

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.06.007; CSTR:32311.14.rswc.2025.06.007.

尹珂, 任思敏. 三峡库区耕地绿色转型的时空分异及其驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(6): 381-390, 402.

Yin Ke, Ren Simin. Spatiotemporal differentiation and driving mechanisms of green transformation of cultivated land in Three Gorges Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(6): 381-390, 402.

三峡库区耕地绿色转型的时空分异及其驱动机制研究

尹珂, 任思敏

(重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘要: [目的] 解析典型生态脆弱区三峡库区耕地利用绿色转型的时空演变规律及其驱动机制, 为实现区域耕地资源可持续利用与生态-经济协同发展提供科学支撑。[方法] 基于2007—2021年土地利用、社会经济及地理环境多源数据, 构建“空间—功能—模式”三位一体评价指标体系, 采用熵值法测度耕地绿色转型水平, 并运用时空双固定效应空间杜宾模型解析本地效应与空间溢出效应。[结果] (1) 社会经济主导性: 人均GDP(总效应0.863)与农业生产总值比重(总效应0.723)通过跨区协同显著驱动转型, 而固定资产投资仅作用于本地(直接效应0.103); (2) 空间溢出非对称性: 邻近城镇化通过劳动力再分配促进本地转型(间接效应0.410), 但邻近人口密度增加引发“虹吸效应”(间接效应-0.199), 且优质区位(距中心城市、河流)存在竞争性抑制(间接效应-0.466, -0.376); (3) 地形强约束: 坡度与海拔对62%研究区转型形成显著阻碍(总效应-0.654, -0.731), 限制机械化与规模化经营。[结论] 生态脆弱区耕地绿色转型需遵循“差异化协同”路径。组建跨区域农业经济联盟, 强化人均GDP与农业产值的空间协同; 优先在平坦区域(坡度 $<15^\circ$)推进高标准农田建设; 对地形复杂区实施生态补偿与耕地指标跨区交易。

关键词: 生态脆弱区; 耕地绿色转型; 多尺度驱动; 三峡库区

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)06-0381-10

Spatiotemporal differentiation and driving mechanisms of green transformation of cultivated land in Three Gorges Reservoir Area

Yin Ke, Ren Simin

(School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatiotemporal evolution patterns and their driving mechanisms of green transformation of cultivated land use in the Three Gorges Reservoir Area, a typical ecologically fragile zone, thereby providing scientific support for sustainable utilization of regional cultivated land resources and eco-economic coordinated development. [Methods] Utilizing multi-source data (2007—2021) of land use, socioeconomic statistics, and geographical environment, an evaluation indicator system integrating three dimensions of “space-function-mode” was developed. The entropy method was employed to measure the green transformation levels of cultivated land, and a spatiotemporal dual-fixed-effect Spatial Durbin Model was applied to analyze local effects and spatial spillover effects. [Results] (1) Socioeconomic dominance: GDP per capita (total effect: 0.863) and the proportion of agricultural production value (total effect: 0.723) significantly drove the transformation through cross-regional synergy, while fixed-asset investments only had local effects (direct effect: 0.103). (2) Asymmetric spatial spillover: adjacent urbanization promoted local transformation through labor redistribution (indirect effect: 0.410), but increased adjacent population density triggered “siphon effects” (indirect effect: -0.199). Additionally, premium locations (near urban centers/rivers) demonstrated competitive suppression (indirect effects: -0.466, -0.376). (3) Strong topographic constraints: slope and elevation significantly

收稿日期: 2025-03-11

修回日期: 2025-03-24

接受日期: 2025-03-28

资助项目: 国家社会科学基金一般项目(20BJL02); 重庆市教育委员会人文社会科学研究项目(24SKGH066)

第一作者: 尹珂(1981—), 男, 重庆人, 教授, 博士研究生, 土地利用与生态过程。E-mail: keyin@cqu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

hindered transformation in 62% of the study area (total effects: -0.654 , -0.731), limiting mechanization and large-scale operations. [Conclusion] Green transformation of cultivated land in ecologically fragile zones should adopt a “differentiated coordination” approach forming cross-regional agricultural economic alliances to enhance spatial synergy between GDP per capita and agricultural output; prioritizing high-standard cultivated land development in flat areas (slope $< 15^\circ$); and implementing ecological compensation with cross-regional cultivated land quota trading in areas with complex terrains.

Keywords: ecologically fragile zone; green transformation of cultivated land; multi-scale drivers; Three Gorges Reservoir Area

耕地是土地资源中极其重要的部分,实现其合理利用是保障粮食安全的前提和基础。随着生态文明建设力度的不断增强,生态用地需求的显著增加凸显出寻求生态保护与粮食安全平衡的复杂性,也彰显了现代化治理中协调生态保护和农业生产的重要性。因此,以“数量、质量、生态”三位一体为核心,以高质量发展为引领,追求“绿色”和“转型”双重目标的耕地利用绿色转型(Green Transformation of Cultivated Land Use, GTCLU)成为了新兴研究命题。2022年,党的二十大报告中提出“要加快发展方式绿色转型”;2023年,中央一号文件则进一步强调要“推进农业绿色发展”。在这种绿色发展理念不断深化、经济发展全面转型的背景下,耕地资源的利用不再适合传统转型发展,如何促进耕地资源的绿色利用及有序转型成为实现耕地资源治理现代化的关键环节^[1]。

Grainger Alan认为土地利用转型是指某个国家或某一区域土地利用形态随着经济社会发展所产生的某种变化^[2]。随着概念内涵、理论框架的发展^[3-5],耕地利用转型研究也逐渐开始蓬勃发展^[6-7],研究领域主要包括耕地利用空间转型(显性转型)以及耕地利用功能转型(隐性转型)研究。前者针对耕地数量^[8-9]、耕地利用结构和耕地利用空间格局等^[10]的显性形态变化。而后者聚焦于社会发展不同时期耕地利用功能的变化^[11]。相比于传统转型,“绿色”转型强调绿色发展,即注重耕地利用生态效益的提升。耕地利用绿色转型作为农业可持续发展的重要路径,强调在生态效益优先原则下,通过技术替代、资源节约和空间集约,推动传统“高投入、高污染”模式向环境友好型转变。其内涵不仅涵盖耕地空间与功能的显性调整,更注重自然系统与社会经济的协同优化,如通过绿色低碳技术减少碳排放、提升碳汇能力^[12]。研究方法通常采用定性和定量结合的方式,以评价指标体系测度耕地利用绿色转型发展水平,如从投入与产出角度选择与耕地规模化经营水平、耕地劳动力投入水平、农业技术投入水平、农业资本发展水平、产出社会效益、经济生态效益相关指标构建耕地利用绿色转型评价框架,或者从“投

入+期望产出+非期望产出”构建模型以量化转型水平^[13],结合空间计量^[14]、生态足迹等^[15]方法揭示区域异质性。驱动机制上,自然条件(如地形约束、水土流失)构成转型基础限制^[14],社会经济因素(如人均GDP、农业机械化)^[16]与政策导向(如财政支农、污染治理)^[17]则通过要素配置与技术创新形成核心推力。因此,绿色转型优化策略须强调因地制宜,通过城乡要素流通、农业现代化及科技培训增强系统性协同^[1,18]。整体上,绿色转型研究呈现“理论构建—方法创新—机制解析—策略响应”的递进逻辑,旨在实现耕地资源高效利用与区域可持续发展的动态平衡。然而,学者较多关注粮食主产区耕地利用的调控^[1,7,12,16-17],对特色地理单元耕地利用绿色转型还缺少较为系统的评价框架。其中生态脆弱区是耕地保护利用与生态文明建设存在矛盾较为突出的区域,而GTCLU则是破解当前耕地利用生态困境的有力举措^[13]。

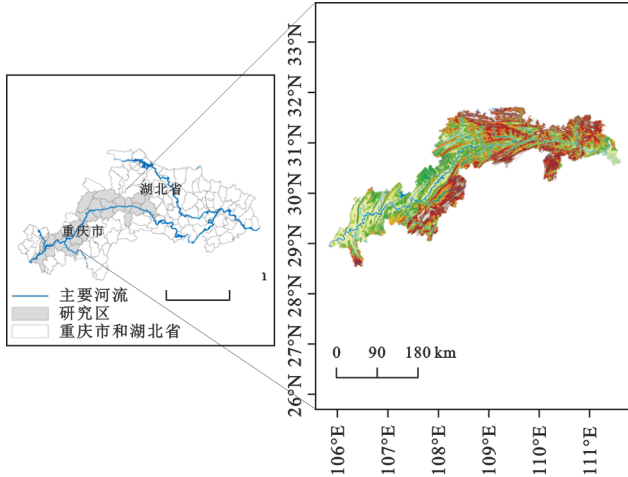
生态脆弱区作为一种生态系统特别脆弱、极易受到人类活动干扰和自然灾害影响的独特区域,耕地资源的永续利用受到制约,甚至约束着全国社会经济的可持续发展^[19]。要使其区域生态得到支持及社会经济得到良好发展就必须保障耕地的绿色利用,这与耕地利用绿色转型的初衷不谋而合,因此研究生态脆弱区耕地利用绿色转型具有现实意义。作为典型生态脆弱区,三峡库区环境敏感脆弱,是国家生态环境建设重点治理区,坚持最严格的耕地保护制度,促进耕地利用绿色转型势在必行。基于此,本文以耕地利用绿色转型为核心,典型生态脆弱区三峡库区作为研究区,利用土地利用数据、社会经济统计数据等,研究区域耕地利用绿色转型特征,在明晰转型时空特征和驱动机制的基础上,提出优化耕地绿色利用配置的措施,以期生态脆弱区耕地资源合理利用、社会经济发展提供相关参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区位于长江中下游,包含湖北省、重庆市26

个行政区,地理位置介于 $106^{\circ}20'—110^{\circ}30'E$, $29^{\circ}20'—31^{\circ}30'N$ 间,地处长江中游平原和四川盆地接壤处,横跨鄂中山区大峡谷和川东岭谷地,北屏大巴山,南接川鄂高原,总面积 5.8 万 km^2 ,是长江最重要的生态屏障之一(图1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2766号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 研究区域位置

Fig. 1 Location of the study area

三峡库区地处潮湿亚热带季风气候区,夏季降雨集中且时空分异显著,降水不均导致水土流失与旱涝灾害频发。区域内以山地丘陵为主,地势起伏陡峭、地貌破碎,叠加河流落差大、水流湍急的特征,进一步加剧了地质灾害(如山洪、滑坡)风险。尽管库区生物多样性丰富、淡水资源充沛,但土壤类型分化明显(如紫色土肥力高却易侵蚀,黄棕壤贫瘠且酸化),加之人类活动扩张(如城市化、农业开发)对植被的破坏,生态系统面临多重压力。经济层面,尽管区域生产总值较高,但受制于地形约束与生态保护需求,部分区县发展滞后,基础设施与公共服务不均,城镇化推进与生态脆弱性之间的矛盾逐渐显现,亟需平衡资源开发与自然修复。因此,三峡库区的生态问题不仅关系到当地的环境,还对整个区域的可持续发展构成严峻挑战。

1.2 数据来源与预处理

本文以三峡库区25个区县为研究对象,所使用的数据包括遥感数据和社会经济统计数据。遥感数据主要包括三峡库区的DEM数据(来源于NASA官方网站 <https://search.asf.alaska.edu/#/>),空间分辨率为 12.5 m,通过ArcGIS软件提取平均坡度和平均海拔。社会经济数据来源于《重庆市统计年鉴》(2008—2022)、《宜昌市统计年鉴》(2008—2022)、《恩施州统计年鉴》(2008—2022)、各区县统计年鉴(2008—2022)、重庆调查年鉴、各区县国民经济和社会发展

统计公报。耕地面积数据来源于规划与自然资源厅,降水量数据来源于《重庆市水资源公报》《宜昌市水资源公报》,水土流失治理面积数据来源于《水土保持公报》,三峡库区省界、区县界、主要河流、各级行政中心驻地数据均来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>)1:400万数据集。

2 研究方法

2.1 耕地利用绿色转型指标体系构建

耕地利用绿色转型在“数量—质量—生态”三位一体的基础上,兼顾“绿色”与“转型”双重目标,成为促进耕地合理开发利用与生态环境协调发展的有效途径。和传统转型相比,绿色转型更突出“绿色”,更多倾向于关注耕地的生态效益,即耕地在实现空间、功能转型的过程中,更重视节约资源、保护环境、实现集约空间和提升生产效率。因此,本文参考已有研究将耕地利用绿色转型分为空间转型、功能转型和模式转型^[18,20],遵循“诱致性生产替代理论”^[21],即特定地区耕地利用投入要素和产品(服务)的相对价格会随经济、社会发展阶段和宏观政策环境的改变而发生变动,引起耕地投入要素及作物间相互替代,进而驱动耕地利用空间形态、耕地利用功能和经营模式发生改变,实现绿色转型目标。

基于上述对耕地利用绿色转型的内涵分析和研究区的实际状况,本着指标体系构建的科学性、系统性、可操作性、目标指向性等原则,本文从空间转型、功能转型和模式转型3个方面选择以下15个指标构建耕地利用绿色转型评价指标体系(表1)。

本研究将熵值法用于耕地利用绿色转型指数评价指标的计算。熵值法是一种基于信息熵对指数离散性进行评价的客观赋权法。随着指数离散性的增大,指标对综合评判结果的影响也越大。因此,可以通过信息熵来判定离散性,实现对各指标权重的计算,从而综合计算多个指标。关于熵值法的具体应用方法,可参考已有的文献^[22],因此不再赘述。

2.2 空间计量分析方法

考虑到耕地利用绿色转型指数及其驱动因子可能存在着空间效应,运用传统的非空间计量模型对其进行数据分析可能会存在偏差,因此将空间效应纳入计量模型中会更符合客观实际。本文首先构建出合适的空间权重矩阵,对有关数据进行空间自相关分析,并通过各项检验选择适当的模型对数据进行探索,最后进行空间加权回归分析空间溢出效应。具体研究方法如下:

表 1 耕地利用绿色转型指标体系
Table 1 Indicator system for green transformation of cultivated land use

准则层	因素层	指标层	指标解释
空间转型	面积	人均耕地面积	耕地面积/农村人口,反映耕地面积变化
		耕地垦殖率	耕地面积/土地面积,反映耕地利用程度
		粮经比	粮食作物播种面积/经济作物播种面积,反映耕地作物种植结构
	结构	省增投入比	劳均农业机械总动力/地均化学品投入,反映耕地要素投入结构变化
		利用类型	旱地面积/耕地面积,反映耕地利用类型结构
功能转型	粮食安全保障功能	人均粮食保证率	粮食总产量/(总人口×400 kg)
	社会就业保障功能	农业从业人员占比	农业从业人员/乡村劳动力资源总数
	经济贡献功能	耕地地均产值	农业总产值/耕地面积,反映耕地经济产出能力
	环境协调功能	人均耕地生态承载力	人均耕地面积×耕地均衡因子 ⁽¹⁾ ×耕地产量因子 ⁽²⁾ ,反映耕地的环境承载力
	资源节约	地均农机总动力	农业机械总动力/耕地面积,反映耕地机械化水平及动力资源的变化情况
	环境友好	退耕还林还草面积	是指耕地转变为林地、草地的面积,反映人地协调状况
		水土流失治理面积	反映区域水土协调度
模式转型	科技先进	电视综合覆盖率	反映农业信息化的程度,通过统计年鉴直接获取
	空间集约	财政投入	以农林水支出度量,反映政府对农业发展的支持状况
		设施农业占地面积	设施农业面积/耕地面积,反映设施农业发展状况

注:(1)均衡因子:由于各类生态生产性土地的生态生产力存在差异性,因此需要将其面积转换为具有某种相同生态生产力的等量面积后,汇总为区域的生态生产力,用于这一转换的系数称为均衡因子。本研究仅以耕地为对象,研究的土地类型单一,故均衡因子取值为1。

(2)产量因子:表示某一区域某种生态生产性土地的平均生产力与全球同类土地类型平均生产力之比。本研究中耕地产量因子为区域耕地平均生产力(粮食单产水平)与全国耕地平均生产力(粮食单产水平)之比。

空间权重矩阵是探索数据在空间上相关性程度的重要工具,是研究空间的重要方法之一。空间权重矩阵的选择是多样的、没有统一标准的,但是可以归纳为以下3种地理矩阵:0~1邻接矩阵、经济空间权重矩阵和经济地理权重矩阵等。本文选择的是0~1邻接矩阵。该矩阵表示:如果某个区域内两个区县距离越近,那么这两个区县在空间上必然存在联系。表达式如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 两区县在地理上相邻} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i, j=1, 2, 3, n$, 表示不同的区县。

空间计量模型的构建需以空间依赖性验证为前提,其核心在于识别变量间因地理邻近性产生的交互影响机制。本文采用全局与局部 Moran's I 指数的双重视角检验耕地利用绿色转型(GTCLU)的空间自相关性:①全局 Moran's I 量化区域整体集聚特征,揭示 GTCLU 指数在空间维度上的依赖程度;②局部 Moran's I 解构异质性空间关联模式,识别高-高、低-低等典型集聚类型。这种空间依赖性的内在根源在于耕地系统的外部性本质——相邻地块利用主体行为通过要素流动(如水土资源竞争、技术扩散)产生跨区域福利效应。因此,GTCLU 作为自然-经济-社会复合系统的演化过程,必然呈现内生驱动(如耕作制度创新)与外生溢出(如政策空间辐射)的耦合作

用。空间计量模型通过引入空间滞后项与误差项,能够有效解耦这种多维交互机制。目前,已有的空间计量方法多采用构建空间矩阵的方法,将空间效应引入到空间模型中,将影响因子与被解释变量间的交互作用关系进行研究,进而考察各要素对被解释变量的影响程度。因此本文用到的空间计量回归模型主要有空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)与空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)以及空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM)分析空间溢出效应,明确影响耕地利用绿色转型的驱动机制。

3 结果与分析

3.1 耕地利用绿色转型指数评估结果

本文基于熵值法确定的权重计算 2007—2021 年三峡库区各区县耕地利用绿色转型及其子系统转型指数,数据表明三峡库区各区县耕地利用绿色转型指数整体呈上升趋势且增长幅度较大,江北区增长最快,达 0.173。其中空间转型指数整体也在上升,但主城区各区县表现为下降趋势,但下降幅度较小,在 [0, 0.020] 区间功能转型指数整体上升且幅度不大,模式转型指数也呈上升趋势,但上升幅度较空间转型和功能转型更为显著(图 2)。

为了更加明晰转型指数的时间变化特征,本文进一步计算出三峡库区耕地利用绿色转型及其子系

统转型指数的年增长率(图 3),表明 2007—2021 年空间转型指数、功能转型指数以及模式转型指数近似

正态分布,离群值少,总体呈现持续平稳增长的趋势,但转型指数增长率整体偏低,大部分不超过 1。

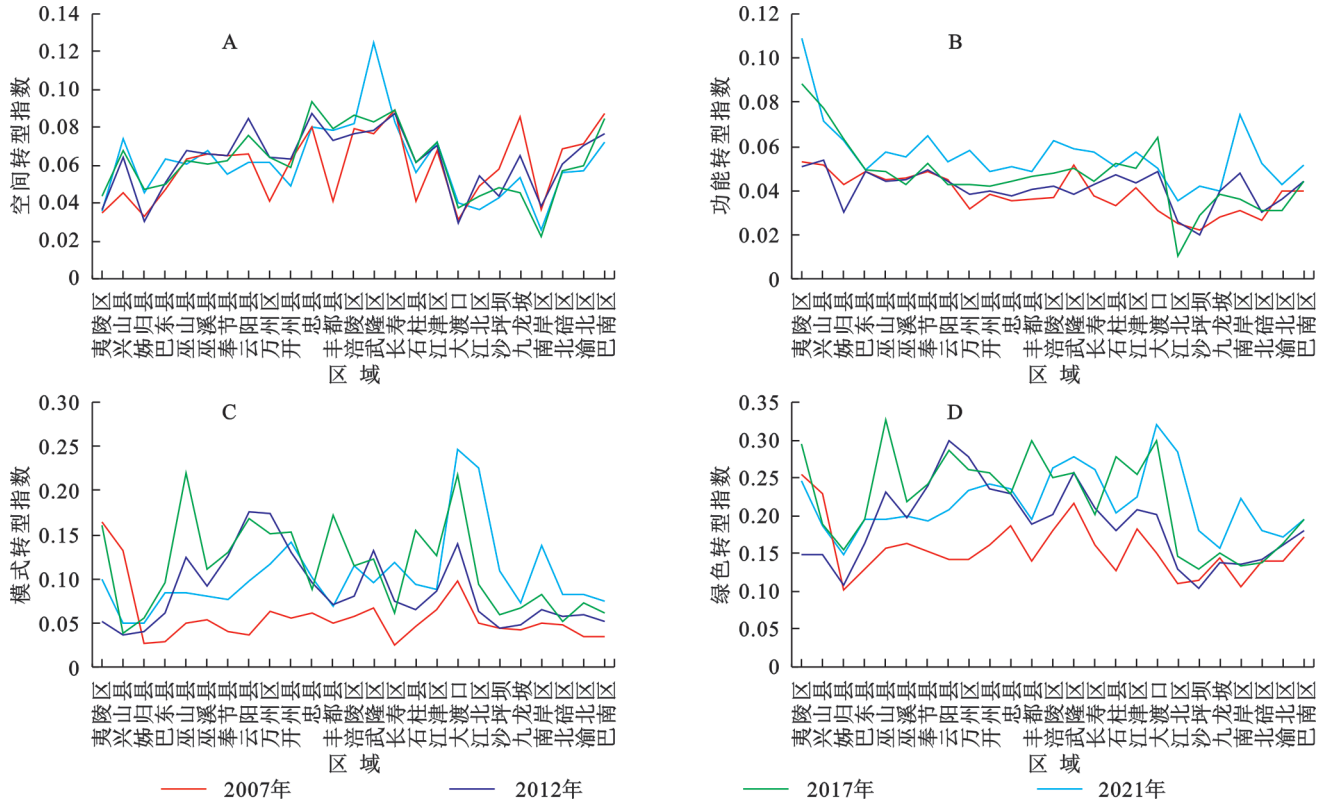


图 2 2007—2021 年耕地利用绿色转型及其子系统转型指数变化折线图

Fig. 2 Line charts of index variations in green transformation of cultivated land use and its subsystems (2007—2021)

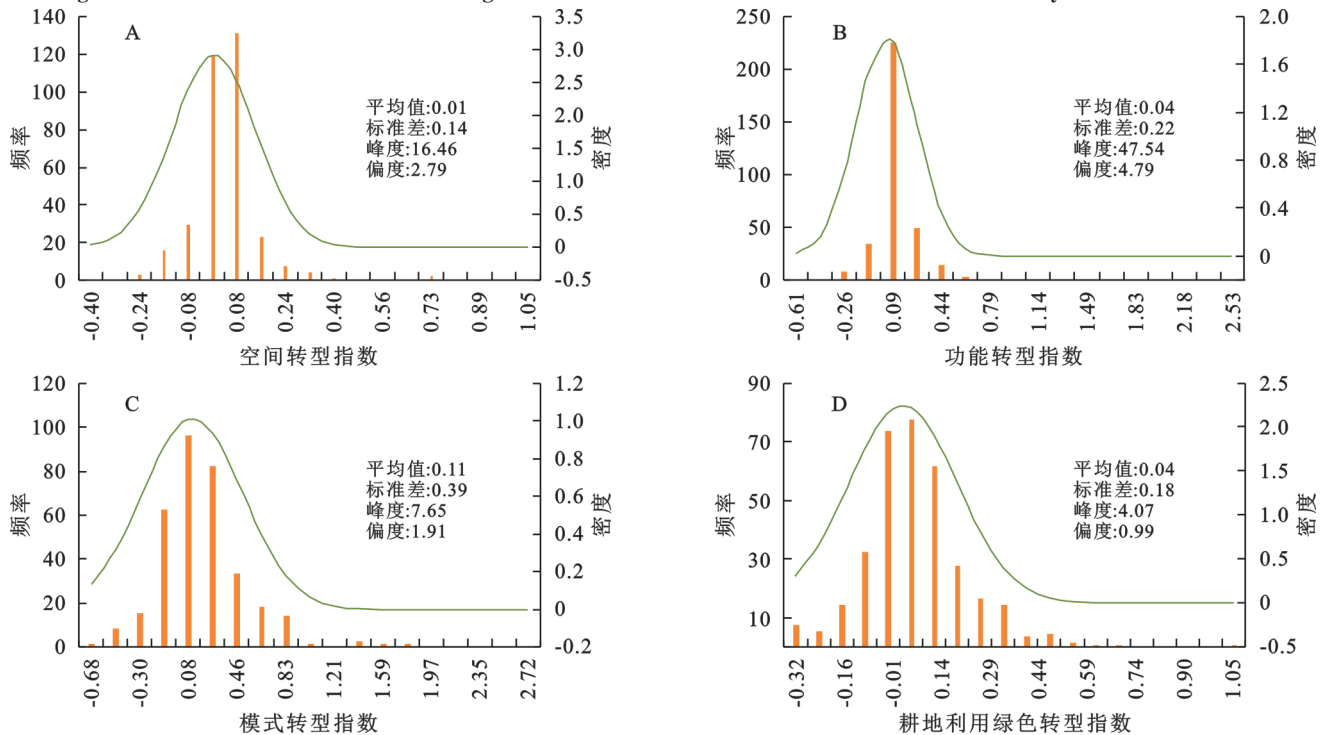


图 3 耕地利用绿色转型及其子系统转型指数密度曲线

Fig. 3 Density curves of indices for green transformation of cultivated land use and its subsystem transformation

3.2 耕地利用绿色转型的时空变化特征

2007—2021 年三峡库区耕地利用绿色转型综合转型指数总体上增长趋势显著,增长幅度较为平缓,

仅东部少数地区表现为下降的趋势,这主要受到模式转型的影响。这一时期高标准农田建设大范围展开,建设用地节约集约利用,用于设施农业建设、水土流

失治理、耕地保墒保肥和用于提升效率和产值的农业科技财政投入增加,耕地向着资源节约、环境友好、技术进步、空间集约方向发展,同时伴随耕地利用功能、空间的转型,因此耕地利用绿色转型指数普遍提高。

2007—2012年三峡库区大部分区域综合转型指数为正增长,其中中部和东部地区增长较快,仅最东部和西部少数区域综合转型指数下降,与同期模式转型的变化一致(图4)。2012—2017年综合转型指数下降区主要集中在中部和西部少部分地区,其余均为增长

区,其中东部地区表现为显著高值增长,与同期耕地利用功能转型变化相符,主要受功能转型的影响;2017—2021年综合转型指数增长率表现为明显的区域差异,以下降区为主,下降区集中在区域“两翼”,南部和西部部分区域为增长区,其中重庆市主城区增长幅度较大,与同期耕地利用模式转型变化相符,主要受模式转型的影响。总体来看,三峡库区耕地利用绿色转型指数的变化在不同时期受不同子系统主导,但模式转型对耕地利用绿色转型起主要作用。

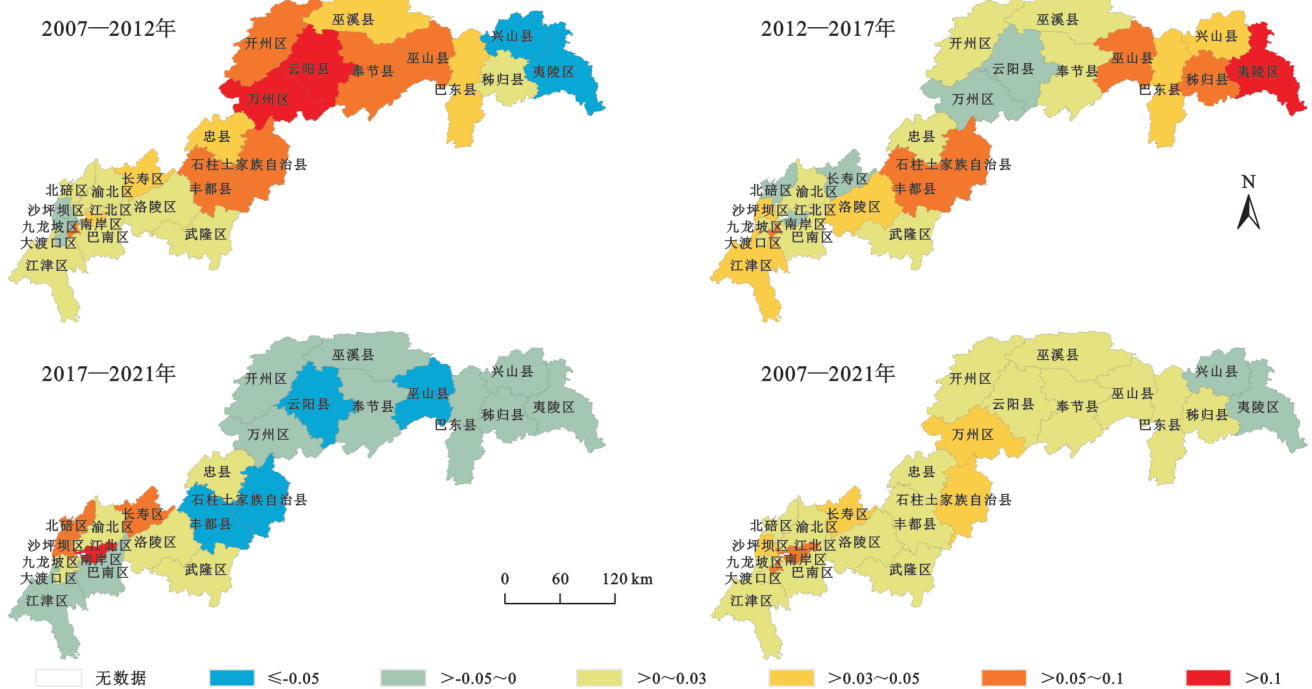


图4 2007—2021年三峡库区耕地利用绿色转型综合指数增长趋势时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of comprehensive index increasing trends of green transformation of cultivated land use in Three Gorges Reservoir Area (2007—2021)

3.3 耕地利用绿色转型驱动机制

耕地利用绿色转型的变化是特定区域内各种因素相互作用、共同约束的结果。研究表明,作为人类赖以生存和发展的重要物质资源,耕地利用转型受人口和社会经济因素的制约。菲舍尔(Fischer)指出,土地利用方式的改变、外部环境的改变、社会经济的发展以及人的价值观念的改变,都是造成土地利用改变的重要因素^[23];戈大专等将耕地利用转型视作一种综合过程,即耕地是在社会经济发展进程中,根据耕地资源的空间分布,协调统筹人口转型规律和耕地资源的持续演变过程^[24]。基于上述内涵,耕地利用绿色转型的驱动因素应该有以人地关系为链接的基础人口因素、影响耕地分布和转型发展的自然环境因素和交通区位因素以及影响耕地利用方式的社会经济因素(表2)。

本文利用Stata 16软件进行空间相关性测度,全局Moran指数结果(表3)表明被解释变量在2007年、

2012年和2017年都呈现出显著的空间正相关,而局部Moran指数(图5)测出的2007年、2012年、2017年和2021年的LISA散点图也表明各区县在空间上也呈现出正相关性。无论是高高集聚还是低低集聚,在地理空间中都呈现出较为明显的空间集聚的特性,这表明研究区各区县的耕地利用绿色转型指数存在相互影响的空间相关性。因此本文通过LM检验、LR检验和Hausman检验等多种方法来选择空间计量模型。

表4的LM检验结果显示,LM-error和Robust LM-error均未通过显著性检验,LM-lag和Robust LM-lag均通过了显著性检验,且LM-lag系数为3.087,大于LM-error的系数0.281,初步判定空间滞后模型(SLM模型)更适用于本研究。表5中空间杜宾模型是否退化为空间滞后模型和空间误差模型的检验中, p 值分别为0.016 3,0.014 3,均小于0.1,通过显著性检验,则模型拒绝原假设,确定本文选取空间

杜宾模型。Hausman 检验中, p 值等于 0.025 4, 小于 0.1, 通过显著性检验, 则模型拒绝原假设, 即本文空间杜宾模型的固定效应优于随机效应。LR(似然比)

检验中, p 值均通过显著性检验, 应选择双固定效应(混合固定效应)。经过上述检验, 本文选择双固定效应的空间杜宾模型进行数据分析。

表 2 耕地利用绿色转型的驱动因素

Table 2 Driving factors of green transformation of cultivated land use

变量	一级指标	二级指标	指标解释
被解释变量	耕地利用绿色转型指数(Y)		
解释变量	人口因素	人口密度(X_1)	总人口/总土地面积
		城镇人口比例(X_2)	非农人口/总人口
		降雨量(X_3)	根据气象站点数据计算年平均值
	自然环境因素	坡度(X_4)	根据DEM数据提取平均坡度
		海拔(X_5)	根据DEM数据计算平均值
		森林覆盖率(X_6)	森林面积/土地面积
	社会经济因素	公路里程(X_7)	年终公路里程
		灌溉比率(X_8)	有效灌溉面积/播种面积
		人均GDP(X_9)	GDP总量/总人口
		固定资产投资密度(X_{10})	固定资产投资/土地面积
	交通区位因素	农业生产总值比重(X_{11})	农业GDP/GDP总量
		距中心城市距离(X_{12})	距离地级市主城区的距离
		距主要河流距离(X_{13})	根据水系分布计算欧氏距离

表 3 全局莫兰检验结果

Table 3 Global Moran's I test results

变量	2007年		2012年		2017年		2021年	
	Moran's I	P-value*	Moran's I	P-value*	Moran's I	P-value*	Moran's I	P-value*
Y	0.471	0.004	0.468	0.000	0.332	0.037	0.119	0.356
X_1	0.719	0.000	0.732	0.000	0.727	0.000	0.746	0.000
X_2	0.826	0.000	0.803	0.000	0.936	0.000	0.976	0.000
X_3	0.550	0.001	0.630	0.000	0.870	0.000	0.107	0.393
X_4	0.826	0.000	0.826	0.000	0.826	0.000	0.826	0.000
X_5	0.504	0.002	0.504	0.002	0.504	0.002	0.504	0.002
X_6	0.323	0.033	0.343	0.023	0.618	0.000	0.076	0.500
X_7	0.697	0.000	0.710	0.000	0.720	0.000	0.743	0.000
X_8	0.384	0.001	0.654	0.000	0.557	0.000	0.259	0.054
X_9	0.699	0.000	0.760	0.000	0.744	0.000	0.669	0.000
X_{10}	0.646	0.000	0.663	0.000	0.817	0.000	0.687	0.000
X_{11}	0.801	0.000	0.824	0.000	0.799	0.000	0.817	0.000
X_{12}	0.971	0.000	0.971	0.000	0.971	0.000	0.971	0.000
X_{13}	0.378	0.029	0.378	0.029	0.378	0.029	0.378	0.029

模型回归后的结果表明(表 6): (1) 人口因素具有双向空间效应, 本地效应表现为人口密度(X_1)与城镇人口比例(X_2)均显著促进本地耕地绿色转型(系数分别为 0.519, 0.396), 而空间溢出则表现为邻近区域人口密度增加会抑制本地转型(X_1 空间滞后项为 -0.285), 邻近区域城镇人口比例提升则产生正向溢出(X_2 空间滞后项为 0.364)。表明城镇化进程中劳动力转移与农地规模经营的空间互补性。(2) 社会经济因素具有核心驱动作用, 公路里程(X_7)、人均 GDP (X_9)及农业生产总值比重(X_{11})对本地和邻近区域的耕地绿色转型均具有显著正向影响(如 X_9 本地系数

0.533, 空间滞后项 0.473), 凸显经济水平提升与农业生产力优化对转型的协同作用, 而固定资产投资(X_{10})仅本地显著(0.158), 表明其对高标准农田建设的直接推动作用。(3) 交通区位存在差异化空间影响, 距中心城市(X_{12})和主要河流(X_{13})越近, 本地耕地绿色转型水平越高(系数分别为 0.323, 0.311), 但邻近区域距离缩短会抑制本地转型(空间滞后项分别为 -0.412 和 -0.325), 说明资源竞争与辐射效应存在空间博弈。(4) 自然环境因素呈现矛盾性作用, 坡度和海拔(X_4 , X_5)显著抑制本地转型(系数分别为 -0.583, -0.765), 但邻近区域地形复杂度提升反而促进本地转型(空间

表 5 LR 检验、Hausman 检验和空间杜宾模型退化检验
Table 5 Likelihood Ratio (LR), Hausman, and Spatial Durbin Model degeneration tests

		Test	结果
LR	Hausman		Prob>chi2=0.0254
		Likelihood-ratio	LR chi2(13)=45.82
	SDM 是否会退化为 SAR or SEM	Assumption: sar nested in sdm	Prob>chi2=0.0000
		Likelihood-ratio	LR chi2(13)=51.67
		Assumption: sem nested in sdm	Prob>chi2=0.0000
		SDM or SAR	LR chi2(9) =20.27
SDM or SEM		Prob>chi2=0.0163	
		LR chi2(9) =20.66	
			Prob>chi2=0.0143

表 6 耕地利用绿色转型驱动因素的空间杜宾模型回归结果
Table 6 Regression results of driving factors of green transformation of cultivated land use using Spatial Durbin Model

变量	Coef.	p>z	W_ Coef.	p>z
X ₁	0.519***	0.000	-0.285***	0.008
X ₂	0.396***	0.000	0.364***	0.000
X ₃	0.030	0.578	0.023	0.463
X ₄	-0.583***	0.000	0.415***	0.001
X ₅	-0.765***	0.000	0.634***	0.000
X ₆	0.031	0.674	0.029	0.637
X ₇	0.307***	0.002	0.456***	0.000
X ₈	0.412***	0.000	0.080	0.321
X ₉	0.533***	0.000	0.473***	0.000
X ₁₀	0.158***	0.006	0.092	0.542
X ₁₁	0.697***	0.000	0.556***	0.000
X ₁₂	0.323***	0.003	-0.412***	0.002
X ₁₃	0.311***	0.002	-0.325***	0.000
rho	0.327	0.000		
sigma _{2_e}	0.007**	0.000		

表 7 耕地利用绿色转型驱动因素空间溢出效应分解表现
Table 7 Decomposition of spatial spillover effects from driving factors of green transformation of cultivated land use

变量	直接效应		间接效应		总效应	
	Coef.	p>z	Coef.	p>z	Coef.	p>z
X ₁	0.523***	0.000	-0.199***	0.004	0.458***	0.000
X ₂	0.422***	0.000	0.410***	0.001	0.635***	0.000
X ₃	0.032	0.547	0.025	0.519	0.029	0.632
X ₄	-0.485***	0.000	0.473***	0.000	-0.654***	0.000
X ₅	-0.639***	0.000	0.702***	0.000	-0.731***	0.000
X ₆	0.033	0.619	0.028	0.734	0.021	0.391
X ₇	0.411***	0.000	0.556***	0.000	0.525***	0.000
X ₈	0.493***	0.000	0.083	0.345	0.611***	0.000
X ₉	0.601***	0.000	0.528***	0.000	0.863***	0.000
X ₁₀	0.103***	0.003	0.093	0.563	0.082	0.387
X ₁₁	0.633***	0.000	0.612***	0.000	0.723***	0.000
X ₁₂	0.401***	0.000	-0.466***	0.001	0.352***	0.002
X ₁₃	0.387***	0.001	-0.376***	0.000	0.420***	0.000

4 讨论与结论

本研究验证了 Grainger 的土地利用转型理论在生态脆弱区的适用性,但发现三峡库区耕地绿色转型更依赖“社会经济—空间溢出”协同机制,而非单一的自然条件驱动,这与传统农业区结论(如黄淮海平原^[25])形成差异,凸显生态脆弱区转型的特殊性。生态脆弱区受坡度(X₄总效应-0.654)与海拔(X₅总效应-0.731)的强负向作用约束,更适合在平坦区布局高标准农田试点,复杂地形区则应通过生态补偿机制缓解限制。而空间溢出效应则揭示出交通区位(X₁₂,X₁₃)的竞争性,与吕添贵等^[16]提出的“交通设施单向促进”不同,表明生态脆弱区需平衡资源辐射与区域竞争,为空间计量理论补充复杂地理单元的案例。进一步分解空间溢出效应后发现人均 GDP(X₉总效应 0.863)和农业生产总值(X₁₁总效应 0.723)的全局主导性,表明政策应优先推动跨区域农业经济联盟,而非仅关注本地固定资产投资密度(X₁₀直接效应 0.103)。然而,本研究仅基于 2007—2021 年数据,未纳入近年极端气候(如 2023 年长江流域干旱)对耕地转型的影响,且灌溉比率(X₈)未包含智能灌溉技术。随着 AI 智能时代的来临,未来需引入“数字农业渗透率”等新兴指标,进一步细化至乡镇尺度,逐步探索微观主体(如农户行为)对绿色转型的驱动机制。

本研究核心结论有以下三点:(1) 三峡库区耕地绿色转型受“社会经济—人口—交通区位”三因素主导,其中人均 GDP 与农业生产总值的总效应最高,是全局性驱动力。(2) 空间溢出效应呈现非对称性:城镇化通过劳动力再分配促进转型,但邻近人口密度和优质区位的竞争效应抑制本地潜力。(3) 自然环境因素(坡度、海拔)的强负向总效应要求分区管理,优先在平坦区推进规模化经营。基于此提出以下几点政策建议:建立长江中游农业经济带,推动技术共享与产业链整合,放大大人均 GDP(X₉)的协同效应;在本地重点建设灌溉设施与交通网络,避免依赖外溢效

应薄弱领域;对受地形限制的区县实施耕地指标跨区域交易,平衡资源分配与生态保护。

参考文献(References):

- [1] 卢新海,匡兵,李菁.碳排放约束下耕地利用效率的区域差异及其影响因素[J].自然资源学报,2018,33(4):657-668.
Lu X H, Kuang B, Li J. Regional differences and its influencing factors of cultivated land use efficiency under carbon emission constraint [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4):657-668.
- [2] Grainger A. National land use morphology: Patterns and possibilities[J]. Geography, 1995, 80(3):235-246.
- [3] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(9):3465-3472.
- [4] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change [J]. Land Use Policy, 2010, 27(2):108-118.
- [5] Mather A S. Recent Asian forest transitions in relation to forest transition theory[J]. International Forestry Review, 2007, 9(1):491-502.
- [6] 苏浩,李佳珂,刘坤,等.山东省耕地利用净碳汇变化与耕地利用效益关系研究[J].地理科学,2024,44(5):864-873.
Su H, Li J K, Liu K, et al. Relationship between net carbon sequestration change and cultivated land use benefit of cultivated land use in Shandong Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(5):864-873.
- [7] 王梦成,董又铭,林娜娜,等.双碳背景下耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响及其空间溢出效应:以黄淮海平原为例[J].自然资源学报,2024,39(2):352-371.
Wang M C, Dong Y M, Lin N N, et al. Impact of farmland use transition on farmland use carbon emissions and its spatial spillover effects under the double carbon background: a case study of Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(2):352-371.
- [8] Wang X W, Cheng H. Dynamic changes of cultivated land use and grain production in the lower reaches of the Yellow River based on GlobeLand30 [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:974812.
- [9] 宋颖,高明秀,王卓然,等.环渤海山东区耕地NPP时空变化特征及其驱动因子探测[J].环境科学,2024,45(8):4733-4743.
Song Y, Gao M X, Wang Z R, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of cultivated land NPP in the Shandong area around the Bohai Sea [J]. Environmental Science, 2024, 45(8):4733-4743.
- [10] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019, 35(15):256-265.
Chen Z F, Shi D M, He W, et al. Spatio-temporal distribution and evolution characteristics of slope farmland resources in Yunnan from 1980 to 2015 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):256-265.
- [11] 宋小青,吴志峰,欧阳竹.1949年以来中国耕地功能变化[J].地理学报,2014,69(4):435-447.
Song X Q, Wu Z F, Ouyang Z. Changes of cultivated land function in China since 1949 [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4):435-447.
- [12] 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 B, Yang J, Wang Z Q, 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.
- [13] 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 B, Fan X Y, Lu X H. 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.
- [14] Berihun M L, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Exploring land use/land cover changes, drivers and their implications in contrasting agro-ecological environments of Ethiopia [J]. Land Use Policy, 2019, 87: 104052.
- [15] 靳亚亚,柳乾坤,李陈.基于改进三维生态足迹模型的耕地承载力评价:以江苏省为例[J].中国土地科学, 2020, 34(9):96-104.
Jin Y Y, Liu Q K, Li C. Evaluation of cultivated land carrying capacity based on an improved three-dimension ecological footprint model: a case study of Jiangsu Province [J]. China Land Science, 2020, 34(9):96-104.
- [16] 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 T G, Fu S F, Hu H, 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.
- [17] 柯楠,卢新海,匡兵,等.碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J].中国土地科学, 2021, 35(8):67-76.
Ke N, Lu X H, Kuang B, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China [J]. China Land Science, 2021, 35(8):67-76.

- 44(3):35-38,45.
Sun Q Z, Ning M Q. Effect of soil and water conservation engineering on rural social economy in limestone area of north and south pan river region, Guizhou[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2016, 44(3):35-38,45.
- [23] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
Chen W X, Li J F, Zeng J, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019,38(9):2173-2187.
- [24] Li M Y, Zhou Y, Xiao P N, et al. Evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in northwest Hubei province from 2000 to 2020 based on the InVEST model[J]. Land, 2021,10(8):857.
- [25] Chong G S, Hai Y, Zheng H, et al. Characteristics of changes in Karst rocky desertification in southern and western China and driving mechanisms [J]. Chinese Geographical Science, 2021,31(6):1082-1096.
- [26] Cheng W M, Zhou C H, Chai H X, et al. Research and compilation of the geomorphologic atlas of the people's republic of China (1: 1 000 000)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011,21(1):89-100.
- [27] 余李敏,李阳兵,罗光杰,等.贵州中部岩溶山区坡耕地时空演变特征及驱动因素分析[J].农业工程学报,2022,38(11):289-298.
Yu L M, Li Y B, Luo G J, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of slope cultivated land in Karst mountainous areas of central Guizhou Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(11):289-298.
- [28] Liang X Y, Jin X B, Yang X H, et al. Exploring cultivated land evolution in mountainous areas of Southwest China, an empirical study of developments since the 1980s[J]. Land Degradation & Development, 2021,32(2):546-558.
- [29] 谷保静,段佳堃,任琛琛,等.规模化经营推动中国农业绿色发展[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):709-715.
Gu B J, Duan J K, Ren C C, et al. Large-scale farming promotes agricultural green development in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021,38(5):709-715.
- [30] 石晓艺.我国耕地生态保护补偿制度优化研究[J].合作经济与科技,2024(17):190-192.
Shi X Y. Optimization Research on the Ecological Protection Compensation System for Cultivated Land in China [J]. Co-Operative Economy & Science, 2024(17):190-192.
-
- (上接第 390 页)
- [18] 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 S G, Cui H Y, Lu X H, 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.
- [19] 张笑楠,王克林,张伟,等.桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J].生态学报,2009,29(2):749-757.
Zhang X N, Wang K L, Zhang W, et al. The quantitative assessment of eco-environment vulnerability in karst regions of Northwest Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(2):749-757.
- [20] 史洋洋,吕晓,郭贯成,等.基于GIS和空间计量的耕地利用转型时空格局及其驱动机制研究[J].中国土地科学,2019,33(11):51-60.
Shi Y Y, Lyu X, Guo G C, et al. Temporal-spatial pattern and driving mechanism of cultivated land use transition based on GIS and spatial econometric model [J]. China Land Science, 2019,33(11):51-60.
- [21] 宋小青,李心怡.区域耕地利用功能转型的理论解释与实证[J].地理学报,2019,74(5):992-1010.
Song X Q, Li X Y. Theoretical explanation and case study of regional cultivated land use function transition [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(5):992-1010.
- [22] 司锦锦,王世东.基于组合赋权法的焦作矿区生态安全评价与时空分异[J].水土保持研究,2021,28(3):348-354.
Si J J, Wang S D. Ecological security evaluation and spatiotemporal differentiation of Jiaozuo mining area based on combined weighting method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):348-354.
- [23] Fischer G, Heilig G K. Population momentum and the demand on land and water resources [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1997,352(1356):869-889.
- [24] 戈大专,龙花楼,杨忍.中国耕地利用转型格局及驱动因素研究:基于人均耕地面积视角[J].资源科学,2018,40(2):273-283.
Ge D Z, Long H L, Yang R. The pattern and mechanism of farmland transition in China from the perspective of per capita farmland area [J]. Resources Science, 2018,40(2):273-283.
- [25] Liu Y Q, Long H L. Land use transitions and their dynamic mechanism: the case of the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(5):515-530.