

湖北省国土空间“三生”功能权衡特征及影响因素分析

刘俊祥¹, 张蕾¹, 刘格格², 张自正¹

(1.湖北大学 资源环境学院 区域开发与环境响应湖北省重点实验室,
武汉 430062; 2.湖北省规划设计研究总院有限责任公司, 武汉 430064)

摘 要: [目的] 阐明湖北省“三生”功能之间的关系及其影响因素对国土空间布局的作用, 为优化国土空间开发保护格局提供理论支持。[方法] 遵循“功能评价—关系量化—机制识别”的框架, 基于格网尺度评价“三生”功能, 采用均方根误差(RMSE)模型和地理探测模型等方法分别探究了空间功能权衡关系的时空演变格局及其驱动因素, 突破了既有研究对微观尺度上空间功能关系动态演变研究不足的局限。[结果] (1) 2000—2020 年, 区域生产功能和生活功能不断提高, 其中武汉市“高”等和鄂西山区“低”等区域变化显著, 分别扩张了 538.54 km², 14 207.47 km²; 整体生态功能减弱, 四大山区“高”等区域降低尤为凸显, 年均减少 1 009.50 km²。(2) 研究期间, 生产-生活功能权衡强度呈“Δ”形演变特征, 空间布局呈“低值区扩张、高值区收缩”态势, 尤以随州市中西部和武汉市主城区较为显著; 生产-生态功能权衡强度和生态-生活功能权衡强度变化规律相似, 均呈倒“N”字形演变趋势, 但空间分布格局差异明显, 分别呈“中间高、四周低”的分布规律和中心-外围的空间布局。(3) 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年, “一主两副”主城区、武汉城市圈部分县区和鄂西山区生产-生活功能权衡指数的动态变化尤为凸显; 生产-生态功能权衡指数变化和生态-生活功能权衡指数变化显著区主要分布在湖北省四大山区和江汉平原部分县区。(4) 人口密度、GDP 和人类活动强度是国土空间功能权衡关系的主要驱动因子。[结论] 湖北省“三生”功能之间协同水平整体呈提升态势, 社会经济活动对“三生”功能协调发展的影响较大, 后续应因地制宜加强国土空间调控与管理。

关键词: 国土空间; 权衡强度; 功能测算; 时空演变; 湖北省

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0354-13

Analysis of the Trade-off Pattern and Influencing Factors Among Production-Living-Ecological Functions of Territorial Space in Hubei Province

Liu Junxiang¹, Zhang Lei¹, Liu Gege², Zhang Zizheng¹

(1. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Faculty of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. HuBei General Institute of Planning and Design Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to elucidate the relationship between the production-living-ecological functions in Hubei Province and the role of their influencing factors on the spatial layout of the territorial space, and to provide theoretical support for optimizing the development and protection pattern of the territorial space. [Methods] The framework of ‘function evaluation-quantification of relationships-identification of mechanisms’ was followed to evaluate the production-living-ecology functions based on the grid scale, and the root mean square error (RMSE) model and geographical detector model were used to explore the spatiotemporal pattern and influencing factors of spatial functional trade-off relationships, respectively, which broke through the limitations of existing studies on the dynamic evolution of spatial function relation-

收稿日期: 2023-03-29

修回日期: 2023-04-13

资助项目: 教育部人文社会科学研究一般项目(20YJC630207); 湖北省社科基金一般项目(后期资助项目)(2019076); 湖北省教育厅哲学社会科学基金项目(2019063)

第一作者: 刘俊祥(1995—), 男, 安徽临泉县人, 硕士研究生, 研究方向为国土空间优化。E-mail: happinessljx@163.com

通信作者: 张蕾(1989—), 女, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 主要从事国土空间优化与土地资源可持续利用研究。E-mail: lzhang520@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

ships at the microscopic scale. [Results] (1) From 2000 to 2020, the production and living functions of the region had been improved, with significant changes in the high areas of Wuhan City and low areas of the western mountainous areas of Hubei, expanding by 538.54 km² and 14 207.47 km² respectively. The overall ecological function had weakened, and the reduction in the high areas of the four mountainous regions had been marked, with an average annual decrease of 1 009.50 km². (2) During the study period, the intensity of production-living function trade-off was characterized by a ‘ Δ ’-shaped evolution, and the spatial layout showed an ‘expansion of low-value areas and contraction of high-value areas’, especially in the central and western parts of Suizhou City and the main urban area of Wuhan City. The change patterns of production-ecological function intensity and living-ecological function intensity were similar, with an inverted N-shaped evolution trend, but the spatial distribution pattern differed significantly, showing a ‘high in the middle and low around’ distribution pattern and a center-periphery spatial layout, respectively. (3) In 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, and 2015—2020, the dynamic changes of the production-life function trade-off index were especially prominent in the main urban areas of one provincial center of Wuhan and two provincial sub-centers of Xiangyang and Yichang, some counties and districts of Wuhan Metropolitan Area and mountainous areas of western Hubei Province. The significant changes of production-ecological function trade-off index and living-ecological function trade-off index mainly distributed in four mountainous areas and some counties and districts of Jiangnan Plain in Hubei Province. (4) Population density, GDP, and human activity intensity were the main drivers of the territorial spatial functional trade-off relationship. [Conclusion] The overall level of synergy among the production-living-ecological functions in Hubei Province is improving, and socio-economic activities have a greater impact on the coordinated development of the production-living-ecological functions, which should be followed up by strengthening the territorial space control and management in accordance with the local conditions.

Keywords: territorial space; trade-off intensity; function measurement; spatiotemporal pattern; Hubei Province

国土空间是自然生态要素和社会经济要素相互作用所形成的复杂系统,能为人类提供多样化的私人产品和公共产品或功能服务^[1]。伴随着中国城镇化、工业化进程与自然资源和生态环境之间关系的逐渐失衡,人类对生产、生活功能的开发利用与自然生态系统服务功能之间的矛盾也日益激化^[2],使得空间功能之间的关系越来越复杂,成为了限制区域可持续发展的主要障碍。当前国土空间规划要求生态文明建设背景下社会经济的协调发展,表现为国土空间功能的协调共生^[3]。但生产-生活-生态功能在国土空间中存在着彼此交叉共生又相互胁迫的耦合交互关系,使得不同功能间在时间、空间和可逆性方面的相互作用关系往往以权衡/协同的方式表现^[4]。推动国土空间功能的协调,本质上就是调控国土空间功能权衡关系。因此,如何科学识别空间功能权衡关系,厘清“三生”功能间关系的影响机制,对服务生态文明建设战略、实现国土空间高质量发展具有重要意义。

目前,关于国土空间功能关系的识别^[4-5]、演变过程^[6-7]和影响机制等^[8-9]内容的研究受到学界持续关注。研究对象从成熟的生态系统服务权衡/协同关系^[10-11]逐

步向“三生”空间功能^[3,12]的权衡/协同拓展,现已延伸到耕地多功能和土地利用功能领域,覆盖了省、市、县和城市群等多个尺度^[3,13-14]。尺度关联特征致使不同尺度的“三生”功能权衡/协同关系探究具有明显的尺度依赖性^[15],这使得既定尺度上国土空间功能相互作用关系不能简单地推演到其相邻的更高或更低尺度^[16]。例如,中宏观尺度的空间功能相互作用过程根源于微观尺度国土空间利用方式的动态变化,微观尺度上国土空间开发方式的变化也会通过累积形成区域性或更大尺度的功能关系演变^[17-18]。当前研究重点关注行政区尺度,简化或模糊了微观尺度国土空间功能权衡关系与影响因素间的尺度依赖,一定程度上忽视了土地利用变化在精细尺度上对复杂社会生态系统的影响。常用的方法包括了统计分析法^[19]和机械平衡模型等^[3]。但相关性分析作为最常用的统计分析方法,难以衡量3个及以上功能间相互作用关系;机械平衡模型基于不同向量的合力大小反映国土空间功能间的权衡/协同关系,需考虑不同向量是否存在共线性问题。此外,特定区域类型多样、地域分布不均衡的国土空间功能,受人类需求影响始终处于动态权衡的过

程中^[20],但以往研究侧重于对国土空间功能权衡关系的静态格局探索,对其权衡强度的动态演变和影响因素的揭示有所不足,难以为有效管理国土空间和推动区域的可持续发展提供对策建议。

湖北省作为推动中部崛起和长江经济带发展的重要省份,建设用地需求的上升必然会加剧生产-生活-生态空间的竞争与博弈,导致国土空间用地失衡。鉴于此,本文按照“功能评价—关系量化—机制识别”的思路,定量评价价格网单元上的“三生”功能,借助均方根误差(RMSE)模型揭示湖北省 2000—2020 年国土空间功能权衡关系的时空演变过程,并采用地理探测器模型探析权衡强度的关键驱动因子,以期为区域国土空间优化提供决策支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖北省位于 108°21′42″—116°07′50″E, 29°01′53″—33°06′47″N,地处中国中部、长江的中游地区,国土总面积达 18.59 万 km²。秦巴山、武夷山、大别山、幕阜山四大生态屏障沿省界四角分布,中南部地势低平,呈向南敞开的不完整盆地。林地和耕地是湖北省最主要的用地类型,2020 年面积分别为 9.28 万 km², 4.75 万 km²;水域和城乡建设用地面积相近,2020 年分别为 1.99 万 km², 1.42 万 km²,国土空间

整体呈“五分林地三分田,一分城乡一分水”的格局。2000—2020 年,湖北省城镇化率从 40.47% 上升到 62.89%,城镇空间的日益扩张加剧了其与生态空间和农业生产空间之间的矛盾与冲突,使得耕地质量下降,生态服务功能减弱,直接影响到长江中下游的可持续发展。因此,如何提升“三生”空间功能的协调发展水平,优化“三生”空间布局,已成为湖北省国土空间高质量发展的重要内容。

1.2 数据来源及处理

研究数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的湖北省地理空间数据和社会经济统计数据两部分,具体见表 1。为了统一数据类型,便于后续功能的测算,采用以下方法处理数据:(1) 统一数据精度。省域“三生”功能的研究包括了行政区尺度^[21]和格网尺度^[14,22],基于前人研究和研究区特点,最终选取 1 km×1 km 作为研究的基本单元,并将所有数据统一到该精度。(2) 统一数据坐标系。所有数据均采用 1984 年世界大地坐标系(WGS84),统一为兰伯特投影。(3) 气象数据处理。降水和气温数据采用克里金插值法对日值数据插值获取。(4) 社会经济统计数据处理。社会经济数据均以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年当年县级行政区界线进行统计,若当年县域单元的社会经济统计数据缺失,则以相邻年份数据补充。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

类型	名称	来源及处理
空间数据	土地利用数据(30 m×30 m)	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	NDVI 数据(1 km×1 km)	
	人口密度数据(1 km×1 km)	
	夜间灯光数据(800 m×800 m)	
	道路数据	全球夜间灯光数据(http://ngdc.noaa.gov/eog/)
		以 2015 年湖北省地理国情普查中的道路数据为基准,参照 2000 年、2005 年、2010 年、2020 年湖北省道路里程地图册矢量化处理
	教育数据	中国教育机构名录、全国中小学校长通讯录、湖北教育年鉴、湖北省地理国情数据,采用高德地图坐标拾取系统查询坐标,并借助 Arc-GIS 10.6 统一转换为矢量点数据
	土壤数据(1 km×1 km)	寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)
	气象数据	中国气象网(http://data.cma.cn)
统计数据	社会经济数据	湖北统计年鉴、湖北农村统计年鉴、湖北各地级市统计年鉴和国民经济与社会发展公报、中国县域统计年鉴、中国民政部

2 研究方法

2.1 国土空间功能评价体系

国土空间作为一种复杂的功能系统,可以划分成生产功能、生活功能和生态功能 3 大功能^[23],三者之间相互促进,相互影响,存在着复杂紧密的联系。生产功能

是指直接从土地获取生产资料或以土地为载体进行社会生产而产出各种产品和服务的功能^[22,24],是国土空间的基础,为生活功能提供物质产品,并在扩张中挤压生态功能,决定着生活功能和生态功能的质量和状态。生活功能与承载和保障人居有关,是指为人类提供居住、消费、休闲和娱乐等功能^[25],是国土空间的需求,生活需

求的增加能够强化生产功能,生活品质的提升也能改善生态功能。生态功能是指生态系统与生态过程所形成的、维持人类生存的自然条件及其效用^[24],为生产功能和生活功能提供保障,满足生产生活发展所需的环境条件。“三生”功能中,一个功能的提升或恶化会直接影响其他功能的有序推进,只有生产、生活和生态功能相互

协调才会促进国土空间综合利用效益的最大化。

国土空间功能具有尺度特性,不同尺度的功能评价指标具有差异性。基于“三生”功能逻辑关系的梳理及内涵解析,根据已有的研究^[24,26]、考虑地域特色和 数据可获取性,构建格网尺度的国土空间功能评价体系(表 2),并定量测算二级指标(表 3)。

表 2 国土空间功能评价体系

Table 2 Territorial space function evaluation system

功能	一级指标	二级指标	指标含义	属性
生产功能	非农生产功能	二三产业保障功能(0.2061)	反映区域产业发展水平	+
		能源供给功能(0.1374)	反映区域化石能源供给的水平	+
		粮食供给功能(0.2290)	反映区域小麦、水稻等粮食作物的保障能力	+
	生存与物质供给功能	蔬菜供给功能(0.1030)	反映区域蔬菜作物的保障能力	+
		油料供给功能(0.0687)	反映区域油菜、花生等油料作物的保障程度	+
		畜牧供给功能(0.0687)	反映区域猪、羊等肉类产品的保障能力	+
		渔业供给功能(0.0589)	反映区域鱼类资源的保障能力	+
	原材料保障功能	林业供给功能(0.0824)	反映区域林业资源的供给水平	+
		纤维供给功能(0.0458)	反映区域棉麻等纤维作物的供给水平	+
		居住承载功能(0.1992)	反映区域土地容纳人口的能力	+
生活功能	空间承载功能	交通承载功能(0.1328)	反映区域居民出行的便捷程度	-
		医疗供给功能(0.1328)	反映区域每千人拥有的床位数	+
		基本生活保障功能(0.1992)	反映区域维持基本生活的能力	+
	保障功能	就业保障功能(0.0996)	反映区域提供就业机会的能力	+
	精神生活	教育服务功能(0.0996)	反映区域教育资源的保障程度	-
	保障功能	文化供给功能(0.0797)	反映区域提供文学鉴赏对象和艺术设计灵感的能力	+
		休闲娱乐功能(0.0569)	反映区域提供公园、湿地等休闲场所的能力	+
生态功能	调节功能	水源涵养功能(0.2000)	反映区域生态系统调节降水和地表径流的能力	+
		土壤保持功能(0.1333)	反映区域生态系统对土壤侵蚀和滑坡崩塌控制的能力	+
	支持功能	生境质量功能(0.2667)	反映区域动植物的多样性程度	+
		NPP(0.4000)	反映区域植物的初级生产能力	+

2.2 国土三生空间功能指数的计算

本研究以国土空间功能评价体系为基础,依据各个指标的属性,借助极差标准化法^[27]进行无量纲化处理,并采用层次分析法确定指标权重;最后,采用综合加权法^[3]分别计算出生产功能、生活功能和生态功能指数,具体公式如下:

$$F_i = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij}$$
(1)

式中: F_i 为第 i 个空间功能的指数(生态功能指数、生活功能指数和生态功能指数); W_j 为第 j 项指标的权重; A_{ij} 为第 i 个评价单元的 j 项的分值。

2.3 国土空间功能权衡强度测算

均方根误差^[4,20] (RMSE)作为一种测度功能间权衡强度的简单有效方法,将权衡的含义从负相关关系(即传统意义上)扩展到包含“三生”功能间同向变化的不均匀率,为国土空间功能权衡关系的管理标准和阈值设定提供了新视角。其基本原理为在二维坐标系内,通过国土空间功能对坐标到 1 : 1 线的距离

RMSE 判断“三生”功能权衡强度的高低,值域范围为[0,1],即 RMSE 越接近 1,权衡强度越高,反之越接近 0,权衡强度越弱。具体公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}$$
(2)

式中:RMSE 为均方根误差; x_i 为第 i 个功能指数; \bar{x}_i 为第 i 个功能指数的平均值; n 为功能个数。

2.4 冷热点分析 (Getis-Ord G_i^*)

冷热点分析作为探索局部空间集聚性特征的方法^[30],本文以 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年国土空间功能间权衡强度的动态变化作为观测值,基于 ArcGIS 10.6 平台计算 Getis-Ord G_i^* 指数,并借助自然断点法将其划分为极显著冷点、显著冷点、冷点、不显著、热点、显著热点和极显著热点 7 级,对国土空间功能间权衡强度演变的冷热点格局进行分析。具体公式如下:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{var}(G_i^*)}}$$
(3)

式中: G_i^* 为集聚指数; $E(G_i^*)$ 和 $\text{var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和变异系数。若 $Z(G_i^*)$ 为正值, 表明 i 区域为高值集聚的热点区。

2.5 国土空间功能权衡强度的影响因素

地理探测器是探测地理现象空间异质性特征及其驱动因素的一种统计方法, 它通过层内方差和层间方差的空间分异特性来探测自变量与因变量空间分布格局的相似程度, 进而揭示自变量对因变量的解释力度^[17]。因子探测器作为地理探测器的核心部分, 能够直观揭示

自然因素和社会经济因素对国土空间功能权衡关系的解释力度, 便于探析国土“三生”空间功能间权衡强度的关键驱动因子。具体公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中: q 为影响因子对国土空间功能权衡强度的解释力度, 值域范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 解释力度越强; L 为分区数; N_h 和 N 分别为分层和研究区样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为研究区方差和 h 层的方差。

表 3 指标空间化的定量测算模型

Table 3 Quantitative measurement models for spatialization of indicators

指标名称	公式	解释
二三产业保障功能 能源供给功能	$E_x = \frac{N_j}{C_j \cdot \text{HSL}_j} \cdot C_x \cdot \text{HSL}_x$	E_x 为栅格 x 处的非农业经济密度和能源供给量; N_j 为县 j 的非农业 GDP 和能源消费量; C_x 和 C_j 分别为栅格 x 和县 j 的城市建设用地和独立工矿用地; HSL_x 、 HSL_j 分别为栅格 x 和县 j 的人类住区指数
粮食、蔬菜、畜牧、油料、 渔业、林业和纤维供给功 能	$\text{AP}_i = \text{AP}_t \cdot \frac{A_i}{\sum A_i}$	AP_i 和 AP_t 分别为栅格 i 和县级行政区 t 的粮食、蔬菜、畜牧、油料、渔业、林业和纤维作物的产量(林业为林业产值); A_i 为栅格 i 的用地类型面积
居住承载功能	$R_x = \frac{\text{POP}_j}{\text{URL}_j} \cdot \text{URL}_x \cdot (1 + \frac{\text{URL}_{\text{NL}_j}}{\text{NL}_j})$	R_x 为栅格 x 的人口; POP_j 为县的总人口; URL_j 和 URL_x 分别为栅格 x 和县 j 的住宅用地; URL_{NL_j} 为县 j 的城乡聚落建设用地夜光灯值; NL_j 为所有县 j 的城乡建设用地夜光灯值
交通承载功能	$S_i = g \cdot Z_{\min} \cdot (\sum_{j=a}^{i=m} D_{ij} \cdot R_i \cdot W_j)$	S_i 为第 i 个栅格的时间成本; g 为累积阻力最小值与时间成本的适应性关系, 是未知负函数; Z_{\min} 为某服务源单元到不同的源累积阻力最小值; D_{ij} 为从源 j 到单元 i 的距离; R_i 为栅格 i 对运动过程的阻力系数; W_j 为源 j 所属等级的相对阻力因子; 时间成本度量方式按照不同等级道路的时速来进行测算
医疗供给功能文化供给 功能基本生活保障功能	$R_j = \frac{C_t}{P_t} \cdot M_i$	R_i 和 C_t 分别为栅格 i 和县 t 的医疗床位数、图书数和基本生活保障金; M_i 和 P_t 分别为栅格 i 和各县区 t 的人口数
就业保障功能 ^[24]	$V_w = (P_0 - P_1) \cdot B / K$	V_w 为失业保险功能; P_0 为人口承载力; P_1 为土地的最小人口承载力; B 为城镇失业保险金; K 为城镇可支配收入与农村纯收入比值
教育服务功能 ^[27]	等权叠加法	小学、中学、高职、高等学校欧式距离空间化后等权相加
休闲娱乐功能 ^[28]	$f(d) = \frac{1+K}{K+e^a \cdot d} \cdot w$	d 为距离休闲文化娱乐场所的距离; a 和 K 为根据距离阈值评估的大小和形状参数; w 为指定的分数
水源涵养功能 ^[29]	$\text{WC} = \min(1, \frac{249}{V_{\text{velocity}}}) \cdot \min(1, \frac{0.9\text{TI}}{3}) \cdot \min(1, \frac{K_{\text{soil}}}{300}) \cdot Y$	V_{velocity} 为径流系数; TI 为地形指数; K_{soil} 为土壤饱和导水率(cm/d); Y 为产水量
土壤侵蚀功能 ^[10]	$\text{SD} = R \cdot K \cdot \text{LS} \cdot (1 - P \cdot C)$	R 为降雨侵蚀因子($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$); LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为土壤保持措施因子
生境质量功能 ^[29]	$Q_{xj} = H_j (1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z})$	Q_{xj} 为土地覆被类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为土地覆被类型 j 的生境适宜度; D_{xj} 为土地覆被类型 j 中栅格 x 的生境退化程度; k 为半饱和系数; z 为模型默认的归一化常数
$\text{NPP}^{[10]}$	$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \cdot \varepsilon(x, t)$	$\text{NPP}(x, t)$ 为植被净初级生产力; x 为空间位置; t 为时间; $\text{APAR}(x, t)$ 为空间位置 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$); $\varepsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的光能转化率(gC/MJ)

3 结果与分析

3.1 国土空间功能指数强度分布特征

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的湖北省生产功能、生活功能、生态功能指数的变化规律如图 1 所示。生产指数呈现出“中间高, 两边低”的分布特点, 生活功能呈现出以武汉主城区为中心的圈层递减特征, 生态功能展现出“四周高, 中间低”的分

布特征。研究期内, 生产指数和生活指数总体呈上升趋势, 其中武汉市“高”等生产功能变化最为明显, 扩张了 538.54 km^2 , 这可能是由于武汉市作为中部崛起的重要战略支点, 对周边具有“虹吸效应”, 加上湖北省政府的政策支持, 城镇化和工业化水平较高, 推动了生产功能的提升; 鄂西北和鄂西南山区谷地的“低”等生活功能提升显著, 扩张了 $14\,207.47 \text{ km}^2$, 这可能是由于该地区的生活服务设施不断完善, 提升了

人们的生活质量,特别是随着鄂西山区交通设施的完善,有力推动了鄂东和鄂西之间人、资金、资源的双向联动,一定程度上提升了生活功能。大部分区域的生态指数呈下降态势,从 2000—2020 年四大山区“高”等生态功能年均减少 1 009.50 km²,特别是在 2010 年以前呈现出逐年下降趋势,鄂西北、鄂西南、鄂东北

和鄂东南山区是主要降低区域;2010 年后虽有所提升,但总体仍呈减弱态势。这可能是由于 2010 年之前,城镇化和工业化发展带来的生产、生活功能空间的扩张挤压了生态功能空间,2010 年之后,随着生态文明建设逐渐上升到国家层面以及主体功能区划的出台,四大山区的生态环境渐趋改善。

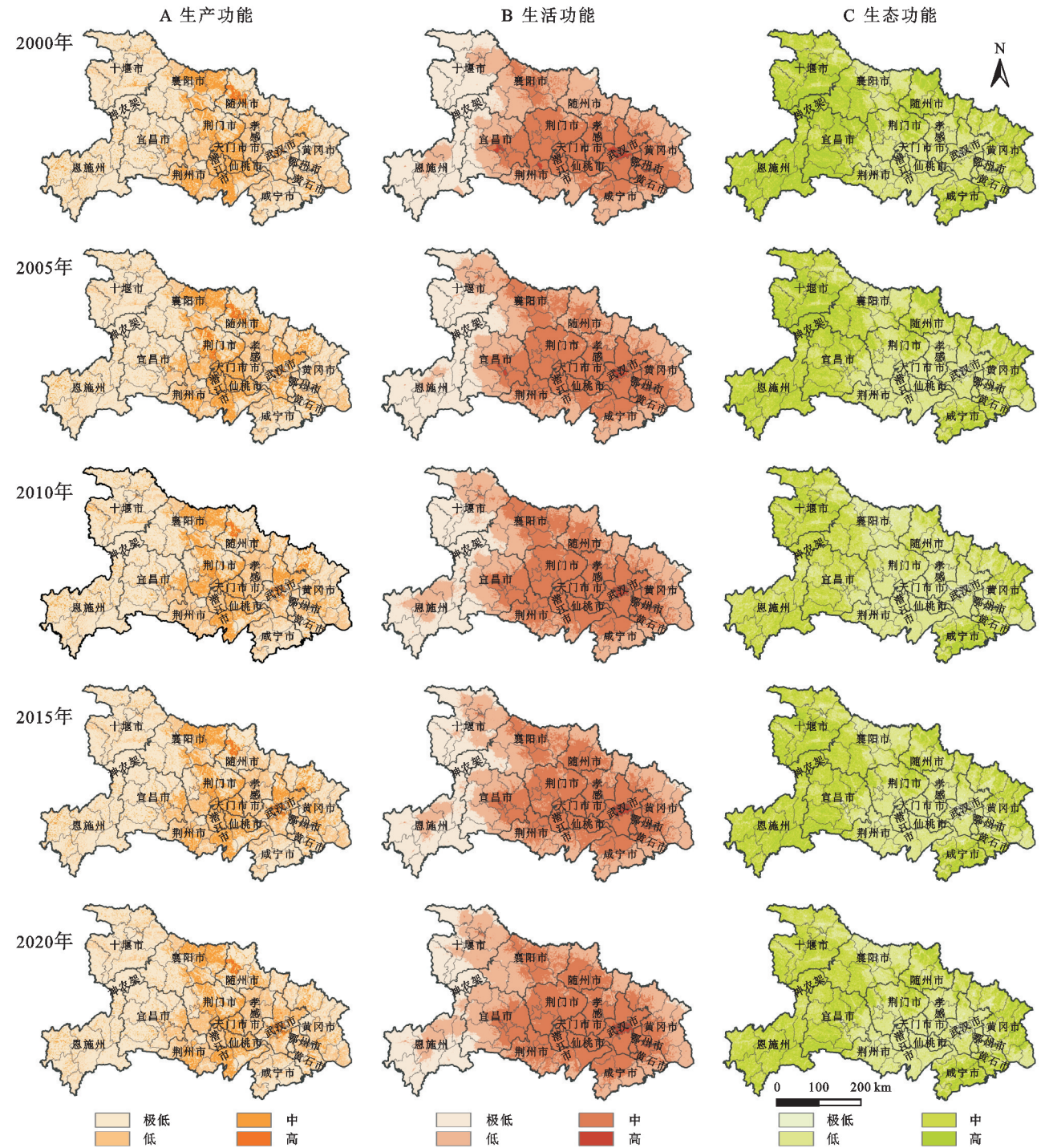


图 1 湖北 2000—2020 年国土空间功能分布格局

Fig. 1 Territorial space function distribution pattern of Hubei 2000—2020

3.2 国土空间功能权衡关系时空演变特征

基于均方根误差(RMSE)模型,得到 2000 年、

2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年湖北省国土空间

功能权衡强度和年均值。由表 4、图 2 可知,研究期

间,国土空间功能权衡强度整体呈减弱趋势,特别是生产-生态功能和生活-生态功能权衡强度减弱幅度尤为凸显。其中,生产-生活功能权衡强度先增后减,呈“Λ”形演变特征。这主要是由于“十五”期间,工业经济的快速发展和农业综合生产能力的显著提高推动了生产功能的增强,生活功能的缓慢提升导致了生产-生活功能发展失衡,但在 2005 年后,区域生活基础设施的完善和新农村建设的提出,有效推动了生产-生活功能的协调发展,降低了生产-生活功能的权衡强度;空间分布格局呈“低值区扩张、高值区收缩”态势,尤以武汉市主城区和随州市中西部变化突出。生产-生态功能权衡强度与生活-生态权衡强度的演

变规律相似,均呈倒“N”形变化趋势。这主要是由于“十五”和“十一五”期间,淘汰落后产能和发展循环经济有效减少了工业废物的排放,城镇生活污水、生活垃圾无害化处理率的不断提高和退耕还林、湿地保护等生态保护措施的实施,促进了生产-生态和生活-生态功能权衡强度的减弱,但 2010 年后由于主体功能区的划定尚处于探索阶段,各种配套政策体系有待完善,从而导致了 2015 年生产-生态和生活-生态功能权衡强度的增强,但随后在“十三五”期间减弱;其中生产-生态功能权衡强度的空间格局总体呈“中间高、四周低”的分布态势,生活-生态功能权衡强度的城乡差异显著,呈现出中心-外围分布格局。

表 4 湖北 2000—2020 年国土空间功能权衡强度年均值

Table 4 Annual average value of the intensity of territorial space function trade-offs of Hubei 2000—2020

类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
生产-生活功能权衡强度	0.0843	0.0850	0.0827	0.0813	0.0766
生产-生态功能权衡强度	0.1247	0.1231	0.1172	0.1182	0.1142
生活-生态功能权衡强度	0.1141	0.1102	0.1025	0.1060	0.1023

2000—2005 年,生产-生活权衡指数变化冷热点区的空间差异明显,热点区集中分布在鄂西南山区、随州市中东部、荆门市中部和武汉市城市圈部分县区;冷点区则主要分布在鄂西北山区、宜昌市东南部和荆州市中西部的交界处(图 3A)。随着时间的推移,2005—2010 年,生产-生活权衡指数变化热点区呈现出“西扩南移”的态势,集中分布在武汉市主城区、襄阳市北部和荆州市东部区域,零散分布在鄂西北山区;冷点区与 2000—2005 年相比,空间范围明显缩小,并由西部和东部向中部收缩。2010—2015 年,生产-生活权衡指数变化冷热点区的空间分化显著,呈现出“东南热、西北冷”的空间分布格局,热点区集中分布在“一主两副”主城区、荆州市南部和鄂东城镇部分县区;冷点区主要分布在十堰市西南部、襄阳市东北部、荆门市东南部和荆州市北部地区。2015—2020 年,生产-生活权衡指数变化冷热点区,与 2010—2015 年相比,空间范围大幅缩小,热点区呈“北移南扩”的态势,主要分布在鄂北岗地、荆州市中西部、咸宁市和黄石市部分县区;冷点区分布在“一主两副”主城区、武汉市东北部、黄冈市北部、潜江市和鄂西南部分县区。

2000—2005 年,生产-生态功能权衡指数变化冷热点区的空间分异特征显著,热点区集中分布在武汉市、天门市、荆门市中南部、鄂东北山区和鄂西北山区;冷点区主要分布在襄阳市北部和鄂西南山区(图 3B)。2005—2010 年,生产-生态功能权衡指数变化冷热点区,与 2000—2005 年相比,空间范围显著缩小,热点区向湖北省四大山区转移,尤以鄂东南山区变化最为显著,冷

点区则向东部扩张,集中分布在随州市西部,零散分布在鄂西北山区和武汉市周边县区。2010—2015 年,生产-生态功能权衡指数变化冷热点区呈“中部热,东南、西北冷”的空间分布格局,热点区与 2005—2010 年相比,空间分布较为分散,广泛分布在武汉城市圈部分县区、荆州市南部、荆门市东北部和随州市南部等地区;冷点区分布较为集中,主要分布在鄂东南山区和鄂西北山区。2015—2020 年,生产-生态权衡指数变化冷热点区分布零散,呈全域点状分布的空间态势。

2000—2020 年,生活-生态权衡指数变化冷热点区的空间演变格局总体与生产-生态功能权衡指数变化相似,局部区域存在差异(图 3C)。其中 2000—2005 年,生活-生态功能权衡指数变化热点区还广泛分布在荆州市中东部,与生产-生态功能权衡指数变化冷热点区相比,武汉市主城区热点区与冷点区并存。2005—2010 年,冷点区呈现出更为明显的南扩态势,主要分布在荆州市南部区域,随州市中部县区也存在热点区域。2010—2015 年,荆州市南部生活-生态指数变化热点区与生产-生态指数变化热点区相比,空间布局更为分散。2015—2020 年,生活-生态权衡指数变化冷热点区也呈全域点状分布的格局,但热点区的空间布局较为集聚,主要分布在荆州市中东部区域。

总体而言,国土空间功能权衡指数变化冷热点区的空间异质性特征显著,冷热点区的空间分布范围缩减趋势凸显,表明湖北省国土空间布局得到明显优化,生产-生活-生态功能协同发展水平得到进一步提升。“一主两副”主城区、武汉城市圈部分县区和鄂西

山区生产-生活功能权衡指数的动态演变尤为凸显,原因可能为“一主两副”主城区和武汉城市圈部分县区经济发达,人口密度较大,不同时期国土空间开发政策的变化会引起生产、生活功能处于竞争-协调的发展过程中;鄂西山区地势险峻,适宜人类开展生产、生活活动的空间用地较少,因此生产和生活功能对空间用地竞争较为激烈,使得鄂西山区生产-生活功能权衡指数的变化较为明显。生产-生态功能权衡指数变化和生活-生态功能权衡指数变化显著区主要分布

在湖北省四大山区和江汉平原部分县区,湖北省四大山区可能是由于 2010 年之前,生产和生活空间的扩张占用了生态用地,造成了生产-生态、生活-生态功能间的矛盾与冲突,2010 年后,随着湖北省主体功能区的划定和退耕还林、还草等政策的持续实施,生态功能得到提升,生产-生活-生态功能逐渐向协调方向发展;江汉平原部分县区可能是受到耕地保护政策和农村居民点整治工作的影响,使得生产-生态、生活-生态功能指数的变化较为显著。

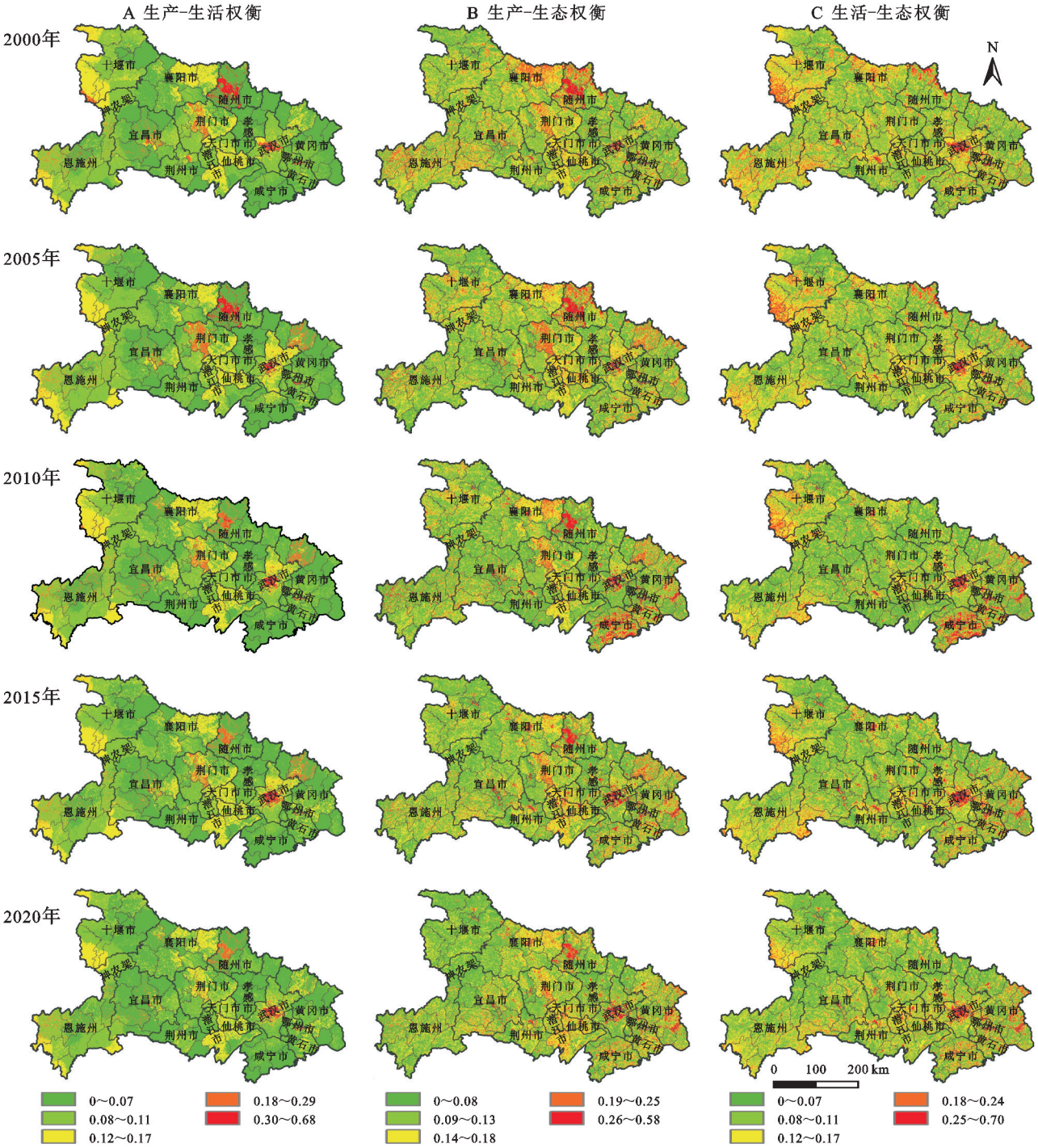


图 2 湖北 2000—2020 年国土空间功能权衡强度分布图

Fig. 2 Distribution of the intensity of territorial space function trade-offs of Hubei 2000—2020

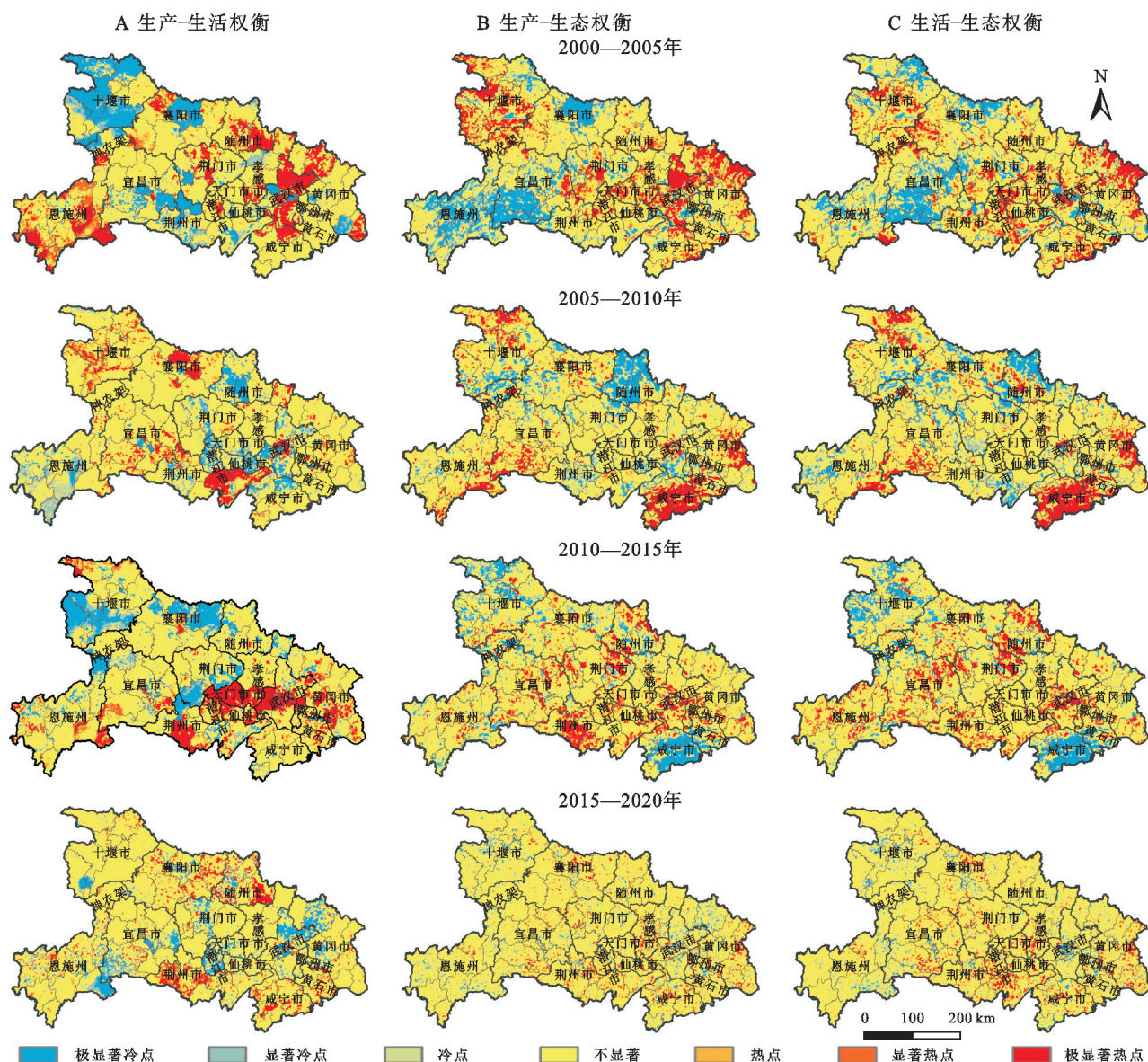


图 3 湖北 2000—2020 年国土空间功能权衡指数变化冷热点分布图

Fig. 3 Distribution of cold and hot spots of changes in the territorial space function trade-offs index of Hubei 2000–2020

3.3 国土空间功能权衡强度影响因素分析

自然地理条件作为国土空间的生态本底,对国土空间功能演化起到促进或抑制作用,是生产-生活-生态功能形成与演化的基础;受人类社会经济活动影响,国土空间功能的分布格局动态演化显著,势必会影响空间功能权衡强度的演变^[9]。现有研究证明^[7-9],国土空间功能权衡关系变化与人-自然因素的复杂性密切相关,因此,本文依据科学性和数据的可获得性原则,从自然资源因素和社会经济因素两个维度选取影响因子(表 5),借助地理探测器识别国土空间功能权衡强度的关键驱动因子。

从生产-生活功能权衡的潜在驱动因子贡献率(q 值)排序来看(图 4A),与生产-生活功能权衡相关的主要驱动因子为人口密度和人类活动强度,其影响程度在 2005 年以后显著增强(q 值明显增大)。

GDP、距居民点距离、高程和土地利用因子对生产-生活功能权衡有一定的影响。GDP 的 q 值总体呈“M”形波动下降态势,2020 年 q 值与 2000 年相比,下降幅度较小,但 2005—2015 年 q 值较高,表明 GDP 对生产-生活权衡强度的影响总体上有所下降,但在 2005—2015 年期间影响程度明显增强;距居民点距离和高程因子的影响具有稳定性;土地利用因子对生产-生活功能权衡强度的影响持续增强(q 值逐渐增大);而坡度、年均降水量、植被覆盖度、距河流距离和距道路距离因子对生产-生活功能的权衡作用影响较弱。

从生产-生态功能权衡的潜在驱动因子贡献率(q 值)排序来看(图 4B),土地利用、人口密度和人类活动强度是生产-生态功能权衡强度的主导驱动力,2010 年之后三者的 q 值大幅增加,表明影响程度明显增强。植被

覆盖度、GDP、年均降水量、高程、坡度和距居民点距离因子对生产-生态功能权衡的影响变化较大,其中植被覆盖度、年均降水量、高程和坡度的 q 值先减小后增大,呈“V”形变化特征,尤以植被覆盖度因子变化显著,表明这些因子对生产-生态功能权衡强度的影响先降低后逐渐增强;GDP的 q 值总体呈波动增加,并渐趋

稳定的态势,表明对生产-生态功能权衡强度的影响呈渐趋增强并逐渐平稳的趋势;距居民点距离因子在2010年前 q 值较低,影响程度较弱,2010年后 q 值大幅增加,表明对生产-生态功能权衡关系的影响显著增强。距河流距离和距道路距离对生产-生态功能权衡的影响始终处于较弱的状态。

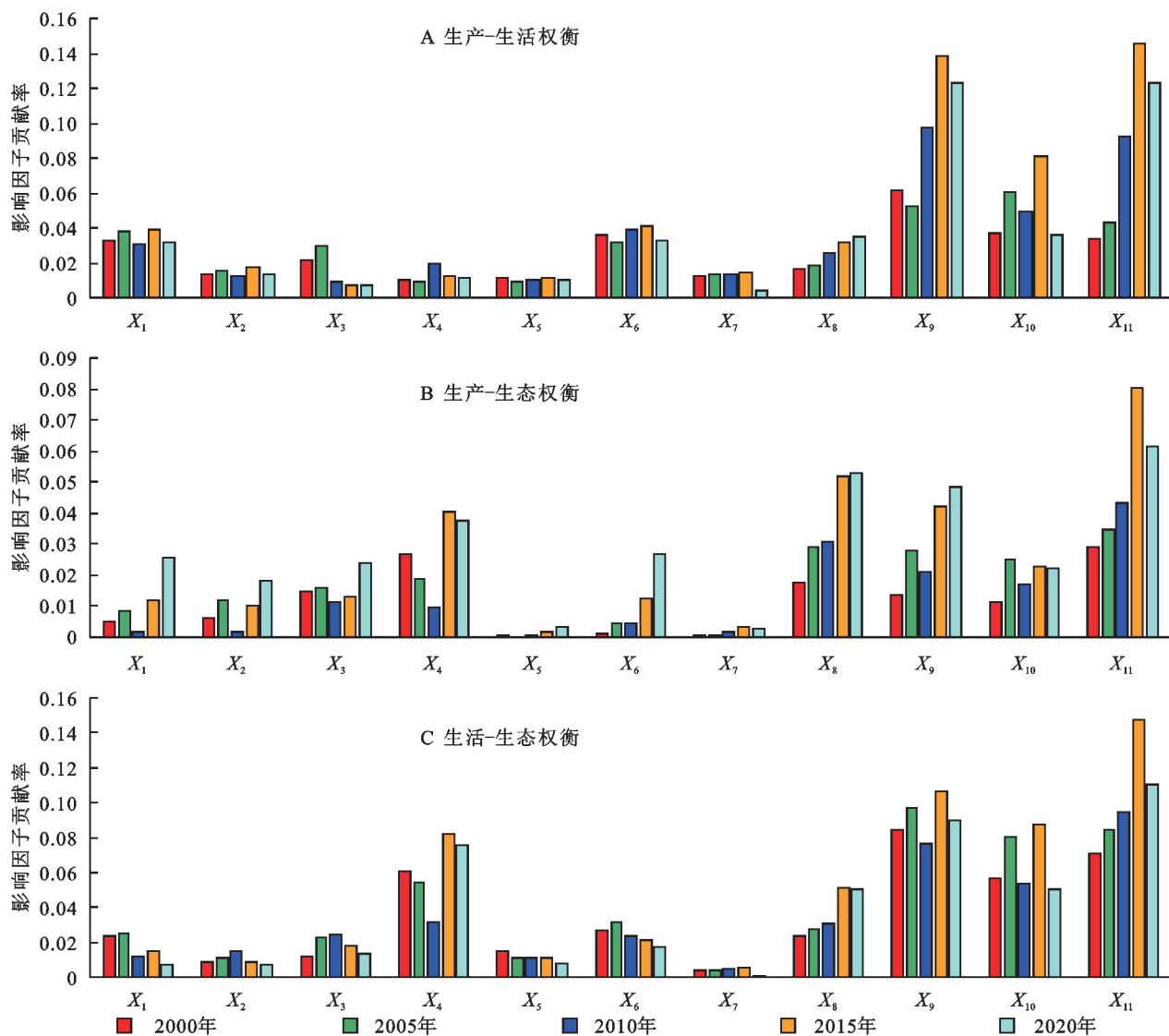
表 5 国土空间功能权衡强度的影响因素
Table 5 Influencing factors on the intensity of territorial space function trade-offs

维度	影响因子		选取理由	定量方法/来源
自然资源因素	高程(X_1)	影响区域自然景观和人类活动的分布		DEM 数据
	坡度(X_2)			坡度分析工具
	年均降水量(X_3)	影响区域水资源的丰度		克里金插值法
	植被覆盖度(X_4)	影响区域生态环境的质量		像元二分法
	距河流距离(X_5)	影响区域工农业生产生活用水		
社会经济因素	距居民点距离(X_6)	反映区域承接产业转移的能力和区域内外联系的便捷程度		欧氏距离
	距道路距离(X_7)			
	土地利用(X_8)	反映区域国土空间的用地类型		中国科学院资源环境科学与数据中心
	人口密度(X_9)	反映区域土地承载人口的能力		
	GDP(X_{10})	反映区域社会经济活动的强度和建设用地扩张的程度		
	人类活动强度(X_{11})			
			夜间灯光数据	

从生活-生态功能权衡的潜在驱动因子贡献率(q 值)排序来看(图 4C),生活-生态功能权衡强度的主导驱动因子为人口密度和人类活动强度,其中人口密度的 q 值呈波动增加的趋势,人类活动强度的 q 值先增加后减小,呈“ Δ ”形变化特征,但总体上 q 值仍呈增加的趋势;GDP、植被覆盖度和土地利用因子对生活-生态功能权衡的影响较强,其中 GDP 的 q 值呈波动减小的趋势,表明对生活-生态功能权衡强度的影响总体呈减弱的态势;植被覆盖度 q 值的时间演变规律与人类活动强度的 q 值演变规律相反,呈“V”形演变特征,表明对生活-生态功能的影响先减弱后增强;土地利用因子对生活-生态功能权衡的影响呈逐渐增强并趋于稳定的态势。高程、坡度、年降水量、距道路距离、距居民点距离和距河流距离影响则较弱。

总体来看,国土空间功能权衡强度的影响因素以社会经济因素为主,自然资源因素为辅。人口密度、GDP 和人类活动强度因子是国土空间功能权衡强度的关键驱动因子,其实质是随着湖北省“十五”“十一五”和“十二五”期间对基础设施建设的大力投资,区域内各类基础设施得到极大完善,吸引了大量工业、服务业的空间集聚,推动了湖北省城镇化进程,特别是 2004 年中部崛起战略的实施,加速了湖北省人口

向城镇聚集,为工业和服务业的发展提供了丰富的劳动力资源,促进了社会经济发展水平的提升,同时国土空间开发力度的不断增强也造成了生态环境破坏,区域发展失衡等一系列问题。因此,“十二五”“十三五”期间,为响应国家构建“生产发展、生活宜居、生态美丽”的国土空间格局,提升区域的协调发展水平,湖北省制定了“一主两副”和“两圈两带”的发展战略,持续推进城乡融合发展,使得 2015—2020 年人口密度、GDP 和人类活动强度因子对国土空间功能权衡强度的影响程度明显减弱。高程、坡度、年均降水量和距河流距离因子作为生态环境的自然本底,对国土空间功能权衡强度的影响具有持续性和稳定性;植被覆盖度因子对生产-生态功能权衡和生活-生态权衡的影响较为显著,这是由于“十五”和“十一五”期间,退耕还林等生态保护政策的实施,提升了湖北省森林覆盖率,但 2000—2010 年,随着经济的发展,生产、生活功能也在持续提升,生产、生活、生态功能之间的矛盾未得到有效调和,2010 年之后,随着生态文明建设上升为国家战略,植被覆盖度的提升能为生产、生活活动的开展提供支撑保障,促进形成国土空间开发保护新格局,使得 2010—2020 年植被覆盖度因子对生产-生态功能权衡和生活-生态权衡的影响显著增强。



注: X_1 为高程; X_2 为坡度; X_3 为年均降水量; X_4 为植被覆盖度; X_5 为距河流距离; X_6 为距居民点距离; X_7 为距道路距离; X_8 为土地利用; X_9 为人口密度; X_{10} 为GDP; X_{11} 为人类活动强度。

图4 湖北省2000—2020年国土空间功能权衡强度的影响因子

Fig. 4 Influence factors on the intensity of territorial space function trade-offs of Hubei 2000—2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

优化国土空间布局,科学建立“生产集约、生活宜居、生态美丽”的国土空间,是当前中国国土空间规划与管理的重心所在。国土空间功能作为国土空间的承载特性,有助于人们认识国土空间开发对区域社会、经济和生态环境可持续发展的多维影响。为了人类社会发展的福祉,协调各方的利益需求,有必要识别区域国土空间功能,探析不同功能间相互作用的关系机制和动态发展方向,以实现国土空间整体效益的最大化。为此,本文融合社会经济、土地覆被和气象数据等多源数据科学评估国土空间功能,并采用均方根误差(RMSE)模型来刻画湖北省2000—2020年生

产-生活功能、生产-生态功能、生活-生态功能间权衡强度的时空演变规律,借助地理探测器模型探究国土空间功能权衡强度的关键驱动因子,可为区域国土空间管理提供实证依据,促进国土空间功能权衡在“三线”划定和国土空间规划中的应用,具有重要的理论和实践价值。

研究表明,湖北省生产-生活功能权衡、生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡关系具有明显的地域分异特征。这表明受制于湖北省社会、经济和自然生态等条件的区域特性,不同功能之间的相互作用关系具有明显空间异质性特征和随时间动态变化的特性,这与其他学者^[4]的研究结果相吻合。由于地理学学科的综合性特征,特定区域会受到至少一组功能权衡的影响,因此,在未来的区域发展过程中应综合考虑

多种功能之间的权衡关系,如武汉市主城区生产-生活功能权衡、生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡强度均显著,应统筹布局城市山、水、路、岸、城等空间,合理控制主城区人口密度,推动城市内涵式发展;有序引导城市绿地空间均衡、系统布局,打造开放绿色的城镇空间,切实增强社会、经济和生态的协调发展水平。鄂东南山区生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡强度较为明显,应积极划定生态保护红线,引导生产、生活空间向城镇集聚,增强生态空间提供生态产品和生态服务的能力。

受制于基础数据的获得性,本文对部分评价指标的测算有待进一步完善。例如,在文化供给功能和医疗供给功能的测算过程中采用图书馆藏数和医院床位数衡量,存在难以准确反映区域公共服务资源的空间保障水平问题,后续研究有待基于大数据深化对区域公共服务功能的探索。

4.2 结论

(1) 2000—2020年,湖北省生产指数和生活指数总体呈上升趋势,生态指数呈下降的态势。其中武汉市“高”等生产功能变化最为明显,扩张了538.54 km²;鄂西北和鄂西南山区谷地的“低”等生活功能提升显著,扩张了14 207.47 km²;生态功能则表现出先减弱后增强的态势,但总体仍呈减弱趋势,从2000—2020年四大山区“高”等生态功能年均减少1 009.50 km²。

(2) 2000—2020年,依据国土空间功能权衡指数平均值的变化规律,可得整体上国土空间功能权衡强度呈减弱趋势,特别是生产-生态功能和生活-生态功能权衡强度减弱幅度尤为凸显。具体来看,生产-生活功能权衡强度先增后减,呈“Λ”形演变特征,空间分布格局呈“低值区扩张、高值区收缩”态势,尤以武汉市主城区和随州市中西部变化突出;生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡强度时间演变规律较为一致,均呈倒“N”形变化趋势,但空间分布格局差异较大,其中生产-生态功能权衡强度呈“中间高、四周低”的空间布局,生活-生态功能权衡强度的城乡差异显著,呈现出明显的中心-外围分布格局。

(3) 研究期内,国土空间功能权衡指数变化冷热点区的空间异质性特征显著,冷热点区的空间分布范围缩减趋势明显。其中“一主两副”主城区、武汉城市圈部分县区和鄂西山区生产-生活功能权衡指数的动态演变尤为凸显;生产-生态功能权衡指数变化和生活-生态功能权衡指数变化显著区主要分布在湖北省四大山区和江汉平原部分县区。

(4) 依据地理探测器模型得到国土空间功能权衡强度的影响因子以社会经济因素为主,自然资源因

素为辅。人口密度、GDP和人类活动强度等社会经济因素是生产-生活功能权衡、生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡强度的关键驱动因子;自然资源因素中高程、坡度、年均降水量和距河流距离因子作为生态环境的自然本底,对国土空间功能权衡强度的影响具有持续性和稳定性;而植被覆盖度因子对生产-生活功能权衡强度的影响变化较小,对生产-生态功能权衡和生活-生态功能权衡强度的影响呈先减弱后增强的态势。

参考文献(References):

- [1] 林佳,宋戈,张莹.国土空间系统“三生”功能协同演化机制研究:以阜新市为例[J].中国土地科学,2019,33(4):9-17.
Lin J, Song G, Zhang Y. Synergistic evolution mechanism of “Production-Living-Ecology” functions in spatial planning system: A case study of Fuxin City[J]. China Land Science, 2019,33(4):9-17.
- [2] Liu C, Cheng L, Li J, et al. Trade-offs analysis of land use functions in a hilly-mountainous city of northwest Hubei Province: The interactive effects of urbanization and ecological construction[J]. Habitat International, 2023,131:102705.
- [3] 康庆,郭青霞,丁一,等.山西省“三生”功能协同/权衡关系分析[J].自然资源学报,2021,36(5):1195-1207.
Kang Q, Guo Q X, Ding Y, et al. Tradeoffs/synergies analysis of “Production-Living-Ecological” functions in Shanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(5):1195-1207.
- [4] Fan Y T, Gan L, Hong C Q, et al. Spatial identification and determinants of trade-offs among multiple land use functions in Jiangsu Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2021,772:145022.
- [5] Zhang Y N, Long H L, Tu S S, et al. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: Implications for sustainable land management[J]. Ecological Indicators, 2019,107:105550.
- [6] 庞晓菲,陆汝成,张利国,等.广西边境地区土地利用“三生”功能协调关系及分区优化[J].水土保持研究,2023,30(2):294-302.
Pang X F, Lu R C, Zhang L G, et al. Study on coordination and zoning optimization of land use based on production-living-ecological functions in border areas of Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):294-302.
- [7] Zhu C M, Dong B Y, Li S N, et al. Identifying the trade-offs and synergies among land use functions and their influencing factors from a geospatial perspective:

- A case study in Hangzhou, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,314:128026.
- [8] Fan Y T, Jin X B, Gan L, et al. Dynamics of spatial associations among multiple land use functions and their driving mechanisms: A case study of the Yangtze River Delta region, China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022,97:106858.
- [9] Liu C, Xu Y Q, Lu X H, et al. Trade-offs and driving forces of land use functions in ecologically fragile areas of northern Hebei Province: Spatiotemporal analysis[J]. *Land Use Policy*, 2021,104:105387.
- [10] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].*地理研究*,2021,40(3):821-838.
- Fang L L, Xu D H, Wang L C, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin[J]. *Geographical Research*, 2021,40(3):821-838.
- [11] 盛舒童,刘艳芳,刘耀林,等.山东沿海生态系统服务协同与权衡的空间格局及驱动力[J].*水土保持研究*, 2023,30(2):384-392.
- Sheng S T, Liu Y F, Liu Y l, et al. Spatial pattern and driving forces of the synergy and trade-off of ecosystem services in the coastal areas of Shandong[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):384-392.
- [12] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*,2022,77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.
- [13] 李怡,方斌,李裕瑞,等.城镇化进程中耕地多功能权衡/协同关系演变及其驱动机制[J].*农业工程学报*, 2022,38(8):244-254.
- Li Y, Fang B, Li Y R, et al. Trade-off and synergy evolution of farmland functions and its dynamic mechanism in the process of urbanization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(8):244-254.
- [14] 杨忍,刘芮彤.珠三角城市群地区都市农业功能演变及其协同-权衡关系[J].*地理研究*,2022,41(7):1995-2015.
- Yang R, Liu R T. Functional evolution and collaboration/trade-off relationship of urban agriculture in the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Geographical Research*, 2022,41(7):1995-2015.
- [15] 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 Y, Gao Y B, Pan Y C, 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.
- [16] 邵景安,陈兰,李阳兵,等.未来区域土地利用驱动力研究的重要命题:尺度依赖[J].*资源科学*,2008,30(1):58-63.
- Shao J A, Chen L, Li Y B, et al. The key to analyze land use driving forces in the future: Scale issue[J]. *Resources Science*, 2008,30(1):58-63.
- [17] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].*地理学报*,2019,74(9):1904-1920.
- Huang M Y, Yue W Z, Fang B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*,2019,74(9):1904-1920.
- [18] 钱凤魁,迟艳茹,徐欢,等.2006—2020年沈阳市耕地多功能权衡协同关系演变分析[J].*中国土地科学*,2022,36(10):31-41.
- Qian F K, Chi Y R, Xu H, et al. Study on evolution of trade-off and synergy relationship of multifunctional cultivated land from 2006 to 2020: A case of Shenyang City[J]. *China Land Science*, 2022,36(10):31-41.
- [19] 程浩然,蒙吉军,朱利凯.基于多源地理数据融合的黑河中游土地多功能性时空格局与权衡研究[J].*干旱区地理*,2021,44(1):208-220.
- Cheng H R, Meng J J, Zhu L k. Spatial-temporal pattern and trade-offs of land multi-function in the middle reaches of the Heihe River based on multi-source geographic data fusion [J]. *Arid Land Geography*, 2021,44(1):208-220.
- [20] 方莹,王静,孔雪松,等.耕地利用多功能权衡关系测度与分区优化:以河南省为例[J].*中国土地科学*,2018,32(11):57-64.
- Fang Y, Wang J, Kong X S, et al. Trade-off relation measurement and zoning optimization of multi-functionality of cultivated land use: A case study of Henan Province[J]. *China Land Science*, 2018,32(11):57-64.
- [21] 陈钱钱,舒晓波,曾凡彬.江西省三生空间结构时空格局的多尺度分析[J].*水土保持研究*,2020,27(4):385-391.
- Chen Q Q, Shu X B, Zeng F B. Multi-scale analysis of the spatio-temporal pattern of the spatial structure of ecology-production-living space in Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(4):385-391.
- [22] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].*中国土地科学*,2018,32(8):67-73.
- Cui J X, GU J, Sun J W, et al. The spatial pattern and evolution characteristics of the production, living and ecological space in Hubei Province[J]. *China Land Science*, 2018,32(8):67-73.

- model in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 793-810.
- [23] 李裕瑞, 王婧, 刘彦随, 等. 中国“四化”协调发展的区域格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2014, 69(2): 199-212.
Li Y R, Wang J, Liu Y S, et al. Spatial pattern and influencing factors of the coordination development of industrialization, informatization, urbanization and agricultural modernization in China: A prefecture level exploratory spatial data analysis [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 199-212.
- [24] 杨丹丽, 孙建伟, 刘艳, 等. 喀斯特山区农村居民点“三生”空间耦合特征分析: 以七星关区为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 337-344.
Yang D L, Sun J W, Liu Y, et al. Analysis on coupling Coordination characteristics of production-living-ecological space in rural settlement in karst mountainous areas: Taking Qixingguan district as an example [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 337-344.
- [25] 韩增林, 赵启行, 赵东霞, 等. 2000—2015 年东北地区县域人口与经济耦合协调演变及空间差异: 以辽宁省为例[J]. *地理研究*, 2019, 38(12): 3025-3037.
Han Z L, Zhao Q H, Zhao D X, et al. Population and economic coupling coordinated evolution and spatial differences at county level in northeast China during 2000—2015: Taking Liaoning Province as an example [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(12): 3025-3037.
- [26] 魏振香, 安蓉. 工业化与生态环境耦合协调度及时空差异研究: 以山东省为例[J]. *生态经济*, 2021, 37(5): 156-162.
Wei Z X, An R. Analysis on the coordination degree of coupling between industrialization and ecological environment and the difference in time and space: Taking Shandong Province as an example [J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(5): 156-162.
- [27] 鲜晓军, 杨海娟, 苏彤. 村庄农户-土地-产业转型耦合协调性评价: 以陕西蓝田县王嘴头村为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(10): 74-84.
Xian X J, Yang H J, Su T. Coupling coordination evaluation of village farmer-land-industry transformation: The case of Wangzuitou Village in Lantian County in Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(10): 74-84.
- ~~~~~
- (上接第 366 页)
- [23] 黄安, 许月卿, 卢龙辉, 等. “生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 503-518.
Huang A, Xu Y Q, Lu L H, et al. Research progress of the identification and optimization of production-living-ecological spaces [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 503-518.
- [24] 李广东, 方创琳. 城市生态-生产-生活空间功能定量识别与分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65.
LI G D, Fang C L. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 49-65.
- [25] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 378-391.
Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 378-391.
- [26] Liu C, Xu Y Q, Huang A, et al. Spatial identification of land use multifunctionality at grid scale in farming-pastoral area: A case study of Zhangjiakou City, China [J]. *Habitat International*, 2018, 76: 48-61.
- [27] 黄安, 许月卿, 刘超, 等. 基于土地利用多功能性的县域乡村生活空间宜居性评价[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 252-261, 304.
Huang A, Xu Y Q, Liu C, et al. Evaluation on livability of living space based on multiple functions of land use at county level [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 252-261, 304.
- [28] Paracchini M L, Zulian G, Kopperoinen L, et al. Mapping cultural ecosystem services: A framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 371-385.
- [29] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1278-1288.
Gong J, Liu D Q, Gao B L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [30] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 736-756.
Zhao X Q, Shi X Q, LI Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 736-756.