。该准则层对各省份的阻碍程度排序为:山东>内蒙古>四川>河南。③创新与发展能力障碍度均值整体呈小幅波动下降的态势,由 2008 年的 32.96% 降至 2022 年的 31.75%,降幅为 3.67%。该准则层对各省的阻碍程度表现为:内蒙古>河南>四川>山东。因此,河南省应重视各能力的提高,山东省应重视适应与重构能力的调节优化,四川省应加强抵抗与驱动能力的提升,内蒙古应提高其创新与发展能力。

3.3.2 指标层障碍因子识别

表 5 表明,2008—2022 年黄河流域粮食主产区农业生态韧性前 5 位障碍因子相对稳定,主要为农业科技投入水平(X_{22})、农村居民用电水平(X_8)、农业劳动

生产率(X_{18})、农业碳吸收水平(X_{11})、农业机械化水平(X_9)。其中 X_{22} , X_8 , X_{18} 稳居障碍因子前三位,且前 6 位障碍因子障碍度合计保持在 60% 以上,对农业生态韧性提升阻碍解释力较强。

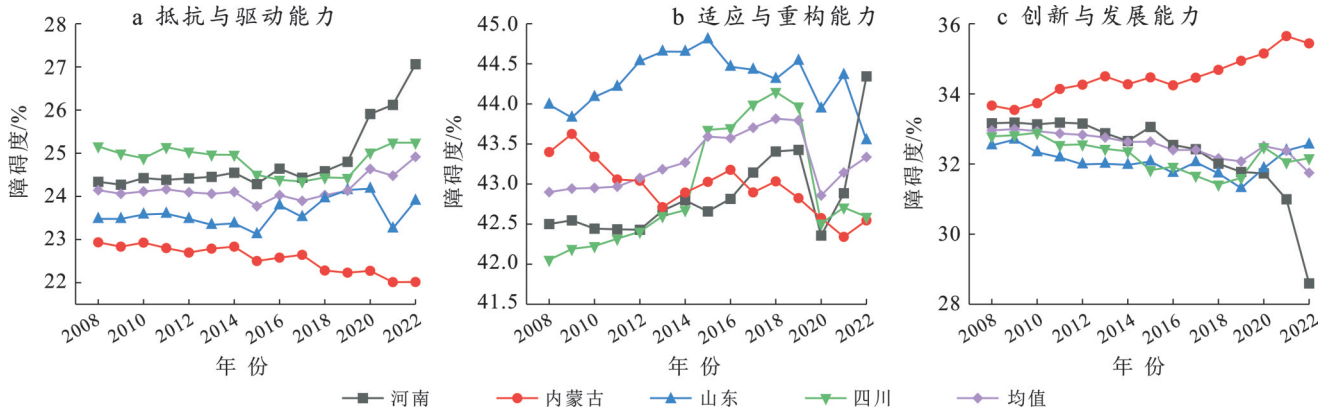


图 6 2008—2022 年黄河流域粮食主产区农业生态韧性准则层障碍度
 Fig.6 Obstacle degrees of criterion layers for agro-ecological resilience in main grain-production areas of Yellow River basin (2008—2022)

表 5 2008—2022 年黄河流域粮食主产区农业生态韧性主要障碍因子及障碍度
 Table 5 Main obstable factors and their obstacle degrees for agro-ecological resilience in main grain-producing areas of Yellow River basin (2008—2022)

单位: %

年份	区域	农业生态韧性准则层障碍度指标排序						合计
		1	2	3	4	5	6	
2008	河南	X_{22} (20.227)	X_8 (12.812)	X_{18} (10.453)	X_{19} (7.492)	X_{11} (6.952)	X_9 (6.504)	64.439
	山东	X_{22} (21.254)	X_8 (12.378)	X_{18} (10.255)	X_{11} (7.651)	X_{19} (7.567)	X_9 (5.957)	65.062
	四川	X_{22} (19.999)	X_8 (12.780)	X_{18} (10.055)	X_{11} (8.934)	X_9 (7.608)	X_{19} (7.439)	66.816
	内蒙古	X_{22} (19.378)	X_8 (11.989)	X_{18} (9.102)	X_{11} (8.127)	X_{19} (7.262)	X_9 (6.665)	62.523
	整体	X_{22} (20.305)	X_8 (12.563)	X_{18} (10.078)	X_{11} (7.909)	X_{19} (7.462)	X_9 (6.713)	65.031
2015	河南	X_{22} (20.519)	X_8 (13.086)	X_{18} (10.247)	X_{19} (7.192)	X_{11} (6.757)	X_9 (6.379)	64.180
	山东	X_{22} (21.829)	X_8 (12.942)	X_{18} (9.594)	X_{11} (8.232)	X_{19} (6.976)	X_{12} (6.757)	66.329
	四川	X_{22} (19.967)	X_8 (12.865)	X_{18} (9.432)	X_{11} (9.188)	X_9 (7.309)	X_{19} (6.896)	65.657
	内蒙古	X_{22} (20.039)	X_8 (11.808)	X_{18} (7.701)	X_{11} (7.595)	X_{19} (7.205)	X_9 (6.754)	61.101
	整体	X_{22} (20.631)	X_8 (12.789)	X_{18} (9.447)	X_{11} (8.005)	X_{19} (7.048)	X_9 (6.410)	64.330
2022	河南	X_{22} (16.141)	X_8 (14.468)	X_{18} (8.188)	X_9 (7.857)	X_{19} (7.545)	X_{11} (7.404)	61.603
	山东	X_{22} (22.995)	X_8 (13.125)	X_{11} (8.675)	X_{18} (8.236)	X_{12} (7.532)	X_{19} (6.847)	67.409
	四川	X_{22} (20.686)	X_8 (13.558)	X_{11} (10.084)	X_{18} (8.516)	X_9 (7.786)	X_{19} (5.828)	66.457
	内蒙古	X_{22} (21.657)	X_8 (11.019)	X_{11} (7.539)	X_9 (7.359)	X_{19} (7.311)	X_{14} (5.922)	60.807
	整体	X_{22} (20.160)	X_8 (13.319)	X_{11} (8.567)	X_{18} (7.944)	X_9 (7.365)	X_{19} (6.808)	64.164

研究区各省份农业生态韧性准则层障碍度持续表现为农业科技投入水平(X_{22})与农业居民用电水平(X_8)主导的“双核心”制约格局。主要是因为本研究选择的 60 个地级市均属于粮食主产区,其在农业基础水利设施、土壤改良方面得到了一定的政策支持与资源投入,而农业科技投入相对不足则成为农业生态韧性提升的关键瓶颈。

4 结论

(1) 研究期内黄河流域农业生态韧性整体呈波动上升态势。核密度曲线分布中心右移,波峰由“窄而高”演变为“宽而低”,未出现极化特征。空间上呈“东高西低,北强南弱”的非均衡分布格局,并经历了“低韧均衡—梯度分化—高值集聚”的演化过程。

(2) 研究期内黄河流域粮食主产区农业生态韧性总体差异呈“N-W”型波动态势。河南、四川区域内差异趋于扩大,山东、内蒙古区域内差异趋于缩小。从区域间差异来看,山东—内蒙古之间韧性差异较大,四川—内蒙古之间韧性差异较小。区域间差异对总体差异的贡献度为76.81%,是空间差异的主要来源。

(3) 黄河流域60个地级市农业生态韧性在空间分布上呈现显著的空间集聚效应。H-H集聚区主要分布于河南、山东;L-L集聚区主要分布于四川、内蒙古;L-H和H-L集聚区则呈“点状+块状”零散分布。研究期内,4种局部空间自相关集聚类型分布范围及数量虽存在小幅波动,但整体空间关联格局相对稳定。

(4) 各准则层障碍度排序为:适应与重构能力>创新与发展能力>抵抗与驱动能力。其中,适应与重构能力障碍度呈倒“V”型发展态势,创新与发展能力障碍度逐渐降低,抵抗与驱动能力障碍度波动上升。农业科技投入水平、农村居民用电水平、农业碳吸收水平是阻碍黄河流域粮食主产区农业生态韧性提升的主要障碍因子。

5 建议

(1) 实施分区农业生态建设,推进农业生态韧性协调发展。应深入分析黄河流域各地区提韧的动力机制,找准切入点与发力点。高值韧性区应充分发挥资源禀赋优势,发展生态型高附加值农业;完善产业配套服务,延伸产业链。低值韧性区应完善基础设施建设,降低农业生产成本,增加农业科学技术支出,提高科技创新能力。

(2) 加强区域生态协同治理,平衡农业生态韧性地区差异。各地区应积极推动产业、技术、人才优势跨地区转移,建立区域农业生态联动机制,树立黄河流域“一盘棋”思想,强化高韧性区的辐射带动作用,而低韧性区应发挥其主观能动性,借鉴高韧性区生态农业管理模式,找寻适应自身发展的低碳农业与经济增长的平衡点,补齐区域发展短板。通过搭建农业生态大数据平台等举措,推动实现“优势互补、责任互担、利益共享”的流域生态治理新格局,逐步改善黄河流域农业生态韧性的地区差异。

(3) 建立低碳农业发展机制,严守农业生态韧性保护红线。①制定农业低碳补贴政策,激发农户低碳生产的积极性,不断调整优化农业结构。②加强对“三废”污染企业的监督管理,建立实施动态监测,严格限制农业污染物排放。③加大农业科技创新投

入,构建农业生态风险智能识别、监测、预警一体化平台。④制定权责分明的生态保护责任制,明确生态风险来源与责任主体。

参考文献(References)

- [1] 陈明华,岳海珺,郝云飞,等.黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J].数量经济技术经济研究,2021,38(9):25-44.
Chen Minghua, Yue Haijun, Hao Yunfei, et al. The spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River basin [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(9):25-44.
- [2] Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions [J]. Environmental Hazards, 2007, 7(4):383-398.
- [3] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks [J]. Journal of Economic Geography, 2012, 12(1):1-32.
- [4] Reggiani A. Network resilience for transport security: Some methodological considerations [J]. Transport Policy, 2013, 28:63-68.
- [5] 田光辉,苗长虹,胡志强,等.区域经济韧性研究进展:概念内涵、测度方法及影响因素[J].人文地理,2023,38(5):1-8.
Tian Guanghui, Miao Changhong, Hu Zhiqiang, et al. Research progress of regional economic resilience: Conceptualization, measurement methods and influencing factors [J]. Human Geography, 2023, 38(5):1-8.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4:1-23.
- [7] Alberti M, Marzluff J M, Shulenberg E, et al. Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for studying urban ecosystems [J]. Bioscience, 2003, 53(12):1169-1179.
- [8] Carl F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3):253-267.
- [9] Pickett S T A, McGrath B, Cadenasso M L, et al. Ecological resilience and resilient cities [J]. Building Research & Information, 2014, 42(2):143-157.
- [10] 李连刚,张平宇,谭俊涛,等.韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J].人文地理,2019,34(2):1-7.
Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience [J]. Human Geography, 2019, 34(2):1-7.
- [11] 于伟,张鹏.中国农业发展韧性时空分异特征及影响因素研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):

- 102-108.
- Yu Wei, Zhang Peng. Study on the spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of agricultural development resilience in China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(1):102-108.
- [12] Adger W N. Social and ecological resilience: Are they related? [J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3):347-364.
- [13] 郝爱民,谭家银.农村产业融合赋能农业韧性的机理及效应测度[J].*农业技术经济*,2023(7):88-107.
- Hao Aimin, Tan Jiayin. Empowering agricultural resilience by rural industrial integration: Influence mechanism and effect analysis [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2023(7):88-107.
- [14] 吕添贵,胡晗,付舒斐,等.长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J].*地域研究与开发*,2023,42(1):54-60.
- Lyu Tianguai, Hu Han, Fu Shufei, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River delta [J]. *Areal Research and Development*, 2023, 42(1):54-60.
- [15] 张明斗,任衍婷.环境规制对生态韧性的影响:基于“本地-邻地”效应的视角[J].*北京理工大学学报(社会科学版)*,2022,24(6):16-29.
- Zhang Mingdou, Ren Yanting. Impact of environmental regulation on ecological resilience: A perspective of “local-neighborhood” effect [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24(6):16-29.
- [16] 王少剑,崔子恬,林靖杰,等.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J].*地理学报*,2021,76(4):973-991.
- Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4):973-991.
- [17] 薛选登,范晓婕,谢清华.农业水资源生态韧性时空演化及多尺度障碍因子分析:以黄河流域9省区为例[J].*中国农业资源与区划*,2025,46(2):91-102.
- Xue Xuandeng, Fan Xiaojie, Xie Qinghua. Spatio-temporal evolution and multi-scale barrier factor analysis of ecological resilience of agricultural water resources: A case study of nine provinces in the Yellow River basin [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025, 46(2):91-102.
- [18] 郭向阳,明庆忠,杨春宇,等.喀斯特生态脆弱区旅游生态系统韧性时空变化及多尺度障碍因素:以贵州省为例[J].*经济地理*,2023,43(10):190-200.
- Guo Xiangyang, Ming Qingzhong, Yang Chunyu, et al. Spatiotemporal evolution of tourism ecosystem resilience in karst ecologically fragile areas and its multi-scale obstacle factors: A case study of Guizhou [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(10):190-200.
- [19] 郭海明,范勇.黄河流域数字经济、产业结构与生态环境耦合协调研究[J].*创新科技*,2024,24(10):48-60.
- Guo Haiming, Fan Yong. Study on the coupling and coordination of digital economy, industrial structure, and ecological environment in the Yellow River basin [J]. *Innovation Science and Technology*, 2024, 24(10):48-60.
- [20] 赵政楠,茹少峰,薛飞.黄河流域生态韧性的时空格局与分布动态演进:基于能值生态足迹模型的分析[J].*中国人口·资源与环境*,2024,34(8):136-147.
- Zhao Zhengnan, Ru Shaofeng, Xue Fei. Spatio-temporal pattern and dynamic evolution of ecological resilience in the Yellow River basin: Based on the analysis of emergy ecological footprint model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(8):136-147.
- [21] 孙聪,夏恩君,黄洁萍,等.数农融合发展对农业韧性的影响[J].*经济与管理研究*,2024,45(6):76-94.
- Sun Cong, Xia Enjun, Huang Jieping, et al. Impact of digital economy-agriculture integration on agricultural resilience [J]. *Research on Economics and Management*, 2024, 45(6):76-94.
- [22] 李志远,冯学钢,夏赞才,等.长江经济带旅游生态韧性与效率协同效应及空间特征分析[J].*旅游科学*,2024,38(3):1-23.
- Li Zhiyuan, Feng Xuegang, Xia Zancai, et al. Synergy effect and spatial characteristics analysis of tourism ecological resilience and efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. *Tourism Science*, 2024, 38(3):1-23.
- [23] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].*中国人口·资源与环境*,2011,21(8):80-86.
- Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8):80-86.
- [24] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].*自然资源学报*,2013,28(8):1298-1309.
- Tian Yun, Zhang Junbiao. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8):1298-1309.
- [25] 陈罗焯,薛领,雪燕.中国农业净碳汇时空演化特征分析[J].*自然资源学报*,2016,31(4):596-607.
- Chen Luoye, Xue Ling, Xue Yan. Spatial-temporal characteristics of China's agricultural net carbon sink [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4):596-607.