

供需耦合视角下合肥都市圈生态空间 冲突诊断与协同策略

王秉义^{1,2}, 叶琼¹, 闫梦茹¹, 兰春³, 胡莎莎³

(1.安徽建筑大学公共管理学院,安徽合肥 230601; 2.安徽省地域环境健康与空间智慧感知工程研究中心,安徽合肥 230601; 3.自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室,安徽合肥 230601)

摘要: [目的] 诊断合肥都市圈生态空间冲突区域并提出协同策略,为区域生态保护和经济发展提供参考。[方法] 通过形态学空间分析和最小阻力模型提取生态源地、生态廊道,构建生态安全格局;耦合供给适宜性和需求稀缺性,评价城镇空间、农业空间合理范围,识别非生态空间重点区域;采用叠置分析法,测算生态空间冲突指数。[结果] ①合肥都市圈生态景观中部、南部连通性较好,北部细碎化严重,生态源地、廊道呈南多北少特征,核心生态源地集中在南部山地丘陵区。②非生态空间分布呈圈层式分异,中心区开发需求和适宜性高,边缘区较低,郊区表现为过渡性。③生态空间冲突区具有“中心高,边缘低”的异质性,高、较高冲突区(24.21%)集中分布于城郊过渡带,主要为生态敏感性与开发需求性冲突;中低冲突区(75.79%)位于生态本底良好、人类活动强度较低的缓冲区域。④生态空间冲突区宜建立“生态空间底线锁定—非生态空间弹性管控”协同机制,在保障核心生态功能的同时,建立有条件准入与动态适配策略,实现“金山银山”和“绿水青山”的有机衔接。[结论] 都市圈生态空间冲突呈现核心区—边缘的梯度分异特征。生态空间、非生态空间协同配置及差异化治理是实现生态保护与高质量发展的主要路径。

关键词: 生态安全; 国土空间冲突; 都市圈; 供需分析; 协同策略

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0360-12

中图分类号: F301.24

文献参数: 王秉义, 叶琼, 闫梦茹, 等. 供需耦合视角下合肥都市圈生态空间冲突诊断与协同策略[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 360-371. Wang Bingyi, Ye Qiong, Yan Mengru, et al. Diagnosis and cooperative strategy of ecological spatial conflict in Hefei metropolitan area from a perspective of supply-demand coupling [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 360-371. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.026; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.026.

Diagnosis and cooperative strategy of ecological spatial conflict in Hefei metropolitan area from a perspective of supply-demand coupling

Wang Bingyi^{1,2}, Ye Qiong¹, Yan Mengru¹, Lan Chun³, Hu Shasha³

(1.School of Public Policy and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 2.Anhui Provincial Engineering Research Center for Regional Environmental Health and Spatial Intelligent Perception, Hefei, Anhui 230601, China; 3.Key Laboratory of Jiang Huai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: [Objective] Areas of ecological space conflict in the Hefei metropolitan area were identified, and collaborative strategies were proposed to provide references for regional ecological protection and economic development. [Methods] Ecological source areas and corridors were extracted using morphological spatial analysis and a minimum resistance model to construct an ecological security pattern. Coupling the suitability of supply and the scarcity of demand, the reasonable range of urban and agricultural spaces were evaluated, and key areas of non-ecological space were identified; The superposition analysis method was adopted to calculate the ecological space conflict index. [Results] ① Central and southern regions exhibited superior ecological connectivity, contrasting

收稿日期: 2025-01-13

修回日期: 2025-04-29

采用日期: 2025-04-30

资助项目: 安徽省社会科学创新发展研究课题“安徽省际毗邻区空间协同利用的现实困境与靶向治理”(2024CX062); 自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室开放课题(ARPE-2023-KF04); 合肥市哲学社会科学规划项目(HFSKQN202523)

第一作者: 王秉义(1982—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 副教授, 主要从事国土空间规划与利用等方面研究。Email: wangbingyi@ahjzu.edu.cn.

通信作者: 兰春(1986—), 女(汉族), 安徽省阜阳市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为国土空间生态修复。Email: lansedesha-100@163.com.

with severe fragmentation in northern areas. Ecological sources and corridors demonstrated distinct differentiation of more in the south and less in the north, with core sources aggregating in the southern hilly regions. ② Non-ecological spaces displayed concentric zonation: high development suitability and demand in the central zones, transitional characteristics in the suburbs, and lower values in peripheral areas. ③ Spatial conflicts manifested as heterogeneity of higher at the center, and lower along the edge with high and higher conflict zones (24.21% of the area) concentrated in urban-rural transition areas, reflecting ecological sensitivity and contradictions in development demand. Medium-low conflict zones (75.79%) occupied buffer regions with favorable ecological conditions and limited human disturbance. ④ In ecological space conflict zones, a dual governance mechanism featuring ‘ecological red lines enforcement’ and ‘adaptive non-ecological space management’ should be established, incorporating conditional access policies and dynamic adaptation strategies to reconcile ecological integrity with development needs. [Conclusion] The ecological space conflicts in metropolitan areas present a gradient differentiation feature of form core area to periphery. The coordinated allocation and differentiated governance of ecological and non-ecological spaces are the main paths for achieving ecological protection and high-quality development.

Keywords: eco-security; territorial spatial conflicts; metropolitan area; supply-demand analysis; cooperative strategy

生态安全是经济社会可持续发展的核心支撑,是人类生存与发展的基础保障^[1]。生态空间作为提供生态系统服务的核心载体,其完整性和稳定性关系到区域可持续发展与全球生态文明建设^[2]。生态空间冲突是在有限的空间资源开发过程中,因人类活动与生态系统功能需求而引发的空间资源竞争与功能失衡现象^[3],具有多元价值失调、利益相关者博弈复杂化以及空间权利失配等核心特征^[4]。随着城镇化与农业集约化进程加速,生态空间持续遭受挤压,呈现破碎化、多样性减化、系统服务退化等问题^[5]。科学诊断生态空间冲突并提出协同策略,已成为国土空间治理的关键课题。

有关生态空间冲突的研究普遍是基于生态系统服务评估和景观格局分析,构建“压力-状态-响应”等系统性分析框架^[6],通过空间重构缓解生态保护与城镇扩张、农业生产之间的矛盾,在识别冲突热点、量化冲突强度、模拟未来情景等方面取得了显著进展,为生态保护红线划定和国土空间规划提供了科学依据。但已有研究多侧重于单一视角:从供给端分析聚焦生态系统的服务能力^[7]与空间承载力^[5],通过“双评价”识别生态源地与敏感区^[6];从需求端分析则关注社会经济活动对生态空间的占用需求及其空间溢出效应^[8]。研究思路,提出“冲突识别-功能细分-分级管控”的逆向推导框架^[9],实现冲突区分类管控^[10]、开发“风险-效应”模型^[11]精准识别冲突热点、探索生态补偿与市场机制,通过跨区域合作促进供需匹配。研究方法上,“DPSIR框架”^[12](驱动力-压力-状态-影响-响应)常被用于解析冲突源、冲突区与冲突影响的连锁反应^[13],并借助生态系统服务流模

型量化供需空间错位程度^[14]。但对于生态空间冲突的识别大多基于土地利用现状,较少从供需视角分析非生态空间重点区域,缺乏兼顾适宜性与需求性的可操作路径。为此,从供需双侧视角分析生态空间冲突,突破传统“被动保护”思维,有利于实现生态安全约束下的主动式空间优化。

合肥都市圈作为长三角城市群的重要组成部分,正处于城镇化加速与生态保护需求剧烈碰撞的关键发展阶段,如何在高速发展的同时科学识别并有效调节非生态空间对生态空间的挤压,优化空间资源配置是支撑高质量发展的关键。鉴于此,本研究以合肥都市圈为例,旨在建构“生态安全为基,供需分析为用”的综合生态空间冲突诊断与协同框架:使用MSPA方法识别生态安全格局,通过供需双侧路径识别非生态空间重点区域,融合生态安全格局的刚性约束与供需双侧路径的弹性调控,揭示冲突的“自然-社会”耦合驱动机制,破解“保护-发展”二元对立,提出差异化协同策略,以期为国土空间规划提供科学依据,推动生态空间从“被动防御”转向“主动赋能”,实现人与自然和谐共生的可持续发展目标。

1 研究区概况

合肥都市圈地处安徽省中部、长江三角洲西翼,范围含合肥市全域、淮南市寿县、滁州市定远县、六安市金安区和舒城县、马鞍山市含山县、芜湖市无为市、安庆市桐城市16个县级单元,总面积 $2.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1);地势呈中部高,南北低,岗冲交错。2024年,都市圈城镇化率86.38%,人均GDP约 7.50×10^4 元,常住人口 3.40×10^7 人。作为安徽省经济发展的核心

引擎,都市圈城市化和工业化的快速发展,生态安全、农业和城镇发展冲突问题加剧。

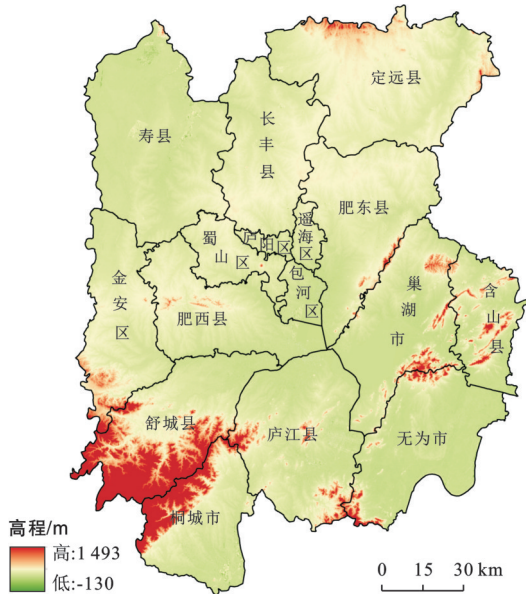


图1 合肥都市圈概况

Fig.1 Overview of Hefei metropolitan area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究使用数据包括土地资源、水资源、环境、生态、经济社会等方面^[15-16]。土地利用覆被数据和农田生产潜力数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/x>),分辨率为500 m;数字高程和NDVI数据源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m;道路数据源于Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>)。GDP和人口数据源于安徽省统计年鉴(<http://stats.ah.gov.cn/gdtjnj/index.html>);土壤有机质含量源于国家地球系统科学数据中心(<http://soil.geodata.cn/ztsj.html>)。除农田生产潜力(2019年)、土壤有机质含量(2017)以外,其余数据年份均为2022年。

2.2 研究方法

2.2.1 研究框架

国土空间在自然本底条件、生态系统服务供给能力及社会经济需求耦合作用下具有农业生产、城镇建设、生态保育等不同空间利用方式,即国土空间的多功能适宜性^[4]。因此,基于国土空间的多功能特性,将国土空间分为生态空间和非生态空间。生态空间以提供生态系统服务,如水源涵养、生物多样性保护、气候调节等为核心功能^[15],强调生态产品的可持续供给,其质量和稳定性高度依赖自然条件,对外

界干扰敏感,恢复周期长,易发生不可逆退化。非生态空间以城镇建设、农业生产等社会经济功能为主,追求经济效益或居住适宜性^[16],主要通过基础设施、土地利用改造自然基底,受人口增长、产业集聚等驱动,空间边界易向外扩张。

精准识别生态空间与非生态空间是分析生态空间冲突的基础。生态空间的识别基于生态安全理论^[17],通过形态学空间分析方法和最小阻力模型,构建生态阻力面,识别出生态源地和生态廊道,从而构建生态安全格局,明确生态保护的核心区域;非生态空间的识别基于国土空间多功能理论^[18-19]和马斯洛需求层次理论^[15],通过建立非生态空间适宜性和稀缺性评价指标体系,从供给视角分析城镇空间适宜性、农业空间适宜性,明确区域非生态空间适宜情况和空间差异;从需求视角分析城市化、人口增长和产业发展对空间资源的需求变化,识别需求的主要来源和空间差异。以此构建生态空间冲突诊断模型,识别冲突区域(图2)。

2.2.2 生态安全等级划分

(1) 生态源地识别。采用形态学空间格局分析(MSPA)方法^[17],选取林地、草地、灌木、水体等生态要素为前景,受人类活动干扰较大的耕地、建设用地为背景,进行二值化处理,设定栅格数据大小为30 m×30 m。利用Guidos Toolbox分析软件,将面积大于10 km²的生境斑块提取出为潜在生态源地。基于Conefor 2.6软件,对提取出的潜在生态源地进行景观连通性计算。根据斑块重要性指数(dPC)对生态源地进行等级划分^[20]。dPC的值越大,该斑块景观连通性越好。

(2) 生态阻力面构建。基于合肥都市圈“低山丘陵—平原交错”的地形特征和快速城市化的空间特点,选择土地利用类型、高程和坡度3个自然因子构建生态阻力面^[16]。根据已有研究成果^[17,20],对各阻力因子分级(分类),并匹配相应的阻力值,通过加权求和的方法构建生态阻力面。其中,各阻力因子的权重依据层次分析法确定^[21](表1)。

(3) 生态廊道提取。采用最小阻力模型^[22],利用ArcGIS 10.8提取各生态源地的中心为生态源点,以生态阻力面为成本,通过Linkage Mapper工具提取生态廊道,计算公式^[23]为

$$F_{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中: F_{MCR} 为从生态源地扩散到其他生态源地的最小累积阻力值; D_{ij} 为从生态源地 j 到景观单元 i 的距离; R_i 为景观单元 i 的生态阻力数。

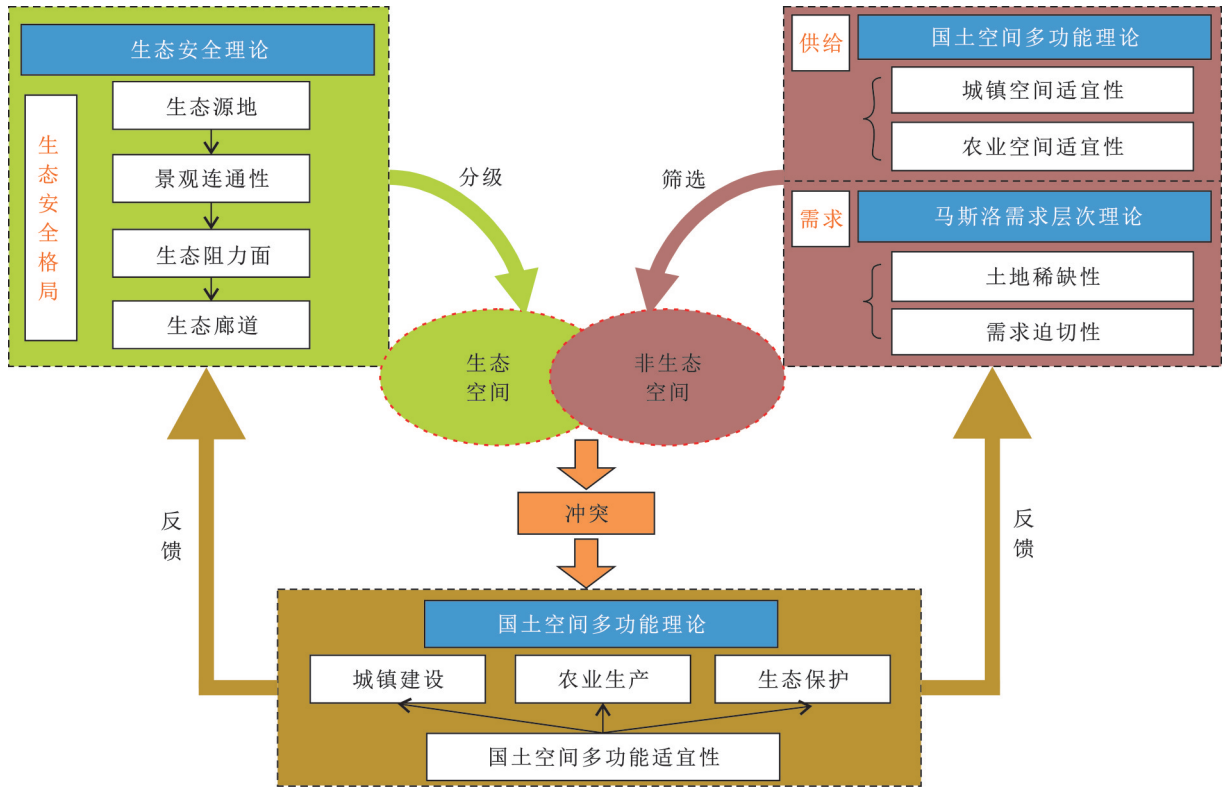


图 2 合肥市都市圈生态空间研究框架

Fig.2 Research framework for ecological space of Hefei metropolitan area

表 1 生态阻力面最小阻力指标体系
Table 1 Minimum resistance index system of ecological resistance surface

阻力因子	分级指标	阻力值	权重
坡度/(°)	≤3	1	0.25
	(3, 8]	3	
	(8, 16]	5	
	(16, 26]	7	
	>26	9	
高程/m	≤39	1	0.25
	(39, 125]	3	
	(125, 294]	5	
	(294, 556]	7	
	(556, 1 503]	9	
土地利用	林地	1	0.50
	草地	3	
	水域	5	
	耕地	7	
	建设用地	9	

2.2.3 非生态空间重点区域识别

非生态空间重点区域的识别主要从供需双侧路径进行:基于适宜性的非生态空间识别,从可供的空间资源角度出发,通过建立城镇空间适宜性评价指标体系和农业空间适宜性评价指标体系,识别非

生态空间适宜区;基于稀缺性的非生态空间识别,从人类需求出发,通过建立城镇空间稀缺性评价指标体系和农业空间稀缺性评价指标体系,识别出非生态空间稀缺区。综合考虑非生态空间适宜性和稀缺性,识别非生态空间重点区域。参考相关研究^[18-20],结合评价指标的数据特征,采用分级赋值与多源权重确定方法对指标进行处理。具体而言,对于有明确标准的定量指标,如土壤有机质含量,依据《全国耕地质量等级评价》等规范进行分级;对于无明确标准的定量指标,如高程、坡度、地形粗糙度等,则基于数据分布特征,采用自然断点法进行分级。在权重确定方面,运用专家打分法和层次分析法确定各指标权重。

(1) 供给侧。基于适宜性的城镇空间和农业空间识别。选择自然条件与交通区位^[24]建立城市空间适宜性评估指标体系(表 2)。其中,随着高程、坡度、地形粗糙度的增大,适宜性越低;城市与主干道之间的距离是衡量城市交通便利度的指标,城市与主干道之间的距离越短,城市的区位优势就越明显,其适宜性也就越高。农业空间适宜性以耕作条件和耕作便利性^[25]为研究对象。随着高程的降低,其适宜性也随之提高;随着土壤有机质含量、农田生产潜力的增加,耕地的生产力水平提高,耕地的空间适宜度也随之提高;离居民点和道路愈近,农耕条件愈好,则

愈有利于农业发展。通过加权叠加城镇空间适宜性和农业空间适宜性,得到非生态空间适宜性。

(2) 需求侧。基于稀缺性的城镇空间和农业空间识别。随着社会经济发展,人口数量增长,生活质量提高,人们对空间资源的要求也随之变化,从最初的粮食生产、居住到更高的商业开发、休闲娱乐,表现出大量化、多样化和精细化特点。而随着城市人口的增加和经济的发展,第二、三产业产值愈高,需

要更多的土地来承载居民、企业和基础设施等。但为保护生态环境、避免无序扩张,政府合理规划土地利用,严格控制各空间指标,空间稀缺性日益凸显。因此,从城镇空间稀缺性、农业空间稀缺性综合评价人类需求迫切性^[26](表 3)。其中,各类空间人均数量越大,则稀缺性越低;各产值越高,稀缺性越高。通过加权叠加城镇空间稀缺性和农业空间稀缺性,得到非生态空间稀缺性。

表 2 基于适宜性的城镇空间与农业空间评价指标体系与权重

Table 2 Suitability-based urban and agricultural space evaluation index system and weights

因素层	指标层	指标分级赋值					权重	
		100	80	60	40	20		
农业空间 (0.50)	自然条件 (0.62)	高程/m	≤39	(39, 125]	(125, 294]	(294, 556]	>556	0.33
		坡度/(°)	≤3	(3, 8]	(8, 16]	(16, 26]	>26	0.39
	地形粗糙度	(1, 1.02]	(1.02, 1.09]	(1.09, 1.17]	(1.17, 1.31]	>1.31	0.28	
	交通区位 (0.38)	距城镇距离/m	≤396	(396, 1 365]	(1 365, 2 951]	(2 951, 5 064]	>5 064	0.48
		距主要道路距离/m	≤579	(579, 1 343]	(1 343, 2 375]	(2 375, 4 189]	>4 189	0.52
城镇空间 (0.50)	耕作条件 (0.57)	高程/m	≤39	(39, 125]	(125, 294]	(294, 556]	>556	0.17
		坡度/(°)	≤3	(3, 8]	(8, 16]	(16, 26]	>26	0.20
		土壤有机质含量	>39	(24, 39]	(20, 24]	(10, 20]	≤10	0.26
	耕作便利性 (0.43)	农田生产潜力	>10 102	(7 808, 10 102]	(5 624, 7 808]	(2 348, 5 624]	≤2 348	0.37
		距农村道路距离/m	≤500	(500, 1 500]	(1 500, 3 000]	(3 000, 5 000]	>5 000	0.71
	距农村居民点距离/m	≤4 507	(4 507, 9 013]	(9 013, 14 164]	(14 164, 22 534]	>22 534	0.29	

表 3 基于稀缺性的城镇空间和农业空间评价指标体系与权重

Table 3 Scarcity-based urban and agricultural space evaluation index system and weights

因素层	指标层	指标分级与赋值					权重
		100	80	60	40	20	
农业空间 (0.50)	人均农业空间	≤40	(40, 144]	(144, 182]	(182, 212]	>212	0.36
	第一产业生产总值	(66.32, 87.26]	(41.16, 66.32]	(25.38, 41.16]	(4.99, 25.38]	(0.56, 4.99]	0.51
城镇空间 (0.50)	人均城镇空间	≤9	(9, 15]	(15, 21]	(21, 32]	>32	0.49
	第二、三产业生产总值	(1 651.99, 4 011.52]	(992.61, 1 651.99]	(546.47, 992.61]	(334.96, 546.47]	(198.07, 334.96]	0.64

基于非生态空间适宜性与稀缺性的评价结果,采用线性加权法和模型测算非生态空间重点区域指数^[27],计算公式为

$$S_{\text{dev}} = \sum_{i=1}^2 W_i F_i \quad (2)$$

式中: S_{dev} 为非生态空间重点区域指数; F_i 为城镇空间与农业空间适宜性、城镇空间与农业空间稀缺性的综合得分; W_i 为评价指标权重。

2.2.4 生态空间冲突诊断 将研究区非生态空间重点区域图与生态安全等级图叠加,通过栅格数据标准化与空间配准方法测算生态空间冲突指数,获取区域生态空间冲突情况。基于自然断点法渲染冲突等级,将冲突指数分为高、较高、中、较低、低 5 级,阈

值根据数据分布特征优化,以此分析合肥都市圈生态空间冲突空间分异特征,计算公式为

$$C = \alpha \cdot S_{\text{eco}} + \beta \cdot S_{\text{dev}} \quad (3)$$

式中: C 为生态空间冲突指数; S_{eco} 为标准化后的生态安全值; S_{dev} 为非生态空间重点区域指数; α, β 为权重系数,以符合《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》中生态功能保障基线的要求,通过层次分析法确定 $\alpha=0.65, \beta=0.35$ 。

3 结果与分析

3.1 生态安全等级分析

利用 MSPA 分析方法得到 7 种不重叠景观类型(表 4)。

表4 合肥市都市圈生态空间景观格局分类统计
Table 4 Landscape pattern classification statistics for ecological space of Hefei metropolitan area

景观类型	总面积/km ²	占比/%
核心区	3 380.41	79.18
孤岛	166.28	3.90
孔隙	92.18	2.16
边缘区	474.37	11.11
环岛	13.24	0.31
桥接区	20.06	0.47
分支	122.66	2.87
合计	4 269.2	100

合肥都市圈生态景观面积为3 380.41 km²,占景观生态用地的79.18%,且多集中在都市圈中部和南部。以巢湖为中心,其总体连通性良好。都市圈北

部生态景观面积小而散,地块间的连通性不强,不利于陆生动物的迁徙和能量交换。边缘区生态景观面积为474.37 km²,占11.11%;孔隙生态景观面积约为92.18 km²,占2.16%。合肥都市圈绿地面积和周边绿地面积总和均低于核心区绿地。筛选面积大于10 km²的生境斑块,获取25个生态源地,共计2.67×10³ km²。将所得生态源地按重要程度进行排序分级,发现合肥都市圈的生态源地存在明显异质性,且主要集中于中南部,即中部依巢湖、南部依大别山,具有良好的生态连通性。其次,识别出38条生态廊道,主要集中于南部,中北部区域生态廊道分布稀少(图3a)。根据阻力面栅格分布拐点通过自然断点法划分不同生态安全等级(图3b)。合肥都市圈生态廊道以森林类型为主,以南方山地丘陵为代表。

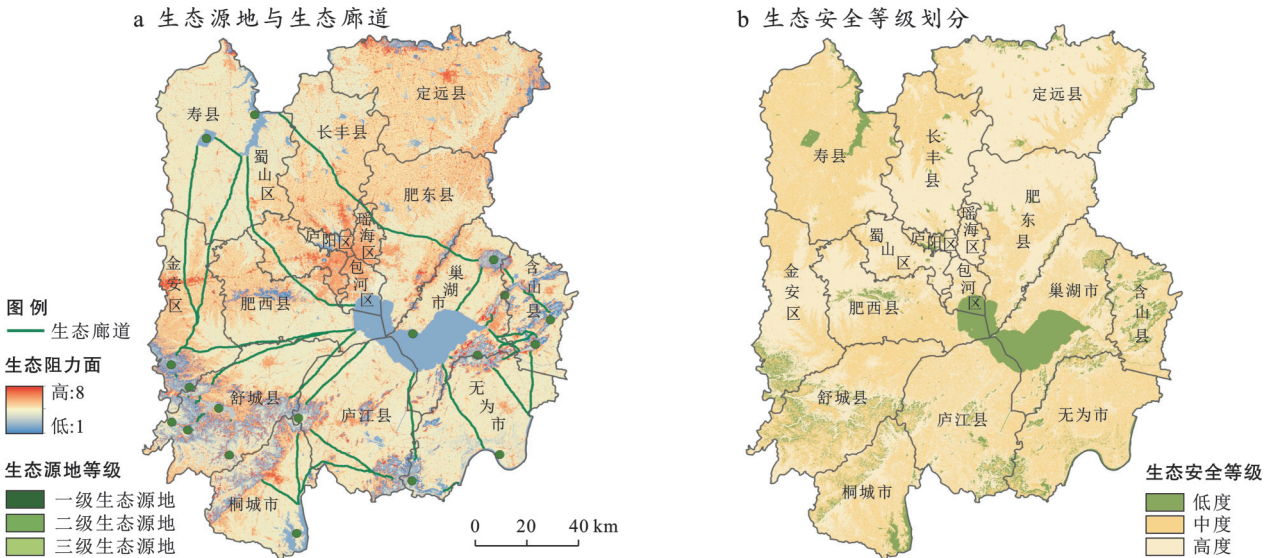


图3 合肥都市圈重要生态源地及生态安全等级空间分布

Fig.3 Spatial distribution of important ecological sources and ecological security level in Hefei metropolitan area

3.2 非生态空间重点区域分析

3.2.1 适宜性空间分异特征

为反映非生态空间适宜性与稀缺性分布特征,有针对性提出协同策略,并发挥行政区治理优势,采用自然断点法并参照已有研究^[7,16-18],将合肥都市圈非生态空间适宜性与稀缺性等级划分为高、较高、中、较低、低5类。

合肥都市圈城镇空间适宜性呈现“中南高、四周低”的格局(图4a)。其中,高、较高的适宜性区域主要分布在合肥市、肥东县和寿县,占26.50%,具有良好的位置和自然条件,海拔较低,地形平坦。中等适宜性区占46.34%,分布于半城市化地区。低、较低适宜性区域占比27.16%,分布于西南山区,以山地丘陵为主,地势起伏明显。

合肥都市圈农业用地适宜性偏低(图4b)。高、

较高适宜性区仅22.34%,主要集中在肥东县、定远县等城乡过渡带,金安区东部和北部、庐江县南部、肥东县和无为县西南。中度适宜性区占45.60%,以高适宜区为中心,向四周辐射;舒城县、桐城市、含山县等山区丘陵山区为低、较低适宜性区域,耕地面积较小,生产潜力较低,距离乡村聚落较远。

总体来看,合肥都市圈的非生态空间适宜性以中等为主(图4c)。具体而言,适宜性高、较高的地区占31.88%,集中在肥东县、肥西县、金安区、庐江县和无为市。从城镇空间来看,区域地势平坦,临近城镇和交通要道,具有较强的区位优势;从农业空间来看,耕地生产潜力大,离乡村聚落近,耕种方便。非生态空间适宜性低、较低的区域占19.89%,主要集中在各县区外围的山地丘陵地带。中度非生态空间适宜性区域占48.23%,广泛分布在各个区县。

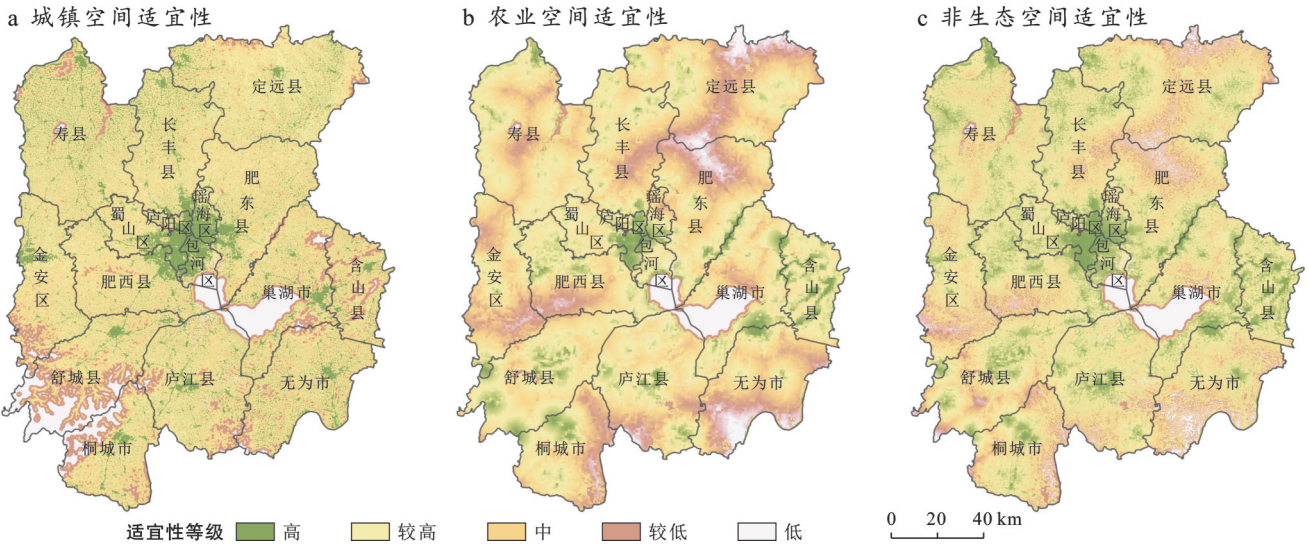


图 4 合肥市都市圈非生态空间适宜性分布

Fig.4 Distribution of non-ecological spatial suitability of Hefei metropolitan area

3.2.2 稀缺性空间分异特征

合肥都市圈城镇空间高、较高稀缺性区域占 16.32%(图 5a),主要分布于庐阳区、瑶海区、蜀山区、包河区,人口密集,经济活动频繁,土地资源紧张,与作为安徽省的省会城市,经济、政治、文化中心地位相吻合。中等稀缺性区域占 34.81%,主要分布于肥东县、肥西县、长丰县、巢湖市、庐江县,经济活动和人口逐渐增加。低、较低稀缺性区域占 48.87%,主要分布于舒城县、桐城市、无为市等,经济活动和人口密度相对较低,城镇空间资源相对较为充裕。合肥都市圈农业空间稀缺性呈现出中等水平,但存在明显的区域差异(图 5b)。高、较高稀缺性区域占 41.24%,主要集中在合肥市的中心城区,包括蜀山区、包河区、瑶海区和庐阳区等。由于城市化和工业化的发展,大量农业用地被转化为城市建设用地,导

致农业空间稀缺性较高。中等稀缺性区域占 27.48%,主要分布在庐江县、无为市和巢湖市的部分地区。低、较低稀缺性区域占 31.28%,主要分布在寿县、定远县、舒城县、金安区、肥东县和肥西县的部分地区,人口密度较低,农业用地相对充足,但仍需关注未来城市化和工业化对农业用地的影响。

总体来看,合肥都市圈非生态空间稀缺性属于中等程度,其空间布局呈现出“中西高,四周低”的特点,且存在明显的地域分异(图 5c)。合肥市长丰县、肥西县、肥东县高需求量区域占 26.48%,经济发展水平高,人口密度大,是都市圈的核心地带。金安区、桐城市、庐江县、巢湖市等,为中需求区域占 38.20%。舒城县、寿县、定远县、含山县等低、较低稀缺性区域人口密度偏小,经济发展水平不高,与中心城区有很大的距离。

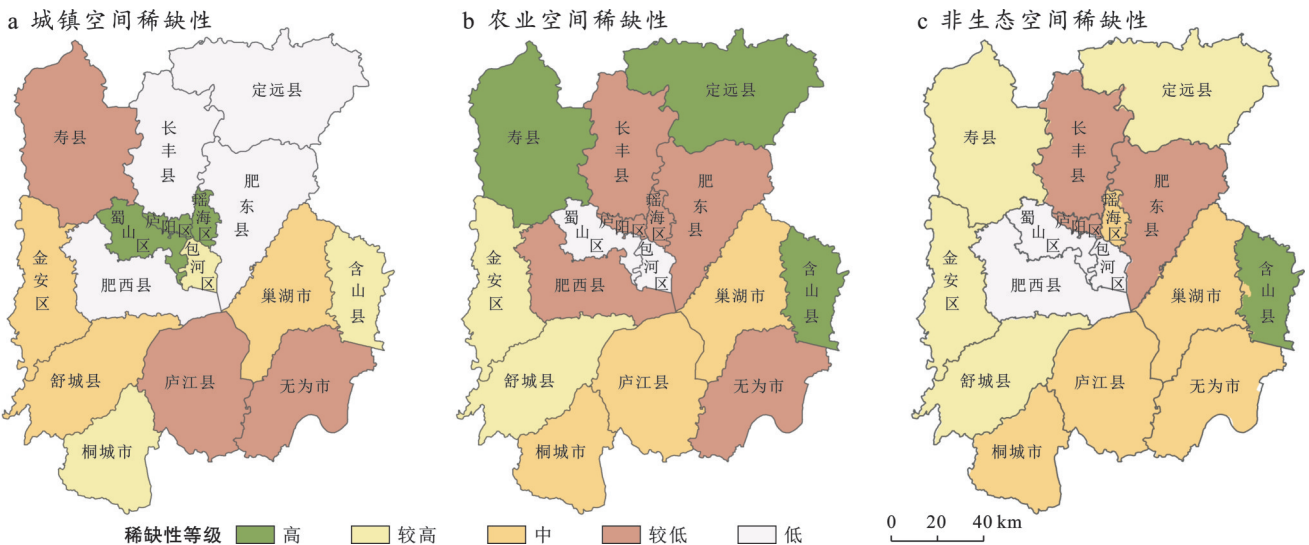


图 5 合肥市都市圈非生态空间稀缺性分布

Fig.5 Distribution of non-ecological spatial scarcity of Hefei metropolitan area

3.2.3 非生态重点区域空间分异特征

合肥都市圈非生态空间重点区域的分布情况反映了不同区域的非生态空间利用适宜性和人类需求映射的资源稀缺性,以及交通、基础设施和生态保护等因素对非生态空间分布的影响(图6)。具体来说,高、较高非生态空间重点区域主要集中在都市圈的中心地带,基础设施完善,交通便利,商业和服务业发达,适宜进行高强度的城市建设,且随着城市人口的增加和经济的发展,城市中心区域的空间需求不断增加;中等非生态空间重点区域主要分布于城市边缘和郊区,基础设施相对不够完善,交通相对不够便利,但随着城市化进程的推进,越来越多的人和产业向城市边缘和郊区转移,其适宜性和稀缺性可能会逐渐提高;低、较低非生态空间重点区域主要是因为需要保护生态环境,限制人类活动,避免过度开发。

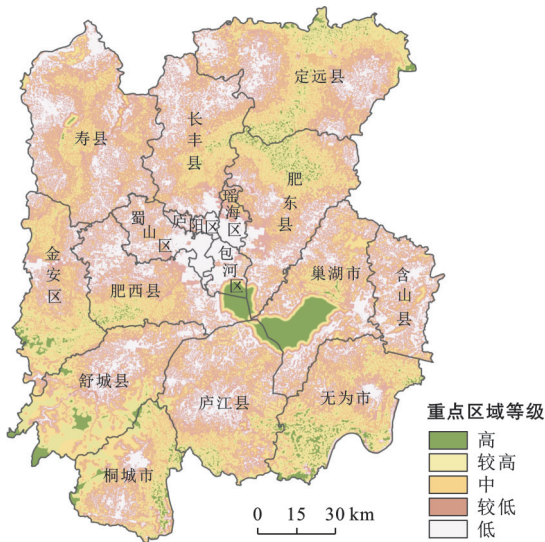


图6 合肥市都市圈非生态空间重点区空间分布
Fig.6 Spatial distribution of non-ecological spatial priority areas of Hefei metropolitan area

3.3 生态空间冲突诊断分析

为反映区域内生态保护与人类发展需求的矛盾程度,基于生态空间冲突指数,将合肥都市圈生态空间冲突划分为高、较高、中、较低、低5个等级(图7)。高、较高冲突区表现为生态敏感性与开发强度的高度重叠;中冲突区反映适度开发与生态保护的过渡;较低、低冲突区则体现生态本底良好与开发需求较低的特征。

高冲突和较高冲突空间占24.21%,广泛分布在长丰县、肥西县和肥东县范围内,部分城郊地区也表现明显,如无为市、庐江县南部、桐城市东部等。高冲突和较高冲突空间呈现出高水平的农业用地、中等规模的城镇和高度稀缺的土地资源,并处于重点

生态安全区内,各地区的优势特征存在明显的差异性。如肥西县南部地带位于重点生态安全区域,北方地区的农业生产水平较高;从优势特性的要素来看,北部生态安全保护区的开发利用程度较低,人为干扰程度较低,而具有较好的自然资源条件。而在农业空间适宜性高的区域,其耕地的生产潜力较大,且离乡村聚落较近,耕种较为便捷。土地资源稀缺程度高,主要受限于人均耕地面积与人均城镇建设用地面积的短缺,而城市与城乡交错区作为大量外来人口流入的重要区域,其用地需求日益增长,导致土地资源极度匮乏。

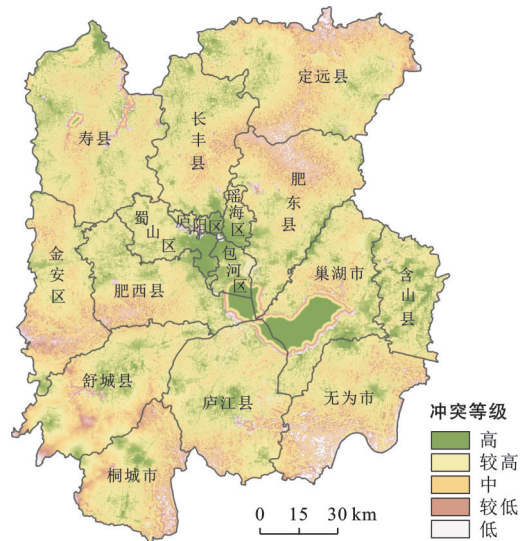


图7 合肥市都市圈生态空间冲突分布
Fig.7 Distribution of ecological spatial conflict of Hefei metropolitan area

中冲突空间表现为从半城市化地区向城市中心、乡村降低的格局。中冲突区域面积约占30.96%,主要集中于城市与农村的过渡区域及城镇。中冲突实质上是高度冲突和低度冲突的缓冲区,其主要特点是人的需要更加紧迫,非生态空间适宜性低,对生态空间的侵占强度较低。中冲突区域主要位于中北部和南部地区。该区域对人口吸引力大,且城镇基础设施建设较好,但已存在的国土空间利用格局难以变化,故生态空间冲突程度也较为稳定。而大部分乡镇区域的特点是土地资源的稀缺程度适中且需求程度不高,如长丰县,目前缺乏集聚性、吸引力,但因土地约束因素较少,更适宜于农业生产与生态保护,是向高冲突区转型的危险区。

低冲突和较低冲突空间占44.83%,主要分布在都市圈四周边缘地带。例如,舒城县、含山县的非生态空间适宜性低、人类需求迫切性不高,对重点生态安全区域的侵占程度低。另外,与南京相邻的区域,

由于其独特的地理位置优势,其发展和建设水平较高,而土地的利用方式却很难发生变化,与“地窄人多、经济发达”的合肥中心城区相似,其城市用地扩展受限于地域、人口密集的特点,城市用地矛盾并不突出。山区丘陵地区受自然条件制约,具有高海拔、陡坡等特点,土地利用难度大,非生态空间适宜性差;同时,地广人稀,经济发展滞后,人类需求低。

3.4 生态空间冲突协同策略

合肥都市圈生态空间冲突呈现“中部高、四周低”的非均衡格局,表现为高强度开发挤压生态空间、城乡过渡带功能竞争加剧、边缘区保护成效与价值转化不足,反映了刚性保护与弹性发展的深层矛盾。一方面,生态红线管控政策虽在一定程度上遏制了无序开发,却难以应对非生态空间的集约化需求;另一方面,跨系统要素流动缺乏协同机制,导致保护与开发在空间和制度上脱节。因此,如何构建保护—发展协同管控体系,成为解决合肥都市圈生态空间冲突的关键。

当前,生态空间管控以“保护优先”为原则,通过自然保护地体系与生态恢复工程遏制生态系统退化^[28],取得了阶段性成效。然而,非生态空间的集约开发需求、跨系统要素流动及生态产品价值转化,亟须构建生态空间与非生态空间的协同管控机制^[29]。基于“山水林田湖草沙一体化治理”理念,协同管控可划分为战略协同、空间适配、动态调整、权益平衡四大环节。战略协同方面,制定生态安全与高质量发展双导向目标,衔接国土空间规划与专项规划指标;空间适配方面,以“双评价”为基础,划定生态控制单元,实施“负面清单+弹性留白”差异化管制;动态调整方面,建立生态空间与非生态空间的流量配额与置换机制,允许生态修复区与城镇发展区指标调剂;权益平衡方面,通过生态补偿、发展权转移及跨区域协议推动利益共享。但现有生态空间协同管控仍面临多重矛盾:生态空间刚性保护与非生态空间弹性扩张的冲突,导致边界地带管控失效;部门分割下的空间规划标准不统一,生态廊道与基础设施网络叠加引发功能竞争;过度依赖行政手段而市场激励不足,生态产品价值实现渠道单一,削弱了多元主体参与积极性。

基于此,本研究提出“生态空间底线锁定—非生态空间弹性管控”的协同机制,通过分级分类施策,实现生态保护与社会发展的动态平衡。首先,底线锁定,刚性保障核心生态功能。底线锁定适用于生态红线区与永久基本农田等区域。其核心在于衔接“三区三线”划定成果,严格限制非生态活动向核心

生态空间渗透,设定生态服务功能的最低保有量指标,确保规模与质量双约束,禁止工业开发、大规模基建等对生态系统的破坏性行为。以舒城县为例,在保持原优质生态源地的前提下,推进非生态空间适宜性高且需求性迫切的区域进行生态保护与修复,以减少人为干扰,提高生态系统的功能与服务。其次,弹性协调,柔性适配复合功能需求。弹性协调适用于如城乡交错带与生态修复区等,其核心手段包括:允许土地混合利用,如“生态+休闲”“农业+文旅”,通过正负面清单明确兼容性活动;建立生态空间与非生态空间的流量置换机制,如耕地占补平衡、生态用地增减挂钩;依据冲突强度制定分级规则,如中度冲突区需生态补偿,高度冲突区需功能置换。具体来说,在肥东县、定远县等非生态空间重点区域,重点保护现有农业空间和城镇空间,提升土地生产力;对农业生产受限区域加大基建投入,促进集中连片发展;对人均城镇空间不足区域,加快旧城改造和绿色城镇化进程;对人均农业空间较小区域,严格执行占补平衡制度,发展生态农业园区。最后,协同实施路径。将生态保护、城镇开发等专项规划纳入“一张图”管理,避免管控标准冲突;以县域为单位分解管控目标,建立动态优化机制,通过“年度评估—动态优化”反馈调整策略;结合生态补偿、发展权交易等市场化手段,激励多元主体参与协同治理。综上所述,通过“底线锁定”筑牢生态安全屏障,依托“弹性协调”满足发展弹性需求,系统性化解保护与发展的矛盾,推动国土空间治理向精细化、自适应方向转型,实现“金山银山”和“绿水青山”的有机衔接。

4 讨论

本研究通过构建供需双侧路径分析,揭示了合肥都市圈生态空间冲突的形成机理与空间分异特征。与国土空间冲突相比,生态空间冲突空间格局呈现生态约束导向性。研究显示,合肥都市圈生态空间冲突区域异质性显著,表现为中心极化、边缘弱化的典型特征,高、较高冲突区(24.21%),表现为生态敏感性与开发需求性冲突;低、较低冲突区(44.83%),为生态本底良好、人类活动强度较低的区域;中冲突区(30.96%)生态敏感性与开发需求性并存且矛盾初步显现。冲突程度受自然资源、人口密度和经济发展水平影响显著,其空间格局印证了经济发展阶段与生态保护强度的动态平衡关系,与相关研究结果基本一致^[2-4,18,30]。从研究视角上看,基于供需双侧路径分析,从生态安全格局出发,构建了“生态安全性-供给适宜性-需求稀缺性”三维诊断模

型,实现了生态空间冲突在“格局识别-机理解析-政策响应”全链条中的系统性衔接。通过耦合生态安全格局与空间开发核算,综合考虑资源环境本底约束与社会经济发展诉求,对生态空间冲突进行分级分区判定,有效弥补了传统单侧评估模型对冲突动态性与复合性刻画不足的缺陷,为国土空间功能优化提供了新的分析框架。从研究尺度上看,本研究以合肥都市圈为研究对象,将冲突分析单元细化至500 m 栅格与乡镇行政边界嵌套层级,通过多源数据融合,精准识别了城乡过渡带等高敏感区的梯度突变特征。然而,受数据可获性限制,生态阻力面指标仍依赖静态地形因子,未来需引入地表形变、生态服务流量等动态参数;供需非生态空间重点区域的识别栅格数据与县级单元的研究尺度不完全统一,难以反映各区域之间的关联性。从方法普适性看,本研究提出的“底线锁定-弹性管控”协同机制具有区域推广价值。但生态承载力阈值需根据区域本底调整,冲突类型划分应结合主体功能区定位。当前研究结论在长江中游城市群具有较强的普适性^[10,17],但针对高原、滨海等特殊地貌区的适用性仍需进一步检验。未来研究应构建全国统一的指标基准库,并开发“自然地理-社会经济”双维修正系数,以增强诊断结果的横向可比性。此外,可探索将冲突分区与国土空间规划“三区三线”智能校核模块对接,提升成果在空间管控政策中的转化效率。

5 结论

(1) 合肥都市圈生态景观中部、南部连通性较好,北部细碎化严重,生态源地、廊道呈南多北少特征,核心生态源地集中在南部山地丘陵区。

(2) 非生态空间分布呈圈层式分异,中心区开发需求和适宜性高,边缘区较低,郊区表现为过渡性。

(3) 生态空间冲突分布呈现从中心向四周递减,与重要生态廊道重合的基本格局。高冲突区域集中在城市和低生态安全区,以生态敏感性、空间开发适宜性及人类活动强度冲突为主。

(4) 生态空间冲突区宜建立“生态空间底线锁定-非生态空间弹性管控”协同机制,在保障核心生态功能的同时,建立有条件准入与动态适配策略,实现“金山银山”和“绿水青山”的有机衔接。

合肥都市圈需根据生态与非生态空间的“共性”与“差异性”,通过协同治理与创新,优化生态资源、农业生产和城镇建设分工协作。针对高冲突生态区域,提升非生态空间适宜性并缓解土地稀缺,例如在肥东、定远等交界地带保护现有农业和城镇空间,提

升生产力;条件受限区域需加强农业基础设施集中建设;生态安全区则需保护优质生态源地,选择性修复高需求区域。同时,盘活城镇存量空间推进绿色城镇化,严格保护耕地并发展生态农业。较高冲突区域因土地稀缺和需求压力大,需提高人均空间利用率及交通通达度,加强集约化发展,推动美丽乡村建设和人口合理流动,最终形成生态保护与可持续发展的长效机制。

参考文献(References)

- [1] 翟端强,卓健.国土空间管控困境与逻辑重构:基于人地耦合理论的演绎与分析[J].城市规划,2024,48(10):36-50.
Zhai Duanqiang, Zhuo Jian. Predicaments and logic reconstruction of territorial space regulation: Deduction and analysis based on the man-land coupling theory [J]. City Planning Review, 2024, 48(10): 36-50.
- [2] 刘一辉,高培超,孙筱敏,等.广东省“三生”空间冲突评价与多尺度影响因素分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(6):819-830.
Liu Yihui, Gao Peichao, Sun Xiaomin, et al. Evaluation of “production-living-ecological” space conflict in Guangdong and analysis of multiscale influencing factors [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(6): 819-830.
- [3] 黄安,许月卿,王燕,等.“三生”空间冲突风险研究的逻辑主线:机制、评估与优化路径[J].经济地理,2024,44(11):173-183.
Huang An, Xu Yueqing, Wang Yan, et al. The paradigms of the research on the production-living-ecological space conflict risk: Mechanism, evaluation and optimization path [J]. Economic Geography, 2024, 44(11): 173-183.
- [4] 曲彦博,董晓珍,苏德胜,等.如何平衡保护与发展?——一个全面的分析框架用于领土空间利用规模、功能和模式[J].环境管理,2023,339:117809.
- [5] Jiang Song, Meng Jijun, Zhu Likai. Spatial and temporal analyses of potential land use conflict under the constraints of water resources in the middle reaches of the Heihe River [J]. Land Use Policy, 2020, 97: 104773.
- [6] 余丽,马淇蔚,徐丽华.“识别—构建—管控”规划路径下生态系统服务供需应用研究进展[J].风景园林,2024,31(3):89-98.
Yu Li, Ma Qiwei, Xu Lihua. Research progress on application of ecosystem services supply and demand application under the planning path of “identification-establishment-management and control” [J]. Landscape Architecture, 2024, 31(3): 89-98.
- [7] 苏伟忠,马丽雅,陈爽,等.城市生态空间冲突分析与系

- 统优化方法[J].自然资源学报,2020,35(3):601-613.
- Su Weizhong, Ma Liya, Chen Shuang, et al. Conflict analysis and system optimization of urban ecological space [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 601-613.
- [8] 梁栋栋,张正涛,王蒙,等.城镇化下池河流域土地利用冲突及驱动力分析[J].测绘科学,2024,49(11):133-145.
- Liang Dongdong, Zhang Zhengtao, Wang Meng, et al. Analysis of land use conflict and driving forces in the Chihe River basin of urbanization [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024, 49(11):133-145.
- [9] 向芳芳,黄丽萍,陈荣清.基于综合视角的县域国土空间冲突测度与功能优化:以江西省宜黄县为例[J].水土保持通报,2024,44(1):158-171.
- Xiang Fangfang, Huang Liping, Chen Rongqing. Measurement and function optimization of county territorial spatial conflict based on comprehensive perspective: A case study of Yihuang County, Jiangxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1): 158-171.
- [10] 邱国强,牛潜,吴振华,等.苏锡常城市群土地利用冲突空间测度及异质性分析[J].水土保持研究,2022,29(4):400-406.
- Qiu Guoqiang, Niu Qian, Wu Zhenhua, et al. Spatial evaluate and heterogeneity analysis of land use conflict in Su-Xi-Chang urban agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4):400-406.
- [11] Li Mingzhe, Xu Nuo, Liu Fan, et al. Ecological management zoning based on the supply-demand relationship and synergies of urban forest ecosystem services: A case study from Fuzhou, China [J]. *Forests*, 2025, 16(1):17.
- [12] Deng Weihua, Li Meng, Guo Yanlong. Research on fuzzy evaluation of ecological safety of land resources in Pearl River delta area based on DPSIR framework [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15:8059.
- [13] 战明松,王梦媛,刘冲,等.城市生态承载力量化评价方法研究进展[J].应用生态学报,2024,35(10):2925-2932.
- Zhan Mingsong, Wang Mengyuan, Liu Chong, et al. Research progress on quantitative evaluation methods of urban ecological carrying capacity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10):2925-2932.
- [14] 陈龙,徐丽,于名召,等.水生态系统服务流研究进展[J].生态学报,2025,45(2):1000-1012.
- Chen Long, Xu Li, Yu Mingzhao, et al. Research progress of water ecosystem service flows [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(2):1000-1012.
- [15] 杨金礼,吴洋洋,李思亮,等.雄安新区“三生空间”耦合协调评估及生态安全格局优化[J].生态环境学报,2024,33(11):1816-1826.
- Yang Jinli, Wu Yangyang, Li Siliang, et al. Assessing the coupling and coordination of ‘production-living-ecological’ spaces in Xiongan New Area: Towards an optimized ecological security pattern [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(11):1816-1826.
- [16] 田若颖,陈勇,周皓,等.生态安全格局视角下矿业城市土地利用空间冲突识别[J].矿业研究与开发,2020,40(6):153-159.
- Tian Ruoying, Chen Yong, Zhou Hao, et al. Land use space conflict recognition in mining cities from the perspective of ecological security pattern [J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(6):153-159.
- [17] 彭娅,王娟娟,王珊珊,等.生态安全视角下乌鲁木齐市土地利用冲突时空格局演变分析[J].干旱区地理,2024,47(1):81-92.
- Peng Ya, Wang Juanjuan, Wang Shanshan, et al. Spatiotemporal pattern evolution of land use conflict in Urumqi City from the perspective of ecological security [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(1):81-92.
- [18] 董光龙,周俏薇,孙传璋,等.基于“多宜性—稀缺性—多样性”的粤港澳大湾区土地利用冲突识别[J].农业工程学报,2023,39(17):245-255.
- Dong Guanglong, Zhou Qiaowei, Sun Chuazhun, et al. Identification of land use conflicts in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area based on “multi-suitability-scarcity-diversity” [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(17):245-255.
- [19] 曲衍波,王世磊,李岩,等.基于多功能适宜性的黄河三角洲国土空间潜在冲突特征与优化格局研究[J].地理科学,2023,43(2):301-312.
- Qu Yanbo, Wang Shilei, Li Yan, et al. Characteristics of potential conflicts of territorial space and optimization pattern in the Yellow River delta based on multi-functional suitability [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(2):301-312.
- [20] 栾春风,郭欣然.生态安全格局视角下的土地利用冲突识别研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):156-164.
- Luan Chunfeng, Guo Xinran. Research on land use conflict identification from the perspective of ecological security pattern [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(5):156-164.
- [21] 蔡俊飞,汤曾伟,王亚林,等.基于生态系统服务供需平衡的重庆市三峡库区生态空间分区[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2025,42(1):73-82.
- Cai Junfei, Tang Zengwei, Wang Yalin, et al. Ecological spatial zoning of the Chongqing Three Gorges reservoir area based on the balance of ecosystem services supply and demand [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2025, 42(1):73-82.

- [22] Zhou De, Zhao Xingyu, Li Pu, et al. Assessing territorial space conflicts in the coastal zone of Wenzhou, China: A land-sea interaction perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926: 171826.
- [23] Fan Yuemin, Wei Guoen. Assessment of ecological resilience and its response mechanism to land spatial structure conflicts in China's Southeast Coastal Areas [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 112980.
- [24] 李传昌, 雍新琴. 基于国土空间开发适宜性的冲突空间识别与分析[J]. *自然资源情报*, 2022(12): 14-21.
Li Chuanchang, Yong Xinqin. Recognition and analysis of spatial conflict based on suitability of land space development [J]. *Natural Resources Information*, 2022(12): 14-21.
- [25] 王丹阳, 陈逸, 黄贤金, 等. 基于空间冲突的区域国土空间优化研究: 以江苏省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4): 832-839.
Wang Danyang, Chen Yi, Huang Xianjin, et al. Spatial optimization of regional territory based on spatial conflict: A case study of Jiangsu Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4): 832-839.
- [26] 陈理庭, 蔡海生. 昌江流域土地利用冲突时空演变及关键影响因子探析[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(1): 55-67.
Chen Liting, Cai Haisheng. Spatial and temporal evolution of land use conflicts and their key influencing factors in the Changjiang River basin [J]. *Journal of Ecology*
- and *Rural Environment*, 2024, 40(1): 55-67.
- [27] 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 土地利用冲突研究的逻辑主线与内容框架[J]. *资源科学*, 2023, 45(3): 465-479.
Tian Junfeng, Wang Binyan, Wang Shijun. The paradigms and main content of land use conflict research [J]. *Resources Science*, 2023, 45(3): 465-479.
- [28] 郑希平, 陈竹安. 国土空间多功能耦合协调测度及多维功能冲突诊断[J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 5868-5879.
Zheng Xiping, Chen Zhu'an. Coupling coordination measurement and multi-dimensional conflict diagnosis among territorial space functions [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(10): 5868-5879.
- [29] 许自昌. 基于多目标遗传算法的国土空间开发格局优化配置研究: 以龙岩市为例[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(6): 60-67.
Xu Zichang. Research on optimal allocation of land spatial development pattern based on multi-objective genetic algorithm: A case of Longyan City [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2022, 39(6): 60-67.
- [30] 柯钦华, 周俏薇, 孙传璋, 等. 基于生态系统服务权衡的粤港澳大湾区土地利用冲突识别研究[J]. *热带地理*, 2023, 43(7): 1426-1439.
Ke Qinhua, Zhou Qiaowei, Sun Chuanzhun, et al. Identifying land use conflict based on ecosystem service trade-offs in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area, China [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(7): 1426-1439.
- ~~~~~
- (上接第221页)
- [23] 王嘉杰, 王贺封, 张安兵, 等. 基于多种植被指数 TVDI 京津冀地区干旱监测[J]. *测绘与空间地理信息*, 2023, 46(4): 21-25.
Wang Jiajie, Wang Hefeng, Zhang Anbing, et al. Drought monitoring in Beijing-Tianjin-Hebei region based on TVDI of multiple vegetation indexes [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46(4): 21-25.
- [24] Deng Li, Yu Dong. Deep learning: methods and applications [M]. Hanover, USA: Now Publishers Inc, 2014.
- [25] 胡刚, 梁士楚, 张忠华, 等. 桂林岩溶石山青冈栎群落数量分析[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1177-1181.
Hu Gang, Liang Shichu, Zhang Zhonghua, et al. Quantitative analysis of *Cyclobalanopsis glauca* community on karst hills of Guilin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1177-1181.
- [26] Rose J P, Malanson G P. Microtopographic heterogeneity constrains alpine plant diversity, Glacier National Park, MT [J]. *Plant Ecology*, 2012, 213(6): 955-965.
- [27] Valerio M, Ibáñez R, Gazol A, et al. Long-term and year-to-year stability and its drivers in a Mediterranean grassland [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(5): 1174-1188.
- [28] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [29] 姜蓝齐, 王萍, 姜丽霞, 等. 温度植被干旱指数(TVDI)在农业干旱监测中的应用[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(29): 132-139.
Jiang Lanqi, Wang Ping, Jiang Lixia, et al. Temperature vegetation dryness index and its application in agricultural drought monitoring [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(29): 132-139.
- [30] Zhang Qipeng, Wang Jian, Wang Qian. Effects of abiotic factors on plant diversity and species distribution of alpine meadow plants [J]. *Ecological Informatics*, 2021, 61: 101210.