

干旱区农业生态效率与经济韧性协同 权衡识别及其驱动因素

孙宇, 黎新伍, 黄静文

(新疆农业大学 经济管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 探究干旱区农业生态效率与经济韧性协同权衡识别及其驱动因素, 为实现区域可持续发展, 以及新疆农业发展与生态保护双赢的管理决策提供科学依据。[方法] 测度新疆维吾尔自治区 14 个地州 2010—2022 年农业生态效率水平和农业经济韧性, 运用 Spearman 秩相关分析法、生产可能性边界 (PPF) 和权衡强度指数量化分析效率与韧性的权衡-协同关系, 采用 GWR 分析不同地区效率-韧性协同权衡关系的影响因素。[结果] ①新疆农业经济韧性时间上呈现快速增长态势, 空间上呈现“南部>北部”的分布格局。农业生态效率呈现增长态势, 空间上为“南部>北部”的格局。②产出与抵抗力显著协同, 产出与恢复力显著权衡, 投入-抵抗力与产出-恢复力的 PPF 曲线形状为“下凹—上凸”形状, 且对应组合多数处于最优配置。③各影响因素加强效率与韧性的权衡关系, 整体大小表现为: 农林水财政支出>财政科技支出>农林牧渔业总产值>环境污染治理投资总额; 各影响因素加强效率与韧性的协同关系, 从大到小排序为: 环境污染治理投资总额>财政科技支出>农林牧渔业总产值>农林水财政支出。[结论] 新疆各地州需要因地制宜制定农业生态效率与农业经济韧性权衡协同发展政策, 实现干旱区可持续发展。

关键词: 农业生态效率; 农业经济韧性; PPF 曲线; 权衡强度; 权衡协同; 干旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0347-13

中图分类号: F323, X322

文献参数: 孙宇, 黎新伍, 黄静文. 干旱区农业生态效率与经济韧性协同权衡识别及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 347-359. Sun Yu, Li Xinwu, Huang Jingwen. Driving factors and identification of trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 347-359. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.035; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.035.

Driving factors and identification of trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in arid regions

Sun Yu, Li Xinwu, Huang Jingwen

(College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] The trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in arid regions and their driving factors were identified, in order to provide a scientific basis for achieving regional sustainable development and win-win management decisions for agricultural development and ecological protection in Xinjiang. [Methods] Agricultural ecological efficiency levels and agricultural economic resilience in 14 prefectures of Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2010 to 2022 were measured. Spearman's rank correlation analysis, production possibility frontier (PPF), and trade-off intensity index were employed to quantitatively analyze the trade-off and coordination relationships between efficiency and resilience. Geographically weighted regression (GWR) was applied to analyze the influencing factors of the efficiency-resilience trade-off and coordination relationships in different regions. [Results] ① The agricultural economic resilience in Xinjiang demonstrated a rapid growth trend over time and a spatial distribution pattern of “south > north”. Agricultural ecological efficiency showed an increasing trend, with a spatial pattern of “south > north”. ② Output and

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2025-07-03

采用日期: 2025-07-04

资助项目: 新疆维吾尔自治区人才发展基金“天池英才”引进计划(创新领军人才)

第一作者: 孙宇(2000—), 女(汉族), 吉林省乾安县人, 博士研究生, 研究方向为资源环境经济。Email: 1148614510@qq.com。

通信作者: 黎新伍(1973—), 男(汉族), 江西省九江市人, 博士, 教授, 主要从事农业经济研究。Email: liyue7511@163.com。

resistance demonstrated significant coordination, while output and recovery exhibited significant trade-off. The PPF curves of input—resistance and output—recovery were “concave-down—convex-up” in shape, with most of the corresponding combinations in their optimal configurations. ③ The trade-off relationship between efficiency and resilience was strengthened by all influencing factors, with the overall order being: fiscal expenditure on agriculture, forestry, and water resources > fiscal expenditure on science and technology > total output value of agriculture, forestry, animal husbandry, and fishery > total investment in environmental pollution control. Additionally, the influencing factors enhanced the coordination relationship between efficiency and resilience in the following descending order: total investment in environmental pollution control > fiscal expenditure on science and technology > total output value of agriculture, forestry, animal husbandry, and fishery > fiscal expenditure on agriculture, forestry, and water resources. [Conclusion] All prefectures in Xinjiang should formulate region-specific policies for the trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and agricultural economic resilience, thereby achieving sustainable development in arid regions.

Keywords: agricultural ecological efficiency; agricultural economic resilience; PPF curves; trade-off intensity; trade-off and coordination; arid region

改革开放以来,中国农业得到了快速发展,成为国家经济的重要组成部分,在维护经济社会的良性发展和长治久安中发挥着重要作用。随着农业日益发展,引发出“农业生产资源消耗大”“化学农业”“非点源污染”等一系列生态问题^[1],严重阻碍了农业生态效率的高质量发展和农业经济韧性的稳步提升。2024年中央一号文件指出要重视“三农”工作的开展,聚焦于“三农”问题,持续推进农业农村发展。中国共产党第二十次全国代表大会报告中把实现经济和环境双赢的绿色可持续发展模式提升到了国家战略高度。

韧性起源于生态系统范畴,原指系统遭遇外部冲击后恢复到原始状态的能力^[2],后被延伸至经济学^[3]研究范畴,聚焦到农业经济韧性视角,被定义为农业系统抵抗外部干扰并保持原有系统稳定的能力^[4]。在实证层面上,主要集中在对农业经济韧性指标构建、度量方法、空间差异以及影响因素,学者以经济韧性理念为基础,构建风险抵御能力-适应调节能力-创新发展能力^[5]、抵抗力-重构力^[6]、压力-状态-响应等^[7]指标体系,从国家、省域多尺度借助综合评价法、层次分析法、泰勒指数法等分析农业韧性水平及其空间差异^[8-12]。关于影响因素的研究,学者集中采用空间计量模型^[13]、地理探测器^[6-7]等方法。生态效率的测度方法主要有数据包络分析法(DEA)、生命周期评价法、超效率SBM^[14-16]。国内针对韧性和效率二者关系的研究相对有限,主要集中在经济韧性与流通效率^[17]、国土空间的韧性与效率^[18]、旅游经济的韧性与效率^[19]、农业绿色生产效率与经济韧性等^[20]视角展开二者的协同研究,学者研究结论共同表明韧性与效率存在紧密的协同关系,为本研究奠定坚实基础,但还存在以下不足:国内外学者针对农业经济韧性与

农业生态效率协同关系的研究较多,但关于权衡关系识别研究不足,并且多数学者聚焦于研究韧性或效率单一视角的影响因素,针对韧性和效率关系的影响因素研究有所欠缺。新疆维吾尔自治区作为典型的干旱区和生态脆弱区,农业作为主导产业,过度追逐农业经济效益及发展速度,而忽略农业污染、生态破坏,使其农业经济韧性面临巨大威胁。鉴于此,本研究以新疆14个地州为研究区域,采用Spearman秩相关分析法探讨2010—2022年农业生态效率与农业经济韧性的协同与权衡关系,模拟出生产可能性边界PPF曲线,计算效率与韧性间权衡强度,并构建GWR模型考察影响因素对效率韧性权衡协同关系影响的空间异质性,以期为实现区域可持续发展,以及新疆农业发展与生态保护双赢的管理决策提供科学依据。

1 作用机理

农业生态效率是农业经济韧性的指向标,农业经济韧性是农业生态效率的动力引擎,准确识别农业生态效率与农业经济韧性的作用关系是实现系统内部持续发展的逻辑本质(图1)。韧性是指生态系统在遭受外界干扰时,生态系统主动维持、适应以及重构的能力^[21]。当农业经济系统受到冲击时,农业生态条件造成破坏,良好的经济基础可以降低农业自然灾害的脆弱性,增加系统自保能力,从而提升了农业生态效率。

农业经济系统的恢复力是农业生态效率的重要推动力。较高的经济增长有助于改善居民生活水平和经济状况,补齐经济上的短板,可以重新调配资源,提供全面的劳动力支撑和良好的道路通达条件,恢复原有的资源利用水平和经济水平。系统韧性的适应力是为农业生态效率提供跃迁支持。在科技和

人才双驱动下,助推该地区农业转型升级,降低农业污染,提升经济效益和资源利用率。效率是以最小的资源要素、环境要素投入去获得最大化社会产出的资源利用方式^[19]。在农业资源和环境承载力的约束下,改善了农业粗放式的生产模式,控制资本、能源、物质等生产要素的投入,实现资源合理配置,降

低化肥、农药农膜等要素投入,减缓外部冲击对农业发展的负面影响,强化农业经济系统的风险抵御力及恢复力。农业生产技术创新,农业污染治理体系完善,环保政策帮扶力度加大为系统韧性的提升提供创新支撑和发展支撑,最终实现农业经济系统韧性创新发展跃升阶段^[8]。

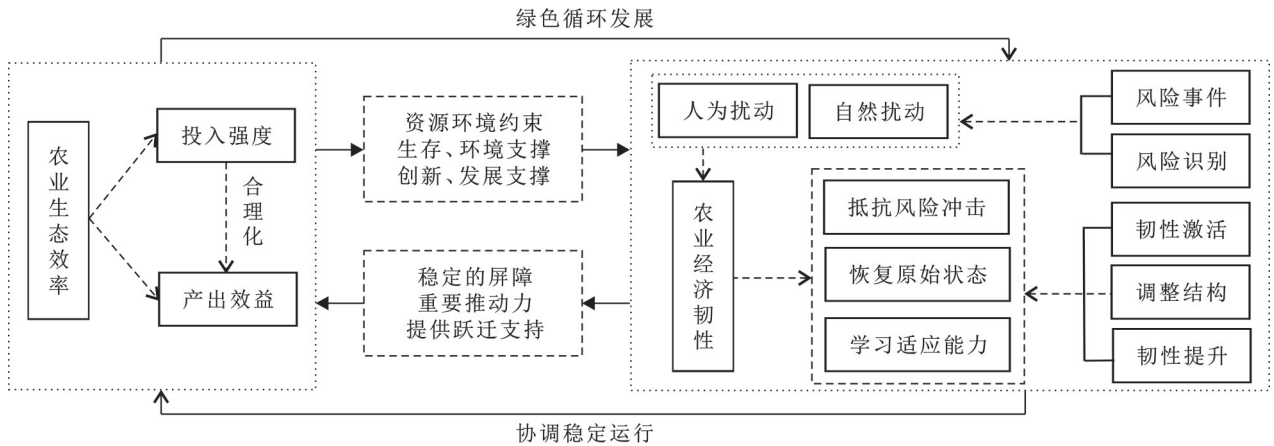


图 1 农业生态效率与经济韧性相互作用机理

Fig.1 Mechanism of interaction between agricultural ecological efficiency and economic resilience

2 研究区概况和研究方法

2.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处中国西北干旱区,总面积 $1.67 \times 10^6 \text{ km}^2$,其辖区内有 4 个地级市,5 个地区,5 个自治州。该地区为典型的大陆性干旱、半干旱气候区,夏季酷热少雨,冬季严寒,昼夜温差显著,同时地形复杂,山脉与盆地交错分布。首先,新疆因地貌多样、气候干旱,多发地质灾害和气象灾害,单位面积产出能力受限^[22],2023 年新疆生产总值为 19 125.91 亿元,仅占全国总量的 1.52%。其次,新疆生态脆弱,水资源分布不均,南北差异大,植被稀少,荒漠化、盐碱化严重,2022 年土地荒漠化面积为 $1.07 \times 10^6 \text{ km}^2$,占新疆土地总面积的 64.18%。

2.2 指标构建

2.2.1 农业生态效率指标构建

农业生态效率是指在恒定农业生产要素投入下的产出,由投入与产出两大指标构成,产出越高,效率相应也就越高,反之则越低^[23]。结合新疆地区发展现状,并参考相关研究^[24-25],构建农业生态效率的评价指标体系(表 1)。

2.2.2 农业经济韧性指标构建

本文参考经济韧性的定义^[6],以此为基础界定农业经济韧性的内涵,即农业经济系统受到外界冲击时所表现出的抵御力和恢复力,及转向更优运作状态的

适应力。将农业经济韧性划分为抵抗力、恢复力、适应力 3 个维度,并筛选合适的指标体系^[26-28]。抵抗力包含生产韧性、生态韧性、经济韧性;恢复力包含恢复韧性;适应力包含技术进步和经济增长(表 2)。

表 1 农业生态效率评价指标体系
Table 1 Evaluation indicator system for agricultural ecological efficiency

指标类别	指标名称	指标层	属性
投入	资本	农林牧渔业固定资产投资/万元	+
	劳动力	农林牧渔从业人员/万人	+
	水资源	有效灌溉面积/ 10^3 hm^2	+
	农药	农药使用量/t	-
	农膜	农用塑料薄膜使用量/t	-
	化肥	化肥投入/t	-
	机械	农业机械总动力/kW	+
	能源	农用柴油使用量/t	-
	土地	农作物播种面积/ 10^3 hm^2	+
期望产出	经济产出	农业总产值/万元	+
	实物产出	粮食总产量/t	+
非期望产出		化肥、农药、农膜综合指数/10 kt	-
	农业面源污染	SO_2 排放量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	-
		NO_2 排放量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	-

注: + 表示正向指标, - 为负向指标。下同。

2.3 研究方法

2.3.1 综合评价法

首先对各指标数据进行无量纲化处理,再利用熵

权法确定各指标权重,最后运用综合评价法,计算新疆各地州不同年份农业经济韧性水平、农业生态投入水平、产出水平,计算公式参照文献[29]的研究方法。

表 2 农业经济韧性评价指标体系
Table 2 Evaluation indicator system for agricultural economic resilience

维度	一级指标	二级指标	属性	
抵抗力	生产韧性	农业机械总动力/kW	+	
		农村用电量/(10 ⁴ kW·h ⁻¹)	+	
		农作物播种面积/10 ³ hm ²	+	
		农业用水量/10 ⁸ m ³	+	
	生态韧性	农用化肥投入/t	-	
		SO ₂ 排放量/(mg·m ⁻³)	-	
		NO ₂ 排放量/(mg·m ⁻³)	-	
		农药施用量/t	-	
	经济韧性	农用塑料薄膜施用量/t	-	
		第一产业占GDP的比重/%	+	
恢复力	经济韧性	农林牧渔业总产值/万元	+	
		粮食总产量/10 ⁴ t	+	
	恢复韧性	第一产业增长值占GDP的比重/%	+	
		乡村劳动力人口/人	+	
		农村居民人均可支配收入	+	
		农村居民人均消费支出	+	
		耕地面积/10 ³ hm ²	+	
		农村路网通达性/10 ⁴ km	+	
	适应力	技术进步	财政科技支出/万元	+
			农业科技人员数/人	+
经济增长		农村宽带普及率/%	+	
		农林水财政支出/万元	+	
		农业固定资产投资/万元	+	

2.3.2 Super-SBM 模型法

Tone 在 SBM 的基础上提出超效率 SBM 模型,计算结果相较之前更精准,因此本文采用 Super-SBM 模型对新疆各地州农业生态效率进行测度,计算公式参照文献[14]的研究方法。

2.3.3 权衡-协同分析方法

分析新疆农业生态效率与经济韧性时,需要对数据进行 Shapiro-Wilk 检验(样本量<50)时,计算 Pearson 相关系数(*r*)。当其中一类不符合正态分布时,计算 Spearman 秩相关系数(*r*),若 *r*>0,代表效率与韧性是协同关系;*r*<0,代表效率与韧性是权衡关系^[30]。

2.3.4 生产可能性曲线

生产可能性边界(production possibility frontiers, PPF)是一个经济学概念,是指在有限资源和技术条件下所能产生的各种商品最大数量的组合,可以直观、定量地显示不同产品间的权衡强度。基于生产

可能性边界概念,新疆农业生态资源是有限的,可以为农业经济运行提供的物质资源是一定的,并且效率与韧性之间存在动态联动关系。由于不同地区发展的偏好和决策可能导致选择冲突,使得效率和韧性发展水平也存在不同组合情况。参考刘玉等^[31]的方法,基于新疆农业生态效率与农业经济韧性综合评价指数;而后,将综合评价指数按照升序排列,依据排序结果确定能提供最大综合评价指数的效率-韧性组合;随后,选用排名前5组的效率-韧性组合并依据数据趋势绘制 PPF 曲线(图 2),以表示理想状态下韧性-效率的最优均衡组合。

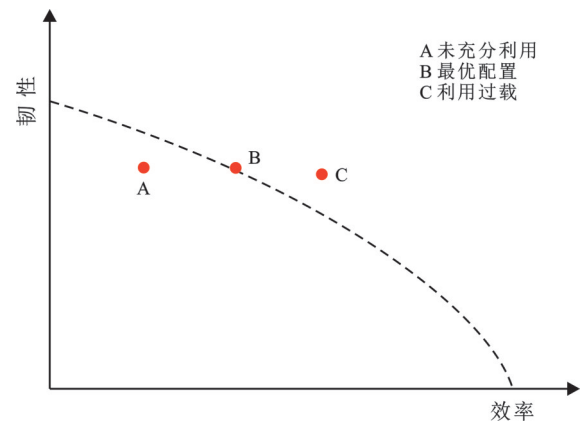


图 2 生产可能性边界曲线

Fig.2 Frontier curve of production possibility

2.3.5 权衡强度

假设 PPF 曲线的表达式为 $y=f(x)$,那么该曲线上任意一点的坐标为 $Q[x, f(x)]$,假定权衡移动的最终方向是达到效率-韧性的最优组合值,那么这种最优状态就可以认为是平衡状态,而且给定条件下只存在一种平衡状态,即只能获得一条 PPF 曲线^[31],表达式为

$$D_{PQ} = \left| P(x_0, y_0) - Q[x, f(x)] \right| = \left\{ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \right\} \quad (1)$$

因此,权衡强度指标计算公式为

$$D_{PQ_{min}} = \min \left| P(x_0, y_0) - Q[x, f(x)] \right| = \min \left\{ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \right\} \quad (2)$$

式中:坐标点 $P(x_0, y_0)$ 表示效率-韧性均值对应的点; D_{PQ} 表示该点到 PPF 曲线上任意一点 Q 的距离。基于此假设,采用效率-韧性均值对应的点到 PPF 曲线的最短距离来代表权衡强度指数的值,即权衡强度指数($D_{PQ_{min}}$)。 $D_{PQ_{min}}$ 的值越大,权衡强度越大;反之越弱。

2.3.6 地理加权回归模型(GWR 模型)

GWR 模型可以揭示自变量的回归系数在不同地理单元上的差异^[32]。为探究新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同关系的影响因素,选用 GWR 模型进行估计,计算公式为:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(\mu_i, \nu_i) Z_{ik} + \epsilon_i \quad (3)$$

式中: Y_i 为地州 i 的农业生态效率与经济韧性权衡协同关系; (μ_i, ν_i) 为地州 i 的空间坐标; $\beta_0(\mu_i, \nu_i)$ 为地州 i 的截距; $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 为地州 i 第 k 个解释变量的回归系数; Z_{ik} 为一组解释变量; p 为解释变量的个数; ϵ_i 为残差项。

2.4 数据来源

本文所需的数据主要来源于新疆维吾尔自治区水利厅,新疆维吾尔自治区统计局等政府部门的数据,以及《新疆统计年鉴(2011—2022年)》《新疆水资源公报(2010—2022年)》《新疆水土保持公报(2010—2022年)》《新疆生态环境状况公报(2010—2022年)》及各地州市国民经济和社会发展统计公报和环境状况公报等,部分缺失数据通过线性插值法补充。

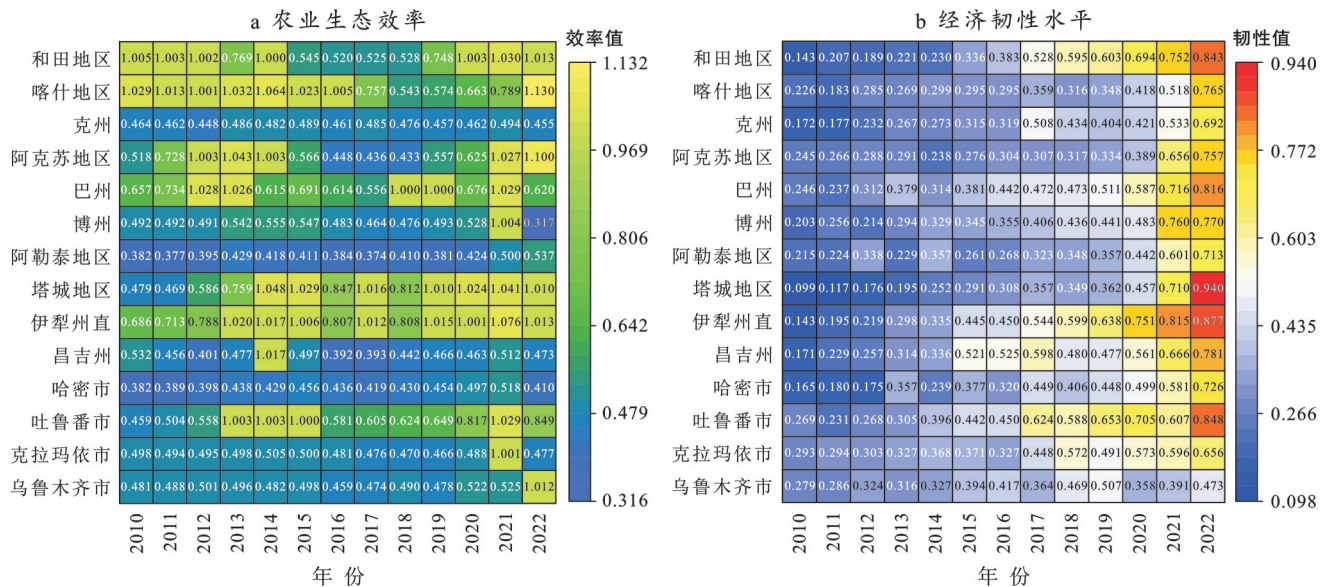
3 结果分析

3.1 新疆农业生态效率与经济韧性水平时空分析

3.1.1 新疆农业生态效率与经济韧性水平时序特征分析

由图 3a 可知,2010—2022 年新疆总体农业生态

效率呈现增长趋势。2014 年新疆各地州农业生态效率增长最显著,塔城地区由 0.479(2010 年)增长为 1.048(2014 年),吐鲁番市由 0.459(2010 年)增长为 1.003(2014 年),说明新疆农业生态效率受自然环境状况、农业生产状况和政策的影响,新疆水资源匮乏,农民节水意识强烈,在节水措施的推广和政策的有力支持下,节约了农业用水,加之国家和地方加大对农机购置补贴的力度,新疆各地农机装备水平提升,提高了这些领域的生产效率和规模化水平。2021 年新疆各地州农业生态效率最高,2022 年出现小幅下滑趋势,博州由 1.004(2021 年)下滑到 0.317(2022 年),克拉玛依市由 1.001(2021 年)下降到 0.477(2022 年),这可能因为双碳政策的实施,能源结构向清洁能源转型,环保标准提升也可能导致企业生产成本增加,短期内影响产出效率。由图 3b 可知,2010—2022 年新疆总体农业经济韧性呈现迅猛式增长的态势,2022 年韧性值达到最高水平。塔城地区由 0.099(2010 年)上升到 0.940(2022 年),伊犁州直由 0.143(2010 年)上升到 0.877(2022 年),这主要因为新疆作为中国重要粮仓,统筹推进“三农”工作建设农业强区,新疆农业科技水平不断提升,能够解决劳动力不足,生产效率低等问题,以此提升农业经济韧性。但乌鲁木齐市农业经济韧性增长幅度不显著,由 0.279(2010 年)上升到 0.473(2022 年)。



注:克州为克孜勒苏柯尔克孜自治州;巴州为巴音郭楞蒙古自治州;伊犁州直为伊犁哈萨克自治州的直属县市;博州为博尔塔拉蒙古自治州;昌吉州为昌吉回族自治州。

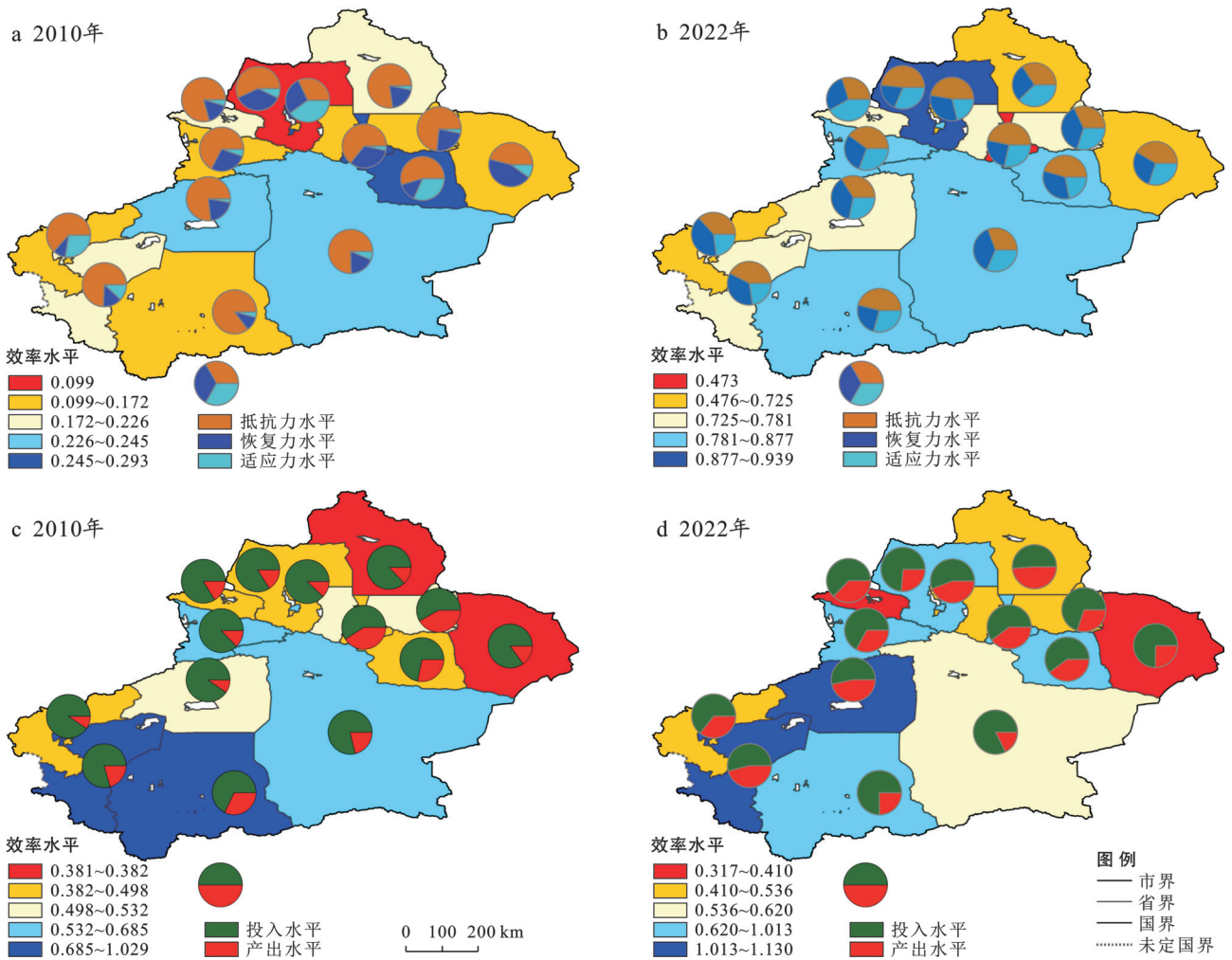
图 3 新疆 2010—2022 年农业生态效率与经济韧性水平时序特征

Fig.3 Temporal characteristics of agricultural ecological efficiency and economic resilience level in Xinjiang (2010—2022)

3.1.2 新疆农业生态效率与经济韧性水平空间格局分析

由图 4a 可知,2010 年新疆各地州农业经济韧性水平整体偏低,空间上呈现“南部高,北部低”的空间格局,且各地州抵抗力水平较高,恢复力和适应力水平较低。农业经济韧性发展水平最高的是克拉玛依市,韧性值为 0.293,表明克拉玛依市创新科技较其他地区领先,农业资源丰富,农业科技人才队伍强大,使其农业经济系统在遭受外部冲击时,能够抵抗风险的冲击,进而恢复系统发展水平。由图 4b 可知,2022 年新疆各地州农业经济韧性水平大幅度提升,区域空间差异缩小,且各地州恢复力、适应力相比于 2010 年增长明显。高值区聚集在塔城地区、巴州、和田地区、伊犁州直、吐鲁番市、阿克苏地区、喀什地区、昌吉州、博州。由图 4c 可知,新疆各地州农业生态效率空间异质性显著,效率值处于中等水平,且投入水平高于产出水平。2010 年各地州农业生态效率空间分布格局为“东北低、西南高”,阿勒泰地区农业生态效率水平最低,效率值为 0.381,投入水平相比产出水平高出 0.462,表明该区农业资源配置不合理,资源消耗过多和环境污染排过量,导致农业生态效率低下。

由图 4d 可知,2022 年各地州农业生态效率水平大幅提升,空间差异逐步缩小,高值区数量增加,产出水平相较于 2010 年有所提升,为推进农业现代化建设的进程,农业要素投入也在增长。



注:该图基于新疆标准地图服务网站下载的审图号为新S(2022)047号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 4 新疆 2010—2022 年农业生态效率与经济韧性水平空间格局

Fig.4 Spatial pattern of agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang from 2010—2022

3.2 新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同关系分析

3.2.1 新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同相关性分析

相关性分别对投入水平、产出水平、抵抗力、恢

复力、适应力进行非参数检验,发现产出水平不服从正态分布,从而采用 Spearman 秩相关性分析识别产出水平与抵抗力、恢复力、适应力两两间的关系,投入水平采用 Pearson 相关系数进行检验,分析结果如图 5 所示。结果表明,投入水平和产出水平分别与抵

抗力、恢复力、适应力两两之间存在显著相关性 ($p < 0.01$; 双侧检验)。投入水平与抵抗力、产出水平与恢复力之间的相关性系数 $r < 0$, 表明两者之间呈负相关, 为权衡关系; 投入水平与恢复力、适应力, 产出水平与抵抗力、适应力两两之间的相关系数 $r > 0$, 表明两者之间呈正相关, 为协同关系。

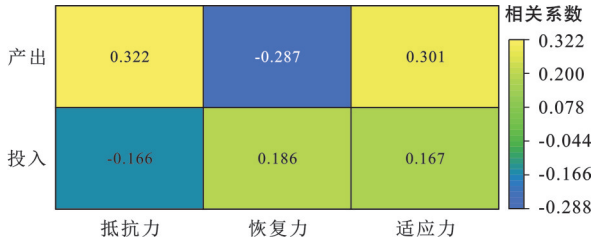


图 5 新疆农业生态效率与经济韧性的相关性

Fig.5 Correlation between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

3.2.2 新疆农业生态效率与经济韧性的权衡关系量化

按照本文构建的权衡强度定量化方法, 绘制投

入与抵抗力、产出与恢复力权衡组合的权衡曲线, 借助 Origin 散点图的拟合趋势线功能绘制权衡 PPF 曲线 (图 6)。由图 6 可知, 投入与抵抗力的权衡强度 (0.004) $<$ 产出与恢复力的权衡强度 (0.042)。 P_1 点代表位列前 5 投入-抵抗力综合评价指数的均值点, 坐标为 $(0.511, 0.517)$, P_2 点代表位列前 5 产出-恢复力综合评价指数的均值点, 坐标为 $(0.408, 0.586)$ 。图 6a 中投入-抵抗力组合形成了“下凹—上凸”的 PPF 曲线, 处于理想状态点为 $(0.484, 0.446) \rightarrow (0.558, 0.645) \rightarrow (0.570, 0.542)$, 表明这些投入-抵抗力组合达到最优配置, 而点 $(0.470, 0.460)$ 处于未充分利用状态, 农业生产效率和农业经济韧性还有待提升。图 6b 中产出-恢复力组合 PPF 曲线呈“高尖型”, 处于理想状态点为 $(0.373, 0.606) \rightarrow (0.457, 0.814) \rightarrow (0.595, 0.367)$, 表明这些产出-恢复力组合处于最优配置状态, 点 $(0.314, 0.576)$ 处于利用过载, 表明此时的农业资源利用率已经达到最高值, 农业污染也达到峰值, 生态承载力也难以支撑农业系统的恢复力水平。

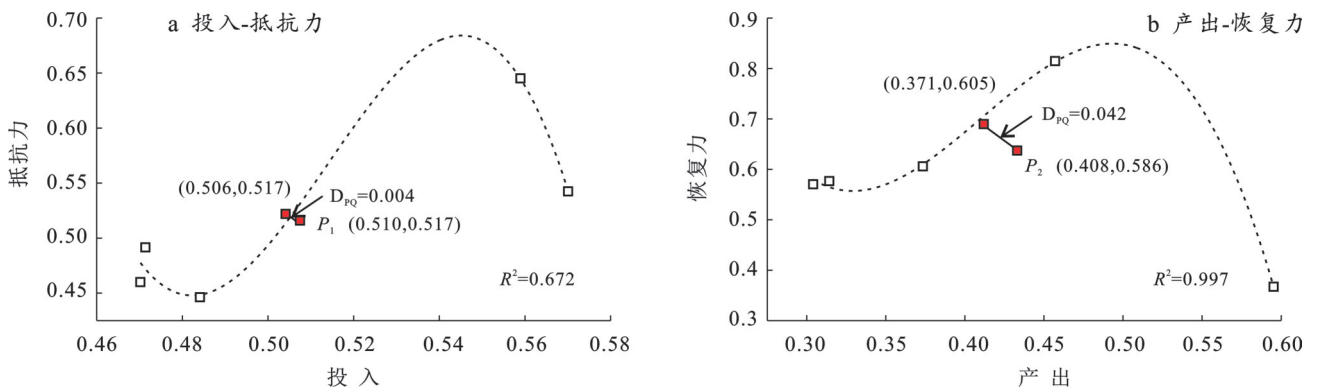


图 6 新疆农业生态效率与经济韧性权衡 PPF 曲线及权衡强度

Fig.6 Trade-off PPF curves and trade-off intensities of agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

3.2.3 新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同的空间格局分析

由图 7 可知, 新疆各地州的投入与抵抗力保持在大部分区域呈现轻度协同和初度协同关系, 而权衡关系主要分布在西部和北部, 数量较少包括克州、克拉玛依市、阿克苏地区。其中, 阿克苏地区投入与抵抗力权衡关系最强, 相关系数为 -0.87 。投入与恢复力保持在大部分区域呈现轻度协同和中度协同关系, 但巴州、博州、克拉玛依市出现权衡关系。其中协同程度最强的地区为乌鲁木齐市, 相关系数为 0.89 , 主要由于稳定的农业资源投入, 使得农业生产拥有足够的资源应对风险的冲击, 有条件恢复到原有发展水平, 给予农业经济恢复一定的物质保障。克州、阿克苏地区、巴州、博州、阿勒泰地区投入与适

应力处于权衡关系, 主要由于“三农”工作的逐步推进, 但农业资源消耗过高, 对于水资源稀缺的新疆地区造成很大压力。由图 7d—7f 可知, 新疆各地州的产出与抵抗力保持在大部分区域呈现初度权衡、初级协同和中度协同关系, 相较于图 7a, 处于初度权衡地区数量增加, 包括巴州、博州、阿勒泰地区。相较于图 7b, 产出与恢复力中度协同数量减少, 初度权衡数量增加。说明农业快速发展的同时农业面源污染也有所增加, 造成产出与恢复力呈负向关系。产出与适应力保持在大部分区域呈现显著协同关系, 数量多且分布较分散, 主要坐落于新疆北部和新疆南部。这些协同地区转变了传统农业生产方式, 生态效率明显提升, 机制创新也降低了使用成本, 真正实现了技术创新带动农业提质增效。

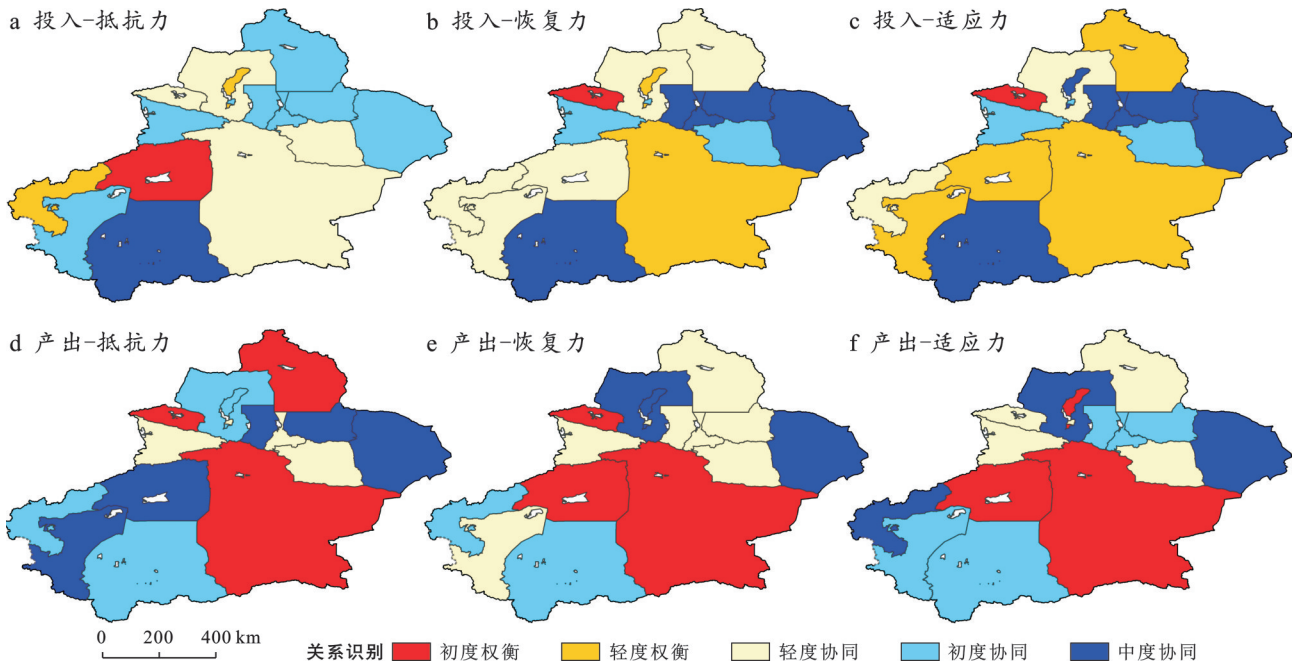


图7 新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同空间格局

Fig.7 Spatial patterns of trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

3.3 新疆农业生态效率与经济韧性权衡协同关系的影响因素分析

基于既有文献^[6-7,20]和新疆实际状况,选取环境污染治理投资总额、化肥、农药、农膜综合指数、农业机械总动力、农林牧渔业总产值、财政科技支出、农林水财政支出作为模型的解释变量。首先进行多重共线性检验,其中化肥、农药、农膜综合指数、农业机械总动力驱动因素方差膨胀因子大于10,说明存在明显的多重共线性,从而剔除。其次,采用GWR模型对新疆各地州效率与韧性权衡协同关系的影响因素进行识别,GWR模型的 R^2 均在0.612以上,模型拟合效果较好,AICc值在37以下,残差平方和在2.081以下。如图8所示,环境污染治理投资总额在对投入-抵抗力为权衡关系的影响中,克州、阿克苏地区、克拉玛依市呈现显著负相关,而在巴州为投入-抵抗力协同关系的组合呈现正相关,其他地区投入-抵抗力为协同关系的组合均呈现正相关。在环境污染治理投资总额对投入-恢复力、投入-适应力为协同关系的影响中,和田地区、昌吉州、乌鲁木齐市、哈密市、吐鲁番市、伊犁州直呈现正相关。在农林牧渔业总产值对产出-抵抗力、产出-恢复力为权衡关系的影响中,巴州、博州呈现显著负相关。在对产出-适应力为协同关系的影响中,克州、哈密市呈现显著正相关关系,而在阿勒泰地区、博州、吐鲁番市的地区中,产出-适应力为轻度协同却呈现负相关。可能由于农民强化农业生产依赖化学投入物以满足农产品需求,使其农业韧性增长日益紧张。

差异,投入强度高的区域,生产过程中所造成污染可以快速有效地治理,生态条件可以迅速恢复较高的发展水平。

由图9所示,农林牧渔业总产值在对投入-抵抗力为权衡关系的影响中,克州、阿克苏地区、克拉玛依市呈现显著负相关,和田地区投入-抵抗力为协同关系的组合呈现显著正相关。在对投入-恢复力、投入-适应力为协同关系的影响中,和田地区、昌吉州、乌鲁木齐市、哈密市、吐鲁番市、伊犁州直呈现正相关。在农林牧渔业总产值对产出-抵抗力、产出-恢复力为权衡关系的影响中,巴州、博州呈现显著负相关。在对产出-适应力为协同关系的影响中,克州、哈密市呈现显著正相关关系,而在阿勒泰地区、博州、吐鲁番市的地区中,产出-适应力为轻度协同却呈现负相关。可能由于农民强化农业生产依赖化学投入物以满足农产品需求,使其农业韧性增长日益紧张。

如图10所示,财政科技支出在对投入-抵抗力为权衡关系的影响中,克州、阿克苏地区、克拉玛依市呈现显著负相关,博州、塔城地区、巴州投入-抵抗力为协同关系的组合呈现负相关。在对投入-恢复力协同关系的影响中,处于负相关的地区主要分布在新疆西部,包括阿克苏地区、克州、喀什地区、塔城地区、阿勒泰地区。在对投入-适应力协同关系的影响中,新疆东北部呈现正相关。在财政科技支出对产出-抵抗力、产出-恢复力为权衡关系的影响中,巴州、博

州呈现显著负相关。在对产出-适应力为协同关系的影响中,呈现正相关的地区分布较分散,主要位于西南部和东北部,主要原因是科技资金投入可吸引创

新要素集聚,衍生新型生产模式,从源头减少污染排放,提升生态环境质量,从而提升农业系统受风险冲击后的恢复力和适应力。

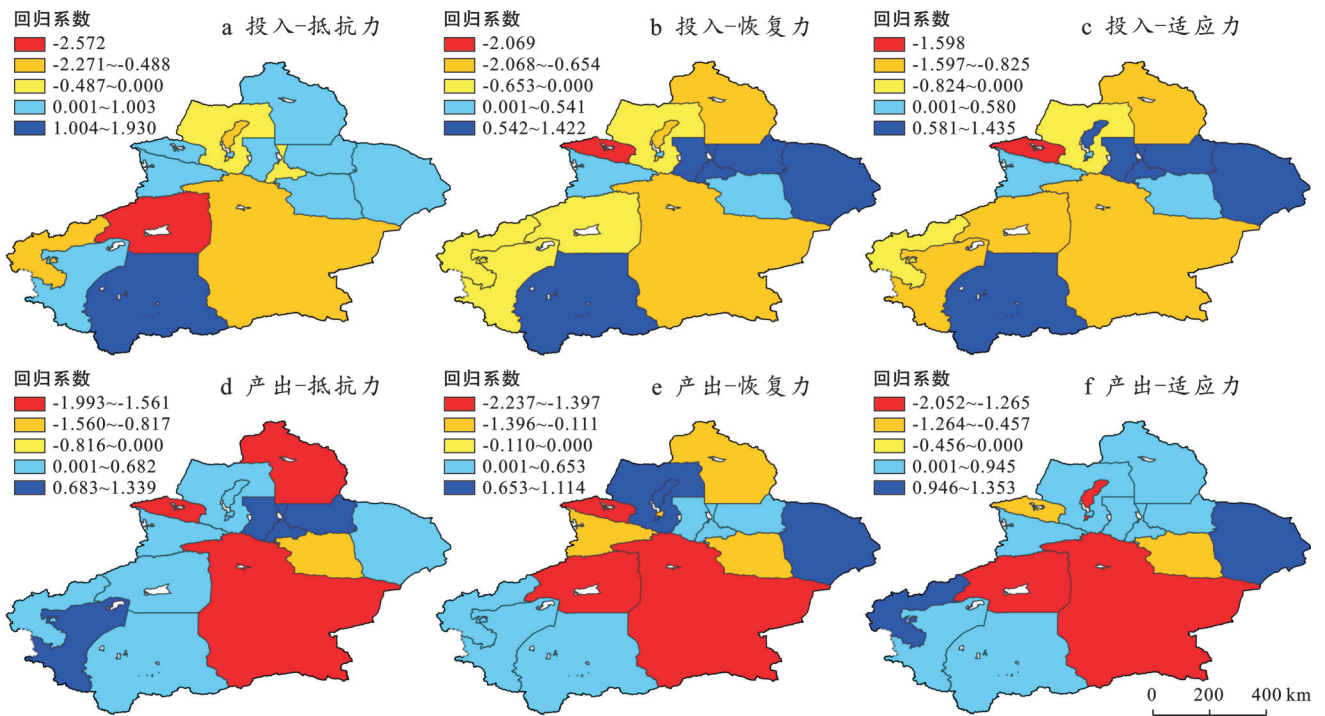


图 8 新疆环境污染治理投资总额对农业生态效率与经济韧性权衡协同的影响系数

Fig.8 Influence coefficients of total investment in environmental pollution control on trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

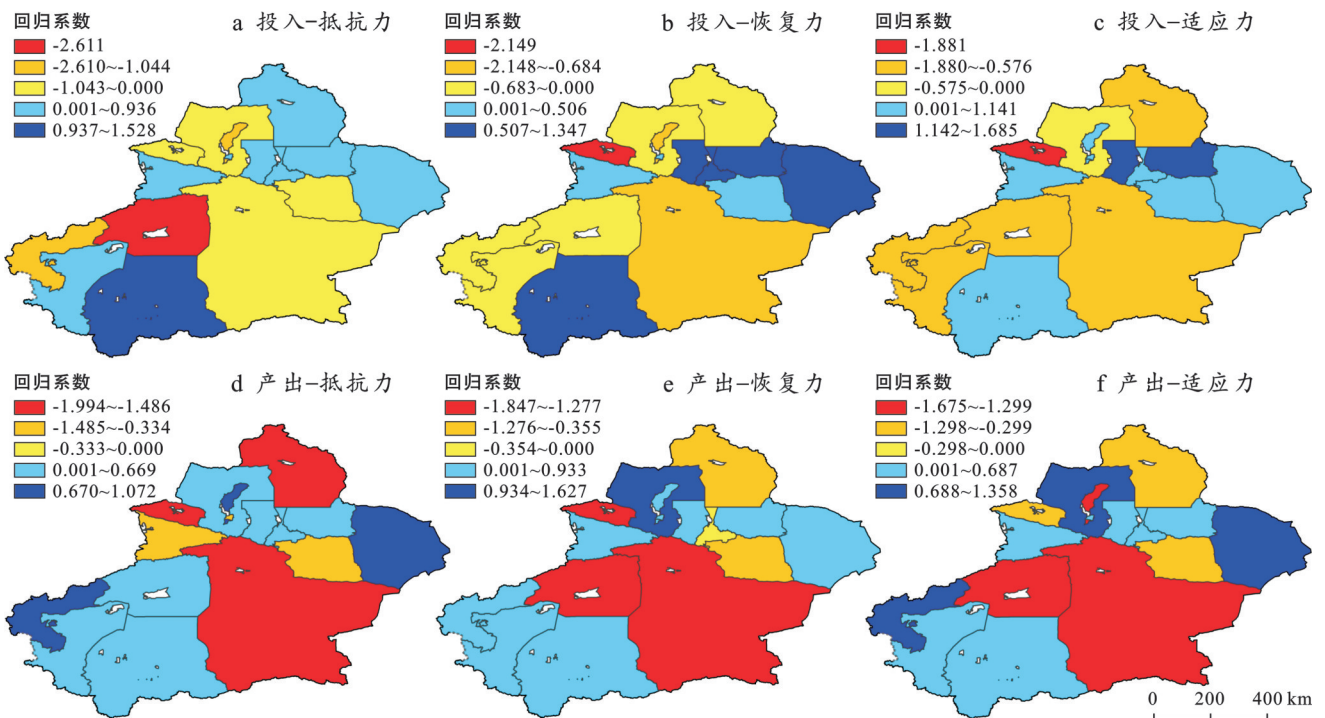


图 9 新疆农林牧渔业总产值对农业生态效率与经济韧性权衡协同的影响系数

Fig.9 Influence coefficients of total output value of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery on trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

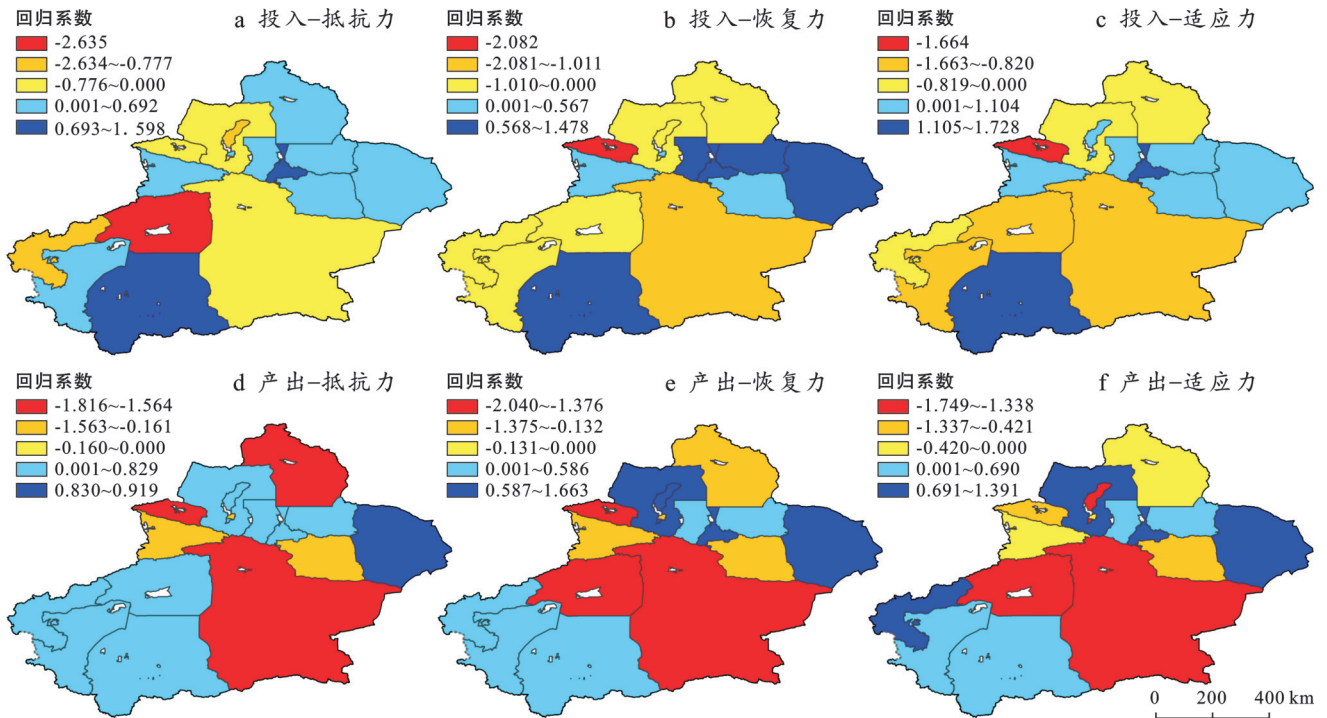


图 10 新疆财政科技支出对农业生态效率与经济韧性权衡协同的影响系数

Fig.10 Influence coefficients of fiscal expenditure on science and technology on trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjinag

由图 11 所示,农林水财政支出在对投入-抵抗力为权衡关系的影响中,克州、阿克苏地区、克拉玛依市呈现强负相关,博州、塔城地区、巴州投入-抵抗力为协同关系的组合呈现弱负相关。在对投入-恢复力协同关系的影响中,处于负相关的地区主要分布在新疆西部。在对投入-适应力协同关系的影响中,呈现负相关的地区数量较少,分布在新疆西部包括克州、塔城地区。在农林水财政支出对产出-抵抗力、产出-恢复力为协同关系的影响中,伊犁州直、吐鲁番市呈现显著负相关。阿勒泰地区、伊犁州直、吐鲁番市、博州中产出-适应力为轻度协同却呈现负相关,主要原因是政府在农林水支出分配过程中,针对生态工程建设投资不足,资金配置的作用没有充分发挥,从而加强了产出与韧性的权衡关系。

4 讨论

本研究投入与抵抗力、产出与恢复力之间的权衡关系区别于其他学者关于效率与韧性协同关系的研究,其中张明斗等^[33]利用耦合协调度分析水资源利用效率与生态韧性的协调关系,认为两者协调度呈现增长趋势,并识别内源动力是提升两者协调度的主要动力,因为经济发展为环境治理提供资金支撑,保证基础设施的建设,技术创新可以助力污染减排与环境治理技术的发展,产业转型可淘汰落后产

能,也有学者认为财政支农和环境规制对农业绿色生产效率与经济韧性协调度产生负向^[20],因为财政支农是保障农业基础设施建设的基础保障,环境规制可知防止过度污染,保护生态环境,这与本文得出环境治理投资总额、财政支农对农业生态效率与农业经济韧性权衡协同影响存在负向影响相一致,可以印证本文得出结论的科学性。此外,本文是利用权衡-协同分析方法^[30]识别农业生态效率与农业经济韧性之间的权衡协同关系,在理论上突破了原有的协同关系,证明效率与韧性的发展中不仅存在协同关系还存在权衡关系,经研究环境污染治理投资总额、农林牧渔业总产值、财政科技支出、农林水财政支出 4 种影响因素对新疆不同地州韧性与效率的关系产生促进和抑制的作用。因此,可针对研究区可持续发展战略进行科学管理,进一步降低韧性与效率之间的权衡作用,首先,加大政策扶持力度,推进政策性农业保险工作、完善受灾补贴机制,稳定的政策供给才能给农业生产提供保障。其次,财政支出是支撑农业发展的途径,为提高支农资金使用效率,要增大投入规模和比例,改善环境与基础设施、保障生产能力,设立相关基金,探寻多种投入方式,保证农业科技的研发和推广。最后,对于资源型地区韧性下降时,应转变发展方式,培育新动能,发展循环经济,保护生态,处理好经济与资源消耗、生态保护的关系。

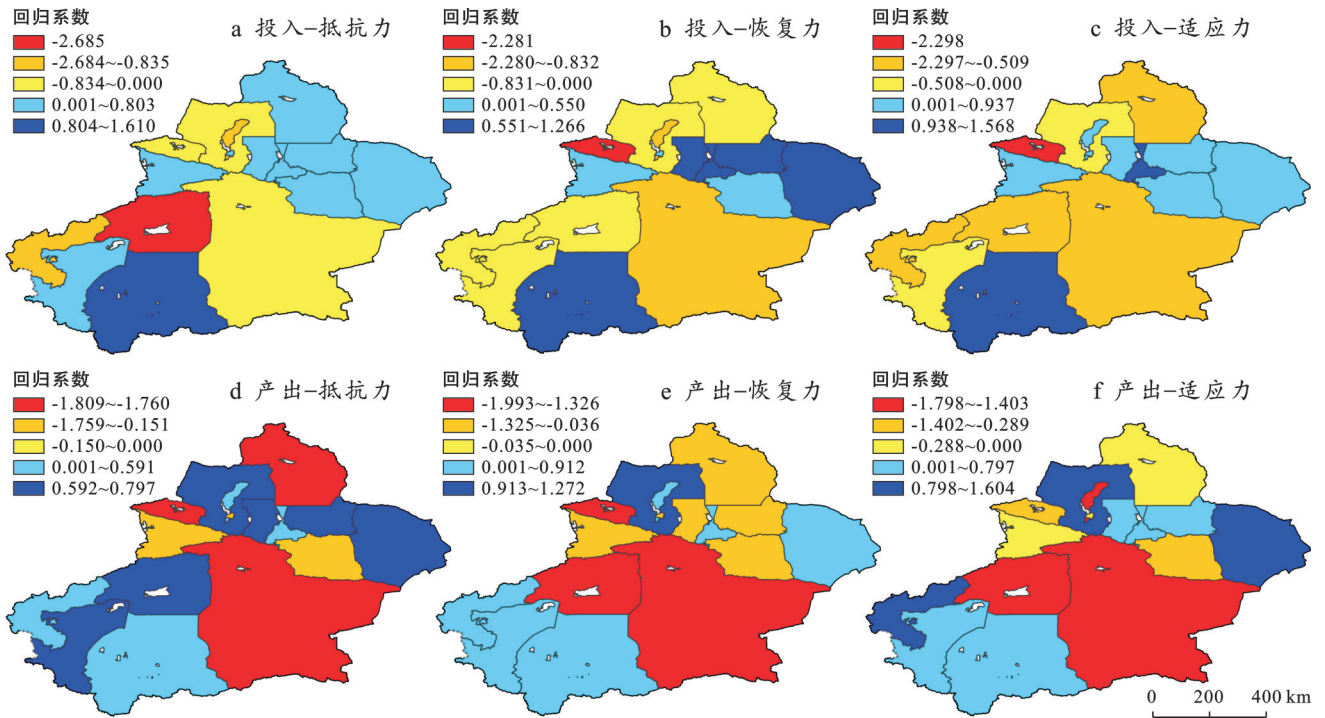


图 11 新疆农林水财政支出对农业生态效率与经济韧性权衡协同的影响系数

Fig.11 Influence coefficients of fiscal expenditure on agriculture, forestry and water resources on trade-off and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in Xinjiang

本研究将杨薇等^[30]提出的生态系统服务权衡强度模型首次应用到韧性与效率的权衡关系量化研究中,所得结果可以衡量不同效率与韧性均值组合的权衡关系的大小,并进行有效对比,基于PPF方法寻求韧性和效率的最优组合,从而为实现干旱区可持续发展提供科学依据,但方法是否具有普适性和科学性,尚需通过更多案例来验证。此外,本研究分析了效率与韧性关系的影响因素,未来可以引入时间变量,探讨不同时期下影响因子的系数变化。

5 结论

(1) 2010—2022年新疆农业经济韧性呈现快速增长态势,农业生态效率呈增长趋势。从空间分布来看,新疆各地州农业经济韧性水平呈现“南部>北部”的分布格局,且各地州恢复力和适应力增长显著;农业生态效率高值区分布在新疆南部,低值区主要分布在北部。

(2) 产出与抵抗力之间显著协同,产出与恢复力之间显著权衡;产出-恢复力权衡强度>投入-抵抗力权衡强度。PPF曲线表明,投入-抵抗力与产出-恢复力间的权衡情形相似为“下凹—上凸”形状,且对应组合多数处于最优配置。

(3) GWR模型结果显示,环境污染治理投资总额使新疆南部效率与韧性之间的权衡关系加强,其他地区协同关系加强;农林牧渔业总产值在一定程

度上减弱新疆北部效率-韧性的协同关系,加强中部地区权衡关系;财政科技支出推进了不同地区效率与韧性之间的协同关系,也加强了两者的权衡关系;农林水财政支出在新疆北部减缓了韧性效率之间的权衡关系,而在南部部分地区加强韧性效率之间的权衡关系。

参考文献 (References)

[1] 周芳名.中国城乡要素配置的协调性测度与演化分析[J].统计与决策,2021,37(23):54-58.
Zhou Fangming. Coordination measurement and evolution analysis of urban and rural factor allocation in China [J]. Statistics & Decision, 2021, 37(23):54-58.

[2] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.

[3] Martin R, Sunley P, Tyler P. Local growth evolutions: Recession, resilience and recovery [J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2015,8(2):141-148.

[4] Carl F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. Global Environmental Change, 2006,16(3):253-267.

[5] 郭娜,吕腾旭,宗昊龙.农业数字化对农业经济韧性的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(1):178-189.
Guo Na, Lyu Tengxu, Zong Haolong. Impact of agricultural digitization on the economic resilience of agriculture

- [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(1): 178-189.
- [6] 张明斗, 惠利伟. 中国农业经济韧性的空间差异与影响因素识别[J]. *世界农业*, 2022, 44(1): 36-50.
Zhang Mingdou, Hui Liwei. Spatial disparities and identification of influencing factors on agricultural economic resilience in China [J]. *World Agriculture*, 2022, 44(1): 36-50.
- [7] 李久林, 滕璐, 马昊楠, 等. 安徽省农业经济韧性的空间异质性及其影响因素[J]. *华东经济管理*, 2022, 36(11): 75-84.
Li Jiulin, Teng Lu, Ma Haonan, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural economic resilience in Anhui Province [J]. *East China Economic Management*, 2022, 36(11): 75-84.
- [8] 方叶林, 王秋月, 黄震方, 等. 中国旅游经济韧性的时空演化及影响机理研究[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(3): 417-427.
Fang Yelin, Wang Qiuyue, Huang Zhenfang, et al. Spatial and temporal evolution of tourism economic resilience and mechanism of impact in China [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(3): 417-427.
- [9] 蒋文鑫, 吴军, 徐建刚. 城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系研究: 以江苏省为例[J]. *资源开发与市场*, 2023, 39(3): 299-308.
Jiang Wenxin, Wu Jun, Xu Jiangan. Study on the coupling coordination between urban ecological resilience and economic development level: Taking Jiangsu Province as an example [J]. *Resource Development & Market*, 2023, 39(3): 299-308.
- [10] 刘淑淑, 姜霞, 张龙, 等. 长江经济带城市经济韧性测度及时空演化研究[J]. *特区经济*, 2021, 39(6): 31-35.
Liu Shushu, Jiang Xia, Zhang Long, et al. Study on the measurement of urban economic resilience and its spatial-temporal evolution in the Yangtze River economic belt [J]. *Special Zone Economy*, 2021, 39(6): 31-35.
- [11] 储金龙, 马昊楠, 李久林. 城市韧性的空间差异与影响因素研究: 以安徽省为例[J]. *安徽农业大学学报(社会科学版)*, 2023, 32(1): 68-76.
Chu Jinlong, Ma Haonan, Li Jiulin. Spatial differences and influencing factors of urban resilience: A case study of Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural University (Soc Sci)*, 2023, 32(1): 68-76.
- [12] 王新越, 季冉冉. 中国省域旅游经济韧性与效率适配发展及其影响因素[J]. *中国生态旅游*, 2024, 14(1): 79-92.
Wang Xinyue, Ji Ranran. Research on adaptability between tourism economy resilience and efficiency and its influencing factors in China [J]. *Journal of Chinese Ecotourism*, 2024, 14(1): 79-92.
- [13] 于伟, 张鹏. 中国农业发展韧性时空分异特征及影响因素研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(1): 102-108.
Yu Wei, Zhang Peng. Study on the spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of agricultural development resilience in China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(1): 102-108.
- [14] 陈杰, 许朗. 基于面板三阶段DEA-Malmquist模型的中国农业绿色水资源利用效率研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(4): 709-718.
Chen Jie, Xu Lang. Utilization efficiency of Chinese agricultural green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(4): 709-718.
- [15] 胡美娟, 丁正山, 李在军, 等. 生态效率视角下旅游业生态福利及驱动因素: 以常州市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1944-1955.
Hu Meijuan, Ding Zhengshan, Li Zaijun, et al. Tourism ecological welfare and driving factors from the perspective of ecological efficiency: A case study of Changzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1944-1955.
- [16] 周霞, 王佳. 中国省域经济韧性与生态效率测度及其协同演化分析[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(2): 319-331.
Zhou Xia, Wang Jia. Measurement and synergistic evolution analysis of the economic resilience and eco-efficiency of provincial regions in China [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(2): 319-331.
- [17] 陈思宇. 长三角城市群经济韧性与流通效率协同发展关系分析[J]. *商业经济研究*, 2024, 43(15): 36-39.
Chen Siyu. Analysis on the relationship between the coordinated development of economic resilience and circulation efficiency in Yangtze River delta urban agglomeration [J]. *Journal of Commercial Economics*, 2024, 43(15): 36-39.
- [18] 耿艺伟, 李效顺, 陈姜全, 等. 中国国土空间韧性与效率的耦合关系及跃迁机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(14): 6003-6019.
Geng Yiwei, Li Xiaoshun, Chen Jiangquan, et al. Coupling relationship and transition mechanism between resilience and efficiency in China's territorial space [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14): 6003-6019.
- [19] 李志远, 冯学钢, 夏赞才, 等. 长江经济带旅游生态韧性与效率协同效应及空间特征分析[J]. *旅游科学*, 2024, 38(3): 1-23.
Li Zhiyuan, Feng Xuegang, Xia Zancai, et al. Synergy effect and spatial characteristics analysis of tourism ecological resilience and efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. *Tourism Science*, 2024, 38(3): 1-23.
- [20] 梁坤丽, 刘维奇. 农业绿色生产效率与经济韧性耦合协调度的时空演变特征[J]. *统计与决策*, 2024, 40(9): 90-94.

- Liang Kunli, Liu Weiqi. Temporal and spatial evolution characteristics of coupling coordination degree between agricultural green production efficiency and economic toughness [J]. *Statistics & Decision*, 2024, 40(9): 90-94.
- [21] 曾智,杨赫,米锋.财政科技投入、科技创新与生态效率[J].*统计与决策*,2023,39(3):154-158.
- Zeng Zhi, Yang He, Mi Feng. Financial science and technology investment, science and technology innovation and ecological efficiency [J]. *Statistics & Decision*, 2023,39(3):154-158.
- [22] 郭倩倩,张志斌,马晓敏,等.西北地区城市网络结构韧性测度及其优化策略[J].*资源科学*,2024,46(8):1636-1650.
- Guo Qianqian, Zhang Zhibin, Ma Xiaomin, et al. Evaluation and optimization strategy of resilience of urban network structures in northwest China [J]. *Resources Science*, 2024,46(8):1636-1650.
- [23] 张慧萍,李彦华.中国省域能源系统可持续发展研究:基于韧性及效率协同发展视角[J].*环境科学与管理*,2022,47(3):178-183.
- Zhang Huiping, Li Yanhua. Study on sustainable development of provincial energy systems in China: Based on resilience and efficiency synergistic development perspective [J]. *Environmental Science and Management*, 2022,47(3):178-183.
- [24] 周思思,李雯.农村数字经济与农业生态效率的耦合协调发展研究[J].*智慧农业导刊*,2024,4(20):14-17.
- Zhou Sisi, Li Wen. Research on the coupling coordinated development of rural digital economy and agricultural ecological efficiency [J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2024,4(20):14-17.
- [25] 王明昊.东北地区农业生态效率及影响因素研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2023.
- Wang Minghao. Research on Agricultural Ecological Efficiency and Influencing Factors in Northeast China [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2023.
- [26] 马聪聪.中国农业经济韧性时空分异特征与影响因素研究[D].浙江 舟山:浙江海洋大学,2023.
- Ma Congcong. Research on the characteristics and influencing factors of spatiotemporal differentiation of China's agricultural economic resilience [D]. Zhoushan, Zhejiang: Zhejiang Ocean University, 2023.
- [27] 邹萍.江西省农业经济韧性的时空差异与影响因素识别[D].江西 南昌:江西农业大学,2023.
- Zou Ping. Spatio-temporal differences and identification of influencing factors of agricultural economic resilience in Jiangxi Province [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023.
- [28] 郝爱民,谭家银.农村产业融合赋能农业韧性的机理及效应测度[J].*农业技术经济*,2023,47(7):88-107.
- Hao Aimin, Tan Jiayin. Empowering agricultural resilience by rural industrial integration: Influence mechanism and effect analysis [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2023,47(7):88-107.
- [29] 孙宇,刘维忠,盛洋.基于PSR模型的新疆水资源经济生态韧性时空差异及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2023,46(12):2017-2028.
- Sun Yu, Liu Weizhong, Sheng Yang. Spatiotemporal differences and influencing factors of economic and ecological resilience of water resources in Xinjiang based on the PSR model [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(12):2017-2028.
- [30] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等.基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J].*自然资源学报*,2019,34(12):2516-2528.
- Yang Wei, Jin Yuwan, Sun Lixin, et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers: Model development and a case study [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(12):2516-2528.
- [31] 刘玉,郜允兵,潘瑜春,等.基于多源数据的乡村功能空间特征及其权衡协同关系度量[J].*地理研究*,2021,40(7):2036-2050.
- Liu Yu, Gao Yunbing, Pan Yuchun, et al. Spatial differentiation characteristics and trade-off/synergy relationships of rural multi-functions based on multi-source data [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(7): 2036-2050.
- [32] 庞瑞秋,腾飞,魏冶.基于地理加权回归的吉林省人口城镇化动力机制分析[J].*地理科学*,2014,34(10):1210-1217.
- Pang Ruiqiu, Teng Fei, Wei Ye. A GWR-based study on dynamic mechanism of population urbanization in Jilin Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(10):1210-1217.
- [33] 张明斗,任衍婷,刘耀彬.中国水资源利用效率与生态韧性的协调度及动力因素研究[J].*世界地理研究*,2025,34(2):168-180.
- Zhang Mingdou, Ren Yanting, Liu Yaobin. Coordination degree and driving factors of water resources utilization efficiency and ecological resilience in China [J]. *World Regional Studies*, 2025,34(2):168-180.