

# 塔里木河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调及其驱动因素

付文凯<sup>1</sup>, 韩博宇<sup>2</sup>, 马瑛<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学 公共管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 吉林艺术学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** [目的] 分析资源环境双重约束下, 塔里木河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率的耦合协调关系及其驱动因素时空演变, 为该流域农业绿色转型提供理论依据。[方法] 基于耕地利用和粮食生产数据, 结合碳排放和面源污染系数, 运用熵值法、Super-EBM 和耦合协调度模型探究塔里木河流域 2000—2021 年耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调水平的时空演变趋势, 并借助时空地理加权回归模型分析其驱动因素。[结果] ① 研究期内塔里木河流域各地州耕地利用绿色转型和粮食绿色全要素生产率普遍处于高度耦合阶段, 协调度总体偏低, 协调类型从一般协调转变为良好协调, 耦合协调度总体呈上升趋势, 均值由 0.643 上升到 0.872, 增幅为 35.6%, 耦合协调类型从初级协调发展为良好协调。② 空间上, 耦合协调水平呈现中部高、东西低的分布特征, 地区差异呈现波动变化趋势。③ 驱动因素具有阶段性特征, 自然因素由负转正并波动变化, 经济因素由正向转为负向驱动, 社会因素则经历正负交替波动。[结论] 建议塔里木河流域响应农业绿色发展理念, 实施空间适配性治理策略, 促进技术-制度协同创新, 推动耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调发展。

**关键词:** 耕地利用绿色转型; 粮食绿色全要素生产率; 耦合协调度模型; 时空地理加权回归模型; 城镇化率; 塔里木河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0384-12

中图分类号: F301.24

**文献参数:** 付文凯, 韩博宇, 马瑛. 塔里木河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 384-395. Fu Wenkai, Han Boyu, Ma Ying. Coupling coordination and driving factors of green transition of farmland use and green total factor productivity of grain in Tarim River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 384-395. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.033; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.033.

## Coupling coordination and driving factors of green transition of farmland use and green total factor productivity of grain in Tarim River basin

Fu Wenkai<sup>1</sup>, Han Boyu<sup>2</sup>, Ma Ying<sup>1</sup>

(1. School of Public Administration, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Jilin Art Institute, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** [Objective] The coupling and coordination relationship between green transition of farmland use and green total factor productivity of grain under the dual constraints of resources and environment, as well as the spatiotemporal evolution of driving factors were analyzed, in order to provide theoretical support for agricultural green transition in the region. [Methods] Based on arable land use and grain production data, combined with carbon emissions and non-point source pollution coefficients, the spatiotemporal evolution trend of the coupling coordination level of green transition of farmland use and green total factor productivity of grain in the Tarim River basin from 2000 to 2021 was analyzed using the entropy method, Super-EBM model, and coupling coordination degree model. The driving factors were analyzed using spatiotemporal geographically weighted regression model. [Results] ① During the study period, the green transition of farmland use and green total factor productivity of

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-07-12

采用日期: 2025-07-14

资助项目: 新疆维吾尔自治区社会科学基金项目“新疆农业绿色转型的动力机制及运行路径研究”(2023BGL071); 新疆维吾尔自治区研究生教育创新计划项目“塔里木河流域耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率耦合协调及其驱动机制研究”(XJ2024G130)

第一作者: 付文凯(1999—), 男(汉族), 山东省日照市人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。Email: fwk1202@163.com。

通信作者: 马瑛(1975—), 女(汉族), 山东省冠县人, 博士, 教授, 主要从事农业资源与环境方面的研究。Email: xndmy@qq.com。

grain in various prefectures in the Tarim River Basin were generally in a highly coupled stage. The coordination level was generally low, and the coordination type improved from general to good coordination. The overall coupling coordination showed an upward trend, with the average value rising from 0.643 to 0.872, an increase of 35.6%. The coupling coordination type progressed from primary to good coordination. ② Spatially, the coupling coordination level showed a distribution pattern of high in the middle and low in the east and west, with regional differences showing a fluctuation trend. ③ The driving factors showed stage-specific characteristics: natural factors turned from negative to positive and fluctuated, economic factors turned from positive to negative drivers, and social factors experienced alternating positive and negative fluctuations. [Conclusion] It is recommended that the Tarim River basin embraces the concept of green agricultural development, implements spatially adaptive governance strategies, promotes collaborative innovation in technology and institutions, and drives the coupled and coordinated development of green transition of farmland use and green total factor productivity of grain.

**Keywords: green transition of farmland use; grain green total factor productivity; coupling coordination degree model; spatiotemporal geographically weighted regression model; urbanization rate; Tarim River basin**

在全球资源环境约束加剧的当下,党和国家高度重视粮食及重要农产品安全供给。2025年发布的中央一号文件《中共中央、国务院关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴的意见》重申“保障国家粮食安全”的战略目标。中国粮食产量长期以来高位攀升,有效满足了国家粮食安全和经济社会发展需求,但随着人口增长和城市化进程加速,粮食需求仍将继续保持刚性增长<sup>[1]</sup>。粮食稳产增产依赖两条途径,一是增加要素投入,二是提高生产效率。在当前土壤退化、水资源匮乏及农村劳动力流失的严峻背景下,传统生产要素增量的方式已难以有效提升粮食产量。此外,粮食生产中化肥、农药、农膜等过度使用,导致资源消耗加剧、面源污染严重及减排降碳能力不足等问题。而粮食绿色全要素生产率(green total factor productivity of grain, GTFP)衡量的是在绿色、环保、可持续原则下,劳动力、资本、技术等要素在粮食生产中的利用效率<sup>[2]</sup>。耕地作为粮食生产的基石,对保障农业生产和推动社会经济可持续发展至关重要。区别于传统耕地利用转型,耕地利用绿色转型(green transition of farmland use, GTFU)倡导绿色发展理念,摒弃“高投入、高消耗、高污染”的耕地利用方式,旨在优化耕地空间与功能,同时实现资源节约、环境友好及科技进步<sup>[3]</sup>。耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率紧密相连,二者的高度耦合与协同发展对保障粮食安全、推动农业绿色转型至关重要。

近年来学界对耕地利用绿色转型的研究主要涉及其规律<sup>[4-5]</sup>、结构<sup>[6]</sup>,与其他土地利用活动的关系<sup>[7]</sup>、测度评价<sup>[8]</sup>以及驱动机制<sup>[9-10]</sup>。关于粮食绿色全要素生产率研究则主要侧重于内涵<sup>[11-12]</sup>、测算<sup>[13]</sup>、影响因素<sup>[14]</sup>。但已有成果多聚焦单一维度评价,对“耕地利

用绿色转型-粮食绿色全要素生产率”系统耦合协调关系的相关研究较少,主要呈现3大特点:从单向关联向系统耦合深化<sup>[15-16]</sup>,从静态评估向动态演化延伸<sup>[17-18]</sup>和从区域均衡向空间分异聚焦<sup>[19]</sup>。然而,现有研究仍存在一些问题:①视角局限。多囿于“耕地-粮食”的单一逻辑链,缺乏对“碳排放约束-面源污染控制”双重视角的整合分析;②内容割裂。多数耦合研究仅采用截面数据,数据来源单一,且未解析驱动因素的时空异质性;③方法滞后。传统DEA模型忽略非期望产出,较少研究采用Super-EBM混合距离函数,时空动态解析多依赖地理回归模型(geographically weighted regression, GWR),缺少时空地理加权回归模型(spatiotemporal geographically weighted regression, GTWR)与GIS工具相结合的进一步运用。塔里木河流域作为西北干旱区典型绿洲农业系统,其耕地利用转型与粮食生产的耦合过程具有“水资源约束-生态脆弱性”的双重特殊性<sup>[11]</sup>。本研究以塔里木河流域5个地州作为研究单元,从“空间形态-功能形态-经营模式”综合解析耕地利用绿色转型机理,构建“碳排放强度-面源污染负荷”双约束下的粮食绿色全要素生产率核算体系,揭示二者耦合协调度时空分异的驱动机制,据此提出促进干旱区农业绿色转型的策略建议。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

塔里木河流域(简称塔河流域)位于中国新疆维吾尔自治区南部,是我国重要的粮棉生产基地。流域涵括巴音郭楞蒙古自治州(巴州)、克孜勒苏柯尔克孜自治州(克州)、喀什、和田及阿克苏地区5个地州,总面积约 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,地形地貌复杂,沙漠占

流域面积 35% 以上,降水稀少,蒸发量大,工程性缺水与资源性缺水困境交织。流域内耕地资源主要集中在阿克苏和喀什地区,其土地垦殖率在 3%~4%,仍远低于全国 10% 的平均水平,其余地区土地垦殖率都不足 1%。地区经济发展以农牧业为主,种植的作物类型主要是粮食作物(包括水稻、小麦、玉米)、经济作物(棉花)、豆类(大豆)、甜菜。作为绿洲农业区,耕地资源对其经济发展与生态保护具有重要支撑作用。而随着气候变化、人口增长和农业大规模扩张,资源消耗量持续增加,流域面临土地退化、水资源短缺和生态脆弱等多重挑战。

### 1.2 数据来源

塔里木河流域行政边界地图数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)。研究依据清华大学徐冰教授课题组制作的中国 1986—2021 年 30 m 分辨率的年度耕地数据集(CACD)<sup>[20]</sup>计算耕地景观破碎化指数等指标。社会经济数据主要来自 2001—2023 年《新疆统计年鉴》、各地州统计

年鉴和 EPS 平台等官方权威数据。针对部分年份指标数据存在的缺失问题,采用反距离加权插值法和 3 次样条插值法处理,经交叉验证  $R^2 > 0.85$ , 确保其连续性。

## 2 研究方法

### 2.1 熵值法

根据耕地利用绿色转型的核心理念与数据可及性<sup>[21]</sup>,构建了涵盖空间、功能、模式 3 个维度,含 9 项因素,20 项具体指标的多层级评价体系<sup>[22]</sup>(表 1)。其中,空间转型关注耕地数量、结构及形态的动态变化<sup>[3]</sup>,功能转型涉及生产、生活与生态功能的转换<sup>[7]</sup>,模式转型则聚焦于资源高效利用、环境友好及技术进步的实现<sup>[19]</sup>。研究采用熵值法,通过指标信息熵的客观变异程度确定耕地利用绿色转型指标权重,规避主观赋权偏差。所有指标采用归一化处理,其中负向指标正向化,以消除量纲差异,并采用线性加权求和模型计算耕地利用绿色转型指数。

表 1 耕地利用绿色转型测度评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for measuring green transition of farmland use

目标层	因素层	指标层	指标解释	属性	权重/%	参考来源
空间 转型	数量	人均耕地面积	耕地面积/农村人口	+	8.73	牛善栋等 <sup>[21]</sup>
		土地垦殖率	耕地面积/土地总面积	+	9.33	李贤等 <sup>[16]</sup>
	结构	复种指数	农作物总播种面积/耕地面积	+	1.95	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
		省增投入比	地均农业机械总动力/地均化学品投入	+	11.96	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
		粮棉比	粮食作物播种面积/棉花播种面积	+	3.29	卢泉等 <sup>[11]</sup>
	形态	粮食作物播种比	粮食作物种植面积/耕地总面积/熟制	+	5.34	牛善栋等 <sup>[21]</sup>
平均地块面积		耕地面积/耕地斑块数	+	6.05	柯善淦等 <sup>[3]</sup>	
功能 转型	生产功能	耕地破碎化指数	$1 - (1/\text{面积形状指数})$	-	2.79	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
		地均农业总产值	农业总产值/耕地面积	+	4.12	孙心怡等 <sup>[19]</sup>
		粮食单产	粮食总产量/粮食作物播种面积	+	2.13	吕添贵等 <sup>[6]</sup>
	生活功能	地均劳动力数量	农业从业人员/耕地面积	-	2.73	孙心怡等 <sup>[19]</sup>
		农业人均产值	农业产值/农业从业人员	+	9.68	孙心怡等 <sup>[19]</sup>
		人均粮食保障量	粮食产量/地区总人口	+	1.63	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
生态功能	农业从业比例	农业从业人员/乡村从业人员	+	1.17	吕添贵等 <sup>[6]</sup>	
	地均化肥面源污染	化肥施用总量/耕地面积	-	2.82	吕添贵等 <sup>[6]</sup>	
模式 转型	资源节约	耕地占生态用地比	耕地面积/(土地面积-建设用地面积)	-	9.35	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
		地均水资源投入	农业用水量/耕地面积	-	2.07	吕添贵等 <sup>[6]</sup>
	环境友好	地均能源消耗	农村用电量/耕地面积	-	6.48	柯善淦等 <sup>[3]</sup>
		地均化学品施用量	农用柴油施用总量/耕地面积	-	4.37	吕添贵等 <sup>[6]</sup>
技术进步	地均农机总动力	农业机械总动力/耕地面积	+	4.00	孙心怡等 <sup>[19]</sup>	

注:指标属性来源于已有研究及理论假设,指标权重均由熵值法确定。

### 2.2 Super-EBM 模型

本研究运用 Tone K 等<sup>[22]</sup>提出的 Super-EBM (epsilon-based measure)模型,融合径向(CCR)与非

径向(SBM)模型优势,引入非期望产出约束,采用 Pasto J T 等<sup>[23]</sup>提出的全局参比方法,解决跨期可比性问题。同时考虑到研究区内农业自然资源等生产

要素的相对稳定性,采用规模报酬不变(CRS)假设下全局参比的非期望 Super-EBM 模型,其计算公式为

$$\begin{aligned}
 p^* = \min & \frac{\theta - \epsilon_x \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^I \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ki}}}{\delta + \epsilon_y \sum_{n=1}^T \sum_{m=1}^N \frac{\omega_n^+ s_n^+}{y_{kn}} + \epsilon_b \sum_{z=1}^T \sum_{k=1}^Z \frac{\omega_z^- s_z^-}{b_{kz}}} \\
 \text{s.t.} & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i x_{ji}^+ + s_i^- = \theta x_{ki} \quad (i = 1, 2 \dots I) \\
 & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i y_{jn}^+ - s_n^+ = \delta y_{kn} \quad (n = 1, 2 \dots N) \\
 & \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_j^i b_{kz}^+ + s_z^- = \delta b_{kz} \quad (z = 1, 2 \dots Z) \\
 & (\lambda_k^i \geq 0, s_i^-, s_n^+, s_z^- \geq 0)
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $p^*$ 表示决策单元最优效率得分; $x_{ki}, y_{kn}, b_{kz}$ 分别为第  $k$  个决策单元投入、期望产出和非期望产出; $s_i^-, s_n^+, s_{bz}^-$ 分别表示各松弛变量; $\omega_i^-, \omega_n^+, \omega_{bz}^-$ 表示各部分权重; $\theta$ 为径向部分规划参数; $\delta$ 表示产出扩大比例; $\epsilon$ 表示非径向部分重要程度, $\epsilon \in [0, 1]$ 。 $\epsilon$ 取 0.01, 0.05, 0.1 时,效率值变异系数  $< 3\%$ ,表明结果稳健。

基于粮食生产的“合理投入、低能耗、低排放”原则<sup>[24]</sup>,选取土地、劳动力、机械、化肥及水资源为关键投入,以社会、经济、环境效益为期望产出,粮食生产中的碳排放与面源污染为非期望产出指标(表 2)。为区分粮食与农业生产投入,采用卢新海等<sup>[15]</sup>的方法,引入权重系数  $A$  和  $B$  ( $A = \text{粮食作物播种面积} / \text{农作物播种面积}$ ,  $B = \text{农业产值} / \text{农林牧渔总产值} \times A$ ) 将两者剥离。经济产出以 2000 年为基期进行平减指数折算,以消除价格因素影响。

2 粮食绿色全要素生产率测度指标体系

Table 2 Evaluation index system for measuring green total factor productivity of grain

指标	变量	变量说明
投入	土地投入/ $10^3 \text{ hm}^2$	粮食播种面积
	劳动投入/万人	第一产业从业人数 $\times B$
	机械投入/ $10^4 \text{ kW}$	农用机械总动力 $\times A$
	化肥投入/ $10^4 \text{ t}$	化肥折纯量 $\times A$
	水资源投入/ $10^4 \text{ t}$	农业用水量 $\times A$
期望产出	社会产出/ $10^4 \text{ t}$	粮食产量
	经济产出/万元	粮食生产总产值
	环境产出/ $10^4 \text{ t}$	粮食作物碳汇总量
非期望产出	碳排放产出/ $10^4 \text{ t}$	粮食生产碳排放总量
	粮食生产面源污染/ $10^4 \text{ t}$	化肥投入总量 $\times$ (总氮流失系数 + 总磷流失系数)

注:塔河流域的粮食作物主要包括谷物(如水稻、小麦、玉米)、豆类及薯类。

粮食作物碳汇总量的测量。光合作用下的粮食作物会吸收二氧化碳,这个过程引起的碳吸收量即为粮食生产碳汇量<sup>[24]</sup>。参考付伟等<sup>[24]</sup>的研究,确定相关具体参数(表 3),其计算公式为

$$C_{ct} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot S_i \times (1 - W_i) / H_i \tag{2}$$

式中: $C_{ct}$ 为农作物碳固定量; $E_i$ 为第  $i$  种作物产量; $S_i$ 为第  $i$  种作物碳固定率; $W_i$ 为第  $i$  种作物含水率; $H_i$ 为第  $i$  种作物经济系数。

表 3 主要粮食作物经济系数、含水率和碳吸收率  
Table 3 Economic coefficients, water content, and carbon absorption rates of main grain crops

作物	经济系数	碳固定率	含水率
水稻	0.45	0.41	0.12
小麦	0.40	0.49	0.12
玉米	0.40	0.47	0.13
豆类	0.34	0.45	0.13
薯类	0.70	0.42	0.70

注:参考付伟等<sup>[24]</sup>的研究,确定相关参数。

粮食碳排放量:运用清单分析法,借鉴崔瑜<sup>[25]</sup>的研究,农业碳排放量即农业生产过程中化肥、机械、翻耕及灌溉等产生的碳排放,具体测算公式为

$$E = \sum E_i \cdot T_i \tag{3}$$

式中: $E$ 表示农业碳排放总量; $E_i, T_i$ 分别为第  $i$  类碳源排放系数和消耗量。具体排放系数及来源详见表 4。为精确计算粮食生产碳排放量,将农业碳排放总量与系数  $A$  相乘。

农业生产过程中的面源污染主要来自化肥中的氮磷流失。对于氮磷流失量,本文借鉴李欠男等<sup>[26]</sup>的处理方式,具体计算方式为化肥投入总量  $\times$  (总氮流失系数 + 总磷流失系数),氮、磷流失系数参考赖斯芸等<sup>[27]</sup>的研究成果。为更准确计算粮食生产面源污染,将农业面源污染与权重系数  $A$  相乘<sup>[15]</sup>。

2.3 耦合协调度模型

耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率之间的耦合协调关系是指这两系统在相互作用中共同发展的趋势和程度。研究借鉴肖黎明等<sup>[28]</sup>的方法,采用耦合度、协调度及耦合协调度 3 个指标,综合构建耦合协调分析框架。

$$\begin{aligned}
 C &= 2 \times \sqrt{\frac{V \cdot \delta}{(V + \delta)^2}} \\
 Q &= \alpha V + \beta \delta \\
 D &= \sqrt{C \cdot Q}
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $C$ 为耦合度; $Q$ 为协调度; $D$ 为耦合协调度,其

值越大表示耦合协调程度越高;  $V, \delta$  分别为耕地利用绿色转型指数、粮食绿色全要素生产率;  $\alpha, \beta$  分别为两系统的权重,  $\alpha = \beta = 0.5$  (假设两系统重要性对等)。  $\alpha$  取 0.4~0.6 时, 耦合协调度变化幅度  $< 8\%$ , 结论保持定性一致。耦合度  $C$  阈值划分参考物理学相

变临界值, 协调度  $T$  等级依据系统发展同步性判定, 将两系统耦合度 ( $C$ ) 划分为 5 个等级, 协调度 ( $T$ ) 划分为 5 个等级, 耦合协调度 ( $D$ ) 划分为 10 个等级 (如表 5 所示)。同时采用  $K$ -means 聚类法重新划分耦合协调等级, 与原始分类吻合度达 89%。

表 4 农业碳排放源和系数

Table 4 Sources and coefficients of agricultural carbon emission

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(ORNL)
农用柴油使用量	0.592 7 kg/kg	政府间气候变化专家委员会(IPCC)
农作物播种面积	312.60 kg/km <sup>2</sup>	中国农业大学农学与生物技术学院(IABCAU)
有效灌溉面积	266.48 kg/hm <sup>2</sup>	崔瑜 <sup>[25]</sup>

表 5 耦合协调度的划分标准及其类型

Table 5 Classification criteria and types of coupling coordination degree

耦合度( $C$ )	耦合阶段	协调度( $T$ )	协调水平	耦合协调度( $D$ )	耦合协调类型
0.5~0.6	轻度磨合	0~0.2	严重失调	0.000~0.099	极度失调衰退
				0.100~0.199	严重失调衰退
0.601~0.7	中度磨合	0.201~0.4	轻度失调	0.200~0.299	中度失调衰退
				0.300~0.399	轻度失调衰退
0.701~0.8	高度磨合	0.401~0.6	一般协调	0.400~0.499	濒临失调衰退
				0.500~0.599	勉强协调发展
0.801~0.9	高度耦合 I	0.601~0.8	良好协调 I	0.600~0.699	初级协调发展
				0.700~0.799	中级协调发展
0.901~1.00	高度耦合 II	0.801~1	良好协调 II	0.800~0.899	良好协调发展
				0.900~0.100	优质协调发展

## 2.4 非参数核密度估计

采用非参数核密度估计<sup>[29]</sup>, 通过概率密度分布的波峰高度、宽度及数量来分析塔河流域耦合协调度分布特征及演进趋势。其计算公式为:

$$K\left(\frac{U_i - u}{h}\right) f(u) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{U_i - u}{h}\right) \quad (5)$$

式中:  $N$  代表观测值数量;  $h$  表示带宽;  $U_i$  代表第  $i$  年的耦合协调度;  $u$  为均值;  $K\left(\frac{U_i - u}{h}\right)$  代表高斯核函数。

## 2.5 驱动因素识别

### 2.5.1 驱动因子选取

本研究参考张立新等<sup>[30]</sup>的相关研究, 结合塔河流域实际, 从影响耕地利用方式和粮食生产的自然、经济和社会因素 3 方面选取共 8 个指标作为耦合协调的驱动因子。具体驱动因子选取详见表 6。同时本文参考胡海洋等<sup>[8]</sup>、陈云洁<sup>[31]</sup>的方法, 采取多重共线性检验来避免数据间存在多重共线问题影响回归

结果的准确性。经检验, 研究所选取自变量的 VIF 值均小于 10, 容差均大于 0.1, 说明各驱动因素通过多重共线性检验, 可进行下一步研究。

### 2.5.2 GTWR 模型构建

在对空间异质性的研究中, 时空地理加权回归模型(GTWR)将时间纳入到地理加权回归模型中, 在考虑不同的时间与空间两种尺度的基础上, 通过处理面板数据降低模型误差及参数估计误差, 探讨截面数据的空间异质性特征<sup>[32]</sup>。该模型计算公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中:  $y_i$  代表耦合协调度;  $W$  为采用高斯距离函数的空间权重矩阵, 权重与区域间距离成反比;  $X_{ik}$  为外生解释变量向量;  $\beta_k$  是第  $i$  个样本点的第  $k$  个自变量的回归系数;  $\varepsilon_i$  为随机误差项,  $(u_i, v_i, t_i)$  为样本点  $i$  的三

维时空坐标。研究对于 GTWR 模型的计算主要基于 ArcGIS 10.8 软件及 Huan Bo 等<sup>[33]</sup>开发的 GTWR 插

件,通过 AICc 优化带宽设置,设定时空距离比为 1,拟合所有驱动因素。

表 6 耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率耦合协调的驱动因素  
Table 6 Driving factors of coupling and coordination between green transition of farmland use and green total factor productivity of grain

目标层	指标层	指标解释
自然因素	人均耕地面积( $X_1$ )	耕地面积/地区总人口
	水土流失治理面积( $X_2$ )	水土流失治理面积
经济因素	农民收入水平( $X_3$ )	农村居民人均可支配收入
	农林牧渔专业及辅助性活动产值( $X_4$ )	农林牧渔专业及辅助性活动产值
	政府财政支出( $X_5$ )	一般公共预算支出
社会因素	人口密度( $X_6$ )	总人口/总土地面积
	城镇化率( $X_7$ )	非农业人口/总人口
	水库数(座)( $X_8$ )	各地州水库数(座)

### 3 结果与分析

#### 3.1 耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调时空演变分析

由图 1 可知,2000—2021 年塔河流域耕地利用绿色转型和粮食绿色全要素生产率的耦合度总体值较高,普遍处于高度耦合阶段且呈现波动上升趋势。2007 年耦合度明显下降,源于 2007 年流域内棉花种植比例达到峰值,占总耕地 45%,而棉花作为典型的高耗水作物,其用水求量显著高于小麦、玉米等粮食作物,导致农业用水矛盾激化。研究区协调度总体值偏低,协调类型从一般协调转变为良好协调。研究区耦合协调度总体呈上升趋势,耦合协调度均值由 0.643 上升到 0.872,增幅为 35.6%,耦合协调类型从初级协调发展型转变为良好协调发展型。耦合协调阶段均向良性互动方向改变,耦合协调发展的正向效应显著,有望能够实现相对协调发展。

如表 7 所示,2000 年塔河流域各地州耕地利用绿色转型和粮食绿色全要素生产率耦合协调度普遍处于中等水平,但克州处于轻度失调衰退状态。这可能与其耕地细碎化,水土流失严重,机械化水平低等因素导致农业生产效率提升缓慢有关。2010 年,各地州耦合协调度略有变化。和田、克州、阿克苏和喀什地区耦合协调度提升明显,农业发展取得了显著成效。而巴州为 0.643,耦合协调度略有下降。其原因可能是农业规模迅速扩张,产生大量水资源和能源消耗,导致碳排放和面源污染持续增加。在 2018 年研究区各地州协调度及耦合协调度出现明显衰退,与当年流域降水量大幅减少及农业用水价格大幅上调的叠加冲击直接相关,表明系统存在不稳定性,不利于

农业生产的可持续发展。到 2021 年,除克州耦合协调度为 0.590 以外,塔河流域大部分地州耦合协调度达到良好协调甚至优质协调水平。可能与这些地州通过耕地流转等方式提高耕地聚集度,促进生产要素流动和共享,推广高效节水灌溉技术等措施有关。

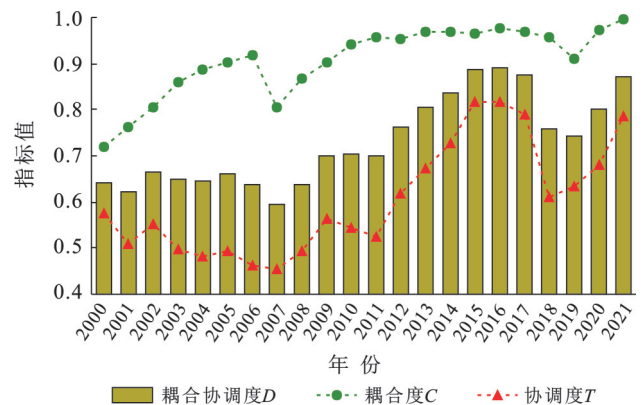


图 1 塔里木河流域耦合度、协调度、耦合协调度时间变化趋势

Fig.1 Temporal variation trends of coupling degree, coordination degree, and coupling coordination degree in Tarim River basin

为展示研究区耦合协调度的动态分布特征,借助 Matlab 软件绘制三维核密度估计图(图 2)。2000—2011 年核密度曲线整体右移,表明耦合协调度总体呈上升趋势。分布形态上,波峰呈现“低宽峰—高尖峰—低宽峰”的变动趋势,2010 年前峰形扁平,2011—2013 年变陡峭,2014 年后恢复扁平,表明地区差距呈“扩大—缩小—扩大”趋势。从波峰数量来看,经历“单峰—双峰—单峰”演变的趋势,2011—2013 年出现双峰,其余年份为单峰,说明该时段塔河流域内耦合协调度存在两极分化,而其余年份相对均衡。

表 7 塔里木河流域 2000—2021 年各地州  
耦合协调度时间演变

Table 7 Temporal evolution of coupling coordination degree of different prefectures in Tarim River basin from 2000 to 2021

年份	耦合协调度				
	巴州	阿克苏	克州	喀什	和田
2000	0.670	0.740	0.315	0.722	0.577
2002	0.611	0.758	0.523	0.768	0.656
2004	0.598	0.720	0.559	0.703	0.656
2006	0.528	0.719	0.498	0.763	0.679
2008	0.547	0.752	0.336	0.837	0.715
2010	0.643	0.804	0.481	0.840	0.748
2012	0.792	0.810	0.612	0.805	0.799
2014	0.864	0.901	0.700	0.938	0.774
2016	0.887	0.939	0.816	0.973	0.842
2018	0.882	0.876	0.651	0.661	0.716
2020	0.852	0.858	0.543	0.812	0.950
2021	0.885	0.994	0.590	0.929	0.962

注：限于篇幅原因，大致以 2 a 为“间隔期”展示部分年份测度结果。

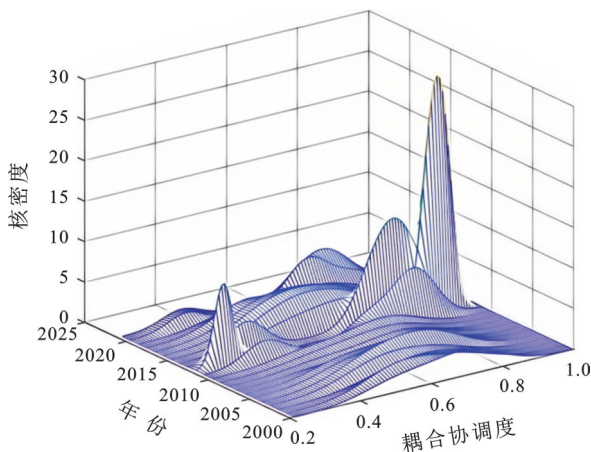


图 2 塔里木河流域耦合协调度三维核密度图

Fig.2 Three-dimensional kernel density map of coupling coordination degree in Tarim River basin

基于等级划分标准(表 5),采用 ArcGIS 10.8 软件对耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率的耦合协调度进行可视化展示(图 3)。2000 年,塔河流域各地州耕地利用绿色转型和粮食绿色全要素生产率的耦合度总体偏低,区域差异较大。除阿克苏和喀什地区处于高度耦合 I 以外,其余地区耦合度水平大多处于轻度磨合到高度磨合之间。2010 年,在空间分布上以高度耦合 II 为主,仅和田地区处于高度耦合 I。至 2021 年,各地州耦合度均处于高度耦合 II 状态。2000 年,塔河流域各地州协调度总体较低,一般协调占据主导,良好协调 I 仅阿克苏地区一

处。2010 年,协调度有所上升,良好协调 I 从阿克苏地区向南延伸至和田、喀什地区,克州衰退至轻度失调状态,巴州仍为一般协调状态。2021 年,各地州协调度总体持续上升,良好协调 II 占据研究区大部分地州,仅克州仍为轻度失调状态。2000—2021 年塔河流域各地州耦合协调水平空间分布总体呈现“中间高东西低”的特征。2000 年,各地州耦合协调度总体较低,耦合协调类型共有 3 种,其中克州和和田地区处于勉强协调发展状态,初级协调发展类型仅巴州一处,阿克苏和喀什地区处于中级协调发展状态,可能与其农业资源丰富、耕地利用效率较高有关。在 2010 年,各地州耦合协调度总体持续增加,耦合协调类型共有 4 种,阿克苏和喀什地区进一步发展为良好协调状态,和田地区发展为中级协调状态,初级协调发展类型仅巴州一处,克州处于濒临失调衰退状态。在 2021 年,研究区内除克州为勉强协调发展外,大部分地州的耦合协调度达到了良好协调发展甚至优质协调的水平,这可能归因于这些地区在农业科技创新、粮食绿色生产及生态保护方面所采取的综合策略。

### 3.2 耦合协调驱动因素时空演化特征

研究从经济、自然及社会 3 个层面识别 2000—2021 年塔河流域各地州耦合协调水平时空分异的驱动因素回归系数,并按年份分别做箱线图(图 4),以探究其时间异质性;将回归系数均值按照自然断点法进行分类,负向驱动作用依据驱动强度由强至弱依次划分为负向强影响、负向较强影响、负向较弱影响以及负向弱影响;正向驱动作用依据驱动力由强至弱依次划分为正向强影响、正向较强影响、正向较弱影响以及正向弱影响,借助 GIS 可视化,分析其空间异质性(图 5)。

自然因素的回归系数总体从负向影响逐渐变为正向影响,并呈现波动性变化。2000 年,自然因素对耦合协调度主要呈负向影响,且驱动力较小,其中巴州为负向弱驱动,克州为负向较强驱动,其余地区为负向较弱驱动。根据自然因素驱动机制,由于塔河流域农业水资源紧张且部分地区水土流失频发使耕地系统遭到冲刷,再加上耕地面积持续扩张,水土资源错配严重,粮食生产无法得到根本保障,致使耦合协调水平走低。

2010 年,自然因素对耦合协调度总体转为正向强驱动,其中除阿克苏地区为正向弱驱动外,其余地区为正向较强或强驱动。2021 年,自然因素对耦合协调度的正向驱动力有所下降,除克州为正向较强驱动外,其余地区为正向较弱驱动。这可能得益于

塔河流域综合治理工程项目使水土流失治理情况和耕地破碎化状态得以改善,农业发展有足够的空间和资源支持,从而保障农业生产的连续性与稳定性,

对系统耦合协调产生正向驱动。2010年以后,随着资源消耗量不断增长,对环境的负向效应加强,自然因素的正向驱动力减小。

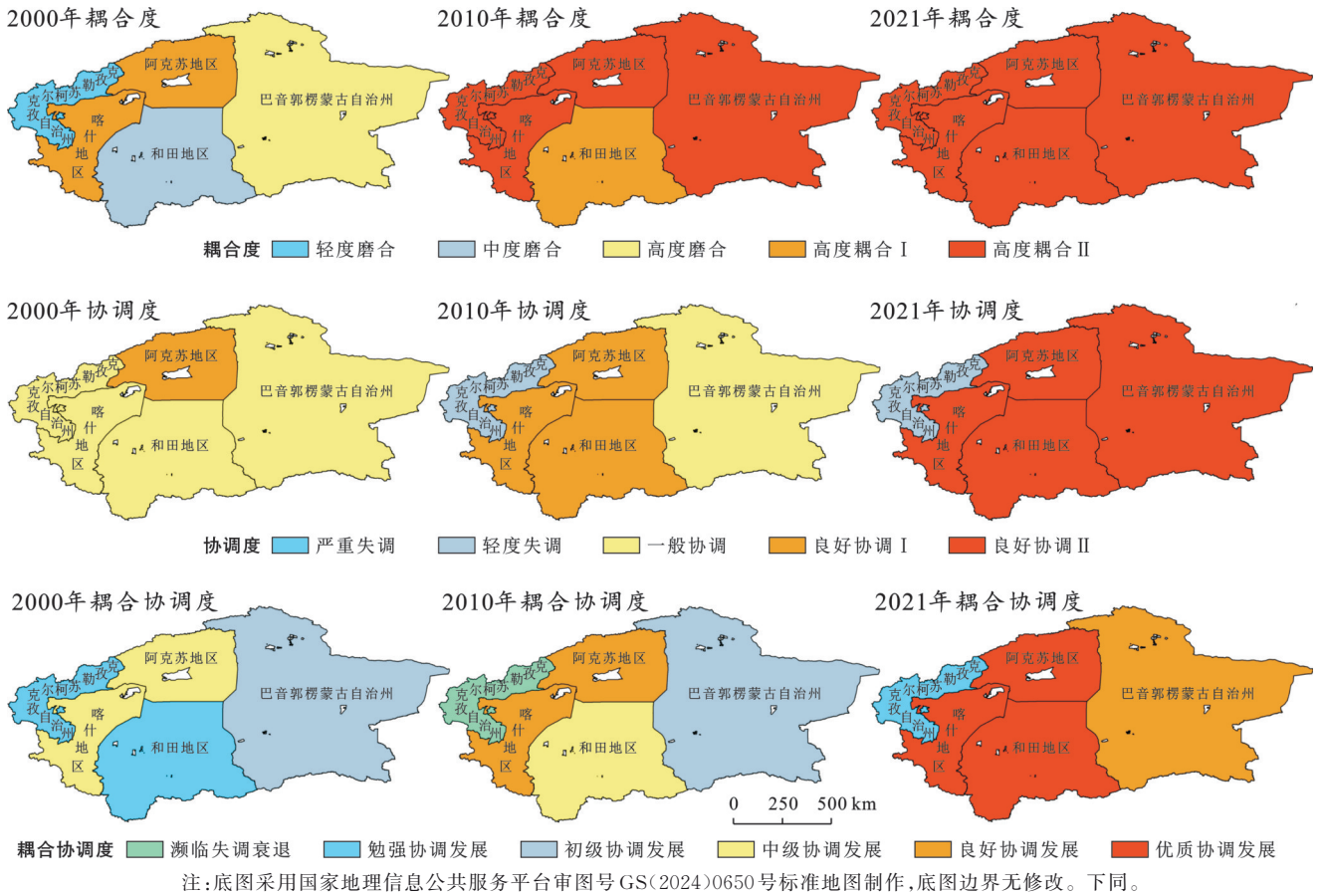


图3 塔里木河流域耦合度、协调度及耦合协调度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of coupling degree, coordination degree and coupling coordination degree in Tarim River basin

经济因素的回归系数则从正向驱动逐渐变为负向驱动。2000年,经济因素对耦合协调度的影响主要呈正向驱动力,其中喀什地区和克州为正向较弱驱动,其余地区为正向弱驱动。根据经济因素驱动机制,一般公共预算支出增加,意味着农业农村水利设施等方面有更加充足的资金保障。财政支出及人均收入的增长,促进了化肥、农机等生产要素投入的增加,缓解了早期投入不足导致的产出低效问题。农林牧渔服务业的发展通过引入优质种子、先进技术和装备,提升粮食产出效率,增强了系统耦合协调性。2010年,经济因素对耦合协调度总体转为负向驱动,其中除巴州为正向弱驱动外,其余地区为负向驱动。2021年,经济因素对耦合协调度的负向驱动力进一步增大,除巴州为负向较强驱动外,其余地区为负向强驱动。可能原因在于随着经济迅速发展,农户及农林牧渔服务业趋向于种植和服务高经济价值的棉花及林果等产业,其对农业发展所需的资金、劳动力和土地等资源产生挤压效应,导致耕地撂荒、

耕地非粮化等现象出现,且农药化肥投入的边际收益越来越低,引起碳排放和面源污染等非期望产出增加,从而抑制耦合协调度提升。

社会因素的回归系数在研究区间经历了从正到负再到正的波动。2000年,社会因素对耦合协调度主要呈正向驱动力,其中喀什地区和克州为正向较弱驱动,其余地区为正向弱驱动。根据社会因素驱动机制,其原因在于水库能够有效调节水资源的季节差异与地区差异,对耕地进行有效灌溉,保障农业生产的连续性与稳定性。人口密度增加可以推动耕地开垦,提高土地垦殖率。而城市化发展可以推动生产方式和技术进步,提高资源利用效率。2010年,社会因素对耦合协调度总体转为负向驱动,其中和田地区和巴州为负向强驱动,其余地区为负向较强驱动。这可能是因为城镇化加速与人口激增导致粮食需求上升,建设用地无序扩张,进而压缩耕地面积。加之农业机械技术滞后,生产中过度依赖污染性复合肥与低效机械作业,引发耕地退化等问题,最终制约了系统耦合协调

度提升。2021年,社会因素对耦合协调度的负向驱动转为正向驱动,除巴州为正向弱驱动外,其余地区为正向较弱驱动。原因在于农村人口流向城市,在耕地规模不变的情况下,务农人口减少有利于增加人

均耕地面积,通过规划经营提升耕地利用效率。而随着城镇化率进一步提高,推动先进农业技术与机械得出推广与应用,在保证本地区良性发展的同时,带动周围地区的耕地绿色利用与粮食绿色生产。

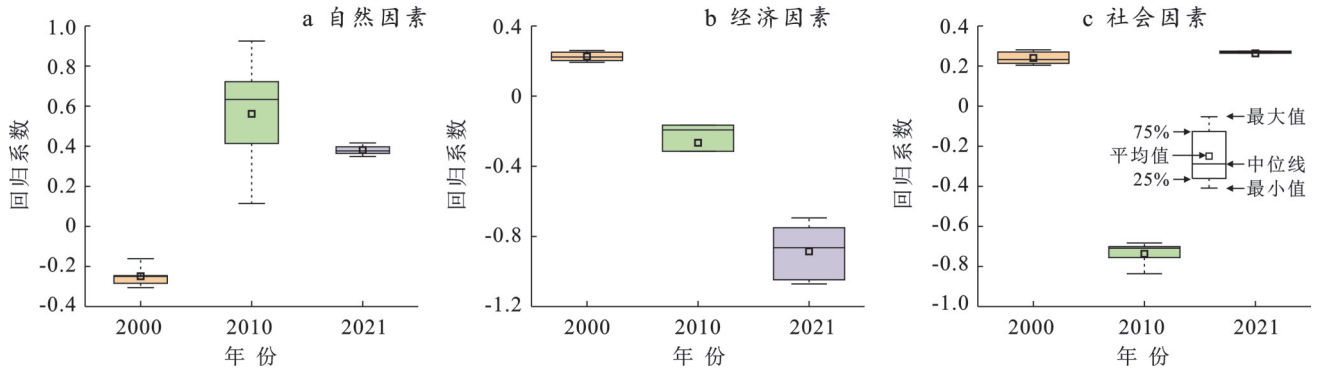


图4 GTWR模型回归系数箱体图

Fig.4 Box diagrams of regression coefficient in GTWR model

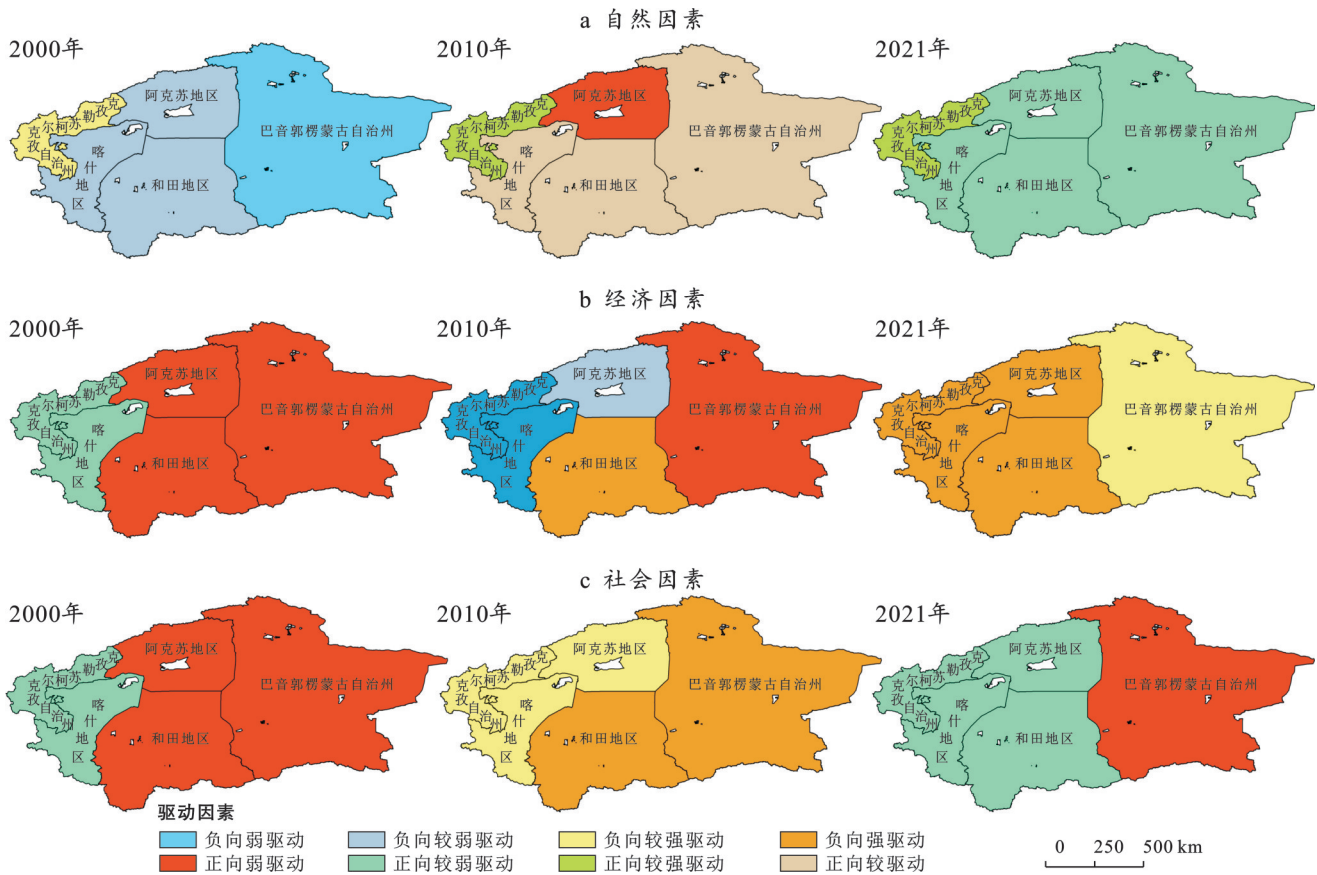


图5 GTWR模型驱动因素系数空间异质性

Fig.5 Spatial heterogeneity of driving factor coefficients in GTWR model

### 4 讨论

本研究测算了2000—2021年塔里木河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调关系及其驱动因素时空格局特征,研究结果显示,耦合协调度呈现“中间高东西低”格局,与卢泉等<sup>[11]</sup>的研

究结果相似,其本质是绿洲农业系统对水资源空间分布的响应<sup>[26]</sup>。中游地区,如阿克苏、喀什,依托塔里木河干流灌溉网络,形成“耕地集约-技术集聚”的良性互动;而东端巴州受博斯腾湖水位下降影响,西端克州因山地-绿洲过渡带生态脆弱性,导致“资源约束-技术滞后”的双重困境。2018年的耦合协调度衰

退,与当年流域降水量大幅减少及农业用水价格大幅上调的叠加冲击直接相关。根据驱动因素结果显示,自然因素的正向转变,源于流域生态治理工程使生态系统服务价值大幅提升;经济因素驱动效应逆转,表明依赖化肥和地下水超采的粗放投入模式已触及天花板;社会因素波动则反映出农村劳动力老龄化与技术采纳的非均衡性。

为推动塔河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调发展,实现农业绿色转型,提出相关差异化政策建议:①实施空间适配性治理策略,实现“藏粮于地”。针对不同地市的耕地资源禀赋和粮食生产现状,采取相应农业发展措施。如阿克苏、喀什等中游优势地区,其经济发展较好,耕地资源丰富,应充分利用优越自然条件,通过进行耕地整合,形成规模化、专业化粮食生产方式。同时构建“技术扩散极”,重点推广水肥一体化技术,建立耕地质量动态监测网络,提高粮食生产的科技含量和附加值,发展智慧农业。如克州等地区,其耕地破碎化加剧,水土流失严重,可通过推进“生态屏障区耕地托管”模式,将细碎化耕地整合为适度规模经营单元,为粮食生产提供优质的土地资源,同时合理进行农业水利化与机械化建设,稳步提高有效灌溉率与机械化水平。针对巴州、和田等缺水严重地区,应实施“水资源三级配置”制度,大力提高博斯腾湖-孔雀河流域农业用水效率,合理优化农业产业结构,推动农业绿色发展。②促进技术-制度协同创新,实现“藏粮于技”。实行绿色技术补偿机制,如对采用生物防治技术的农户给予合理比例保费补贴,推动农药持续减量。同时政府应持续合理地增大财政支农力度,提高资金使用效率、改善支出结构,加强对以绿色生产导向的补贴落实与监管,从根本上提高农民的积极性,使农业财政支出有效转化为农业生产力。同时与高校、科研机构和企业形成发展合力,加大粮食绿色增产资金支持,不断推进粮食种植技术创新,加快绿色农业技术推广宣传,实现技术进步对粮食绿色增产的驱动。此外,可实行碳汇交易试点:如在喀什-克州胡杨林区建立碳汇核算体系,资金用于反哺耕地保护。

耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调发展是一个多维度、多因素交织的动态复杂过程,本研究仍存在一些不足之处:①需进一步结合新型农业经营主体等微观视角,研究耕地利用主体间的差异对系统耦合协调水平的影响。②各地区自然禀赋、农户观念、耕作习惯不同,今后应结合研究区域实际,获得更准确的粮食生产碳排放及面源污

染残留系数。再次,在当前产业结构不断升级的背景下,耕地非粮化成为粮食安全面临的重要问题,今后应进一步研究耕地、粮食与棉花种植之间的耦合协调关系。③本研究在尺度上初步聚焦于地州层面进行测算分析,未来研究拟细化至县(区)级单元,以期获得更为精确详尽的分析结果。

## 5 结论

(1) 研究区耦合协调度均值从2000年的0.643提升至2021年的0.872,增幅达35.6%,协调类型由初级协调发展型跃升为良好协调发展型。耦合协调度地区差距呈现“扩大—缩小—再扩大”的三阶段演化,其中2011—2013年出现显著两极分化。

(2) 耦合协调度区域差异呈现“中游高、东西低”的梯度分布,克州2000年耦合协调度仅0.41,处于轻度失调状态。2010年后各四地州耦合度提升显著(年均增速4.7%),但2018年受极端气候事件影响,全流域耦合协调度出现短暂衰退(均值下降0.08)。

(3) 2000—2021年塔河流域耕地利用绿色转型与粮食绿色全要素生产率耦合协调发展的驱动因素具有阶段性特征。自然因素回归系数由负转正,表明生态保护政策对系统耦合的支撑作用逐步增强;经济因素的驱动效应由正向转为负向,表明传统要素投入模式对绿色转型的制约日益凸显;社会因素影响呈现“正→负→正”交替波动,与城镇化进程中劳动力转移和技术采纳的阶段性特征密切相关。

## 参考文献(References)

- [1] 唐亮,曾庆双,郎润华.粮食全要素生产率及影响因素研究:基于2008—2017年四川省市级面板数据的实证分析[J].云南农业大学学报(社会科学),2021,15(4):67-75.  
Tang Liang, Zeng Qingshuang, Lang Runhua. Study on total factor productivity and influencing factors of grain: Based on the empirical of municipal panel date from 2008 to 2017 in Sichuan Province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2021, 15(4): 67-75.
- [2] 高鸣,魏佳朔.新一轮千亿斤粮食产能提升的源泉:全要素生产率的增长与贡献[J].华中农业大学学报(社会科学版),2024(1):15-27.  
Gao Ming, Wei Jiashuo. The source of the new round of hundred billion catty grain production capacity improvement: The growth and contribution of total factor productivity [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2024(1): 15-27.
- [3] 柯善淦,崔海莹,卢新海,等.耕地利用绿色转型的时空格局及其驱动机制研究:以湖北省为例[J].中国土地科学,2021,35(12):64-74.

- Ke Shangan, Cui Haiying, Lu Xinhai, et al. Research on the spatial-temporal pattern and mechanisms of green transition of farmland use: A case of Hubei Province [J]. *China Land Science*, 2021, 35(12):64-74.
- [4] Grainger A. National land use morphology: Patterns and possibilities [J]. *Geography*, 1995, 80(3):235-246.
- [5] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309 (5734): 570-574.
- [6] 吕添贵,付舒斐,胡晗,等.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[J].*中国土地科学*,2023,37(4):107-118.
- Lyu Tianguai, Fu Shufei, Hu Han, et al. Dynamic evolution and convergence characteristics of cultivated land green use efficiency based on the constraint of agricultural green transition: Taking the main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River as an example [J]. *China Land Science*, 2023, 37(4):107-118.
- [7] 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.
- [8] 胡海洋,余敦,魏鹏,等.鄱阳湖平原耕地利用绿色转型时空格局及驱动因素[J].*水土保持研究*,2025,32(3):270-281.
- Hu Haiyang, Yu Dun, Wei Peng, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of green transformation of cultivated land use in Poyang Lake plain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):270-281.
- [9] 杨斌,杨俊,王占岐,等.长江经济带耕地绿色低碳利用的时空格局及其成因分析[J].*中国土地科学*,2022,36(10):63-71.
- Yang Bin, Yang Jun, Wang Zhanqi, et al. Spatial-temporal pattern and attribution of cultivated land green and low-carbon utilization in the Yangtze River economic belt [J]. *China Land Science*, 2022, 36(10):63-71.
- [10] 谭智元,黄玉莉,曹银贵,等.中国耕地利用转型研究:热点与前沿[J].*农业资源与环境学报*,2023,40(6):1400-1414.
- Tan Zhiyuan, Huang Yuli, Cao Yingui, et al. Research on the transformation of cultivated land use in China: Hotspots and frontiers [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6):1400-1414.
- [11] 卢泉,高花彦,王鹏鹏,等.塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合关系及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2024,47(5):820-829.
- Lu Quan, Gao Huayan, Wang Pengpeng, et al. Coupling relationship and influencing factors of water-cropland-grain-cotton system in Tarim River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(5):820-829.
- [12] 周应恒,杨宗之.生态价值视角下中国省域粮食绿色全要素生产率时空特征分析[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(10):1786-1799.
- Zhou Yingheng, Yang Zongzhi. Temporal and spatial characteristics of China's provincial green total factor productivity of grains from the ecological value perspective [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10):1786-1799.
- [13] 马文江,白妙琴,阿迪力·艾合买提,等.“双碳”目标下新疆粮食绿色全要素生产率的时空分异及驱动因素分析[J].*干旱区地理*,2023,46(12):2029-2041.
- Ma Wenjiang, Bai Miaoqin, Adili AIHEMAITI, et al. Spatial-temporal differentiation and driving factors analysis of green total factor productivity of Xinjiang grain under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(12):2029-2041.
- [14] 杨骞,司祥慧,王珏.减排增汇目标下中国粮食生产效率和分布动态演进[J].*自然资源学报*,2022,37(3):600-615.
- Yang Qian, Si Xianghui, Wang Jue. The measurement and its distribution dynamic evolution of grain production efficiency in China under the goal of reducing pollution emissions and increasing carbon sink [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3):600-615.
- [15] 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.
- [16] 李贤,王浩阳,牛文浩,等.黄河流域耕地利用转型时空演变及其对粮食生产的影响[J].*中国农业大学学报*,2024,29(10):85-96.
- Li Xian, Wang Haoyang, Niu Wenhao, et al. Spatial-temporal evolution of cultivated land use transition and its impact on grain production in the Yellow River basin [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10):85-96.
- [17] 王凤娇,梁伟,傅伯杰,等.近年来的黄土高原耕地时空变化与口粮安全耕地数量分析[J].*干旱区地理*,2020,43(1):161-171.
- Wang Fengjiao, Liang Wei, Fu Bojie, et al. Spatial and temporal changes of cultivated land and quantitative analysis of ration safe cultivated land on the Loess Pla-

- teau in recent years [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1):161-171.
- [18] 戈大专, 龙花楼, 屠爽爽, 等. 黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(4):319-327.  
Ge Dazhuan, Long Hualou, Tu Shuangshuang, et al. Coupling relationship between land use transitions and grain yield in Huang-Huai-Hai plain, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4):319-327.
- [19] 孙心怡, 王介勇, 朱西存, 等. 基于人地系统视角耕地利用转型过程及其驱动因素分析: 以黑龙江省齐齐哈尔市为例[J]. *自然资源学报*, 2025, 40(2):350-366.  
Sun Xinyi, Wang Jieyong, Zhu Xicun, et al. Transformation of cultivated land utilization and its driving factors based on human-earth system perspective: Taking Qiqihar City, Heilongjiang Province, as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(2):350-366.
- [20] Tu Ying, Wu Shengbiao, Bin Chen, et al. A 30 m annual cropland dataset of China from 1986 to 2021 [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 2023, 16:2297-2316.
- [21] 牛善栋, 方斌, 崔翠, 等. 乡村振兴视角下耕地利用转型的时空格局及路径分析: 以淮海经济区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(8):1908-1925.  
Niu Shandong, Fang Bin, Cui Cui, et al. The spatial-temporal pattern and path of cultivated land use transition from the perspective of rural revitalization: Taking Huaihai Economic Zone as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8):1908-1925.
- [22] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3):1554-1563.
- [23] Pastor J T, Knox Lovell C A. A global Malmquist productivity index [J]. *Economics Letters*, 2005, 88(2):266-271.
- [24] 付伟, 徐媛媛, 王福利, 等. 中国省域农田生态系统碳足迹时空演变分析[J]. *生态经济*, 2024, 40(1):88-94.  
Fu Wei, Xu Yuanyuan, Wang Fuli, et al. Temporal and spatial evolution of carbon footprint of farmland ecosystems in China [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(1):88-94.
- [25] 崔瑜. 中国农业碳足迹与经济发展协调性研究: 纳入碳汇效应的分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
Cui Yu. Study on the Coordination of China's agricultural carbon footprint and economic development-analysis based on the carbon sink effect [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [26] 李欠男, 李谷成, 尹朝静. 农业绿色全要素生产率增长的分布动态演进[J]. *统计与信息论坛*, 2020, 35(10):119-128.  
Li Qiannan, Li Gucheng, Yin Chaojing. Dynamic evolution of agricultural green total factor productivity growth [J]. *Statistics & Information Forum*, 2020, 35(10):119-128.
- [27] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(9):1184-1187.  
Lai Siyun, Du Pengfei, Chen Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(9):1184-1187.
- [28] 肖黎明, 张仙鹏. 强可持续发展理念下绿色创新效率与生态福利绩效耦合协调的时空特征[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2):312-324.  
Xiao Liming, Zhang Xianpeng. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between green innovation efficiency and ecological welfare performance under the concept of strong sustainability [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2):312-324.
- [29] 陈强. 高级计量经济学及Stata应用[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014.  
Chen Qiang. *Advanced Econometrics and Stata Application* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [30] 张立新, 朱道林, 谢保鹏, 等. 中国粮食主产区耕地利用效率时空格局演变及影响因素: 基于180个地级市的实证研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(4):608-619.  
Zhang Lixin, Zhu Daolin, Xie Baopeng, et al. Spatio-temporal pattern evolution and driving factors of cultivated land utilization efficiency of the major grain producing area in China [J]. *Resources Science*, 2017, 39(4):608-619.
- [31] 陈云洁. 耕地多功能权衡与协同关系的时空演变及驱动机制研究: 以武汉城市圈为例[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2023.  
Chen Yunjie. Research on the spatiotemporal evolution and driving mechanism of multifunctional trade-offs and synergistic relationships of cultivated land: Taking the Wuhan urban circle as an example [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [32] 吴小影, 杨山, 尹上岗, 等. 基于GTWR模型的长三角地区城市建设用地时空动态特征及其驱动机理[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(11):2594-2606.  
Wu Xiaoying, Yang Shan, Yin Shanggang, et al. Spatial-temporal dynamic characteristics and its driving mechanism of urban built-up area in Yangtze River delta based on GTWR model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11):2594-2606.
- [33] 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.