

DOI: 10.20103/j.stxb.202406151390

吕添贵, 陈安莹, 付舒斐, 赵巧, 梁慧. 农业绿色转型中国耕地系统韧性时空演化特征及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(6): 2891-2904.

Lü T G, Chen A Y, Fu S F, Zhao Q, Liang H. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing mechanism of resilience of China's cultivated land system under agricultural green transformation. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2891-2904.

农业绿色转型中国耕地系统韧性时空演化特征及其影响因素

吕添贵^{1,2}, 陈安莹^{1,*}, 付舒斐², 赵巧¹, 梁慧¹

1 江西财经大学财税与公共管理学院, 南昌 330013

2 江西财经大学应用经济学院(数字经济学院), 南昌 330013

摘要: 科学测度农业绿色转型背景下耕地系统韧性时空演化特征及其影响因素, 对保障区域耕地绿色生产的持续稳定提供参考。基于 2007—2022 年省域面板数据, 构建农业绿色转型下中国耕地系统韧性多指标评价体系, 采用熵值法和探索性空间数据分析揭示中国耕地系统韧性时空演化特征, 运用地理探测器解构耕地系统韧性区域差异的影响因素。结果表明: (1) 全国耕地系统韧性水平由 2007 年 0.2158 波动增加至 2022 年 0.5592, 年均增值 3.83%, 呈阶梯型增长; (2) 全国耕地系统韧性呈现出“西北部—东北部”双区放射空间形态, 其格局由分散发展到聚拢; (3) 轮作休耕规模和地均农药施用量等生态韧性结构对耕地系统韧性提升具有显著正向效应, 而绿色农业合作社规模、农用水泵建设水平对全国耕地系统韧性影响则相对较弱; (4) 轮作休耕规模与粮食单位面积产量共同作用对耕地系统韧性解释力最明显。

关键词: 农业绿色转型; 耕地系统韧性; 时空演化特征; 影响因素; 地理探测器

Spatial-temporal evolution characteristics and influencing mechanism of resilience of China's cultivated land system under agricultural green transformation

LÜ Tianguì^{1,2}, CHEN Anying^{1,*}, FU Shufei², ZHAO Qiao¹, LIANG Hui¹

1 School of Public Finance and Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

2 School of Applied Economics (School of Digital Economics), Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

Abstract: To scientifically measure the spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of cultivated land system resilience within the context of agricultural green transformation, providing insights to ensure the sustainable and stable green production of regional cultivated land. Utilizing provincial panel data from 2007 to 2022, this study developed a multi-index evaluation framework to assess the resilience of China's cultivated land system under the agricultural green transformation. The Entropy method and exploratory spatial data analysis were applied to elucidate the spatio-temporal evolution of China's cultivated land system's resilience, while geographic detectors were employed to dissect the factors influencing regional disparities in this resilience. The results are as follows: 1) The resilience level of the national cultivated land system increased from 0.2158 in 2007 to 0.5592 in 2022, marking an average annual increase of 3.83%, indicative of a progressive enhancement; 2) The resilience of the national cultivated land system presents a 'northwest-northeast' dual-zone radiation spatial pattern, and its pattern develops from dispersion to agglomeration; 3) Infrastructure elements like

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261049); 江西省自然科学基金项目(20232BAB203061); 江西省 2024 年度研究生创新专项资金项目(YC2024-S365)

收稿日期: 2024-06-15; 网络出版日期: 2024-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Chenanying2023@163.com

#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

agricultural water pumps and drainage machinery significantly enhance cultivated land resilience, whereas factors such as pesticide use and rural population density exert a minimal influence on national cultivated land resilience; 4) The combined effect of rotation fallow scale and grain yield per unit area has the strongest explanatory power for the resilience of cultivated land system.

Key Words: green transformation of agriculture; resilience of cultivated land system; characteristics of spatiotemporal evolution; influencing factor; geodetector

耕地系统韧性持续稳定是保障我国粮食安全和推动农业绿色转型的战略关键,对抵御耕地生态风险冲击和稳固农业经济发展具有重要作用^[1]。近年来,我国粮食产量连续保持 0.65 万亿 kg 以上,耕地综合生产能力稳步攀升,但多依靠增加农业化学要素换取农业经济增长的耕作方式,易引发耕地土壤养分失衡并破坏耕地系统功能稳定性^[2]。尤其是农作物生长面临气候异常、灾害频发等多重挑战,致使耕地系统难以适应旱涝胁迫、土壤退化与农作物多元种植压力,严重制约农业绿色生产的持续性^[3-4]。为此,中央政府出台农业绿色转型发展规划,通过耕地生态保护修复不断提升耕地子系统涵养功能,以应对提升耕地系统抗冲击能力的现实挑战^[5]。因此,从农业绿色转型理念科学揭示耕地系统韧性时空演化规律,对保障区域粮食稳产保供具有重要意义。

目前,国内外围绕耕地系统韧性研究开展了多项探索^[6]。在内涵方面,韧性理论从“乡村韧性”、“城市韧性”以及“经济韧性”拓展至“耕地系统韧性”等研究领域^[7-8],强调耕地系统面对冲击的恢复能力^[9-12]。在评价方面,指标体系构建尚未形成统一维度标准^[17-19],多引入共享社会经济路径、三维欧氏距离和耕地利用系统等,包括“抵抗—适应—重构”三维度以及“压力—状态—响应”维度解析^[20-21]。在测度方法方面,主要聚焦于熵值法、层次分析法、关键阈值法与泰尔指数法^[13-16]。在影响因素方面,侧重探究社会经济、农业生产方式等多重因素对耕地韧性的影响作用。在研究尺度方面,从市、县级中微层面进行了实证横向比较^[19-23],并从宏观层面对韧性理论补充深化^[24]。综上,上述研究为耕地系统韧性概念界定、评价测度、影响因素探究等提供良好理论参考。事实上,耕地作为自然-人工交互系统,蕴含生态、社会、经济和工程等多重维度^[25],在自然灾害、资源约束、气候变化等现实威胁下,其子系统协调稳定更是农业绿色转型的重要锚点^[26]。然而,现阶段研究较少关注农业绿色转型视角下的耕地系统韧性内部因子交互、空间分异和影响因素等,无法客观反映耕地系统韧性演变规律,难以响应耕地绿色持续利用安全需求^[27-28]。基于此,本文在科学界定耕地系统韧性内涵基础上,围绕农业绿色转型背景阐释耕地系统韧性动态关系基础上建立评价体系,以全国 30 个省域为研究对象,采用探索性空间数据分析方法揭示 2007—2022 年中国耕地系统韧性时空演化特征,采用地理探测器识别其驱动作用机理,以期为实现农业绿色转型引领下的耕地系统功能保护目标提供理论支撑。

1 耕地系统韧性理论分析框架

1.1 耕地系统韧性理论内涵界定

耕地系统韧性根植于社会生态学理论,包含类型、数量和质量多元要素动态视角^[29]。耕地系统既需应对经济社会发展、工程建设等压力,又需抵御旱涝等生态灾害侵袭。而农业绿色转型政策实施对耕地系统韧性提出新要求,突出耕地系统应具有的整体性、适应性、稳定性与灵活性来适应环境变化^[30]。相应地,耕地系统韧性理论核心强调在自然灾害、人类活动干扰范围内,耕地系统能有效自我调节适应外界干扰,并保持其结构与功能的相对稳定。然而,自然灾害或人类活动超出耕地系统承受阈值,将导致耕地质量下降,甚至引发生态系统崩溃。鉴于此,本文认为耕地系统韧性不仅涉及在受到干扰后维持其结构和功能稳定性的能力,还包含在农业绿色转型下适应新环境条件,确保耕地系统生态保障、社会稳定、经济供给和工程修复等综合映射能力。

1.2 农业绿色转型约束下耕地系统韧性理论分析

农业绿色转型作为传统农业生产方式的深刻变革,旨在实现农业生产与生态环境和谐共生^[31]。耕地系

统韧性应确保耕地系统在面对多重挑战时能够保持稳定的生产能力、持续改良和恢复能力,为农业绿色可持续转型提供坚实支撑^[32-33]。耕地韧性理论分析不仅涵盖从农药、化肥等生产资料的精准高效利用到生态环境保护策略,还涉及绿色农业生产方式顶层政策制度设计,共同构成多层次多要素耕地系统韧性分析框架,为实现农业绿色转型提供理论支撑。因此,耕地系统韧性被视为多维度动态交互的复杂网络,由生态韧性、经济韧性、社会韧性和工程韧性共同构成网络核心架构(图1)。

事实上,四大韧性结构并非孤立存在,而是通过相互作用和反馈循环,共同塑造耕地系统韧性。(1)生态韧性。作为耕地系统韧性的基石,关乎农药、化肥等生产要素对耕地健康与促进绿色发展的影响^[34]。增强生态韧性可激发并优化农业生产中人力、资本和技术投入的内在动力,促进耕地质量和粮食产能提升^[35]。(2)经济韧性。于外部投入加量化与集约化过程中逐步增强,这不仅体现在提升耕地生产效率,也包括对粮食供需平衡。(3)工程韧性。经济收益提升吸引更多人力、资本等资源投入农业领域,增强耕地基础设施的稳定性,进而提高工程韧性,改善生态系统健康状况,达成生态韧性稳定状态。(4)社会韧性。反映农户在耕地生产活动中对社会支持感知以及耕地变化的适应能力和响应状况。通过提升耕地系统社会韧性,能激励农户采取绿色耕种技术,提高耕地的生产力和适应性,推进生态韧性、经济韧性和工程韧性稳固循环,相互形成互惠共生的动态平衡和综合映射的作用机制。

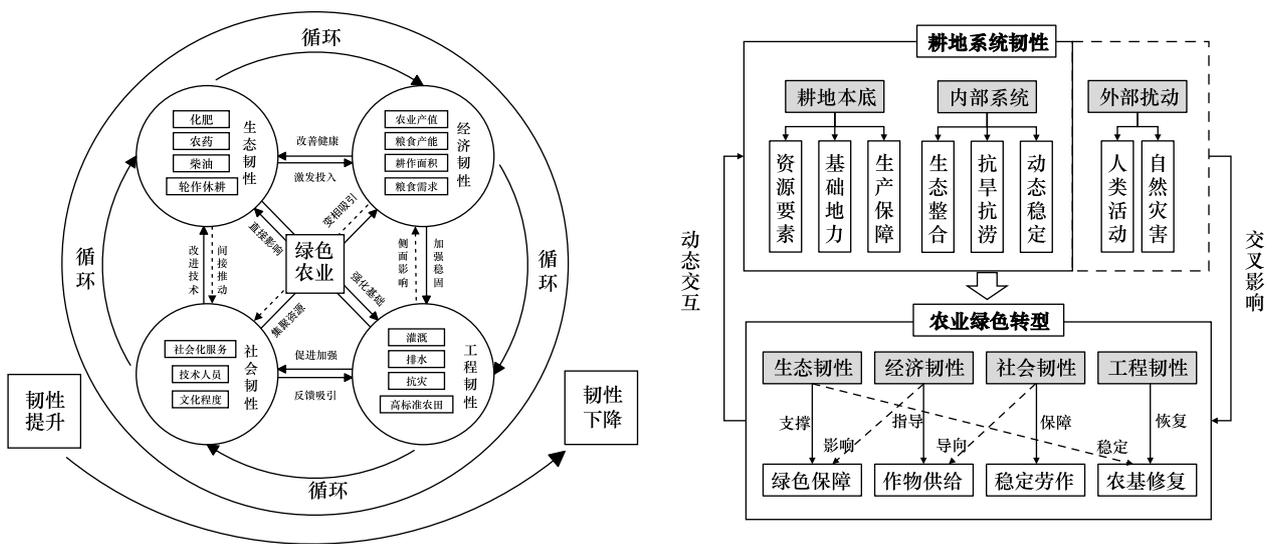


图1 耕地系统韧性“生态-经济-社会-工程”关系演化

Fig.1 Evolution of the wheel of the 'ecology-economy-society-engineering' relationship of cultivated land resilience

2 研究方法 与 指标体系

2.1 研究方法

2.1.1 熵值法

运用熵值法计算耕地系统韧性指标客观权重,并将生成权重与各指标标准化值相乘,量化耕地系统韧性指标的贡献程度^[36]。其中,对指标数据进行标准化处理减少主观赋权随机性,计算指标比重 Y_{ij} 与计算熵值 e_j ,再根据指标差异系数确定耕地系统韧性指标的权重 W_j 。计算公式为:

$$W_j = \frac{1 - \frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m \left[\frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^k P_{ij}} \times \ln \left(\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^k P_{ij} \right) \right]}{\sum_{j=1}^n \left\{ 1 - \frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m \left[\frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^k P_{ij}} \times \ln \left(\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^k P_{ij} \right) \right] \right\}} \quad (1)$$

式中, m 表示 2007—2022 年研究年份; k 表示样本数量; P_{ij} 表示第 i 年第 j 项指标的标准值; W_j 表示第 j 项指标的权重; n 表示指标总量。

2.1.2 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析 (ESDA) 是在地理空间邻域基础上对耕地系统韧性关联性与集聚性的可视化分析, 可通过全局空间自相关及局部空间自相关系数系统分析全国耕地系统韧性空间集聚特征^[37]。

(1) 全局空间自相关。探索耕地系统韧性的空间总体均衡情况, 用统计量全局莫兰指数表示。其公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, I 为全局莫兰指数; x_i, x_j 分别为区域 i 和区域 j 的耕地系统韧性指数; \bar{x} 表示耕地系统韧性指数平均值; n 表示所有样本总数; W_{ij} 是对应于区域 i 和区域 j 的空间权重矩阵权重值。

(2) 局部空间自相关。用于验证空间样本观测值的局部集聚情况, 采用局部莫兰指数表示, 使用 LISA 聚集分布表示耕地系统韧性的变动趋势的相似程度, 并对应到高-高 (HH)、高-低 (HL)、低-高 (LH) 与低-低 (LL) 四个象限, 代表四种集聚类型, 其表达式为:

$$I_i = \frac{(x_j - \bar{x}) \sum_j [W_{ij} (x_j - \bar{x})]}{\sum_j \frac{(x_j - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

式中 I_i 为局部莫兰指数; x_j 表示区域 j 的耕地系统韧性指数; \bar{x} 表示耕地系统韧性指数平均值; W_{ij} 是对应于区域 i 和区域 j 的空间权重矩阵权重值。

2.1.3 地理探测器

借助地理探测器可探究耕地系统韧性时空格局的成因^[38-39]。本文使用地理探测器探寻耕地系统韧性的影响因子, 采用自然断点法将各项要素指标分级, 得出各因素对耕地系统韧性的影响力 q 值, q 值计算公式为:

$$q = \frac{N\sigma^2 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (4)$$

式中, N_h 表示下一级区域样本数; n 表示整个研究区域样本数; L 表示下一级研究区域数; σ^2 代表整个研究区域耕地系统韧性平方差; σ_h^2 为下一等级研究区域耕地系统韧性方差。

2.2 指标体系

2.2.1 耕地系统韧性指标体系

基于农业绿色转型背景, 综合考量耕地利用特点, 将耕地系统韧性剖析为“生态、经济、社会、工程”四大结构, 构建涵盖耕地系统韧性内生机质的评价指标体系^[15,18,40], 较传统韧性评价体系更强调环境保护、生物多样性、农产品质量和食品安全等因素影响, 具体如下 (表 1)。

现阶段, 我国耕地生态风险主要体现在污染严重和质量低下等问题, 生产过程中过度依赖农药、化肥与柴油等外部补给, 而轮作休耕能够提高耕地地力水平, 对防风固沙、涵养水分及保护耕作层方面起到积极作用。

因此, 选择农用化肥、农药、柴油施用量与轮作休耕规模反映生态韧性; 经济过程体现在耕地产出以及农作物带来的经济价值, 可通过发展有机农产品、地理标志产品等途径提高农业附加值, 故采用土地生产率、第一产业增加值占地区生产总值比重、农业结构和粮食单位面积产量表示经济韧性; 社会韧性代表农户作为耕作主体能够妥善灵活应对耕地变化的意识。农业绿色转型影响下, 农户对绿色技术的接受程度同样影响着耕地的使用, 故选取农业技术人员储备、绿色农业合作社规模及农民受教育程度表示社会韧性; 工程韧性反映耕

地防旱防涝等抗灾害能力,取决于现代农业基础设施建设与高质量投入,故采用高标准农田规模、农用水泵建设水平、排涝动力机械建设水平与成灾比例表达工程韧性。

表 1 耕地系统韧性指标体系

Table 1 Cultivated land resilience index system

| 韧性类型 Resilience types | 指标 Index | 单位 Unit | 效应 Effect | 表征 Characterization | 权重 Weight |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|--------------|------------------------|--------------|
| 生态韧性 Ecological resilience | 地均农用化肥施用量(x1) | t/hm ² | - | 反映化肥对绿色耕作影响 | 0.0106 |
| | 地均农药施用量(x2) | t/hm ² | - | 反映农药对绿色耕作影响 | 0.0171 |
| | 地均农用塑料薄膜施用量(x3) | t/hm ² | - | 反映柴油对绿色耕作影响 | 0.0093 |
| 经济韧性 Economic resilience | 轮作休耕规模(x4) | % | + | 反映对绿色耕作影响 | 0.1975 |
| | 土地生产率(x5) | 亿万元/hm ² | + | 反映耕地经济价值 | 0.0692 |
| | 第一产业增加值占地区生产总值比重(x6) | % | + | 反映经济价值增加量 | 0.0369 |
| 社会韧性 Social resilience | 农业结构(x7) | % | + | 反映耕地种植结构 | 0.0235 |
| | 粮食单位面积产量(x8) | kg/hm ² | + | 反映耕地产出能力 | 0.0213 |
| | 农业技术人员储备(x9) | % | + | 反映耕作技术人员储备情况 | 0.0641 |
| 工程韧性 Engineering resilience | 绿色农业合作社规模(x10) | % | + | 反映绿色耕作社会化服务水平 | 0.1124 |
| | 农民受教育程度(x11) | % | - | 反映劳动力接受绿色耕作水平 | 0.0081 |
| 工程韧性 Engineering resilience | 高标准农田规模(x12) | % | + | 反映耕地高质量建设水平 | 0.0869 |
| | 农用水泵建设水平(x13) | 台/hm ² | + | 反映抗旱能力 | 0.1700 |
| | 排涝动力建设水平(x14) | 台/hm ² | + | 反映排涝能力 | 0.1659 |
| | 成灾比例(x5) | % | - | 反映抗灾害水平 | 0.0074 |

2.2.2 数据来源

本文采用 2007—2022 年间中国大陆 30 个省市自治区及以上城市面板数据,依照国家统计局区域划分标准将研究区域划分为东部地区、中部地区与西部地区。由于西藏数据缺失,暂不纳入研究范围。其中,原始数据取自《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国人口和就业统计年鉴》及各省域年度统计公报。行政区划数据来源于国家基础地理信息数据库。此外,针对轮作休耕与高标准农田规模等数据缺失的情况,中国部分地区存在早期探索实践,故采取插值法以及趋势外推法补全缺失数据。

3 中国耕地系统韧性时空分异特征

3.1 中国耕地系统韧性时空动态演进特征

3.1.1 中国耕地系统韧性时序分异特征

(1) 总体分析。2007—2022 年间全国区耕地系统韧性指数呈现阶梯型的波动上升趋势(图 2)。其中,2007—2017 年呈现小幅度稳健上升趋势,全国耕地系统韧性仍处于较低水平;2017—2022 年呈现急剧上升状态,整体大幅提升。由双阶梯变化趋势表明,研究期间耕地系统韧性基本格局已初步形成,耕地系统内部结构优化协调,加之最严格的耕地保护制度的贯彻实施,以及耕地质量保护与提升行动的推进,为保障粮食安全和支撑农业的绿色转型提供实践支撑。

(2) 局部分析。由结果可知,中部地区(0.3510)优于西部地区(0.3307)与东部地区(0.2882),区域韧性始终高于全国平均水平且差异较明显。2007—2017 年间三者差异不显著,自 2017 年后,东部地区增速放缓,中部地区升幅突出,而西部地区与全国演变趋势相近。其中,东部地区年均增量值为 3.45%,低于全国平均水平。究其原因,东部地区由于经济发展较为成熟,建设用地扩张导致耕地数量减少、耕作层被破坏,后备耕地资源相对不足。相对应的是,中部地区耕地系统韧性最优,年均增量值为 4.22%,省域间黑龙江、安徽与河南等地增幅居前。由此可见,我国耕地系统韧性水平仍存在明显的省际差异,应转变传统农业的发展模式,推动区域农业的绿色转型升级。

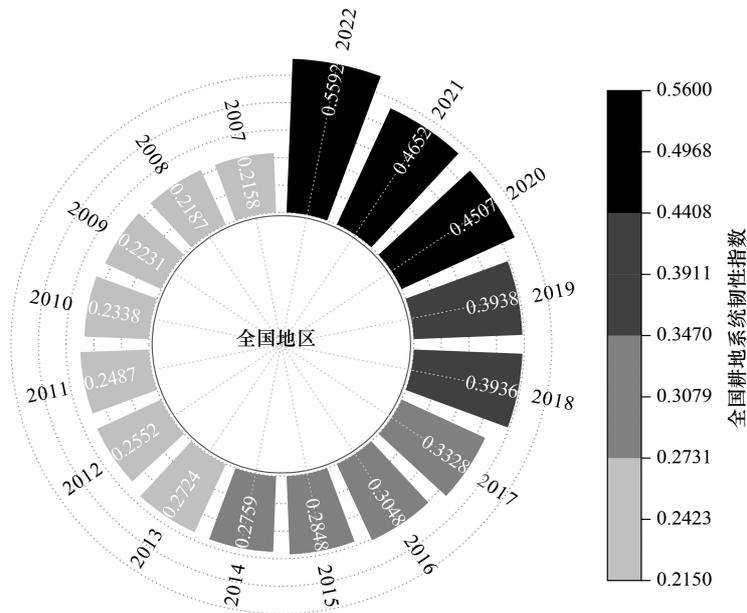
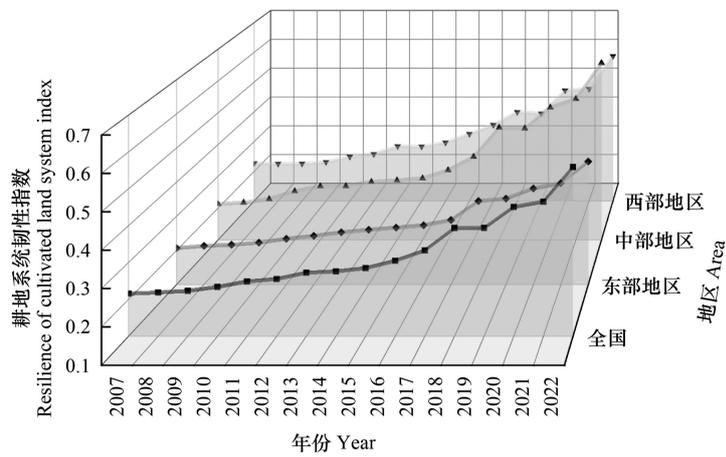


图2 全国各地区耕地系统韧性演变趋势图

Fig.2 Evolution trend map of cultivated land resilience in various regions of China

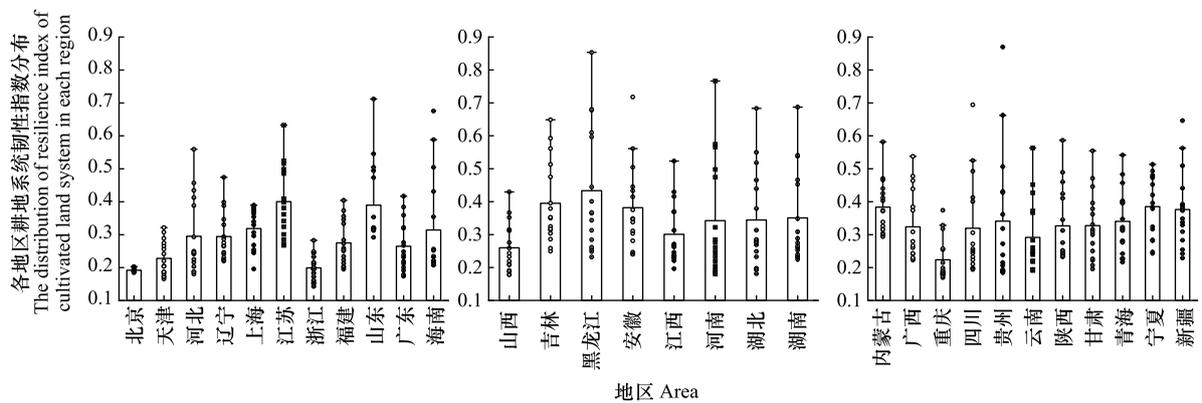


图3 各地区耕地系统韧性演变趋势图

Fig.3 Evolution trend map of cultivated land resilience in different regions

3.2.1 中国耕地系统韧性空间演进格局

根据 2007—2022 年全国各地区耕地系统韧性评价结果,采用自然断点法将耕地系统的韧性水平划分为五个等级:低韧性区、中低韧性区、中韧性区、中高韧性区和高韧性区,对耕地系统韧性水平进行空间演进格局分析。由图 4 可知,研究区域内部整体呈现出“西北部-东北部”双核心高韧性聚集区并向外辐射,而各地区耕地系统韧性空间存在显著差异。特别值得注意的是,东北头部效应虽有所减弱,但整体耕地系统韧性空间格局趋于稳定。究其原因,耕地高强度利用导致耕地基础地力呈下降态势,东北黑土地退化问题尤为突出。而在东部地区,尽管早期因建设用地扩张导致耕地数量质量下降,但得益于近年来生态整治修复的大力推进、面源污染和过度施肥的有效控制,以及保护性耕作技术广泛推广,耕地系统韧性水平得到了显著优化。此外,东部地区耕地地形平坦,水热条件优良,加之在区位、劳动力、资金和技术等方面优势,耕地系统韧性优化趋势显著。

总体而言,耕地系统韧性格局由分散发展到聚拢,目前已形成基本空间格局,中低韧性区、中韧性区与中高韧性区的数量结构逐渐趋于稳定,而低韧性区和高韧性区的变化相对显著。值得注意的是,仍存在部分地区长期处于低韧性状态,基础设施建设薄弱、抗风险能力低,迫切需要制定并系统实施完善的耕地系统韧性提升措施。同时,高韧性区未保持区域优势,维持良好的韧性水平。通过带头作用,高韧性区能够形成吸引技术、人才等资源溢出效应,进而带动周边区域提升耕地系统韧性,融入全国耕地系统韧性中。

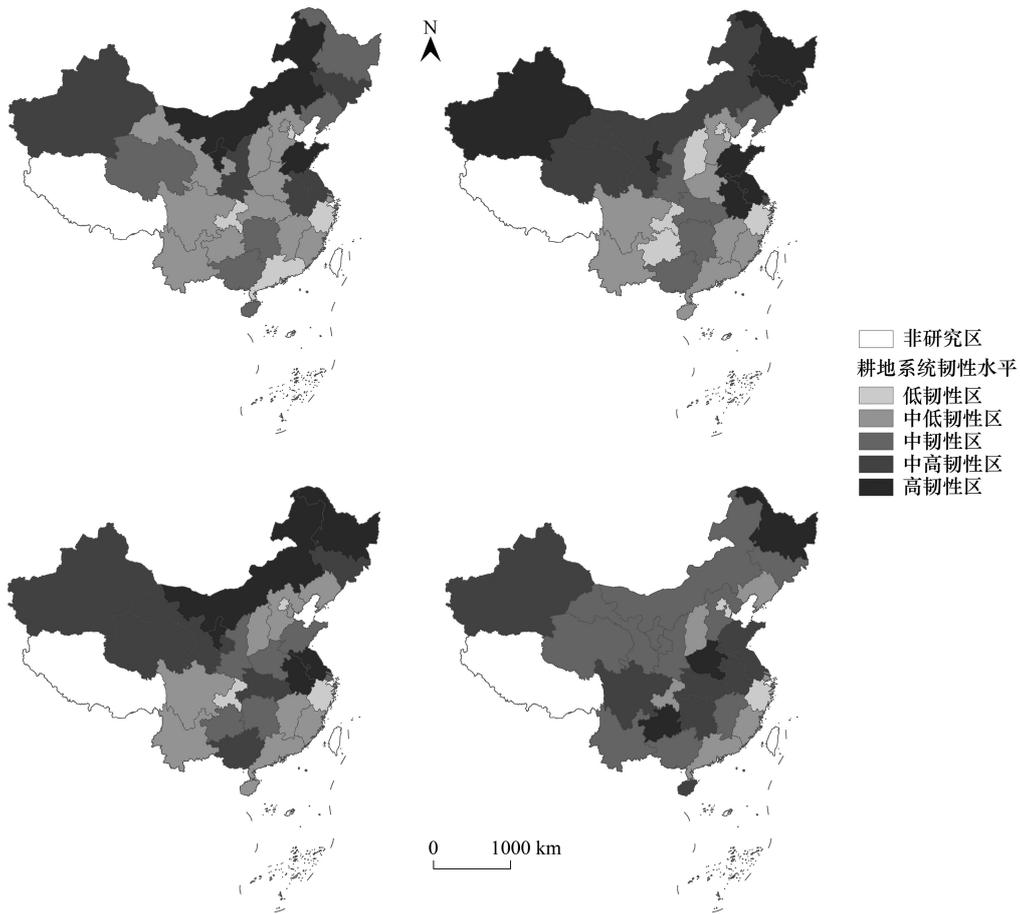


图 4 全国耕地系统韧性空间演进格局

Fig.4 Spatial evolution pattern of cultivated land resilience in China

3.2 中国耕地系统韧性空间关联格局

3.2.1 全局相关特征

借助 GeoDa 软件测算 2007—2022 年耕地系统韧性全局莫兰指数,结果显示全局莫兰指数数值呈“M”状

波动变化,且基本通过 1%或 5%的显著性检验。整体而言,指数波动较为显著,可分为“高尖峰”与“低宽峰”两个阶段。①高尖峰阶段:全局莫兰指数自 2009 年起开始上升,至 2012 年达到顶峰,随后迅速下降,形成明显的“高尖峰”。此段波动很大程度上可以归因于 2009 年完成的二次土地调查,提升了数据准确度,导致了耕地规模的增加与集中度的提升。从 2012—2016 年 0.3692 波动至 0.3394,表现为显著的正相关性且相关性稳定在此范围,表明耕地系统韧性均呈现稳定优化趋势。②低宽峰阶段:2018 年标志着“低宽峰”谷底,此后指数逐渐上升至 2021 年的 0.2663,但在 2022 年又略有下降形成“低宽峰”。由此表明,随着社会经济和城镇化建设快速发展,建设用地规模不断扩张,耕地被建设用地所占用^[35]。

3.2.2 局部相关特征

选取 2007 年、2012 年、2017 年和 2022 年作为典型年份,对全国耕地系统韧性状况进行局部自相关分析。由图 5 可知,耕地系统韧性空间集聚特征 2007 年至 2012 年全国耕地系统韧性空间相关程度较高,此后空间集聚逐渐淡化,空间相关较不明显。直至 2016 年、2017 年空间相关性有所回升后,空间相关程度再次降低,到 2021 年全国耕地系统韧性空间相关程度已十分微弱。同时,局部空间格局也经历了由东北部向西北部聚集的转变。

在空间集聚模式中,“H-H”集聚表现出较高稳定性,主要分布于研究区域内的内蒙古。与之相反,其他地区的集聚特征变化剧烈。2007 年内蒙古、黑龙江两区域高高聚集,形成耕地系统韧性“高台”,吸引青海、甘肃与新疆三地形成多区靠拢态势。然而,自 2017 年后高台现象逐渐消散。“L-L”聚集地区则主要集中于东部地区的福建、天津等地区。“H-L”集聚大多邻近“H-H”集聚区分布,包含河北、山东及湖南等省份。尽管某些高

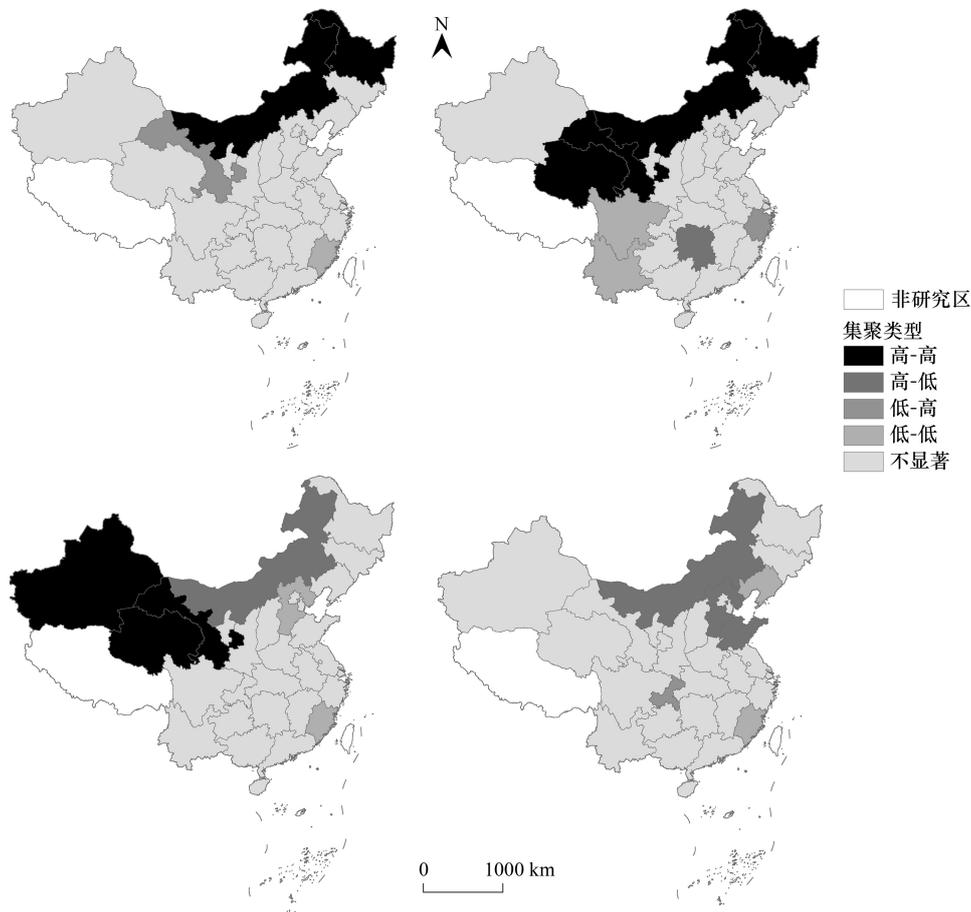


图 5 全国耕地系统韧性水平 LISA

Fig.5 National cultivated land resilience level LISA

韧性地区耕地系统韧性较为强劲,却未对周边地区产生预期辐射带动作用。总体来看,整体和局部各省耕地系统韧性普遍存在集聚现象,但近几年集聚现象减弱。为此,有必要加强工作区域相互合作,充分利用人口和基础设施的优势,以韧性高值区为示范,引领并促进邻近区域耕地系统韧性的提升。

4 中国耕地系统韧性影响因素

4.1 驱动因子影响力变化

运用因子影响力探测分析全国耕地系统韧性时空格局演化的成因,并细化为东部地区、中部地区及西部地区,对耕地系统韧性因子探测 2007 年、2022 年影响力结果的可视化,比较四维度 15 个驱动因子作用力大小,对全国耕地系统韧性影响因素进行对比分析(表 2)。

表 2 全国及三个地区耕地系统韧性因子探测结果

Table 2 Detection results of resilience factors of cultivated land system in China and three regions

| 因子 Factors | 全国 Whole nation | | 东部地区 East region | | 中部地区 Central region | | 西部地区 West region | |
|---------------|--------------------|--------|---------------------|--------|------------------------|--------|---------------------|--------|
| | 2007 | 2022 | 2007 | 2022 | 2007 | 2022 | 2007 | 2022 |
| | x1 | 0.2996 | 0.3453 | 0.7831 | 0.4534 | 0.2506 | 0.8066 | 0.3814 |
| x2 | 0.0934 | 0.2271 | 0.6190 | 0.7847 | 0.5548 | 0.5414 | 0.1647 | 0.1456 |
| x3 | 0.2007 | 0.2746 | 0.7776 | 0.7251 | 0.2534 | 0.1825 | 0.2290 | 0.0629 |
| x4 | 0.1403 | 0.5845 | 0.6570 | 0.4755 | 0.3165 | 0.9470 | 0.2687 | 0.3324 |
| x5 | 0.1417 | 0.5179 | 0.5768 | 0.5596 | 0.5197 | 0.7818 | 0.4990 | 0.5231 |
| x6 | 0.2776 | 0.4855 | 0.2880 | 0.5311 | 0.3300 | 0.5492 | 0.2477 | 0.2616 |
| x7 | 0.1650 | 0.1015 | 0.1814 | 0.6216 | 0.2971 | 0.1868 | 0.2818 | 0.2593 |
| x8 | 0.2021 | 0.1127 | 0.2236 | 0.5234 | 0.2251 | 0.1336 | 0.2271 | 0.2268 |
| x9 | 0.3639 | 0.1549 | 0.4316 | 0.3724 | 0.4255 | 0.5417 | 0.5552 | 0.6035 |
| x10 | 0.1328 | 0.0867 | 0.0449 | 0.3214 | 0.7248 | 0.4274 | 0.2464 | 0.2460 |
| x11 | 0.0317 | 0.1316 | 0.6513 | 0.2685 | 0.6462 | 0.4264 | 0.2348 | 0.7130 |
| x12 | 0.3436 | 0.1467 | 0.3732 | 0.0356 | 0.3073 | 0.3934 | 0.7216 | 0.0085 |
| x13 | 0.1493 | 0.0586 | 0.1914 | 0.3268 | 0.3211 | 0.0260 | 0.3042 | 0.1068 |
| x14 | 0.0335 | 0.2241 | 0.0322 | 0.5649 | 0.6212 | 0.0763 | 0.1204 | 0.6740 |
| x15 | 0.1750 | 0.1676 | 0.4086 | 0.2150 | 0.9192 | 0.6008 | 0.5160 | 0.2423 |

(1)从整体来看,中国耕地系统韧性的主要定量解释因子已从农业技术人员储备转变为轮作休耕规模,其作用力也显著增强,从 0.1403 提升至 0.5845。究其原因,轮作休耕有助于减少农药和化肥的使用,并通过种植绿肥等作物,提高耕地地力水平,实现用地养地相结合。①在生态韧性方面,轮作休耕规模成为影响耕地系统韧性关键因素之一。轮作休耕为耕地提供了休养生息的机会,有助于耕地系统生态的自然恢复,增强了耕地对环境变化的适应能力,确保长期的粮食安全;②在经济韧性方面,土地生产率成为衡量耕地系统韧性的关键指标。土地生产率能够直接体现耕地转换自然资源为经济产出的能力,高效的土地生产通常与资源的合理利用有关,不仅有助于吸引农业技术革新和基础设施建设的投资,还能深挖土地的生产潜力,从而有效提升经济韧性;③在社会韧性方面,农业技术人员储备影响力远胜于绿色农业合作社规模和农民受教育程度。农业技术人员凭借其先进的农业知识和技能,能够引导和推广绿色新技术,以应对气候变化、土壤退化和病虫害等挑战,增强农业系统的可持续性;④在工程韧性方面,排涝动力建设水平持续占据领先地位。农业基础设施的构建与优化直接影响着耕地的利用效率和抵抗自然灾害的能力。及时排除田间积水,减少洪水和内涝对作物的损害,从而确保农业生产的稳定与安全。

(2)从局部来看,对各地区影响力最大的因子类型多为生态韧性维度。①东部地区定量解释力最大的是地均农药施用量。江苏、浙江与福建等地经济发达,由于农业生产水平较高,农作物种植种类繁多且复种指数

高,因此使用农药成为保障农作物产量和品质的必要手段。然而,过量使用农药可能会对土壤和环境造成污染,长期施用过量农药还可能导致土壤退化、生物多样性下降等问题,降低耕地的生态韧性。因此,农药施用量对东部地区耕地系统韧性影响力需要通过综合分析来评估;②中部地区耕地系统韧性的首要影响因素是轮作休耕规模。以湖南典型重金属污染区域为例,轮作休耕集成推广“生物移除”重金属模式,有效减轻耕地开发利用强度。此措施鼓励农户调整种植结构、选择富集能力强的作物以移除土壤中的重金属,从而改善土壤健康状况。轮作休耕不仅是绿色发展理念的贯彻,而且是用地与养地有机结合的全新尝试;③西部地区最高影响力因素从高标准农田规模转变为农民受教育程度。这归功于国家近年来采取“两免一补”政策、远程教育工程有效措施大力发展西部地区的农村教育。在农业绿色转型影响下,新疆、宁夏等地区的农民受教育程度的提升将直接促进农业生产的现代化和农村经济的转型,更好地适应市场需求,调整种植结构,提高农产品的附加值和市场竞争能力,使得农民受教育程度重要性逐渐凸显。

4.2 双因子交互作用探测

(1)从整体来看,依据双因子交互探测结果(图6), q 值大于0.8交互类型有13种,其中解释效力最强的类型由高标准农田规模 \cap 农用水泵建设水平($q=0.8333$)变为轮作休耕规模 \cap 粮食单位面积产量($q=0.8929$)。结果表明,轮作休耕对于调整农业种植结构、优化作物布局、提升农业系统的多样性和稳定性起到积极作用,从而增强耕地对气候变化和市场风险的适应能力。此外,粮食单位面积产量反映耕地的生产效率

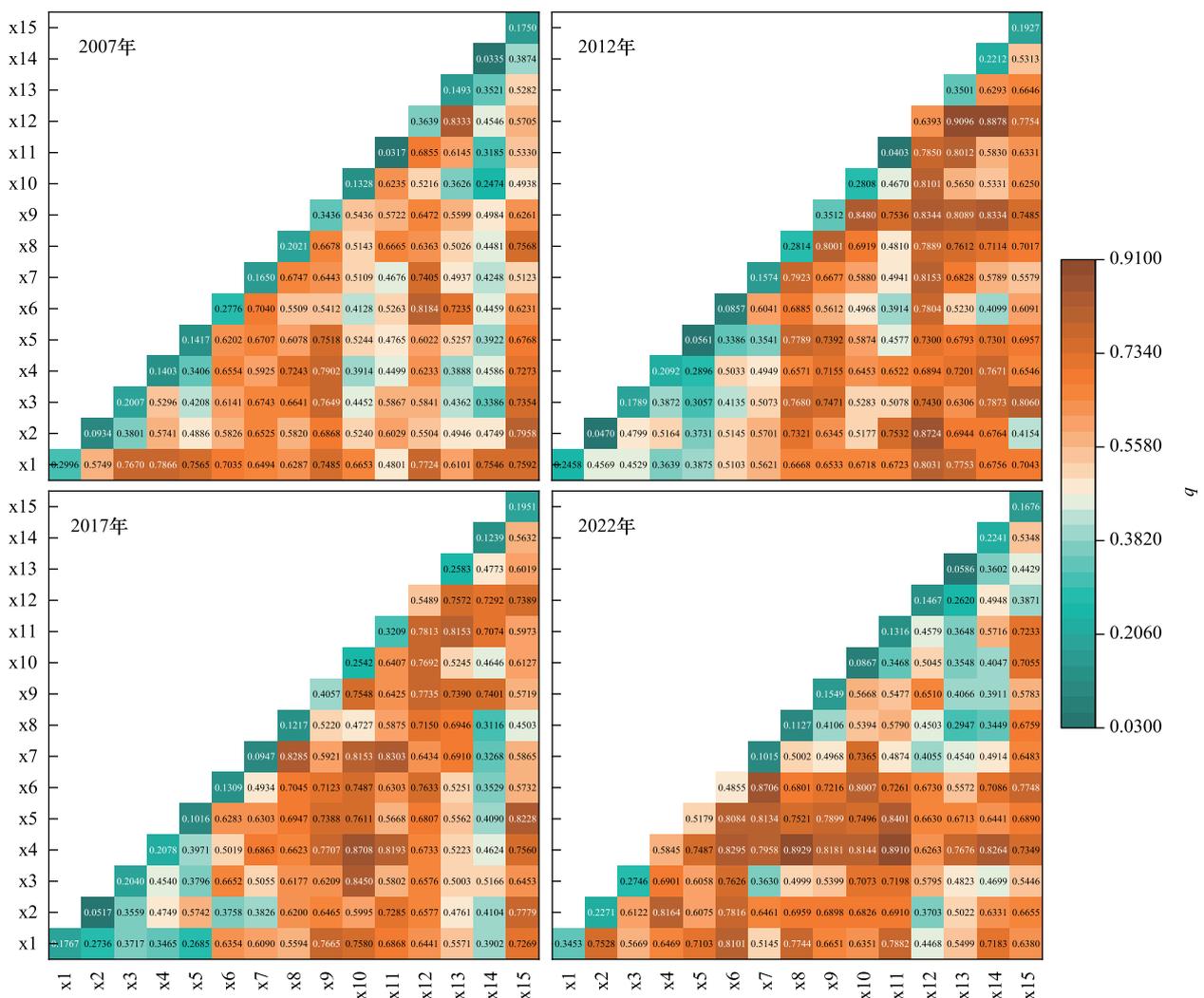


图6 全国耕地系统韧性驱动因子交互作用

Fig.6 Interaction of driving factors of cultivated land resilience across the country

和土地利用的集约化程度,通过改进种植技术、选用高产品种、合理施肥和灌溉可以提高粮食单位面积产量。因此,轮作休耕规模的扩大与粮食单位面积产量的提升相辅相成。一方面,轮作休耕有助于提高土壤肥力和耕地地力,为提高单位面积产量奠定基础;另一方面,科技进步和种植管理优化可提高单位面积产量。总体而言,轮作休耕规模与粮食单位面积产量共同作用下,能显著提升影响耕地系统韧性解释力。

(2)从局部来看,生态韧性作为耕地系统韧性的主要组成部分,通过测算生态维度各因子与其他因子相互交叉作用力大小可知,2007年至2017年逐步下降,在2022年有所回升,达到0.6436,与耕地系统韧性变化趋势基本一致。结果表明,耕地系统韧性中生态韧性维度重要程度愈发凸显。交互解释力最强的影响因素依次为轮作休耕规模、地均农用化肥施用量、地均农药施用量、地均农用塑料薄膜施用量。其中,地均农用化肥施用量作用力是生产要素投入重要程度最高的因子。生态韧性的提升对增强耕地对气候变化和市场风险的适应能力至关重要,同时也是实现农业绿色转型的关键因素之一。

4.3 耕地系统韧性优化路径

4.3.1 升级预警基础设施,强化低韧性区保护

尽管耕地系统韧性的格局虽已初步形成,仍持续存在耕地系统韧性水平相对较低的状态。一是提升区域耕地韧性预警。在山东、江苏等干旱洪涝自然灾害频发区域,此类区域基础设施建设相对薄弱,面对风险的抵御能力较低,亟需制定实施针对性措施以提升耕地系统韧性。由于自然条件限制,耕地恢复能力相对较弱,监测到耕地质量问题或耕地系统韧性出现波动,相关部门采取有效措施干预介入,以减轻潜在风险的影响。二是增强区域基础设施应对能力。河南、安徽等降水分布不均地区则应关注农用水泵建设水平、排涝动力建设水平等高影响因素变化状况。农业基础设施在农业生产中起着关键作用,其运行状态直接影响到农田灌溉和排涝效果。同时,推进高标准农田建设,完善升级基础设施,确保预警系统能够及时监测和预测耕地质量问题和韧性波动,以应对洪涝和干旱等突发自然灾害。

4.3.2 激活辐射带动作用,因地制宜优化农业结构

内蒙古和黑龙江地区在早期耕地系统韧性发展中虽然吸引周边区域的聚集,但未能持续保持聚集效应以带动更广泛的区域发展。因此,在保证主粮安全前提下,一是激活高韧性区辐射带动作用,充分考虑农作物的需水量和市场效益,实现农业优化结构,以达到耕地系统韧性的最优状态以及区域综合效益的最大化^[41]。二是促进区域间相互合作,有效发挥资源、人口、基础设施效益,引领效率高值区示范带动邻近区域耕地系统韧性提升。在新疆、甘肃等生态脆弱地区适当减少种植高耗水作物,扩大耐旱作物比例。内蒙古、宁夏等土壤贫瘠地区推广绿肥种植,提升土壤肥力。东部地区应立足区位优势,合理调整农业结构,发展有竞争力的劳动密集型、附加值高的外向型农业。

4.3.3 增加绿色科技投入,引导耕作生产投入绿色化

在推动农业绿色化转型进程中,生态韧性重要性日益凸显,在耕地系统中体现为地均农用化肥施用量、地均农药施用量和地均农用塑料薄膜施用量等指标,成为衡量耕作可持续性的关键因素。一方面,面对生产投入边际效益的下降,推进化肥和农药的减量增效与推广高效施用技术已成为绿色生产的关键措施。其中,江苏、浙江等东部地区农业生产的压力相对较大,对农药的依赖性可能相对较强,需要转向更加环保、可持续的农业生产模式,兼顾经济效益、社会效益和生态效益。另一方面,加大对种子改良、农业机械等科技投入,扩大农业技术人员储备,加强农业科技创新和推广,鼓励农户掌握新型绿色农业技术和管理方法。同时,鼓励农民采取生态友好耕作方式,如有机农业、精准农业等,降低农户采用生态友好耕作方式的成本,化解中国农业劳动力短缺问题。

4.3.4 倡导轮作休耕理念,巩固农户生态农耕观念

轮作休耕规模作为中国耕地系统韧性定量解释力最大因子,是有效的农业管理措施。一方面,农业绿色转型不仅表现为技术手段和基础设备的变化,也体现为农户对人与自然、农业生产与生态环境关系的观念转变。黑龙江作为高韧性区,所面临的最主要问题是黑土地质量退化。轮作休耕可发挥大豆根瘤固氮、养地培

肥的作用,实现种地养地结合,有效增加土壤有机质含量,推动农业可持续发展。另一方面,巩固农户绿色生产思维,轮作休耕是顺应自然、接近天然的保护性生产方式,实行季节性休耕,减少农事活动,在防风固沙、涵养水分及保护耕作层等积极作用。同时,实施合理的农药使用管理措施,提高农药减量化效率,实现农业的可持续发展和生态环境的改善。

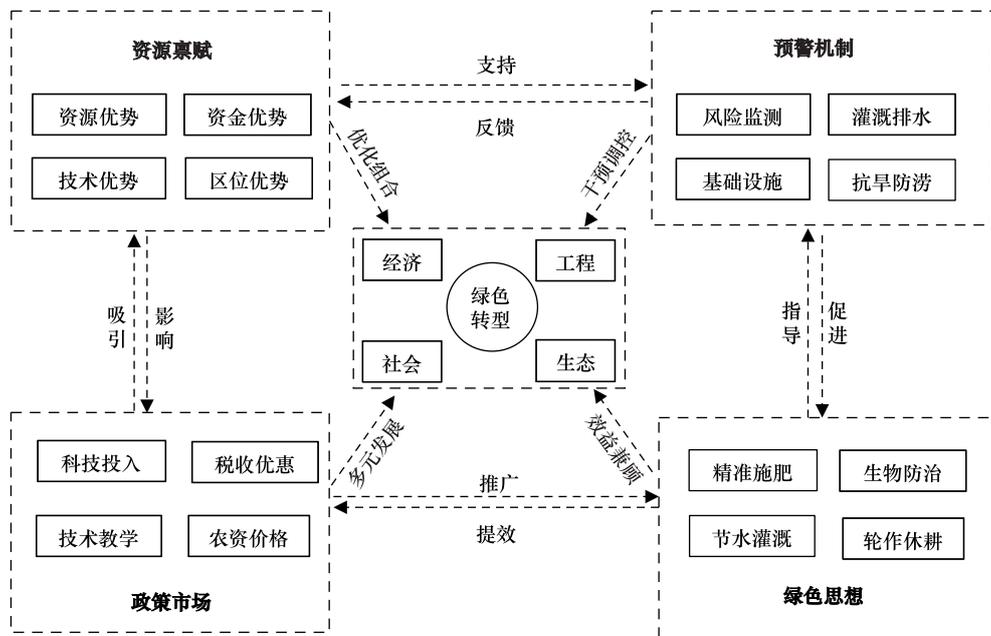


图7 耕地系统韧性提升路径

Fig.7 The improvement path of cultivated land resilience

5 结论与讨论

5.1 结论

(1)耕地系统韧性均值由2007年0.2158波动增加至2022年0.5592,年均增值3.83%,呈阶梯形上升。局部区域韧性差异较明显,东部地区与西部地区年均增值为3.45%与3.31%,低于全国水平,中部地区呈现波动上升趋势,年均增量值为4.22%。

(2)耕地系统韧性呈现出“西北部—东北部”双区放射的空间特征,耕地系统韧性格局由分散发展到聚拢,两区头部效应逐渐减弱,整体耕地系统韧性空间格局更稳定,已初步形成基本空间分布格局。

(3)轮作休耕规模、地均农药施用量等生态韧性结构对耕地系统韧性提升具有显著影响,绿色农业合作社规模、农用水泵建设水平对全国耕地系统韧性影响较弱。轮作休耕规模与粮食单位面积产量是交互作用中最显著的双因子。

(4)未来应持续推广绿色生产技术、因地制宜探索耕地系统韧性稳定道路,提高耕地系统对环境变化的适应性和恢复力,以保障营养导向的粮食安全和农业可持续发展。

5.2 讨论

事实上,农业绿色转型的提出为保护耕地生态与保障粮食安全构筑了新战略框架与实践路径,而韧性理论为科学认知农业绿色转型提供科学依据。本文通过揭示绿色技术持续革新正逐步优化耕地生产环境,显著提升耕地生产能力,有效降低外界不利因素的干扰,提升耕地系统韧性和达到可持续生产的正向循环体系循环。此研究结论与已有研究采用熵权法与基尼系数研究耕地系统韧性水平^[20],以及在使用表象韧性与潜在韧性角度研究曲周县耕地利用系统韧性的结果相似^[27]。值得关注的是,近年来耕地系统韧性水平相较于于其

他研究成果呈现出更高态势,尤其是在部分地区耕地韧性增长显著,但整体变化趋势保持相似轨迹。本研究视角基于农业绿色转型视角,由生态韧性为延伸分析耕地系统整体韧性,尤其是部分地区作为轮作休耕试点,受绿色转型影响较明显,耕地系统韧性对绿色发展变化较敏感显著。

本研究主要聚焦社会经济数据,探讨耕地系统韧性时空演变特征及驱动因素研究。但如何深入分析自然资源因素、耕地禀赋状态与耕地系统韧性之间关系,以及如何致力于将分析维度细化至市、县级层面,完善耕地土壤质量数据,探究耕地本底质量,使得研究结果更加具有针对性等有待深入研究。

参考文献(References):

- [1] 宁吉喆. 中国式现代化的方向路径和重点任务. 管理世界, 2023, 39(3): 1-19.
- [2] Ke X L, Chen J, Zuo C C, Wang X Q. The cropland intensive utilisation transition in China: An induced factor substitution perspective. *Land Use Policy*, 2024, 141: 107128.
- [3] 朱莉芬, 黄季焜. 城镇化对耕地影响的研究. *经济研究*, 2007, 42(2): 137-145.
- [4] Lv T G, Fu S F, Zhang X M, Wu G D, Hu H, Tian J F. Assessing cultivated land-use transition in the major grain-producing areas of China based on an integrated framework. *Land*, 2022, 11(10): 1622.
- [5] 孔祥斌. 中国耕地保护生态治理内涵及实现路径. *中国土地科学*, 2020, 34(12): 1-10.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [7] Stuart-Haëntjens E, De Boeck H J, Lemoine N P, Mänd P, Kröel-Dulay G, Schmidt I K, Jentsch A, Stampfli A, Anderegg W R L, Bahn M, Kreyling J, Wohlgenuth T, Lloret F, Classen A T, Gough C M, Smith M D. Mean annual precipitation predicts primary production resistance and resilience to extreme drought. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 360-366.
- [8] Greene C, Wilmer H, Ferguson D B, Crimmins M A, McClaran M P. Using scale and human agency to frame ranchers' discussions about socio-ecological change and resilience. *Journal of Rural Studies*, 2022, 96: 217-226.
- [9] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(8): 151-158.
- [10] Skerratt S. Enhancing the analysis of rural community resilience: Evidence from community land ownership. *Journal of Rural Studies*, 2013, 31: 36-46.
- [11] 胡俊辉, 刘丹凤, 任利剑, 运迎霞. 国外韧性城市形态研究述评. *生态学报*, 2024, 44(10): 4423-4436.
- [12] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 关皓明. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展. *人文地理*, 2019, 34(2): 1-7, 151.
- [13] 李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰, 杜国明. 多重压力胁迫下东北黑土区耕地韧性研究及其启示——以黑龙江省拜泉县为例. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 71-79.
- [14] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价. *城市问题*, 2018(10): 27-36.
- [15] 祝锦霞, 潘艺, 张艳彬, 邱乐丰, 徐保根, 兰德举. 种植类型变化对耕地系统韧性影响的关键阈值研究. *中国土地科学*, 2022, 36(4): 49-58.
- [16] 耿艺伟, 李效顺, 陈姜全, 刘希朝, 张金鑫, 成菊美. 中国国土空间韧性与效率的耦合关系及跃迁机制. *生态学报*, 2024, 44(14): 6003-6019.
- [17] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 韩博, 任婕, 周寅康. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间. *地理学报*, 2022, 77(3): 697-713.
- [18] 刘婉莹, 宋戈, 高佳, 隋虹均, 王全喜. 下辽河平原典型地域耕地系统弹性时空分异特征. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 252-260.
- [19] 王文琴, 范业婷, 孙建平, 张沪荣. 基于 DEA 模型的安徽省城市韧性与土地利用效率的耦合协调性研究. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 41(5): 9-17.
- [20] 周小平, 梁颖, 李小天, 柴铎. 耕地系统健康的时空演变及其驱动因素研究——以长江中下游地区为例 [J]. *自然资源学报*, 2024, 39(5): 1174-1192.
- [21] 苗欣然, 李泽红, 王梦媛. 粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变——以齐齐哈尔市为例. *资源科学*, 2023, 45(9): 1801-1816.
- [22] 温良友, 张青璞, 孔祥斌, 张蚌蚌, 郎文聚, 孙晓兵, 刘凤建. 基于产能与健康综合评价的北京大兴区耕地整治分区. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 79-89.
- [23] 陈文广, 孔祥斌, 温良友, 朱红梅, 张蚌蚌. 基于需求-功能-维度的耕地健康评价指标体系构建与应用. *中国农业大学学报*, 2021, 26(5): 106-117.
- [24] 赵华甫, 屈雪冰, 冯新伟, 吴克宁, 黄勤. 耕地的弹性变形理论及实证研究. *地域研究与开发*, 2012, 31(2): 73-77.
- [25] 韩杨. 中国耕地保护利用政策演进、愿景目标与实现路径. *管理世界*, 2022, 38(11): 121-131.

- [26] 刘玉, 郝星耀, 潘瑜春, 唐秀美. 河南省耕地集约利用时空分异及分区研究. 地理科学, 2014, 34(10): 1218-1225.
- [27] 孟丽君, 黄灿, 陈鑫, 江丽, 张国梁, 郝晋珉, 安萍莉. 曲周县耕地利用系统韧性评价. 资源科学, 2019, 41(10): 1949-1958.
- [28] 辛良杰. 粮食安全概念、评价体系与地理学优先研究主题. 地理科学, 2024, 44(3): 451-462.
- [29] 吴宇哲, 钱恬楠, 郭珍. 休养生息制度背景下耕地保护生态补偿机制研究. 郑州大学学报: 哲学社会科学版, 2020, 53(3): 27-31, 127.
- [30] 柯新利, 邓洁, 宋钰. 长江经济带耕地利用绿色转型与城乡融合耦合协调发展的时空格局研究. 生态学报, 2024, 44(13): 5773-5785.
- [31] 于法稳. 新时代农业绿色发展动因、核心及对策研究. 中国农村经济, 2018(5): 19-34.
- [32] 刘彦随, 乔陆印. 中国新型城镇化背景下耕地保护制度与政策创新. 经济地理, 2014, 34(4): 1-6.
- [33] 付舒斐, 朱丽萌, 吕添贵, 汪立. 乡村数字化转型对耕地绿色利用效率的影响机制及门槛效应研究. 中国土地科学, 2024, 38(4): 90-100, 112.
- [34] 纪凯婷, 张乐勤, 王雷. 安徽省乡村绿色发展水平测度及时空演变分析. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2023, 41(2): 33-40.
- [35] Lü T G, Hu H, Han H Y, Zhang X M, Fan H B, Yan K G. Towards sustainability: The spatiotemporal patterns and influence mechanism of urban sprawl intensity in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Habitat International*, 2024, 148: 103089.
- [36] 崔家兴, 靳涵, 罗滢渊, 林勇, 童新, 朱媛媛. 县域耕地非农化、非粮化与乡村人口空心化的耦合协调关系——以长江经济带为例. 生态学报, 2024, 44(5): 1822-1836.
- [37] 吕添贵, 付舒斐, 胡晗, 汪立, 耿灿. 农业绿色转型约束下耕地绿色利用效率动态演进及其收敛特征研究——以长江中游粮食主产区为例. 中国土地科学, 2023, 37(4): 107-118.
- [38] 和佳慧, 吴映梅, 余丽娇, 焦敏, 郭怡. 西部地区乡村韧性的时空演变及驱动因子探测. 地域研究与开发, 2023, 42(1): 144-148, 160.
- [39] 马海涛, 张雪莹, 梁源钊, 刘蕴桐. 东北地区黑土保护与区域发展综合评价及耦合协调研究. 地理科学, 2023, 43(12): 2183-2195.
- [40] 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. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 102-108.
- [41] Wang L Y, Anna H, Zhang L Y, Xiao Y, Wang Y Q, Xiao Y, Liu J G, Ouyang Z Y. Spatial and temporal changes of arable land driven by urbanization and ecological restoration in China. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(5): 809-819.