京津冀耕地生态安全时空演变及影响因素

侯孟阳[1,2], 白 金[1], 卢玮楠[3]

(1.河北大学 经济学院, 河北 保定 071000; 2.河北大学 资源利用与环境保护研究中心, 河北 保定 071000; 3.农业农村部农村经济研究中心, 北京 100810)

摘 要: [目的]科学评估京津冀地区耕地生态安全时空演变及驱动因子,为提升相关部门对耕地生态的保护意识以及加快构建农业高质量发展格局提供科学依据。[方法]基于PSR(压力-状态-响应)模型构建耕地生态安全评价指标体系,综合运用熵权法、Kernel密度估计法和Dagum基尼系数及其分解法探讨京津冀地区2011—2023年的耕地生态安全发展水平、动态演进特征及区域差异来源,最后通过GTWR模型分析耕地生态安全影响因素的时空异质性。[结果]①京津冀耕地生态安全水平整体呈波动提升态势,并呈现"北部高,东部低"的分布格局,其中,北部地区张家口、承德均值最高,东部地区增幅最为显著,达4.04%。从子系统来看,压力子系统缓慢上升,状态与响应子系统均波动下降;②京津冀各城市间绝对差异逐步缩小,北部-东部地区差异显著,其次为中南部-北部和中南部-东部。京津冀耕地生态安全总体区域差异略有缩小,区域内差异程度表现为:北部>东部>中南部,差异主要源于区域间差异净值;③京津冀耕地生态安全影响因素存在显著空间异质性,作物种植结构、财政支农水平、农业科研活动经费起正向驱动作用,日照时数与降水量等自然要素呈双向作用,人均GDP则主要起抑制作用。[结论]京津冀耕地生态安全波动提升,北部高,东部低,区域差异缩小且主因是区域间差异,影响因素时空异质性显著。

关键词: 耕地生态安全; Kernel密度估计; Dagum基尼系数; 时空地理加权模型GTWR; 京津冀地区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0417-14 **中图分类号:** F321.1

文献参数: 侯孟阳, 白金, 卢玮楠.京津冀耕地生态安全时空演变及影响因素[J].水土保持通报,2026,46(5):417-430. Hou Mengyang, Bai Jin, Lu Weinan. Spatiotemporal evolution and influencing factors of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):417-430.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.002 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.002**

Spatiotemporal evolution and influencing factors of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region

Hou Mengyang[1,2], Bai Jin[1], Lu Weinan[3]

(1.*School of Economics*, *Hebei University*, *Baoding*, *Hebei* 071000, *China*; 2.*Research Center for Resources Utilization and Environmental Conservation*, *Hebei University*, *Baoding*, *Hebei* 071000, *China*; 3.*Research Center for Rural Economy*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100810, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution and influencing factors of cultivated land ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region were scientifically evaluated in order to enhance the awareness of relevant departments on cultivated land ecological protection, and to provide a scientific basis for accelerating the establishment of a high-quality agricultural development pattern. [Methods] Based on the pressure-state-response (PSR) model, this study constructed an evaluation index system for cultivated land ecological security. It comprehensively adopted the entropy weight method, kernel density estimation, and Dagum Gini coefficient and its decomposition method to explore the development level, dynamic evolution characteristics, and sources of regional differences in cultivated land ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023. Finally, the geographically and temporally weighted regression (GTWR) model was used to analyze the

收稿日期:2025-10-16 **修回日期:**2026-03-27 **采用日期:**2026-03-27

资助项目:河北省高等学校人文社会科学青年项目"河北省耕地生态安全的综合评估及其异质性驱动因子"(SQ2024097)

第一作者:侯孟阳(1988—),男(汉族),河北省邢台市人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事资源经济与环境管理、农业经济与可持续发展等方面的研究。Email:houmengyang@outlook.com。

通信作者:卢玮楠(1991—),男(汉族),陕西省西安市人,博士,主要从事农业经济与可持续发展研究。Email:luweinan@nwsuaf.edu.cn。

spatiotemporal heterogeneity of factors influencing cultivated land ecological security. [Results] ① The overall cultivated land ecological security level in the Beijing-Tianjin-Hebei region showed a fluctuating upward trend, presenting a spatial distribution pattern of "high in the north and low in the east". Among them, Zhangjiakou and Chengde in the northern region had the highest average values, and the eastern region showed the most significant increase, reaching 4.04%. From the perspective of subsystems, the pressure subsystem rose slowly, while both the state and response subsystems declined in a fluctuating manner. ② The absolute differences among cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region gradually narrowed. The disparity between the northern and eastern regions was the most prominent, followed by that between the south-central and northern regions, and that between the south-central and eastern regions. The overall regional disparity in cultivated land ecological security across the Beijing-Tianjin-Hebei region decreased slightly; the intra-regional disparities were ranked in the following order: northern > eastern > south-central, and the overall differences were mainly attributable to the net value of inter-regional disparities. ③ There was significant spatial heterogeneity in the influencing factors of cultivated land ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Crop planting structure, financial support for agriculture, and funds for agricultural scientific research exerted positive driving effects; natural factors such as sunshine duration and precipitation showed bidirectional effects, while per capita GDP mainly played an inhibitory role. [Conclusion] The cultivated land ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region shows a fluctuating upward trend with a high-in-the-north and low-in-the-east spatial pattern. Regional disparities have narrowed, mainly attributed to inter-regional differences, and the influencing factors exhibit significant spatiotemporal heterogeneity.

Keywords: cultivated land ecological security; Kernel density estimation; Dagum Gini coefficient; geographically and temporally weighted regression (GTWR); Beijing-Tianjin-Hebei region

耕地是人类赖以生存和发展的物质基础,是保障粮食安全、经济发展和社会稳定的根基[1-2],而耕地生态安全是指耕地资源环境、生态环境及社会经济环境与自然和谐共生、动态平衡的一种理想功能状态[3]。改革开放40 a来,在"高薪酬高回报"经济模式的驱动下,中国经历了前所未有的城镇化进程。截至2024年末,中国城镇化率已达67%。在城市扩张与农村建设"两头挤占"的影响下,耕地非农化、耕地质量退化、面源污染等问题日益凸显,人地矛盾愈演愈烈。根据第二次全国土地调查数据显示,耕地面积缩减了7.53×10^4 km^2,人均耕地面积降至0.09 hm^2,仅占世界平均水平的34.62%[4]。此外,《2019年全国耕地质量等级情况公报》揭示,全国耕地质量平均等级为4.76等,中低产田比例超过60%,地力整体偏低,因此,耕地保护与利用面临严峻挑战。为有效缓解耕地压力,高效推动生态文明建设,国家多次强调要严格落实数量、质量、生态"三位一体"的"耕地保护制度,严守十八亿亩耕地红线"[5]。2025年两会期间,"耕地保护"成为高频议题,相关表述在各类文件与讨论中累计出现30余次,充分彰显了耕地作为国家发展根基的战略地位。耕地生态安全作为生态安全体系的基石,其健康与否直接关乎资源利用与社会经济的发展大局[6],京津冀作为中国北方规模最大的城市群,不仅是区域经济增长的核心动力源,更是国家粮食安全战略的关键支撑,肩负着稳产保供、维系北方粮食安全的使命。自2014年"京津冀协同发展战略"正式提出以来,区域内人类活动与土地资源的交互愈加频繁,生态协同发展也成为区域合作的重要议题之一。在此背景下,面对多重政策导向与现实挑战的交织影响[4],京津冀耕地生态安全水平表现出怎样的特征,值得深入探讨。因此,本研究以耕地生态为出发点,系统评估京津冀地区耕地生态安全状况及其特征规律,为制定更具针对性的耕地保护政策、促进农业高质量发展提供坚实的理论支撑与实证依据。

耕地生态安全作为保障耕地安全的关键始终是农业经济领域的热点话题[7],国内外许多学者对此进行了丰富的讨论和研究。在耕地生态安全评价方面,早期研究多聚焦于耕地资源本身的保护[8],之后视角延伸到耕地数量及质量安全[9],随着国家倡导生态文明建设,研究热点转向耕地生态安全综合评价及障碍度分析,重点关注耕地生态系统的整体稳定性[10-12]。基于耕地生态系统的复合性特征,现有研究普遍强调需从多维度构建评价指标体系,有学者结合经济可行性、社会接受性和资源环境合理性三大维度搭建指标框架[13],也有学者采用DPSIR模型,综合考量人类活动与生态环境的相互作用关系开展评价研究[14]。在时空演进及驱动因子方面,现有成果

多从自然-经济-社会-生态耦合系统视角展开分析,既有研究普遍证实,区域资源禀赋、经济发展水平、生态环境条件及人类活动强度的差异,是导致耕地生态安全呈现显著时空异质性的核心原因[15-16]。随着研究尺度不断从单一行政单元向流域、城市群乃至国家尺度拓展,学者们进一步发现,耕地生态安全的时空分异不仅受制于本地要素禀赋,更受到区域发展政策、土地利用管控、城乡要素流动、生态保护红线约束等外部制度性因素的深刻影响[17]。同时,在快速城镇化与产业结构转型背景下,耕地利用转型,生态环境压力传导,农业生产集约化程度提升等过程,进一步加剧了不同区域间耕地生态安全的演化差异[18]。

结合现有研究,本文的研究特色与创新主要体现在:①研究视角具有针对性,立足京津冀协同发展战略背景,充分结合区域水资源短缺、生态环境脆弱、农业集约化程度高的核心区域特征,构建贴合区域实际的PSR评价指标体系,弥补现有研究指标针对性不足的缺陷;②研究方法的系统性与精细化,整合熵权法、Kernel密度估计、Dagum基尼系数、时空地理加权回归模型(GTWR)等多种方法,既实现对耕地生态安全水平的精准测算,也完成对其时空演化、区域差异及驱动机制的多维度解析,通过追踪京津冀耕地生态安全的动态演化过程,精准捕捉驱动因子的时空异质性,填补现有京津冀地区长期时序耕地生态安全研究的空白。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

京津冀地处环渤海经济圈核心腹地及东北亚地缘枢纽,是中国北方规模最大,发展动能最强的国家级城市群。该区域覆盖一省两直辖市,即北京市、天津市及河北省11个地级市(含雄安新区)共13个地级行政单元,地理坐标36°03′—42°40′N,113°27′—119°50′E,区域总面积约2.18×10^5 km^2,形成“四季分明、雨热同期、光温适宜”的粮食种植优势。2020年区域耕地面积比例超过46%,主要包括玉米、小麦、水稻和大豆等作物[19]。截至2024年该区域常住人口规模突破1.1亿人,以全国2.3%的土地面积承载了7.77%的人口总量,远超全国平均水平,人地比例失衡问题显著。特别在“京津冀协同发展”国家战略背景下,如何保障“米袋子”“菜篮子”的安全,构建耕地生态安全屏障,实现“耕地红线、城市增长边界、生态控制线”的多规协同,已成为推进区域可持续发展的关键命题,亟待通过系统研究为耕地资源永续利用和城市群高质量发展提供决策支撑。

本研究参考多篇文献[20-22]并结合京津冀城市群耕地资源禀赋与生态约束,决定将研究区划定为北部生态涵养区、中南部粮食主产区以及东部综合治理区3个区域。其中,北部地区耕地零散、生态约束强,包括北京、张家口、承德;中南部地区耕地集中连片、生产潜力大,包括石家庄、保定、廊坊、邢台、邯郸地区;东部地区耕地面积大,但土地盐碱化等问题突出、耕地质量低,包括天津、唐山、秦皇岛、沧州、衡水地区。

1.2　研究方法

1.2.1　熵权法

研究采用熵权法确定耕地生态安全各指标权重,以保证结果的客观性。某一指标的信息熵越低,则表明其信息量越大,应赋予的权重也越大,反之亦反[23]。具体计算步骤为:

(1)采用极差标准化法对原始数据进行处理以消除不同变量之间性质、量纲、数量级等差异。

$$r_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}}\ (\text{正向指标})$$

$$r_{ij}=\frac{\max\{X_{ij}\}-X_{ij}}{\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}}\ (\text{逆向指标})\quad(1)$$

式中:r_{ij}代表第i年第j项指标进行无量纲化处理后的值;X_{ij}代表第i年第j项指标的初始值;$\max\{X_{ij}\}$,$\min\{X_{ij}\}$分别表示第i年j项指标的最大值和最小值。

(2)计算各指标的信息熵E_j和各指标权重W_j。

$$P_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}r_{ij}}\quad(2)$$

$$E_j=-a\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln P_{ij}\quad(3)$$

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{m}1-E_j}\quad(4)$$

其中,$a=1/\ln(n)$

(3)计算综合得分。

$$\text{score}=\sum_{j=1}^{m}r_{ij}W_j\quad(5)$$

1.2.2　Kernel密度估计

Kernel密度估计主要是通过估计随机变量的概率密度,将数据转化为平滑、连续的密度曲线,并对观察到的数据点进行拟合,模拟真实的概率曲线,展示出分布的时间演变过程与空间聚集状况。通过Kernel密度估计方法,可以更直观地解释京津冀地区

耕地生态安全的动态演进特征，具体计算公式参考相关参考文献[24]。

1.2.3 Dagum基尼系数

Dagum基尼系数是由Dagum C[25]提出，能够有效解决传统基尼系数和泰尔指数的局限，该方法主要研究社会经济在不同地区或不同主体之间不平等关系的测度上具有广泛应用[26]。鉴于此，本研究主要运用此方法来分析京津冀耕地生态安全的空间差异及其来源，数值越大，说明地区耕地生态安全的空间差异越大；反之，则差异越小。具体计算公式参考相关参考文献[26]。

1.2.4 时空地理加权回归模型GTWR

时空地理加权回归模型（geographically and temporally weighted regression，GTWR）是一种处理时空异质性数据的统计工具，扩展自地理加权回归（geographically weighted regression，GWR），在考虑空间异质性和空间依赖性的基础上引入时间因子，捕捉变量关系的动态变化。其核心思想是拟合系数随观测点的空间位置和时间动态调整，使研究对象在不同时间段对应不同的空间坐标，降低由于坐标重合引起的参数估计偏差和模型误差，从而同时满足分析拟合系数的时间和空间非平稳性，有效提高估计结果的准确性[27]。GTWR模型基本形式为

$$S_i=\beta_0(\mu_i,v_i,t_i)+\sum_k\beta_k(\mu_i,v_i,t_i)X_{ik}+\varepsilon_i \quad (6)$$

式中：S_i为地级市i的安全水平；$\beta_0(\mu_i,\nu_i,t_i)$为地级市i的回归截距；(μ_i,ν_i,t_i)为地级市i的时空坐标；μ_i,v_i分别为第i个样本点的经纬坐标；t_i为时间；β_k为第i个样本点的第k个影响因素的回归参数；X_{ik}为第k个自变量在地级市i的值；ε_i为第i个地级市随机误差项。

1.3 指标选取

1.3.1 耕地生态安全

耕地生态安全的核心在于保障耕地资源可持续利用与生态系统稳定。受自然条件与社会经济发展差异影响，不同区域在耕作制度、技术投入及土地利用效率等方面呈现明显分异。由于PSR模型具有综合性强、逻辑清晰、可体现人地系统交互作用等优势[28-30]，本文将其作为研究框架并结合京津冀区域特征[31]，从自然、经济、社会、环境维度选取指标，构建包含压力（P）、状态（S）、响应（R）三大子系统的耕地生态安全评价体系（表1），各子系统指标选取及合理性论证如下：①压力（P）表征人类生产生活对自然及近自然生态系统造成的直接压力[32]。该子系统聚焦于人类活动对京津冀耕地生态系统的干扰与破坏，结合京津冀城镇化快速发展、农业集约化程度高的区域特征，选取6项核心指标。其中，城镇化率、人口密度主要表征城市化进程中人口集聚、城镇扩张对耕地资源的占用与挤压压力，反映社会发展对耕地生态的影响；人均耕地经营面积，表征区域耕地资源的人均占有水平与利用集约化程度，直接反映耕地利用的核心变化趋势，是衡量耕地压力的关键指标；单位耕地化肥负荷、单位耕地农药负荷、单位耕地农膜负荷，量化农业生产过程中人为投入对耕地土壤、水质的污染压力，反映农业集约化生产对耕地生态环境的破坏程度。②状态（S）表征当前生态环境下耕地的变化状态及生态系统的健康状况[33]。该子系统聚焦于耕地生态系统在外部压力作用下的当前状态，结合京津冀耕地资源类型多样、生态环境差异显著的特征，选取6项核心指标。其中，粮食单产水平，反映耕地的生产能力与产出效能，是耕地生态系统健康状况的核心表征指标；复种指数，体现耕地的年度利用强度，直接反映耕地资源的利用效率与可持续性；森林覆盖率关联区域生态支撑能力，反映耕地周边生态环境的改善程度，对耕地水土保持、气候调节具有重要支撑作用；农业灾害指数表征自然灾害对耕地生产的干扰与破坏，反映耕地生态系统的抗风险能力；农作物播种面积反映耕地的实际利用规模，体现耕地资源的存量与利用现状；有效灌溉率体现区域农业水利基础设施的保障水平，直接影响耕地的抗灾能力与生产稳定性。③响应（R）是指人类为减轻、阻止和预防生态问题所采取的补救措施，是连接人类活动与生态系统的主动调节环节，可有效降低压力子系统影响强度、扭转状态子系统负面趋势[34]。结合京津冀耕地保护、生态治理的实际工作重点，选取6项核心指标。其中，单位耕地机械总动力反映农业机械化水平，能够提升耕地利用效率，减少人为耕作对耕地的破坏，是农业生产技术层面的核心响应措施；农村居民人均可支配收入反映农户的经济收益水平，能够增强农户对耕地的管护意愿与投入能力，激发耕地保护的内生动力；污水处理率反映区域农业与生活污水的治理水平，能够减少污染物对耕地土壤与水质的损害，改善耕地生态环境；水土流失治理面积针对京津冀部分区域水土流失严重的问题，反映水土保持工作的成效，能够改善耕地水土条件，提升耕地生态稳定性；第一产业从业人数保障耕地经营的人力投入，确保耕地得到合理管护与利用；第二、三产业比例反映区域产业结构优化程度，能够缓解经济发展对耕地资源的依赖，减少耕地占用压力。

耕地生态安全的压力、状态和响应是相辅相成的，当耕地生态压力突破阈值时，会引起耕地状态的改变，从而促使民众对耕地生态环境做出调整，也就

是通过生态修复、政策干预等措施降低压力负荷,恢复耕地功能。而耕地生态状况的改善,又使得耕地可承载更高生态压力,进而支撑人口增长与社会可持续发展。

表 1　京津冀耕地生态安全综合评价指标体系

Table 1　Comprehensive evaluation index system for cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region

准则层	指标层	计算方法	指标属性
压力	城镇化率/%	城镇人口/总人口	−
	人口密度/(人·km^{-2})	总人口/土地总面积	−
	人均耕地经营面积(hm^2/人)	耕地总面积/农业从业人口	+
	单位耕地化肥负荷/($kg·hm^{-2}$)	化肥总量/耕地总面积	−
	单位耕地农药负荷/($kg·hm^{-2}$)	农药总量/耕地总面积	−
	单位耕地农膜负荷/($kg·hm^{-2}$)	农膜总量/耕地总面积	−
状态	粮食单产水平/($kg·hm^{-2}$)	粮食总产量/粮食作物播种面积	+
	复种指数/%	农作物播种总面积/耕地面积	+
	森林覆盖率/%	森林面积/土地总面积	+
	农业灾害指数/%	农作物成灾面积/农作物总播种面积	−
	农作物播种面积/hm^2	农业普查数据	+
	有效灌溉率/%	有效灌溉面积/耕地总面积	+
响应	单位耕地机械总动力/($kW·km^{-2}$)	农业机械总动力/耕地面积	+
	农村居民人均可支配收入/(元·$人^{-1}$)	可支配总收入/农村常住人口数	+
	污水处理率/%	污水处理量/污水排放总量	+
	水土流失治理面积/hm^2	$\sum_{i=1}^{n}$第i项治理措施覆盖面积	+
	第一产业从业人数/人	人口普查数据	+
	第二三产业占GDP比重/%	第二、三产业增加值/GDP	+

1.3.2　驱动因子

从人地相互作用关系视角来看,自然要素与社会经济要素在非均衡交互作用下深刻影响着京津冀耕地生态安全发展的时空分异,本研究在遵循数据连续性、可靠性和可获得性的原则下,结合研究区实际情况,从社会经济、农业支持政策与自然气候3个层面出发,选取人均国内生产总值(per capita gross domestic product, PGDP)、作物种植结构(planting structure, PS)、财政支农水平(fiscal support to agriculture, FSA)、农业科研活动经费(agricultural research funding, ARF)、降水量(precipitation, PRCP)、日照时数(sunshine, SUN)6个指标作为影响耕地生态安全的驱动因子。具体指标说明详见表2。

1.3.3　数据来源

本研究样本为2011—2023年京津冀地区的地级市面板数据。研究所选取的指标涉及自然、经济、社会、环境等多个领域,原始数据主要来源于历年《北京市统计年鉴》《天津市统计年鉴》《河北省统计年鉴》及京津冀地区各城市国民经济和社会发展统计公报等,个别年份数据缺失统一采用插值法补齐。降水量及日照时数的气象数据来源于国家气象科学数据中心“中国地面气候资料年值数据集”,在ArcGIS中通过反距离插值法进行提取。此外,为了避免由于指标数值过大导致数据右偏,造成回归方程中异方差过高,在构建驱动因素的地理加权模型时,将自变量采用取自然对数方法进行转换,并对其进行多重共线性检验,各驱动因子的方差膨胀因子VIF明显低于5,且VIF均值为2.19(表2),表明变量之间不存在明显的多重共线性问题,适合进行后续的时空地理加权分析。

2　结果与分析

2.1　京津冀耕地生态安全结果与分析

根据已获取的数据,利用熵权法计算得到2011—2023年京津冀各城市及三大区域的耕地生态安全值和各子系统指数值。根据表3可知,研究期内京津冀耕地生态安全呈波动提升态势,综合指数由0.458增长至0.462,在2015年处于最高值达到0.468。分区域来看,耕地生态安全水平呈现北部高,东部低的分布格局,北部地区均值为0.492,中南部地区次之为0.457,东部地区最低为0.433,三大区域的综合指数均值分别由2011年的0.522,0.458,0.421变化至

2023年的0.488,0.461,0.438。值得注意的是,东部地区虽综合得分最低,但增长却最为显著,增幅达4.04%。可能原因是该区域耕地面积大但盐碱化、水资源短缺等问题突出,近年来在盐碱地改良,地下水超采综合治理,农田生态修复等方面政策支持力度持续加大,耕地生态环境改善效果逐步显现;同时受天津、唐山等中心城市辐射带动,农业生产集约化水平与耕地污染防控能力不断提升,推动耕地生态安全水平快速提高。分城市来看,张家口、承德、保定分别以均值0.557,0.538,0.488位居前三,凸显了其在耕地条件与生态保护效能方面的双重优势,而廊坊、秦皇岛、北京得分较低,分别为0.397,0.393和0.382,表明这些城市在耕地禀赋及生态保护方面面临更大挑战。

表2 指标描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of indicators

项目	变量名称	计算公式	均值	标准差	最小值	最大值	VIF
耕地生态安全	京津冀耕地生态安全(Score)	熵权法					
社会经济	人均国内生产总值(PGDP)	国内生产总值/总人口	10.809	0.498	9.902	12.207	3.79
	作物种植结构(PS)	粮食作物种植面积/(农作物播种总面积-粮食作物种植面积)	3.356	0.443	2.294	4.682	1.29
农业支持政策	财政支农水平(FSA)	农林水事务/农作物播种面积	2.291	1.158	0.665	6.492	3.00
	农业科研活动经费(ARF)	RD经费内部支出*(地区农林牧渔业总产值/地区生产总值)	4.211	0.874	2.033	5.723	2.41
自然气候	降水量(PRCP)	年均降水量	6.319	0.823	5.539	6.991	1.21
	日照时数(SUN)	年日照时数	7.790	0.099	7.369	8.009	1.45

表3 京津冀地区2011—2023年耕地生态安全综合指数

Table 3 Comprehensive index of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

地区	城市	耕地生态安全综合指数														
		2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	均值	增幅/%
北部	北京	0.356	0.389	0.348	0.388	0.363	0.401	0.366	0.366	0.378	0.387	0.401	0.411	0.413	0.382	16.01
	承德	0.585	0.557	0.511	0.550	0.560	0.507	0.557	0.525	0.519	0.525	0.546	0.532	0.521	0.538	−10.94
	张家口	0.624	0.604	0.573	0.614	0.533	0.529	0.554	0.541	0.529	0.541	0.534	0.537	0.529	0.557	−15.22
	均值	0.522	0.517	0.477	0.517	0.485	0.479	0.492	0.477	0.475	0.484	0.494	0.493	0.488	0.492	−6.51
中南部	石家庄	0.478	0.477	0.483	0.486	0.502	0.461	0.451	0.483	0.475	0.483	0.464	0.478	0.478	0.477	0.00
	保定	0.501	0.488	0.483	0.487	0.481	0.475	0.469	0.490	0.485	0.500	0.499	0.484	0.501	0.488	0.00
	廊坊	0.400	0.402	0.383	0.382	0.462	0.400	0.381	0.386	0.390	0.403	0.391	0.388	0.391	0.397	−2.25
	邢台	0.447	0.442	0.450	0.457	0.461	0.466	0.470	0.473	0.477	0.473	0.479	0.466	0.470	0.464	5.15
	邯郸	0.464	0.461	0.459	0.454	0.456	0.455	0.443	0.453	0.465	0.459	0.476	0.461	0.466	0.459	0.43
	均值	0.458	0.454	0.452	0.453	0.472	0.451	0.443	0.457	0.458	0.464	0.462	0.455	0.461	0.457	0.67
东部	天津	0.385	0.432	0.387	0.398	0.401	0.415	0.420	0.423	0.427	0.447	0.452	0.457	0.461	0.423	19.74
	沧州	0.449	0.488	0.477	0.476	0.490	0.459	0.456	0.465	0.447	0.448	0.454	0.457	0.458	0.463	2.00
	衡水	0.392	0.410	0.422	0.415	0.485	0.431	0.437	0.439	0.436	0.454	0.447	0.446	0.450	0.436	14.80
	唐山	0.468	0.485	0.457	0.460	0.458	0.440	0.433	0.432	0.443	0.447	0.451	0.447	0.444	0.451	−5.13
	秦皇岛	0.412	0.450	0.373	0.414	0.435	0.405	0.363	0.380	0.377	0.371	0.375	0.374	0.375	0.393	−8.98
	均值	0.421	0.453	0.423	0.433	0.454	0.430	0.422	0.428	0.426	0.433	0.436	0.436	0.438	0.433	4.04
京津冀		0.458	0.468	0.447	0.460	0.468	0.450	0.446	0.450	0.450	0.457	0.459	0.457	0.462	0.456	0.87

由图1中3个准则层可知,研究期内京津冀耕地压力指数呈现缓慢波动上升轨迹,整体变化幅度不大。数值由2011年的0.524变化至2016年的0.532,随后呈现反弹态势,到2023年升至0.546,增幅为4.20%。这表明研究期间京津冀地区耕地生态系统承受的外部压力不断加大,主要体现为城镇化扩张、农业集约化生产中化肥农药投入增加,耕地资源被挤占等问题。与之形成对比的是,耕地状态和耕地响应在研究期内均呈现下降趋势,分别由2011年的0.238和0.325下降至2023年的0.136和0.321,降幅分别为42.86%和1.23%。值得注意的是,二者的变化轨迹基本呈现反方向变化特征,出现这一现象的

原因可能是耕地状态变化与保护措施实施之间具有时滞性,即尽管民众总能根据耕地状态变化及时调整保护策略,但政策措施的传导存在延迟,其实际效能往往需要经历一段时间才得以显现。

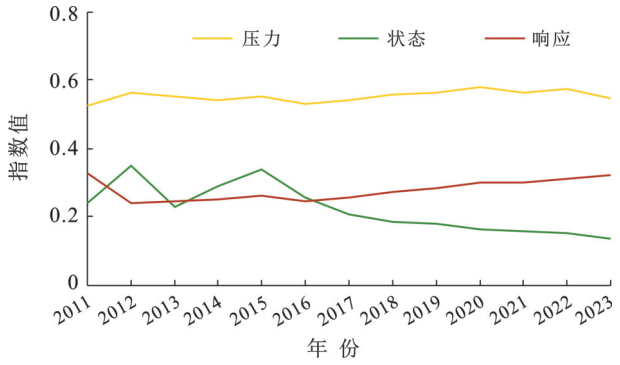


图 1　京津冀地区 2011—2023 年耕地生态安全准则层变化

Fig.1　Changes in criterion levels of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

2.2　京津冀耕地生态安全时序演进特征

图 2a 为 2011—2023 年京津冀耕地生态安全的 Kernel 密度分布。从时间演化特征来看,耕地生态安全核密度曲线呈现明显的多峰向单峰分布的转化,分布态势比较稳定;从曲线位置看,主峰呈现整体右移趋势,表明京津冀地区耕地生态安全稳步提升,这与前文得出的结论相互印证;从曲线分布形态看,主峰高度逐渐攀升且波幅宽度逐渐收窄,反映出各城市间的绝对差距正在逐步缩小;从分布延展性来看,核密度曲线未呈现两极分化及拖尾现象,表明大多数城市正朝着高生态安全水平发展,但仍可能存在少数城市的耕地生态安全水平落后于区域整体发展进程,反映出地区的差异性。这意味着近年来京津冀地区在耕地生态安全方面取得显著成效,具体表现为区域整体安全水平的增强,区域内部耕地生态安全趋于均衡化。

京津冀北部、中南部、东部地区的耕地生态安全动态演化则有所不同,具体动态演进特征如图 2b—2d 所示。①北部地区耕地生态安全 Kernel 密度曲线中心位置呈现整体右移趋势,主峰高度和波幅宽度基本保持不变,曲线基本保持“一主一侧”的双峰形态,且侧峰在主峰左侧,明显低于主峰,未出现明显拖尾特征。这表明北部地区耕地生态安全近年来整体改善,但仍存在一定的非均衡性,部分城市如张家口、承德的耕地生态安全水平高于区域均值,表现突出。尽管区域内部存在差异,但整体水平仍处于较高区间,结合其发展态势不难看出该区域具备向更高水平持续提升的发展潜力。②中南部地区耕地生态安全 Kernel 密度曲线的峰值中心整体右移,主峰高度呈波动变化,曲线形态由多峰向双峰转变,侧峰始终位于主峰左侧且高度低于主峰,并随时间逐步向主峰靠拢,无明显拖尾特征。这表明该区域耕地生态安全水平整体呈波动提升态势,多数城市耕地生态安全向更高水平集聚,原本安全水平较低的城市逐步改善,区域均衡性显著增强,城市间分化现象持续减弱,空间发展差距也在逐步缩小,分布更加集中,整体呈现良好的发展态势。③东部地区耕地生态安全 Kernel 密度曲线的峰值中心整体右移,主峰高度显著提高,2011—2016 年呈现明显的双峰结构,侧峰高度与主峰接近,区域内部两极分化特征突出,随着时间推移,侧峰逐渐向主峰靠拢且高度降低,2017—2023 年基本演变为“一主一侧”的单峰形态,未出现明显拖尾特征,表明该区域耕地生态安全水平整体呈持续提升态势,区域内多数城市的耕地生态安全向更高水平集中,原本安全水平较低的城市也在快速改善,城市间发展差距由非均衡状态向均衡状态转变,空间差距持续缩小,分化现象也进一步减弱,分布更加集中,整体呈现良好的发展态势。

2.3　京津冀耕地生态安全区域差异及其来源

2.3.1　总体区域差异

空间分布特征分析虽然能够直观刻画耕地生态安全水平在地区间的异质性分布,但难以进一步反映区域差异的程度及其缘由。接下来,使用 Dagum 基尼系数对总体及三大区域的耕地生态安全差异及来源进行分析。样本研究期内,耕地生态安全的 Dagum 基尼系数 G 介于 0.048～0.088,平均值为 0.064,表明京津冀地区耕地生态安全存在一定的空间非均衡性。从耕地生态安全总体区域差异的变化趋势来看(图 3),基尼系数 G 总体呈现波动下降趋势,虽在 2013 和 2017 年间有小幅度回升,但相较于 2011 年仍有明显下降,年均降幅为 3.9%,由此可以看出,样本研究期内基尼系数虽存在一定波动,区域内耕地生态安全总体差异略有缩小,但差异依然存在。

2.3.2　区域差异及分解

对于区域内差异(图 3,表 4),北部地区耕地生态安全水平内部差异最大,年均基尼系数为 0.080,高于总体均值,其次是东部和中南部,年均基尼系数分别为 0.059,0.037。从变化趋势来看,北部地区耕地生态安全水平基尼系数呈倒 N 形波动轨迹,整体在高位区间波动;中南部地区的基尼系数变化幅度相对平缓,整体呈小幅上升态势;东部地区的基尼系数则在低位区间小幅波动,整体稳中有降。区域差异演变的内在机理与各地区农业禀赋和政策响应模式密

切相关：北部地区受制于山地、坝上等自然环境因素，耕地分布零散、生态约束强，张家口、承德等城市生态本底较好，而北京受城市扩张影响较大，导致内部差异长期处于高位且波动较小；中南部地区依托集中连片的优质耕地资源和较强的经济基础，在耕地生态修复与集约化利用方面持续发力，区域内差异虽有小幅波动，但整体保持相对稳定；东部地区近年来在盐碱地改良、地下水压采等政策支持下，生态安全水平有所改善，区域内差异呈稳中有降的态势。总体来看，京津冀三大区域耕地生态安全水平均存在一定的区域内差异，但区域内差异呈现缩小的趋势。

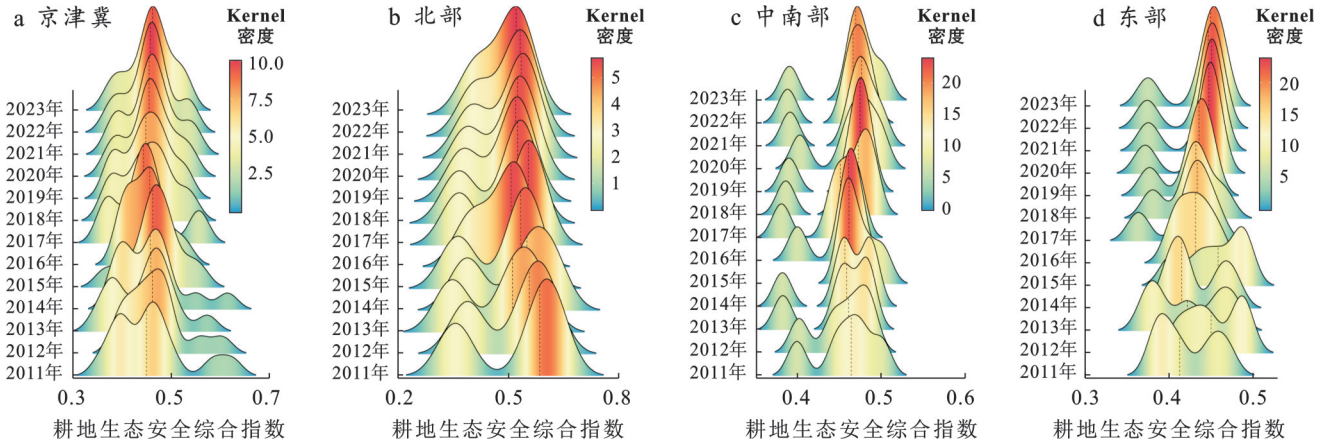


图 2 京津冀地区 2011—2023 年耕地生态安全 Kernel 密度分布

Fig.2 Kernel density distribution of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region (2011—2023)

表 4 京津冀地区 2011—2023 年耕地生态安全的区域差异及分解

Table 4 Regional differences and decomposition of cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

不同耕地生态安全区		Gini 系数(G)							
		2011 年	2013 年	2015 年	2017 年	2019 年	2021 年	2023 年	均值
总体		0.088	0.076	0.058	0.071	0.059	0.059	0.054	0.064
地区内差异	北部	0.114	0.105	0.09	0.086	0.071	0.065	0.053	0.080
	中南部	0.041	0.041	0.019	0.037	0.035	0.04	0.04	0.037
	东部	0.042	0.053	0.04	0.038	0.03	0.03	0.034	0.059
地区间差异	中南部-北部	0.097	0.079	0.062	0.078	0.059	0.061	0.054	0.069
	中南部-东部	0.049	0.052	0.033	0.042	0.043	0.043	0.043	0.042
	北部-东部	0.107	0.091	0.075	0.084	0.065	0.064	0.057	0.074
贡献度/%	地区内	21.3	25.9	23.5	22.4	22.6	23.5	25.8	23.6
	地区间	49.6	33.4	24.7	43.7	40.2	43.7	41.9	40.6
	超变密度	29.2	40.7	51.9	33.9	37.1	32.8	32.3	35.8

对于区域间差异（图 4，表 4），北部-东部耕地生态安全水平的区间差异最大，年均基尼系数为 0.074，其次是中南部-北部，年均基尼系数为 0.069，中南部-东部的区间差异最小，年均基尼系数为 0.042。从变化趋势来看，中南部-北部和北部-东部的区间差异呈“波动下降”的整体态势，而中南部-东部的区间差异则在低位区间呈现小幅度波动。这表明，中南部地区依托集中连片的优质耕地和较强的政策响应能力，在耕地生态安全水平上与北部、东部地区形成了一定的梯度优势；北部地区虽整体水平较高，但与东部地区的区间差异仍相对突出，而东部地区近年来在盐碱地改良、地下水压采等政策支持下，与中南部地区的差距逐步缩小。总体来看，京津冀三大区域耕地生态安全水平均存在明显的区域间差异，但区域间差异呈现缩小趋势。

对于差异的来源及贡献（图 5，表 4），区域间差异净值、区域内差异及区域间超变密度的平均贡献率分别为 40.6%，23.6% 和 35.8%，表明京津冀耕地生态安全的区域总体差异主要来源于区域间差异净值，其次为区域间超变密度和区域内差异。从贡献率变化趋势来看，区域间差异净值对耕地生态安全发展水平的区域总体差异的贡献整体呈现波动变化，但始终占据主导地位，区域内差异对区域总体差异的贡献较为稳定，基本维持在 24% 左右，而区域间超变密度作为

衡量地区间交叉重叠现象的指标,对区域总体差异的贡献整体也呈现波动变化。总体来说,区域间差异净值是导致京津冀地区耕地生态安全非均衡的主要原因,但得益于京津冀协同发展战略的实施,区域间差异对耕地生态安全不平衡的贡献有所缩小,这一发现为制定差异化治理策略提供了科学依据。

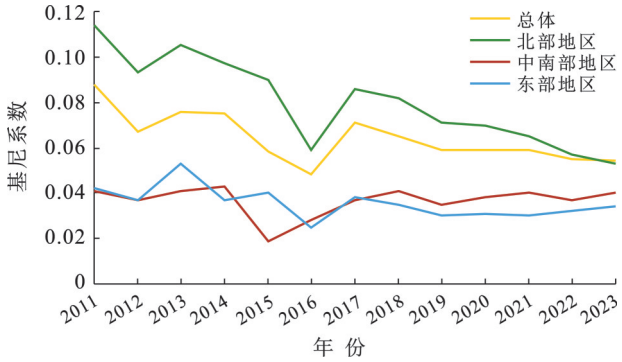


图 3　京津冀总体及三大区域内 2011—2023 年耕地生态安全水平差异演变

Fig.3　Evolution of overall and intra-regional differences in cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

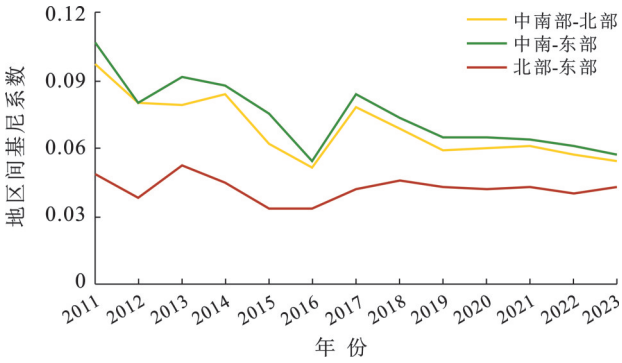


图 4　京津冀三大区域间 2011—2023 年耕地生态安全水平差异演变

Fig.4　Evolution of inter-regional differences in cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

2.4　京津冀耕地生态安全影响因素及其时空特征

2.4.1　相关检验及模型选取

从表 5 可知,纳入时空特性的 GTWR 模型修正的 R^2 在解释力度上达到了 83.3%,显著大于其他模型。此外,根据现有研究可知,AICc, Bandwidth, Residual Squares 与 Sigma 值也是衡量模型性能的重要指标,值越小说明模型对观测数据的拟合效果越好。综合各参数的比较结果发现,GTWR 模型的 AICc 值为 430.472,相比于普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)和 GWR 模型数值均最小,同样 Bandwidth, Residual Squares 与 Sigma 也为最小。这说明使用 GTWR 模型能够更有效地解释该地区耕地生态安全影响因素的空间异质性。

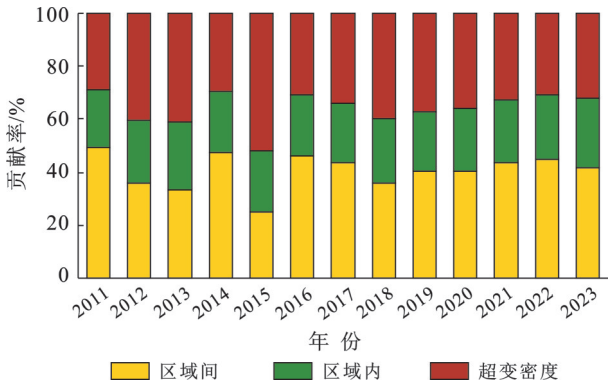


图 5　京津冀地区 2011—2023 年耕地生态安全水平区域差异贡献率

Fig.5　Contribution rates of regional differences in cultivated land ecological security in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2011 to 2023

表 5　OLS,GWR 和 GTWR 模型的参数对比结果

Table 5　Parameter comparison results of OLS, GWR and GTWR models

指标评价	模型		
	OLS	GWR	GTWR
拟合优度(R^2)	0.276	0.584	0.840
调整的拟合优度(adjust R^2)	—	0.567	0.833
赤池信息准则(AICc)	478.290	441.336	430.472
带宽(bandwidth)	—	0.222	0.121
残差平方和(residual squares)	—	103.595	39.887
残差标准差	—	0.815	0.506

2.4.2　影响因素时空演变

根据 GTWR 回归结果,得到各影响因素在不同时空位置对耕地生态安全的拟合系数。借助 ArcGIS 等距分类法对 2011,2017 和 2022 年这 3 个时间节点的拟合系数进行可视化(图 6),可以看出具有明显的空间分异特征。①社会经济因素对耕地生态安全的影响。人均国内生产总值(PGDP)与耕地生态安全之间存在显著的负相关关系,即 PGDP 的增长对耕地生态安全构成了明显的阻碍作用,拟合系数介于 −3.636 1～0.373 6。从影响效应的时空差异上看,研究期间北部和中部地区 PGDP 的负向影响有所缓和,而南部地区的负向影响则呈现增强趋势。具体来看,2011 年负向低值区域主要集中在城市群的西部与南部,负向高值区主要位于东北部;2017 年中部和北部地区的负向影响有所减弱,南部地区的影响则有所加强;2022 年除中部部分区域影响相对稳定外,其他地区的负向影响均显著加强,此时负向高值区域主要分布在南部地区。这一现象表明,随着经济的不断发展,不同区域在耕地生态安全方面所面临的挑战与压力存在显著差异,并且这种差异在时间维度上呈现出动态演变的特征。

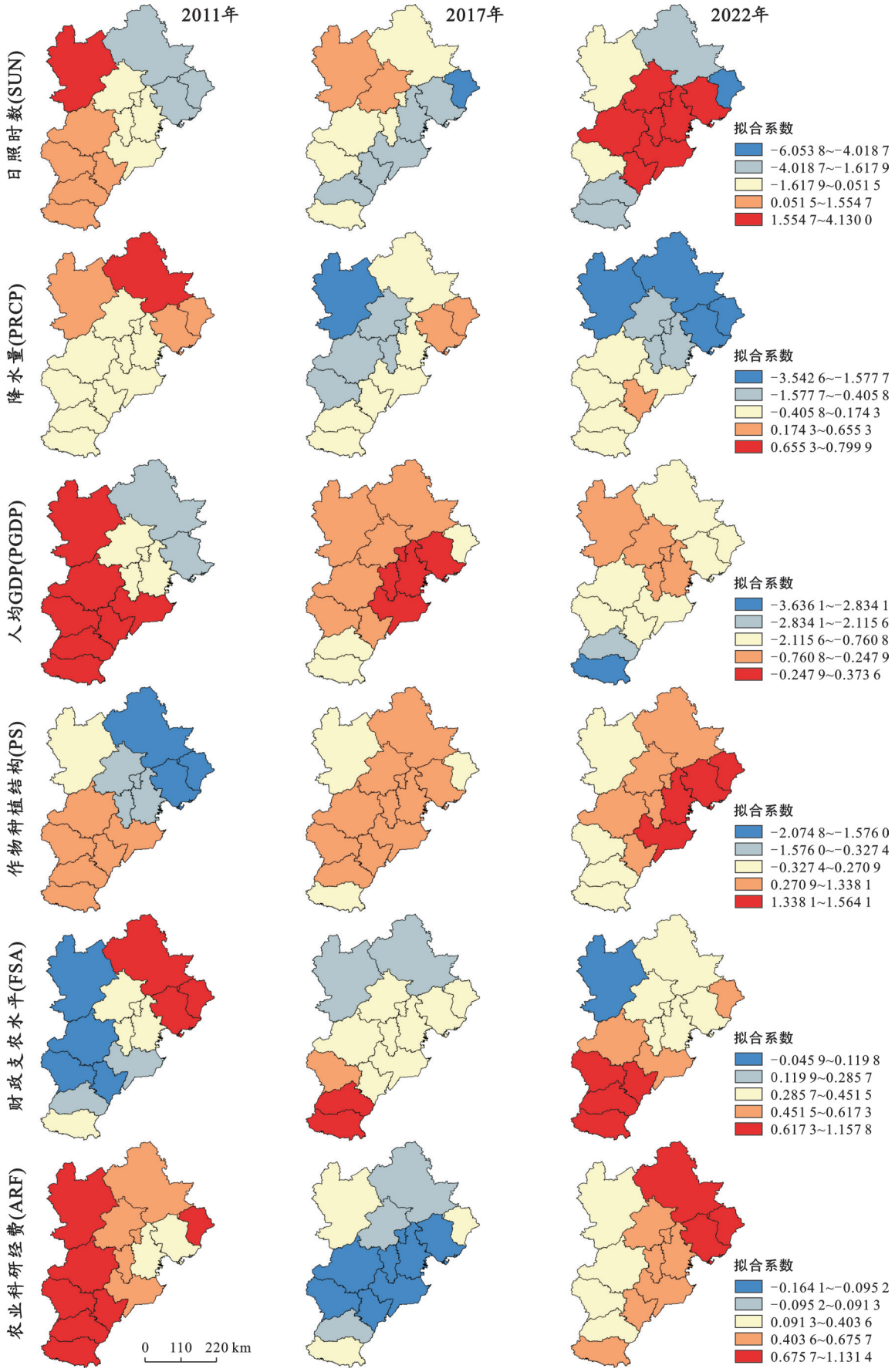


图 6 京津冀地区 GTWR 模型拟合系数的时空演变

Fig.6 Spatiotemporal evolution of fitted coefficients in GTWR model in Beijing-Tianjin-Hebei region

作物种植结构(PS)对耕地生态安全的影响经历了由正负影响相当到正向影响主导的转变,说明PS的优化对耕地生态安全具有促进作用,拟合系数介于−2.074 8~1.564 1。从影响效应的时空差异上看,研究期间PS的拟合系数分布从“南高北低”逐渐转变为“东高西低”。具体来看,2011年负向高值区域主要集中在城市群的北部,中部次之,南部地区则表现出正向影响;2017年除少数城市外,大部分城市的作物种植结构对耕地生态安全产生正向影响,且这一趋势有待进一步加强,这说明研究区的作物种植结构相对落后,存在较大的优化空间。2022年正向影响进一步增强,影响程度自东向西逐渐递减。②农业政策支持对耕地生态安全的影响。财政支农水平(FSA)与耕地生态安全之间呈现出显著的正相关关系,说明提高FSA的支持力度对耕地生态安全具有积极的促进作用,拟合系数介于−0.045 9~1.157 8。从影响效应的时空差异上看,研究期间FSA对耕地生态安全的影响在南部地区呈现逐渐增强的趋势,而在北部地区则逐渐减弱。具体来看,2011年正向高值区域主要集中于城市群的北部,对中部和南部地区的影响相对较小;然而,在2017—2022年南部地区的正向影响显著增强,逐渐成为高值区域,中部地区则基本保持稳定,北部地区则经历了影响程度先下降后上升的变化。农业科研活动经费(ARF)同样与耕地生态安全呈现出正相关关系,说明增加ARF的投入对耕地生态安全也具有积极影响,拟合系数介于−0.164 1~1.131 4。从影响效应的时空差异上看,研究期间ARF的拟合系数正向高值区域呈现出由南向北的转移趋势。具体来看,2011年ARF对京津冀各个城市均产生了正向影响,但南部地区的影响更为显著;至2017年,中部大部分区域的正向影响减弱,负向影响增强,这可能是由于科研方向与生态需求出现了错位,即科研经费过度倾向于高产量技术,而忽视了节水、有机农业等生态友好型技术的发展;2022年ARF对研究区均产生正向影响,其中北部和东部的正向影响尤为突出,其次是中部地区。这一变化表明,国家在探寻新发展方向、加大农业研发投入、优化各项措施以及大力发展生态农业方面取得了显著成效,进而使得耕地安全状况得到了更为明显的改善。③自然气候对耕地生态安全的影响。降水量(PRCP)对耕地生态安全的影响具有双向调节作用,说明PRCP的变化对耕地生态安全的影响既可能有阻碍作用,也可能有促进作用,二者之间并非简单的线性关系,拟合系数介于−3.542 6~0.799 9。从影响效应的时空差异上看,研究期间PRCP拟合系数的分布从“北高南低”转变为“南高北低”。具体来看,2011年PRCP基本呈现正向影响,此时负向影响较小,拟合系数正向高值区域主要集中在城市群的北部,中部和南部处于正负影响的过渡地带;2017年部分地区的情况开始恶化,北部和西部地区的正向影响减弱,负向影响加强;2022年北部和中部地区持续恶化,南部地区大部分城市处在正负影响过渡区,仅有少数城市存在正向影响。日照时数(SUN)对耕地生态安全的影响同样具有双向调节作用,说明SUN可能对耕地生态安全的影响有阻碍或促进作用,二者之间并非简单的线性关系,拟合系数介于−6.053 8~4.130 0。从影响效应的时空差异上看,研究期间SUN拟合系数的分布格局由“西南高,东北低”向“中部高,南北低”转变。具体来看,2011年拟合系数的负向高值区域主要集中在城市群的东北部,正向高值区则集中在南部和西部,中部地区处于正负影响的过渡地带;2017年除北部地区的负向影响有所缓解外,其他地区的情况基本呈现恶化态势,部分地区甚至出现负向影响;2022年正向高值区域主要集中在中部,并呈现连片分布,而北部和南部地区则持续恶化,产生负向影响。

3　结　论

(1) 2011—2023年京津冀耕地生态安全水平整体呈波动提升,综合指数由0.458增至0.462,其中2015年达到峰值0.468。空间格局上呈现“北部高,东部低”的分布特征,北部地区综合指数均值为0.522,高于中南部的0.457和东部的0.433;尽管东部地区得分最低,但其增幅最为显著,达4.04%。从PSR子系统来看,压力子系统缓慢波动上升,指数由0.524增至0.546,增幅4.20%,反映出城镇化扩张与农业集约化生产对耕地生态系统带来的外部压力持续加大。状态子系统与响应子系统则均呈波动下降趋势,分别由0.238,0.325降至0.136和0.321,降幅分别为42.86%和1.23%。

(2) 区域差异方面,Kernel密度估计显示,京津冀各城市间绝对差距逐步缩小,核密度曲线由多峰向单峰转化,主峰右移,宽度收窄,多数城市正朝高生态安全水平迈进。分区域看,北部地区保持“一主一侧”双峰形态,内部仍存一定非均衡性;中南部地区由多峰向双峰转变,侧峰逐步向主峰靠拢,区域均衡性显著增强;东部地区由明显双峰结构演变为单峰形态,两极分化现象明显缓解。

(3) Dagum基尼系数分析表明,总体区域差异略有缩小,基尼系数由0.088降至0.054,均值0.064,差异主要源于区域间差异净值,其次为超变密度和区

域内差异。区域内差异程度表现为:北部>东部>中南部;区域间差异则以北部-东部最为显著,中南部-北部次之,中南部-东部最小。

(4)驱动因素方面,GTWR模型揭示各因子存在显著时空异质性。作物种植结构、财政支农水平、农业科研活动经费对耕地生态安全起正向驱动作用,其中作物种植结构的影响由正负相当逐步转为正向主导,财政支农的正向效应在南部地区持续增强,农业科研经费的正向高值区则由南向北转移。降水量和日照时数呈现双向调节作用,其影响方向和强度随时间和空间变化,表明自然气候因素与耕地生态安全之间并非简单线性关系。人均GDP主要表现为抑制作用,且其负向影响在南部地区呈增强趋势,反映出经济增长与耕地生态保护之间的矛盾在部分区域仍在加剧。

4 建 议

(1)构建耕地生态安全动态监测与预警体系,保障区域农业可持续发展。依托物联网技术与高精度遥感监测平台,通过部署多类型传感器与卫星遥感设备,搭建起全方位、多角度覆盖全区域的耕地生态安全动态监测网络。重点聚焦资源消耗强度、污染排放负荷、土壤质量退化等核心压力指标,实现实时数据采集与传输;同时,结合区域地理特征与农业活动规律,建立分级预警阈值体系,运用机器学习与空间分析模型,动态评估耕地承载阈值与生态风险等级,形成"监测—评估—预警—响应"的闭环管理机制,为耕地生态安全风险防控提供精准化、智能化的决策支持,推动农业可持续发展与生态保护协同共进。

(2)实施区域差异化协同发展策略。各地区立足自身实际,深入剖析农业发展现状、精准把握资源禀赋特点、科学评估未来发展潜力,制定"一区一策"的政策内容。对于京津冀中南部地区而言,要在统筹耕地保护与城镇化的进程中,注重完善农业生产设施,提高农业机械化水平,加大对灌溉设施的改造和升级力度,提高水资源利用效率,促进农业可持续发展与城镇化的良性互动。北部地区受自然条件限制较大,应因地制宜发展节水农业、设施特色林果业,通过建立区域农产品品牌联盟等方式,提升特色产品的市场竞争力,增加产品附加值,实现农业增效、农民增收。东部地区应聚焦盐碱地改良、地下水超采综合治理等关键短板,大力推广耐盐碱作物、节水灌溉技术与生态修复模式,强化耕地质量提升与障碍因子消减,依托政策支持与治理技术突破,逐步缩小与中南部、北部的发展差距,推动区域耕地生态安全水平稳步提升。

(3)加快推进高标准农田建设与生态保护的协同发展。当前,中国部分耕地面临土壤肥力下降、水土流失加剧等质量退化问题,严重制约了粮食产量的稳定增长,对国家粮食安全体系构成潜在威胁。为此,依据2021年出台的《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》并结合近年来全国高标准农田建设的实践经验,深入分析京津冀在高标准农田建设过程中面临的资源环境约束、技术瓶颈及资金投入等现实挑战。在此基础上,还需明确农田管护责任主体与具体技术要求,构建政府引导、企业参与、农民受益的多方协同机制,通过政策激励、技术创新与市场运作相结合,夯实粮食安全根基,推动耕地资源高效利用,最终实现粮食产量与质量的"双提升"目标。

然而,由于耕地生态安全影响因素极具复杂性,在探讨驱动因素时,部分微观指标(如土壤微生物等)因数据缺失未纳入研究,因此,未来可考虑依托物联网等人工智能技术与高精度遥感监测平台,对微观指标进行监测,获取准确数据,进而对研究区耕地生态安全问题展开更加全面深入的探讨。

参考文献(References)

[1] 任平,吴涛,周介铭.基于GIS和空间自相关模型的耕地空间分布格局及变化特征分析:以成都市龙泉驿区为例[J].中国生态农业学报,2016,24(3):325-334.
Ren Ping, Wu Tao, Zhou Jieming. Analysis of spatial distribution pattern and evolutionary characteristics of cultivated lands based on spatial autocorrelation model and GIS platform: A case study of Longquanyi District, Chengdu, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016,24(3):325-334.

[2] 张虹波,刘黎明,张军连,等.黄土丘陵区土地资源生态安全及其动态评价[J].资源科学,2007,29(4):193-200.
Zhang Hongbo, Liu Liming, Zhang Junlian, et al. A dynamic assessment of ecological security of land resources in loess hills region [J]. Resources Science, 2007,29(4):193-200.

[3] 吴大放,刘艳艳,刘毅华,等.耕地生态安全评价研究展望[J].中国生态农业学报,2015,23(3):257-267.
Wu Dafang, Liu Yanyan, Liu Yihua, et al. Progress on ecological security evaluation of cultivated land [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015,23(3):257-267.

[4] 马国斌,陆汝成,吴壮金,等.耕地韧性评价及其调控路径研究:以珠江-西江经济带为例[J].水土保持研究,2025,32(4):332-342.
Ma Guobin, Lu Rucheng, Wu Zhuangjin, et al. Evaluation of cultivated land resilience and its regulatory pathways: A case study of the Pearl River-West River eco-

nomic belt [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):332-342.

[5] 李懿芸,毛晓红,黄祖辉.国家粮食安全背景下耕地数量、质量、生态"三位一体"保护评价与对策研究[J].农村经济,2023(6):21-31.
Li Yiyun, Mao Xiaohong, Huang Zuhui. Evaluation and countermeasure research on the trinity protection of cultivated land quantity, quality and ecology under the background of national food security [J]. Rural Economy, 2023(6):21-31.

[6] 陆威,赵源,冯薪霖,等.土地资源生态安全研究综述[J].中国农学通报,2016,32(32):88-93.
Lu Wei, Zhao Yuan, Feng Xinlin, et al. A review of ecological security research on land resource [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,32(32):88-93.

[7] 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 Jun, Peng Yuqi, Huang Xuyang. 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.

[8] 鲁奇.中国耕地资源开发、保护与粮食安全保障问题[J].资源科学,1999,21(6):5-8.
Lu Qi. Some issues on the relationship between land resources development, production and food security [J]. Resources Science, 1999,21(6):5-8.

[9] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4): 313-319.
Fu Zeqiang, Cai Yunlong, Yang Youxiao, et al. Research on the relationship of cultivated land change and food security in China [J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(4):313-319.

[10] 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: 109619.

[11] 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(6): 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(6):68-73.

[12] 刘丽霞,孙晓霞.内蒙古耕地生态安全评价及障碍因子分析[J].内蒙古统计,2024(2):35-36.
Liu Lixia, Sun Xiaoxia. Evaluation of cultivated land ecological security and analysis of obstacles in Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Statistics, 2024(2): 35-36.

[13] 李朝仙,赵翠薇,谢人栋,等.基于三角模型的喀斯特地区土地生态安全动态评价:以贵州省遵义市为例[J].贵州农业科学,2018,46(5):135-138.
Li Chaoxian, Zhao Cuiwei, Xie Rendong, et al. Dynamic assessment of land ecologic security based on triangle model in karst region: A case study of Zunyi City, Guizhou Province [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018,46(5):135-138.

[14] 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 DPSIT-TOPSIS model [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Social Science Edition), 2021,23(2):80-85.

[15] 王立媛,张勇.甘肃省土地利用转型时空格局演化及多情景模拟[J].干旱区研究,2025,42(4):695-707.
Wang Liyuan, Zhang Yong. Evolution of spatiotemporal patterns and multiscenario simulation of land use transition in Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(4):695-707.

[16] 韩晓晨,刘雨婷.下辽河平原区耕地绿色利用效率的时空演化及影响因素研究[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):156-165.
Han Xiaochen, Liu Yuting. Spatial-temporal evolution and influencing factors of green utilization efficiency of cultivated land in lower Liaohe Plain [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 156-165.

[17] Wang Yafei, He Yao, Fan Jie, et al. Balancing urbanization, agricultural production and ecological integrity: A cross-scale landscape functional and structural approach in China [J]. Land Use Policy, 2024,141:107156.

[18] 吴宇欣,靳晓荷,徐冬梅,等.基于动态QCA中部地区耕地利用生态效率测度及其影响因素研究[J].江西农业学报,2025,37(9):109-118.
Wu Yuxin, Jin Xiaohe, Xu Dongmei, et al. Research on measurement of cultivated land use ecological efficiency and its influencing factors in central region based on dynamic QCA [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2025, 37(9):109-118.

[19] 宁晓菊,张丽君,秦耀辰,等.60年来我国主要粮食作物适宜生长区的时空分布[J].地球科学进展,2019,34(2):191-201.
Ning Xiaoju, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Temporal-spatial distribution of suitable areas for major food crops in China over 60 years [J]. Advances in Earth Science, 2019,34(2):191-201.

[20] 黄伟,孙宏勇,刘建兵,等.河北省盐碱地综合利用的现状、问题及建议[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(3):541-549.
Huang Wei, Sun Hongyong, Liu Jianbing, et al. Current situation, problems, and suggestions for comprehensive utilization of saline-alkali soil in Hebei Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3): 541-549.

[21] 付慧,刘艳军,孙宏日,等.京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J].地理科学进展,2020,39(12):1985-1998.
Fu Hui, Liu Yanjun, Sun Hongri, et al. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Progress in Geography, 2020, 39(12): 1985-1998.

[22] 李鹏山,杜振博,张超,等.京津冀地区耕地质量等别空间差异分析[J].农业机械学报,2017,48(2):150-157.
Li Pengshan, Du Zhenbo, Zhang Chao, et al. Space difference analysis of cultivated land quality grade in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 150-157.

[23] 李滢,刘盼超,赵建龙,等.河北省农产品国际竞争力评价及影响因素研究[J].北方园艺,2024(3):144-152.
Li Ying, Liu Panchao, Zhao Jianlong, et al. Evaluation and influencing factors of international competitiveness of agricultural products in Hebei Province [J]. Northern Horticulture, 2024(3): 144-152.

[24] 陈林生,胡雅文,胡若兰.农村数字化发展水平测度及演化趋势分析[J].统计与决策,2025,41(23):97-101.
Chen Linsheng, Hu Yawen, Hu Ruolan. Measurement of rural digital development level and analysis of its evolution trend [J]. Statistics & Decision, 2025, 41(23): 97-101.

[25] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio [J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515-531.

[26] 高登云,李杏,钱龙.中国粮食安全系统脆弱性:时空格局与空间相关性[J].统计与决策,2025,41(1):81-86.
Gao Dengyun, Li Xing, Qian Long. Vulnerability of food security system in China: Temporal and spatial pattern and spatial correlation [J]. Statistics & Decision, 2025, 41(1): 81-86.

[27] Huang Bo, Wu Bo, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 383-401.

[28] 袁零,杨庆媛.基于PSR框架的甘肃省环县耕地生态安全评价[J].西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(6):60-68.
Yuan Ling, Yang Qingyuan. Ecological security assessment of cultivated land in Huan County of Gansu Province based on PSR framework [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 44(6): 60-68.

[29] 张加磊.恩施州耕地生态安全评价及障碍因子研究[D].湖北 武汉:华中师范大学,2020.
Zhang Jialei. Study on ecological security evaluation and obstacle factors of cultivated land in Enshi Prefecture [D]. Wuhan, Hubei: Central China Normal University, 2020.

[30] 文高辉,袁泉,赵懿,等.2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2021,41(2):178-187.
Wen Gaohui, Yuan Quan, Zhao Yi, et al. Ecological security evaluation and obstacle factors diagnosis of cultivated land in Dongting Lake plain from 2007 to 2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 178-187.

[31] 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.
Han Lu, Song Ziyan. 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.

[32] 邓图南,鲁春阳.基于PSR模型的河南省耕地生态安全诊断[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(5):104-109.
Deng Tunan, Lu Chunyang. Diagnosis of ecological security of cultivated land in Henan Province based on PSR model [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(5): 104-109.

[33] 范树平,李鹏,余波平,等.粮食主产区耕地生态安全障碍诊断及调控策略[J].水土保持研究,2023,30(1):408-417.
Fan Shuping, Li Peng, Yu Boping, et al. Study on obstacle diagnosis and regulation strategy of cultivated land ecological security in main grain producing areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 408-417.

[34] 刘艳芳,安睿,曲胜秋,等.福建省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(11):121-132.
Liu Yanfang, An Rui, Qu Shengqiu, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis of the cultivated land in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(11): 121-132.