

汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全 耦合协调时空演变及其驱动因素

李曼, 王梦竹, 刘焕才, 王超, 菅凯

(山西师范大学 地理科学学院, 山西 太原 030031)

摘要: [目的] 探讨汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调的时空演变特征及驱动因素, 为提升汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调水平提供决策参考。[方法] 利用非期望产出超效率 SBM 模型和熵权法分别对 2005—2021 年汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全进行测度及时空特征分析, 在此基础上运用耦合协调度模型和参数最优地理探测器探讨了二者的耦合协调性及其驱动因素。[结果] ① 耕地利用碳排放效率各县差异明显, 大部分县区仍处于中低等效率。② 汾河流域粮食安全水平整体呈“上升—下降—上升”的趋势; 高值区主要集中在东北部以及南部地区, 低值区主要位于汾河流域上游、太原市区以及灵霍山峡地区。③ 汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调水平总体偏低, 空间上呈现“上游低、中下游高”的分布特征。处于失调衰退阶段的县区主要以碳排放效率滞后型为主, 处于过渡发展阶段的县区主要以粮食安全滞后型为主。④ 人均耕地面积、城市化率和人口规模是影响碳排放效率与粮食安全耦合协调水平的主要驱动因子。[结论] 汾河流域各县区应瞄准差异方向, 提升短板, 在优化耕地利用的同时加强农业科技支持与政策引导, 最终实现二者同步协调发展。

关键词: 耕地利用碳排放效率; 粮食安全; 耦合协调; 非期望产出超效率模型; 汾河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0262-10

中图分类号: S17, K90

文献参数: 李曼, 王梦竹, 刘焕才, 等. 汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 262-271. Li Man, Wang Mengzhu, Liu Huancai, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of coupling coordination between carbon emission efficiency of cultivated land use and food security in Fenhe River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 262-271. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.027; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.027.

Spatiotemporal evolution and driving factors of coupling coordination between carbon emission efficiency of cultivated land use and food security in Fenhe River basin

Li Man, Wang Mengzhu, Liu Huancai, Wang Chao, Jian Kai

(College of Geography, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolutionary characteristics and driving factors of coupling coordination between the carbon emission efficiency of cultivated land use and food security in the Fenhe River basin were explored, in order to provide decision-making references for improving the level of coupling coordination. [Methods] The undesired output super-efficiency SBM model and entropy weight method were used to measure the carbon emission efficiency and food security in the Fenhe River basin from 2005 to 2021. Next, the spatiotemporal characteristics were analyzed. On this basis, coupling coordination and its driving factors were discussed using the coupling coordination degree model and an optimal parameter-based geographic detector model. [Results] ① The carbon emission efficiency of cultivated land use varied significantly among counties; most counties still had mid-and low levels of efficiency. ② The level of food security in

收稿日期: 2024-10-18

修回日期: 2024-11-26

采用日期: 2024-11-26

资助项目: 2024 年度山西省新型智库专项课题“统筹汾河流域粮食安全与低碳农业协同发展的对策研究”(2024ZK033); 山西省自然科学研究面上项目“基于 WRF 模式的山西省区域极端强降水事件分类归因研究”(202403021221174)

第一作者: 李曼(1985—), 女(回族), 河南省鹤壁市人, 博士, 教授, 主要从事农业可持续发展的研究。Email: limansx@163.com.

通信作者: 王梦竹(2000—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 硕士研究生, 研究方向为耕地利用与粮食安全。Email: 1024031910@qq.com.

the Fenhe River basin showed a trend of “increase-decrease-increase.” The high-value areas were primarily concentrated in the northeast and southern regions, while the low-value areas were located mainly in the upper reaches of the Fenhe River basin, the urban area of Taiyuan City, and the gorge region of Linghuo Mountain. ③ The level of coupling coordination between carbon emission efficiency and food security in the Fenhe River basin was relatively low, showing a spatial distribution feature of “low in the upstream and high in the middle and lower reaches.” Counties in the stage of imbalanced degradation were mostly characterized by lagging carbon emission efficiency, while those in the phase of transitional development were chiefly characterized by lagging food security. ④ Per capita cultivated land area, urbanization rate, and population size were the primary driving factors affecting the level of coupling coordination between carbon emission efficiency and food security. [Conclusion] Counties in the Fenhe River basin should focus on differences, improve the short boards, and optimize cultivated land use while strengthening support for agricultural science as well as technological and policy-related guidance, ultimately achieving simultaneous and coordinated development of the two.

Keywords: carbon emission efficiency of cultivated land use; food security; coupling coordination; undesired output super-efficiency model; Fenhe River basin

中国作为农业大国,农业温室气体排放是仅次于工业的第二大碳源,排放量占亚洲农业总碳排放量的 29.01%,占世界总量的 12.54%^[1]。降低耕地利用过程中的碳排放已成为实现农业碳减排目标的关键,但过度追求农业减排必然会导致粮食安全受到威胁^[2]。

粮食安全是国家安全的基础,关乎国计民生与社会稳定,因此,确保粮食安全是农业部门追求“双碳”目标的前提。在粮食安全方面,学者们多从粮食生产时空格局变化及其影响因素^[3]、粮食生产效率^[4]等方面开展研究。随着中国水土供给约束日趋严峻以及人地关系日益紧张,部分学者从“系统”的角度分析水—能—粮^[5]、水—土—粮的关系^[6]。而针对耕地对粮食安全的影响研究主要聚焦在耕地面积与质量^[7]、耕地利用方式及种植结构变化^[8-9]等方面。随着气候变化、耕地资源有限、农业绿色低碳转型等多种因素的影响日趋深刻,寻求耕地利用碳排放效率与粮食安全之间的平衡点逐渐成为当前亟待解决的热点问题。目前开展低碳农业和粮食安全协调发展的研究主要围绕粮食主产区^[10-11]。例如,通过研究湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率耦合关系发现,二者整体趋于协调发展,但仍处于初级协调水平^[12]。也有部分学者围绕特殊地貌单元展开研究^[13]。例如,通过对喀斯特地貌广布的贵州省开展兼顾碳减排与粮食安全的山区耕地利用有效路径研究发现,化肥施用量是山区耕地碳减排的关键^[14]。而从流域尺度对粮食产销平衡区的低碳农业和粮食安全协调发展研究目前仍处于起步阶段。

汾河流域作为中国粮食产销平衡区的重要组成部分、山西省粮食生产主要区域,农业生产活动频繁。汾河流域以 28.85%的耕地面积养育着全省 43.11%的人口,若盲目通过增加农药、化肥等生产要素投入

提高粮食产量,耕地利用碳排放量将会持续增加,但若过度追求碳减排目标也将使粮食安全受到严重威胁。因此,本研究以汾河流域县级行政单元为研究对象,探究 2005—2021 年耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调的时空特征,并利用参数最优地理探测器探究其驱动因素,以期为汾河流域各县区实现农业低碳协调发展提供科学建议。

1 研究区概况、数据来源与方法

1.1 研究区概况

汾河流域位于 111°30'E—111°32'E, 35°20'N—39°00'N 之间,包括山西省的忻州、太原、晋中、吕梁、临汾以及运城 6 个地市,40 个县级行政单元,流域面积为 3.97×10^4 km²,约占全省总面积的 1/4,以太原市上兰村和洪洞县石滩村为界,将流域分为上、中、下游^[15](图 1)。流域内年平均气温、降水量由南向北递减,分别在 5.31~14.40 °C, 364.75~562.59 mm 之间,属温带大陆性气候。在水热条件等因素的影响下,当地种植业发展条件较好,耕地面积达到 1.66×10^4 km²,占流域面积的 41.81%,主要集中在汾河谷地等区域,所种植的粮食作物以小麦、玉米为主。近年来,受农业生产中化肥、农用柴油、农膜和农药投入量不断增加等因素影响,粮食产量由 2005 年的 3.49×10^6 t 增长至 2021 年的 4.76×10^6 t,使得在耕地利用过程中产生的碳排放量大幅增加。

1.2 数据来源

自 2005 年起,随着“两减免三补贴”等农业增产政策的刺激,农业生产要素投入成为增加粮食产量的主要动力源,本文以此为研究背景,探究耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调关系。测算耕地利用碳排放效率、粮食安全以及驱动因素的数据包括:①农业

生产数据包括化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜、有效灌溉面积等农资投入量、粮食播种面积、粮食产量、农业从业人口、农业总产值以及农林牧渔总产值。②社会经济发展数据包括人均 GDP 值、农民人均纯收入、城镇人口以及总人口。上述数据主要来源于山西统计年鉴(2006—2022 年),少量缺失数据通过各地级市统计年鉴和实地考察等方式进行补充。此外,耕地面积数据来源于《1990—2021 年中国 30 m 年度土地覆盖数据》^[16];DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m;年降水量数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

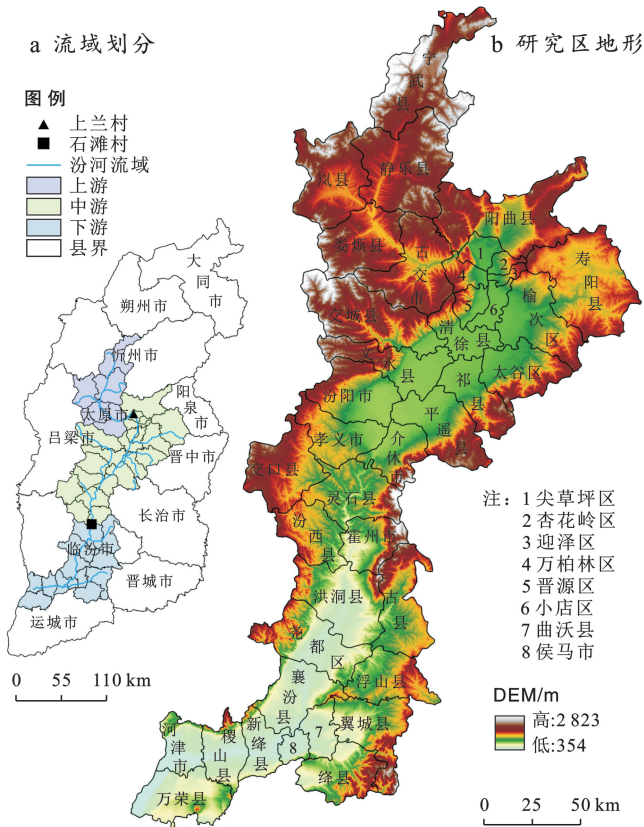


图 1 汾河流域划分及研究区地形图

Fig.1 Zoning of Fenhe River basin and topography of study area

1.3 指标体系构建

耕地利用碳排放效率反映投入资源—社会经济—生态环境三者的协调统一,期望在耕地利用过程中以最合理化生产要素投入实现期望产出的最大化以及环境污染的最小化^[2]。本文借鉴相关研究成果^[17],确定耕地利用碳排放效率测算指标包括以下三个方面:投入指标选取劳动力、农业机械劳动力、农作物播种面积、化肥、农药、农膜、柴油和灌溉 8 个要素;期望产出指标选取粮食产量;非期望产出指标选取耕地利用碳排放量。

粮食生产活动由生产方式、生产要素投入与生产资源组成。本文根据汾河流域自然条件以及粮食生产活动条件,遵循系统性、科学性、指导性和可操作性等原则,从数量安全、质量安全和资源安全 3 个方面构建粮食安全评价指标体系(表 1)^[18-19]。其中,粮食播种面积、粮食单产水平等生产方式是影响数量安全的重要指标;化肥、农药和薄膜等生产要素投入是影响质量安全的重要指标;农业从业人口、灌溉面积等生产资源是影响资源安全的重要指标。本文将采用熵权法对汾河流域粮食安全水平进行测度^[20]。

表 1 汾河流域粮食安全评价指标体系
Table 1 Indicator system evaluation of food security in Fenhe River basin

准则层	指标层	属性	权重
数量安全 (0.342 7)	粮食播种面积/ hm^2	正	0.126 2
	粮食单产水平/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	正	0.057 1
	人均粮食占有量/ $(\text{kg} \cdot \text{人}^{-1})$	正	0.149 6
	粮食生产波动系数/%	负	0.009 8
质量安全 (0.071 6)	化肥施用量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负	0.023 5
	农药施用量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负	0.029 4
	农膜施用量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	负	0.018 7
资源安全 (0.585 7)	农业从业人口(人)	正	0.115 3
	有效灌溉面积比例/%	正	0.181 2
	人均耕地面积/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	正	0.138 8
	农用机械总动力(kW)	正	0.150 4

1.4 研究方法

1.4.1 碳排放系数法 耕地利用碳排放是指耕地资源利用过程中因农业生产活动产生的直接或间接的温室气体碳排放^[21]。本文根据汾河流域农业生产现状及相关文献^[22],将碳源分为 3 类:①化肥、农药和农用薄膜投入产生的碳排放。②农机在农业生产中使用柴油产生的碳排放。③翻耕行为以及灌溉所消耗电能导致的碳排放。运用碳排放系数法,测算汾河流域耕地利用碳排放总量公式为^[23]:

$$Z = \sum Z_i = \sum (\delta_i \times T_i) \quad (1)$$

式中: Z 为耕地利用碳排放总量; Z_i 为 i 类碳源碳排放量; δ_i 为 i 类碳源碳排放系数(表 2); T_i 为对应 i 类碳源的量。

表 2 汾河流域耕地利用碳排放系数
Table 2 Carbon emission coefficients for cultivated land use in Fenhe River basin

碳源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.895 6 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农药	4.934 1 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农用柴油	0.592 7 kg/kg	政府间气候变化专门委员会(IPCC)
农用薄膜	5.180 0 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
翻耕	3.126 0 kg/hm ²	中国农业大学生物与技术学院
灌溉	19.857 5 kg/hm ²	伍国勇等 ^[24]

1.4.2 非期望产出超效率 SBM 模型 非期望产出超效率 SBM 模型可有效解决忽略非期望产出而导致碳排放效率评价结果的偏差问题,并能够对效率值为 1 的决策单元进一步区分^[25]。本文利用该模型测算耕地利用碳排放效率值,其模型表达式为^[26]:

$$\rho = \min \left[1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{s_i^x}{x_{io}} \right) \right] / \left[1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{ko}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{lo}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{io} \geq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j x_j - s_i^x, \forall i; \\ y_{ko} \leq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j y_j + s_k^y, \forall k; \\ z_{lo} \geq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j z_j - s_l^z, \forall l; \\ 1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{ko}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{lo}} \right) > 0; \\ s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_l^z \geq 0, \lambda_j \geq 0, \forall (i, j, k, l) \end{cases}$$

式中: m, s_1, s_2 分别表示投入、期望产出和非期望产出的指标数量; s_i^x, s_k^y, s_l^z 分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; x_{io}, y_{ko}, z_{lo} 分别表示第 o 个决策单元同时期投入、期望产出和非期望产出值; n

为决策单元个数; λ 为其权重向量; ρ 为耕地利用碳排放效率值。

1.4.3 耦合协调度模型 本文选用耦合协调度模型计算耕地利用碳排放效率和粮食安全两个系统的协调发展程度,同时利用相对发展度模型识别两个系统耦合协调的障碍因素及未来优化方向。参考文献^[27],分别对耦合协调度、相对发展度进行划分(表 3)。计算公式为:

$$C = 2 \sqrt{\frac{u_1 u_2}{(u_1 + u_2)^2}} \quad (3)$$

$$T = \alpha u_1 + \beta u_2 \quad (4)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (5)$$

$$E = \frac{u_1}{u_2} \quad (6)$$

式中: C 为耦合度,表示系统之间耦合作用的强弱程度; u_1 和 u_2 分别为耕地利用碳排放效率和粮食安全的评价指数; T 为综合协调指数; α 和 β 是待定系数,两者地位同等重要,因此本文均赋值 0.5^[11]; D 为耦合协调度,反映两者之间的综合协调水平; E 为相对发展度。

表 3 汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调发展阶段划分
Table 3 Stages of coupling coordination development of carbon emission efficiency of cultivated land use and food security in Fenhe River basin

耦合协调度(D)	耦合协调等级	相对发展度(E)	耦合协调相对发展类型
$0 \leq D \leq 0.4$	失调衰退(I)	$0 < E \leq 0.8$	耕地利用碳排放效率滞后于粮食安全(I ₁)
		$0.8 < E \leq 1.2$	耕地利用碳排放效率同步于粮食安全(I ₂)
		$E > 1.2$	粮食安全滞后于耕地利用碳排放效率(I ₃)
$0.4 < D \leq 0.6$	过渡发展(II)	$0 < E \leq 0.8$	耕地利用碳排放效率滞后于粮食安全(II ₁)
		$0.8 < E \leq 1.2$	耕地利用碳排放效率同步于粮食安全(II ₂)
		$E > 1.2$	粮食安全滞后于耕地利用碳排放效率(II ₃)
$0.6 < D \leq 1.0$	协调发展(III)	$0 < E \leq 0.8$	耕地利用碳排放效率滞后于粮食安全(III ₁)
		$0.8 < E \leq 1.2$	耕地利用碳排放效率同步于粮食安全(III ₂)
		$E > 1.2$	粮食安全滞后于耕地利用碳排放效率(III ₃)

1.4.4 参数最优地理探测器 地理探测器在对连续性变量进行离散化处理时一般由经验确定,缺乏准确的定量评估,为了解决这一问题,Song Yongze 等^[28]提出了一种基于参数最优的地理探测器(OPGD)模型,该模型可以帮助我们对比不同离散方法的 q 值,并自动选择 q 值最大,分区效果最好的离散方式,为准确探讨耕地利用碳排放效率和粮食安全耦合协调度的驱动因素提供科学依据。本文运用单因子及交互探测判断不同驱动因子对耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调度的解释程度及交互作用程度。计算公式为^[29]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式中: q 表示驱动因子的解释力,取值范围为 $[0, 1]$,其值越大,解释力越强; N, σ 分别表示样本数和方差; N_h, σ_h 表示第 h 层样本数与样本方差。

2 结果与分析

2.1 汾河流域耕地利用碳排放及其效率的时空特征

2005—2021 年,汾河流域耕地利用碳排放总量整体上呈先升后降的趋势(图 2),其中,2005—2014 年,随着各项惠农政策的执行,农民种粮积极性大幅增强,但形成了“高投入,高产出,高排放”的耕地利用发展格局,受此影响,碳排放量由 49.15×10^4 t 上升至 59.89×10^4 t,增长率达到 21.87%。随着 2015 年《到 2020 年化肥、农药使用量零增长行动方案》和

2017年“深入推进农业供给侧结构性改革”等低碳农业政策的实施,农业生产中农资投入大幅减少,并推动了当地低碳农业高质量发展,2015—2021年耕地利用碳排放总量大幅下降,下降率达到16.49%,其中,化肥和农药的碳排放量分别减少13.37%和28.51%。

从汾河流域耕地利用碳排放总量的空间格局特征来看(图3a),碳排放量高值区主要集中在汾河流域东部和南部,这些区域主要流经太原盆地和临汾盆地,自然资源禀赋优越,粮食产出较高,粮食增产仍主要依赖于高碳农资投入,碳排放量较高。由于上游地区的生态保护政策约束农业发展、地处中游的太原市区农业比重较小、灵霍山峡地区地势起伏较大,不利于农业生产,因此,碳排放量低值区主要集中在流域上游、太原市区和灵霍山峡地区。

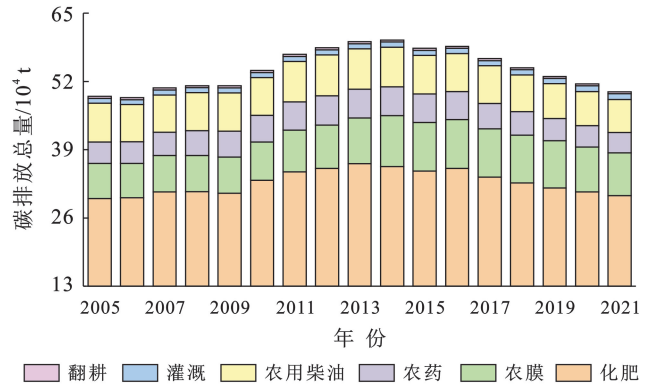


图2 2005—2021年汾河流域耕地利用碳排放总量和碳排放结构

Fig.2 Total carbon emission and carbon emission structure of cultivated land use in Fenhe River basin from 2005 to 2021

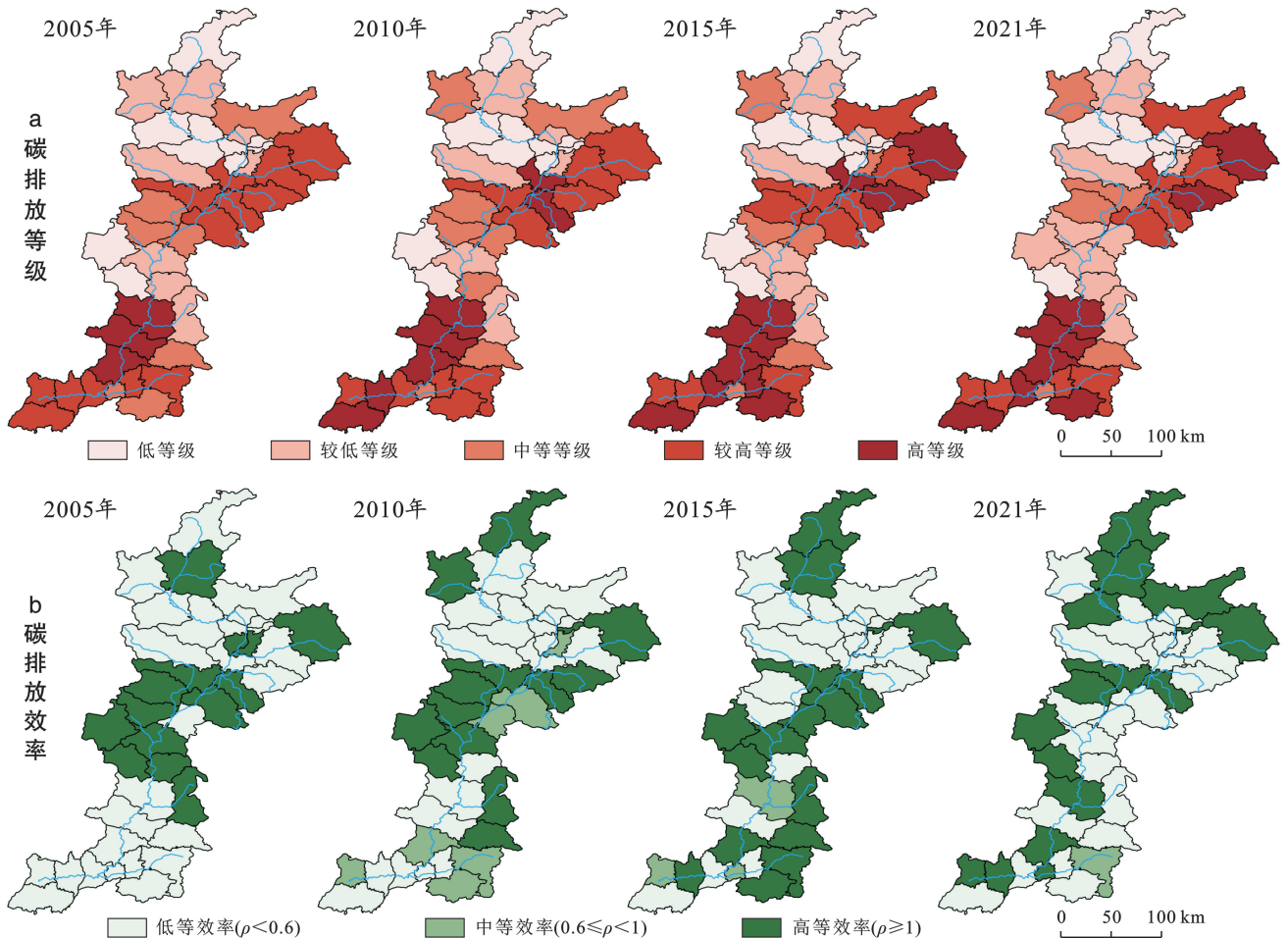


图3 2005—2021年汾河流域耕地利用碳排放总量(a)及碳排放效率(b)空间格局演变

Fig.3 Spatial pattern evolutions of total carbon emissions (a) and carbon emission efficiency (b) from cultivated land use in Fenhe River basin from 2005 to 2021

从不同县区耕地利用过程中碳排放冗余量的空间差异情况来看(图3b),各县区的耕地利用碳排放效率值存在明显时空差异,且大部分县域仍处于中低等效率,各种投入的低效利用和环境约束是导致耕地利用碳排放效率未达到理想水平的主要原因。上游

地区因自然条件不利于农业大规模种植,且汾河源头的污染管理严格,投入和非期望产出方面冗余较少,使得碳排放效率较高。地处中游的太原市区及周边县区由于耕地面积较少,农药、化肥等生产要素的投入较大,使得碳排放强度高于流域平均水平,碳排放

效率总体较低。此外,部分县区的耕地碳排放效率变化明显。例如,2005—2015年中游南部县区多为高效率,但汾阳、孝义、平遥和介休等县区波动明显;受绿色农业政策的影响,2015—2021年中游、下游流域以东部分县区农资投入、碳排放总量和粮食产量均有所减少,因此碳排放效率下降。

2.2 汾河流域粮食安全时空特征

从汾河流域粮食安全的时间变化特征来看(图4),在中国2005年“两减免,三补贴”扶农惠农政策、2015年化肥农药使用量零增长行动以及2019年《中国的粮食安全》白皮书的影响下,2005—2021年汾河流域粮食产量波动明显,数量安全子系统呈现“升—降—升”的趋势;质量安全子系统整体水平不高,2015年后有所提升,呈“先降后升”的态势;随着城镇化的加快,人均耕地面积和农业从业人口均有所下降,但随着农业新技术的推广应用,有效灌溉面积和农用机械动力呈上升趋势,使得资源安全子系统呈“先降后升”的趋势。

整体来看,数量安全子系统的波动更为明显。2005—2021年汾河流域粮食安全水平呈“上升—下降—上升”的趋势,其中,2019年干旱、寒潮和暴雨等灾害天气更为频繁,导致粮食产量比2018年减产16.82%,粮食安全水平降至最低。

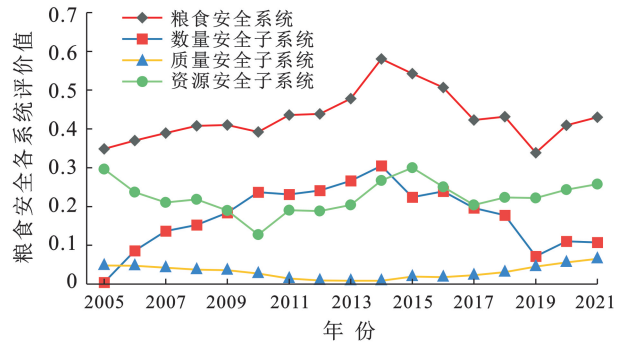


图4 2005—2021年汾河流域粮食安全各系统评价值
Fig.4 Evaluating value of food security systems in Fenhe River basin from 2005 to 2021

从汾河流域粮食安全的空间差异特征来看(图5),2005—2015年,汾河流域粮食安全等级有所提升,高值区主要集中在东北部及南部地区,优越的粮食生产环境是影响粮食产量提升的主要原因;受耕地质量欠佳、耕地资源稀缺等本底条件影响,低值区主要位于在汾河流域上游、太原市区以及灵霍山峡地区。2015—2021年,由于在发展过程中未协调好数量安全和质量安全之间的矛盾,汾河流域粮食安全等级有所下降,其中,太谷区、祁县、平遥县、尧都区、翼城县等地由安全级下降为基本安全级,侯马市由临界安全级下降为不安全级。

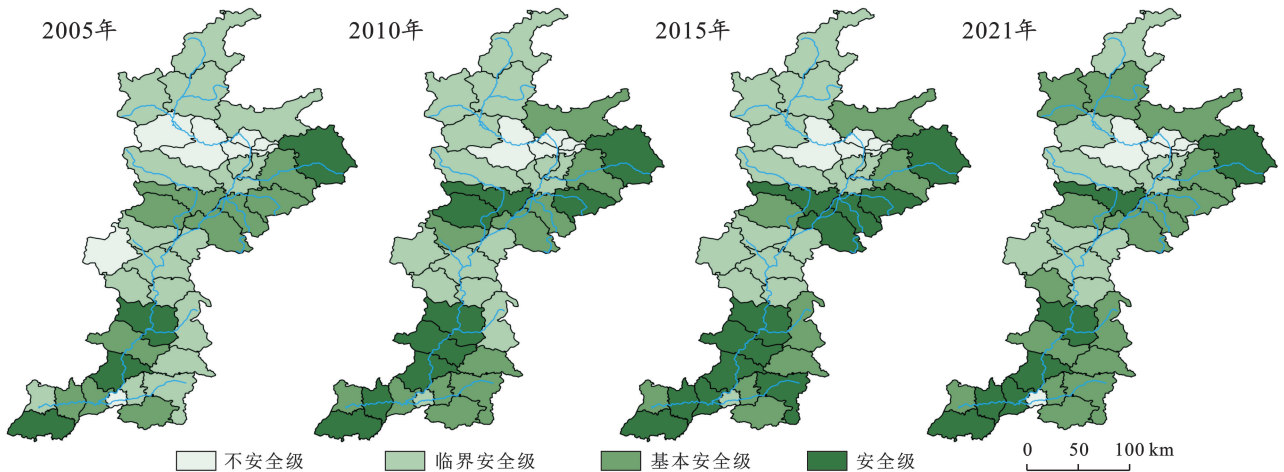


图5 2005—2021年汾河流域粮食安全空间格局演变

Fig.5 Spatial pattern evolution of food security in Fenhe River basin from 2005 to 2021

2.3 汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调时空特征

汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调水平总体偏低,其中,失调衰退阶段县区主要集中在上游及太原市,过渡发展阶段县区主要集中在中下游地区,协调发展阶段县区较少,仅在中下游的寿阳县、襄汾县、稷山县等地的个别年份中出现(图6a);2017年以来,中下游的曲沃县、尧都区等部分县区在

耕地利用低碳转型过程中,耕地利用碳排放效率与粮食安全水平明显下降,耦合协调程度由过渡发展阶段下降为失调衰退阶段。此外,随着当地政府对汾河流域源头水污染治理工作的开展,自2019年宁武县、静乐县等上游县区碳排放效率明显提升,耦合协调程度由失调衰退阶段向过渡发展阶段转变。

在汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全的相对发展类型中,处于失调衰退阶段的县区主要以碳

排放效率滞后型为主;处于过渡发展阶段的县区主要以粮食安全滞后型为主;处于协调发展阶段的县区主要以同步发展为主,同时,耕地利用碳排放效率与粮食安全的相对发展水平存在明显时空差异(图 6b),其中,2005—2021 年,地处汾河流域中游的太原市辖区农业生产空间较小,总体表现为粮食安全滞后于碳排放效率(I_3),除太原市辖区外的其他中游县区的

耦合协调水平实现了层级跨越,但仍表现为粮食安全滞后于碳排放效率(II_3);地处汾河流域下游的古县、浮山县、绛县等县区和灵霍山峡地区在化肥农药减量政策实施初期,人们的认知水平较低,从而造成自 2019 年以来农业生产过程中的资源利用效率降低和粮食产量下降,继而表现为由粮食安全滞后向碳排放效率滞后转变。

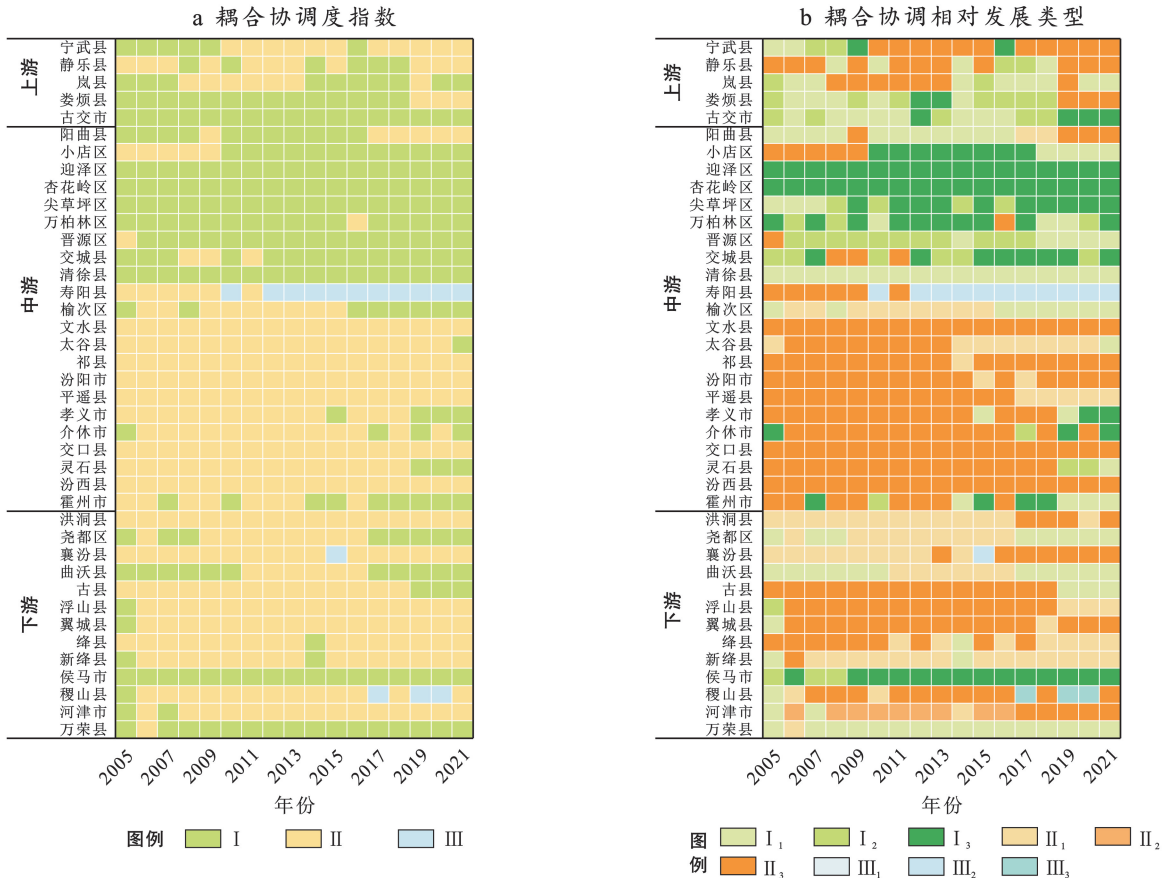


图 6 2005—2021 年汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调指数(a)及相对发展类型(b)

Fig.6 Coupled coordination index of carbon emission efficiency of cultivated land use and food security (a) and relative development types (b) in Fenhe River basin from 2005 to 2021

2.4 汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调影响因素

在已有研究的基础上^[12,30],本文驱动因子选取高程(X_1)、年平均降水量(X_2)、农民人均纯收入(X_3)、人均 GDP(X_4)、城市化率(X_5)、人口规模(X_6)、农业产业结构(X_7)、农业机械动力(X_8)、复种指数(X_9)和人均耕地面积(X_{10})。

总体来看,影响汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调水平的主要驱动因子为人均耕地面积、城市化率和人口规模(表 4)。人均耕地面积的增加有利于提升耕地利用规模化、专业化和机械化水平,从而为提高耕地利用碳排放效率和粮食安全水平提供保障。城镇化进程的加快可以通过农业科技提升提升耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调水

平,但同时也可能造成耕地减少和劳动力向非农产业转移等问题,对二者耦合协调程度造成潜在威胁,人口规模扩大导致粮食需求显著增加,农民为提高粮食产量往往会加大化肥农药的施用量,导致耕地利用碳排放量大增加,最终影响粮食安全。

不同年份同一驱动因子对汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调水平的解释力存在差异。农业产业结构的解释力持续下降,在当地农业发展初期主要依靠农资投入支撑产量增长,随着农业技术的不断进步和绿色农业政策的逐步推广,农业产业结构趋向合理,农业机械动力的解释力整体呈上升趋势,农业机械的广泛使用已成为当下提高农业生产效率的重要手段,但同时也会增加能源的消耗从而影响碳排放量;受厄尔尼诺现象影响,2015 年汾河流域年

平均降水量较 2010 年下降 4.43%，导致灌溉投入增加 3.46%，受此影响，年平均降水量在 2015 年的解释力较强，而在其他年份解释力较弱。

通过因子交互探测发现，不同驱动因子对耦合协调度的驱动作用主要表现为双因子增强或非线性增强特征，表明耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调度是受多种因素综合影响的结果。

表 4 2005—2021 年汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调度驱动因子探测结果

Table 4 Driver detection results of coupling coordination index of carbon emission efficiency of cultivated land use and food security in Fenhe River basin from 2005 to 2021

驱动因子	q 值			
	2005 年	2010 年	2015 年	2021 年
X_1	0.162	0.165	0.176	0.238
X_2	0.383*	0.380*	0.514**	0.367
X_3	0.384	0.443***	0.604****	0.414***
X_4	0.360	0.394	0.297*	0.271
X_5	0.516**	0.545****	0.530****	0.564****
X_6	0.482****	0.508**	0.500**	0.497**
X_7	0.511**	0.359	0.314**	0.258
X_8	0.350**	0.425	0.448**	0.438**
X_9	0.407**	0.231**	0.273	0.450**
X_{10}	0.471*	0.601****	0.547****	0.590****

注：*，**，***，**** 分别表示 10%，5%，1% 的显著性水平。

3 讨论

气候变化引起的农业气候资源与农业生产环境的变化已经对农作物的产量、品质和种植结构等产生了严重影响。本文将属于粮食产销平衡区的汾河流域作为典型研究区，开展耕地利用碳排放效率与粮食安全耦合协调关系的研究，可为当地实现低碳农业与粮食安全协同发展提供科学指导。目前，众多学者对粮食主产区开展的研究结果均表现为碳排放效率与粮食安全趋向协调发展^[10-12]，而本文对汾河流域的研究发现，由于低碳农业等政策执行的滞后性以及粮食产销平衡区较粮食主产区在农业资源禀赋、农业生产技术等方面的相对劣势，使得自 2017 年以来汾河流域出现碳排放效率与粮食安全协调水平呈下降趋势。但长期来看，随着相关政策的高效执行以及农业科学技术的普及，二者耦合协调水平有望提高。

为有效提升汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调程度，结合本文研究结果，提出以下几点对策与建议。

(1) 明确不同地区耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调发展方向，实行差异化治理。上游的县区应重点优化种植结构，确保农业生产与生态环境相协调；太原市区层级跨越的实现，需要从长期考虑

产业转型升级，发展都市现代农业；中下游的县区应通过提升自身短板，提高整体发展同步性。

(2) 处于耕地利用碳排放效率滞后型的县区应通过测土配方，使用环保肥料，发展新能源等环境友好型技术高效利用投入资源，减少各项农资投入和耕地利用碳排放冗余量，做到减量增效；处于粮食安全滞后型的县区应优化农业生产结构，集成推广良田良种良机良法，持续提升粮食单产，做到增产提质；处于同步发展的县区应进一步优化和提升相关举措，实现层级跨越。

(3) 加强规划引导，制定科学政策有效化解城镇化、人口需求和耕地保护之间的矛盾；充分利用科技创新成果以加快形成农业新质生产力推动低碳农业高质量发展，降低农业机械动力对耦合协调水平的负向影响。

4 结论

本文采用耦合协调度模型和参数最优地理探测器探究 2005—2021 年汾河流域耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调水平及其驱动因素，得到以下主要结论。

(1) 汾河流域耕地利用碳排放总量呈现先增加后减少的趋势。高值区主要集中在流域的东北部和南部；各县区的耕地利用碳排放效率差异明显，其中，太原市区及其周边县区、流域中游和下游以东的部分县区仍处于中低等效率。

(2) 时间尺度上，汾河流域粮食安全水平波动明显，总体呈“上升—下降—上升”趋势；受粮食生产环境等因素的影响，在空间上表现出“东北和南部高，西北和中部低”的特征。

(3) 人均耕地面积、城市化率和人口规模是影响耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调水平的主要因素。

(4) 汾河流域的耕地利用碳排放效率与粮食安全的耦合协调水平总体偏低，但存在明显的空间差异，呈现“上游低，中下游高”的分布特征；从相对发展水平来看，耕地利用碳排放效率与粮食安全的相对发展水平呈现一定的波动性，尤其在推行农业减排行动后，波动较为明显，可见二者仍处于磨合阶段。因此，未来应在优化耕地利用的同时，加强农业科技支持与政策引导，以推动耕地利用碳排放效率与粮食安全的协调发展。

参考文献 (References)

- [1] 田成诗,陈雨.中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价:基于衍生指标与 TOPSIS 法的运用[J].自然资源学报,2021,36(2):395-410.

- Tian Chengshi, Chen Yu. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSIS [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 395-410.
- [2] 刘蒙罢, 张安录, 文高辉. 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率区域差异与空间收敛[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2): 477-493.
- Liu Mengba, Zhang Anlu, Wen Gaohui. Regional differences and spatial convergence in the ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the Yangtze Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(2): 477-493.
- [3] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 等. 近 20 年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1413-1425.
- Liu Zhengjia, Zhong Huimin, Li Yurui, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1413-1425.
- [4] 王金伟, 孙洁, 雷婷, 等. 中国粮食生产效率与旅游发展的耦合机制及时空分异[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(10): 2651-2671.
- Wang Jinwei, Sun Jie, Lei Ting, et al. Coupling mechanism and spatiotemporal differentiation between grain production efficiency and tourism development in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(10): 2651-2671.
- [5] 郝帅, 孙才志, 翟小清. 中国水资源—能源—粮食系统效率时空格局及影响因素[J]. *地理学报*, 2024, 79(9): 2389-2406.
- Hao Shuai, Sun Caizhi, Zhai Xiaoqing. Spatio-temporal pattern and influencing factors of efficiency of water-energy-food system in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(9): 2389-2406.
- [6] 李长松, 周霞, 周玉玺. 黄河下游水土匹配系数与粮食生产协调发展测度及影响因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(10): 177-185.
- Li Changsong, Zhou Xia, Zhou Yuxi. The characteristics and influencing factors of coupling coordination between water-soil matching coefficient and grain production in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(10): 177-185.
- [7] 张鹏岩, 庞博, 何坚坚, 等. 耕地生产力与粮食安全耦合关系与趋势分析: 以河南省为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(9): 1392-1402.
- Zhang Pengyan, Pang Bo, He Jianjian, et al. Coupling relationship and trend of cultivated land productivity and food security: A case study of Henan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(9): 1392-1402.
- [8] 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.
- [9] 王成, 梁鑫, 豆浩健, 等. 乡村多元价值实现视角下的耕地“非粮化”演变及其驱动机制: 以重庆市为例[J]. *经济地理*, 2023, 43(4): 144-153.
- Wang Cheng, Liang Xin, Dou Haojian, et al. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of non-grain cultivated land for rural multi-value realization: A case study of Chongqing [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(4): 144-153.
- [10] 杨青林, 赵荣钦, 赵涛, 等. 县域尺度农业碳排放效率与粮食安全的关系[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(2): 156-169.
- Yang Qinglin, Zhao Rongqin, Zhao Tao, et al. Relationship between agricultural carbon emission efficiency and food security at county scale [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2): 156-169.
- [11] 杨晨, 张燕媛. 粮食主产区农业碳排放效率与粮食安全耦合研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(7): 12-27.
- Yang Chen, Zhang Yanyuan. Study on the coupling of agricultural carbon emission efficiency and food security in major grain-producing areas [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(7): 12-27.
- [12] 卢新海, 崔海莹, 柯善淦, 等. 湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率的耦合协调及其驱动机制研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(8): 75-84.
- Lu Xinhai, Cui Haiying, Ke Shangan, et al. Coupling coordination and driving mechanism of green transition of farmland use and total factor productivity of grain in Hubei Province [J]. *China Land Science*, 2022, 36(8): 75-84.
- [13] 陈波, 刘芮羽, 高明英. 山区耕地利用碳排放与粮食安全的耦合协调研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(5): 106-116.
- Chen Bo, Liu Ruiyu, Gao Mingying. Study on the coupling and coordination of carbon emissions from cultivated land use and food security in mountainous areas [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(5): 106-116.
- [14] 陈波, 刘芮羽, 何兆雄, 等. 兼顾碳减排与粮食安全的山区耕地利用路径探索[J]. *地理科学进展*, 2024, 43(7): 1372-1388.
- Chen Bo, Liu Ruiyu, He Zhaoxiong, et al. Pathways of cropland use in mountainous areas balancing carbon emission reduction and food security [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(7): 1372-1388.
- [15] 李振涵, 李静文, 于洪伟, 等. 汾河流域水生态环境保护与可持续发展策略研究[J]. *环境科学学报*, 2024, 44

- (8):1-11.
- Li Zhenhan, Li Jingwen, Yu Hongwei, et al. Research on water ecological environment protection and sustainable development strategy of Fen River basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024,44(8):1-11.
- [16] 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*, 2021,13(8):3907-3925.
- [17] 刘传明,范观宇,毛广雄,等.近 20 年淮河生态经济带粮食生产效率时空变化与影响因素[J].*自然资源学报*, 2023,38(3):707-720.
- Liu Chuanming, Fan Guanyu, Mao Guangxiong, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of grain production efficiency in Huaihe eco-economic belt in recent 20 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023,38(3):707-720.
- [18] 罗海平,王佳铖,胡学英,等.粮食主产区粮食安全与生态安全脆弱性耦合研究[J].*统计与信息论坛*, 2023,38(7):117-128.
- Luo Haiping, Wang Jiacheng, Hu Xueying, et al. Study on coupling of vulnerability of food security and ecological security in major grain producing areas [J]. *Journal of Statistics and Information*, 2023,38(7):117-128.
- [19] 雷勋平, Ronbin Qiu. 基于熵权 TOPSIS 模型的中国粮食安全评价及障碍因子诊断[J].*中国农业大学学报*, 2022,27(12):1-14.
- Lei Xunping, Qiu R. Evaluation of food security in China based on entropy TOPSIS model and the diagnosis of its obstacle factors [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022,27(12):1-14.
- [20] 刘现,王儒桐,张凤,等.西南地区粮食安全评价研究[J].*西南大学学报(自然科学版)*, 2024,46(2):115-124.
- Liu Xian, Wang Rutong, Zhang Feng, et al. Research on evaluation of food security in Southwest China [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024,46(2):115-124.
- [21] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等.中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J].*中国土地科学*, 2019,33(12):45-54.
- Ding Baogen, Yang Shuwang, Zhao Yu, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China [J]. *China Land Science*, 2019,33(12):45-54.
- [22] 田云,尹恣昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J].*中国农村经济*, 2022(3):104-127.
- Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3):104-127.
- [23] 李波,张俊鹰,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] 伍国勇,孙小钧,于福波,等.中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J].*中国人口·资源与环境*, 2020,30(5):46-57.
- Wu Guoyong, Sun Xiaojun, Yu Fubo, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020,30(5):46-57.
- [25] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis [J]. *Management Science*, 1993,39(10):1261-1264.
- [26] 张子晴,张道军,陈亮,等.黄河流域城镇化与耕地利用生态效率的耦合协调度评价、时空特征及驱动因素[J].*农业工程学报*, 2024,40(16):240-250.
- Zhang Ziqing, Zhang Daojun, Chen Liang, et al. Coupling coordination evaluation, spatiotemporal characteristics and driving factors between urbanization and cultivated land use ecological efficiency in the Yellow River basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024,40(16):240-250.
- [27] 王振宇,周玉玺.中国粮食主产区碳排放效率与粮食增产协调发展研究[J].*地理与地理信息科学*, 2024,40(4):102-108.
- Wang Zhenyu, Zhou Yuxi. Coordinated development of carbon emission efficiency and grain yield increase in China's major grain-producing areas [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2024,40(4):102-108.
- [28] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020,57(5):593-610.
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*, 2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [30] 匡兵,范翔宇,卢新海.中国耕地利用绿色转型效率的时空分异特征及其影响因素[J].*农业工程学报*, 2021,37(21):269-277.
- Kuang Bing, Fan Xiangyu, Lu Xinhai. Spatial-temporal differentiation characteristics of the efficiency of green transformation of cultivated land use and its affecting factors in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(21):269-277.