

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.043; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.043.

陈晓杰, 张长城, 黄隆杨. 基于国土空间变化的湖北省生境质量时空演变特征研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 379-388.

Chen Xiaojie, Zhang Changcheng, Huang Longyang. Habitat quality assessment based on spatiotemporal evolution of territorial space in Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 379-388.

# 基于国土空间变化的湖北省生境质量时空演变特征研究

陈晓杰<sup>1</sup>, 张长城<sup>2</sup>, 黄隆杨<sup>3</sup>

(1. 武汉商学院 旅游管理学院, 武汉 430056; 2. 湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队, 武汉 430051; 3. 重庆大学 公共管理学院, 重庆 400044)

**摘 要:** [目的] 探究国土空间变化对生境质量的响应机制, 为国土空间规划和生态环境保护提供依据。[方法] 以湖北省为研究对象, 基于 2000—2020 年的土地利用数据, 运用 InVEST 模型评估生境质量的时空演变特征, 从三生空间的视角研究了区域生境质量对国土空间类型转变的响应程度。[结果] (1) 湖北省 20 年间国土空间利用强度逐年升高, 国土空间类型转换中生产空间向生态空间转化面积最多, 占比 3.86%。(2) 生境质量退化指数逐渐增长, 生境退化度逐期升高; 平均生境质量在时间分布上呈先升高后降低再升高的波动变化趋势, 在空间分布上总体表现为“西北高, 东南低”的空间格局。(3) 生境质量下降的国土空间类型主要发生在生态空间向生产空间和生活空间的转变, 以及生产空间向生活空间的转变, 即生态空间的增加有助于改善区域生境质量, 而生活空间的增多则会降低区域生境质量。[结论] 2000—2020 年湖北省生境质量受国土空间变化影响较大, 关注国土空间类型转变, 严格控制建设用地规模, 可为合理制定国土空间规划和生态保护实践提供理论参考。

**关键词:** 国土空间; 时空演变规律; 生境退化度; 生境质量; 湖北省

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0379-10

## Study on the habitat quality assessment based on spatiotemporal evolution of territorial space in Hubei Province

Chen Xiaojie<sup>1</sup>, Zhang Changcheng<sup>2</sup>, Huang Longyang<sup>3</sup>

(1. School of Tourism Management, Wuhan Business University, Wuhan 430056, China;

2. Institute of Hydrogeologic and Engineering Geological of Wuhan, Hubei Geological Bureau,

Wuhan 430051, China; 3. School of Public Policy and Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the response mechanism of territorial spatial change to habitat quality, and to provide reference for territorial spatial planning and ecological environmental protection. [Methods] Based on the land use data from 2000 to 2020 in Hubei Province, the InVEST model was used to evaluate the temporal and spatial evolution characteristics of habitat quality, and the response degree of regional habitat quality to the change of territorial spatial type was explored from the perspective of tertiary space. [Results] (1) In Hubei Province, the intensity of land use increased year by year in the past 20 years. In the conversion of land space type, the conversion area of production space to ecological space was the largest, accounting for 3.86%. (2) The habitat quality degradation index increased gradually, and the habitat degradation degree increased gradually. The average habitat quality increased first, then decreased and then increased in the temporal distribution, and the spatial distribution showed a spatial pattern of high level in the northwest and low level in the southeast. (3) The spatial types of habitat quality decline mainly occurred

收稿日期: 2024-06-17

修回日期: 2024-07-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(42301299); 武汉商学院校级科学研究项目(2024KB003)

第一作者: 陈晓杰(1993—), 女(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要研究方向为国土空间规划和土地生态研究。E-mail: cxj@wbu.edu.cn

通信作者: 黄隆杨(1995—), 男, 重庆人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用与景观生态。E-mail: hly\_1995@cqu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

in the transformation from ecological space to production space and living space, and the transformation from production space to living space also led to a downward trend in habitat quality. Generally speaking, the increase of ecological space helped to improve regional habitat quality, while the increase of living space reduced regional habitat quality. [Conclusion] Habitat quality in Hubei Province from 2000 to 2020 was greatly affected by the change of territorial space. Paying attention to the change of territorial space type and strictly controlling the scale of construction land can provide theoretical reference for the rational formulation of territorial space planning and ecological protection practice.

**Keywords:** territorial space; spatiotemporal evolution; habitat degradation degree; habitat quality; Hubei Province

土地是人类赖以生存和发展的重要载体,为人类提供生存所需的物质资源以及景观生态环境<sup>[1]</sup>。生境质量作为表征生态安全的重要指标之一,主要反映生态系统为系统内部的个体和种群提供生存和延续所需资源的能力,通常以区域生物多样性和生态系统服务作为表征<sup>[2]</sup>。随着经济的发展和城镇化进程的推进,各种土地利用类型和格局的改变对区域生态栖息地造成了一定的影响,主要表现为栖息地生物多样性的减少以及栖息地的退化等<sup>[3]</sup>。生境质量的优劣程度影响了人类社会和生态系统的可持续发展,高水平的生境质量是维持生态系统内部生物多样性的保障<sup>[4]</sup>。同时由于土地利用变化作为其重要的影响因素,土地生态系统也因此备受关注<sup>[5]</sup>。土地利用类型的转变会导致生态系统的结构甚至格局随之变化,从而影响了生态系统内部的物质能量循环<sup>[6]</sup>。定量评估区域国土空间变化对生境质量的响应机制对生态系统的可持续发展至关重要。

近年来,从生境质量角度开展生态系统服务研究已经成为生态学领域的热点。在研究方法上,国内外有关生境质量的评估方法大致分为两类,一种是通过野外实地调查的方法获取区域生物多样性和栖息地的相关数据进行单一指标或多指标综合评价,该方法由于数据获取困难、操作性差等问题,通常适合小范围内的生境质量评估<sup>[7]</sup>;另一种方法是通过运用分布式模型,如 InVEST 模型<sup>[8]</sup>、SolVES 模型<sup>[9]</sup>、MIMES 模型等<sup>[10]</sup>对区域内生境质量的时空演变规律进行动态模拟,该方法可以对大中尺度区域进行生境质量评价,同时由于其操作简单、数据容易获取等特点得到广泛应用<sup>[11]</sup>。在研究尺度上,国内外关于生境质量的研究主要集中在省<sup>[12]</sup>、市<sup>[13]</sup>、县<sup>[14]</sup>、城市群<sup>[15]</sup>、流域<sup>[16]</sup>、矿区等<sup>[17]</sup>不同尺度上,大部分关于生境质量的模拟研究均集中在大中尺度区域。在研究内容上,已有研究多集中在生境质量时空演变规律<sup>[18]</sup>、生境质量与地形梯度变化等<sup>[19]</sup>方面,还有部分研究关注生境质量与城市化、生境质量与景观格局,如石小伟等<sup>[20]</sup>研究大都市

郊区的生境质量和土地利用转型受到京津都市圈的影响程度,探究大都市郊区中土地利用和生境质量之间的可持续机制。Li 等<sup>[21]</sup>预测未来土地利用变化,并将其整合到生境质量评价模型中,评价未来生境质量变化的趋势和特征,探讨景观格局演变对生境的影响。综上所述,基于土地利用变化视角的生境质量演变规律研究逐渐受到关注,但相关研究仍有待深入,目前相关学者已经在不同区域开展了基于土地利用变化的生境质量评估研究,然而鲜有研究从三生空间的角度探究生境质量对国土空间类型转变的响应,本文将对此问题进行探究以期生态保护实践提供科学依据。

湖北省作为长江经济带的核心区域,地貌类型丰富,是我国中部地区的重要生态屏障,然而近年来随着经济的发展和城市化进程的推进,城镇用地的扩张为区域内部的生态安全带来了巨大的挑战,因此分析生境质量对土地利用变化的响应关系具有重要意义。本文以湖北省为例,运用 InVEST 模型对区域内 2000—2020 年的生境质量进行评估,分析其时空演变规律及其对国土空间类型转变的响应关系,识别生态安全敏感区域,为湖北省域的国土空间规划和生态规划提供理论支撑和决策支持。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源

土地利用数据精度为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,时间范围 2000—2020 年。该数据来自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),数据分为两级,其中一级地类共计 6 类,二级地类共计 25 类。根据研究需要,本研究使用林地、耕地、草地、水域、建设用地和未利用的一级地类标准。

### 1.2 研究区概况

湖北省,简称鄂,介于北纬  $29^{\circ}01'53''$ — $33^{\circ}06'47''$ 、东经  $108^{\circ}21'42''$ — $116^{\circ}07'50''$ 。地势处于我国第二、三阶梯的过渡区,地貌上为四周环山,中间低平。地理位置位于我国中部,长江中游,东侧与安徽省相邻,南侧为

江西省和湖南省,西侧与重庆市、陕西省相连,北侧为河南省。全省总面积 18.59 万 km<sup>2</sup>,约占全国面积的 2%。截至 2020 年,全省包括地级市 12 个,自治州 1 个,县级市 26 个,县 35 个,自治县 2 个,林区 1 个。湖北省是“中部地区崛起”战略的主力军,又是建设“长江经济带”的中部核心区,更是中国重要的粮食产区。近年来,经济高速发展,城市快速扩张,环境恶化和耕地损失严重,这使湖北省成为研究生态补偿和区域间财政支付机制的良好范例。

近年来,湖北省生态环境质量有所改善,然而生态环境由量变到质变的拐点还未到来,湖北省生态环境保护工作目前仍然面临着很大的挑战。根据《2020 年湖北省生态环境状况公报》显示,2020 年湖北省主要湖库总体表现为轻度污染,与 2019 年相比,主要湖库总体水质保持稳定,其中 I—III 类水域比例上升 9.4 个百分点,劣 V 类比例无变化,主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。湖北省位于气候变化的敏感区域,未来极端天气可能增多,气温在 30 年内预计升高 0.3℃,极端气候变化将会威胁生态安全。由《2020 年湖北省生态环境状况公报》可知,大气污染问题尚未彻底解决,全省 9 个城市的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度指标和 17 个重点城市的 PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub> 污染物年均浓度指标均未超过国家年均二级标准限值。根据《生态环境状况评价技术规范》(HJ192-2015),湖北省仅有神农架林区、恩施州、十堰市和宜昌市 4 个地区生态环境状况等级为优,其余地区生态环境状况为良。生态环保制度尚不健全,保护责任不够明确,激励约束和生态补偿机制尚不完善,公众参与生态文明建设的积极性需要政策引导提高。

### 1.3 研究方法

1.3.1 国土空间转型分析 通过 ArcGIS 10.2 软件,分析湖北省 2000—2020 年各期国土空间利用情况,研究不同时期国土空间利用的转换速率、面积及方向,从而揭示 20 年间研究区域内的国土空间演变过程。国土空间利用动态度主要用于表征国土空间类型的转换速度,通常分为单一国土空间动态度和综合国土空间动态度。

单一国土空间动态度表示某一类国土空间在某一段研究时间内的数量变化特点,公式<sup>[22]</sup>为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 表示某一特定时间范围某一国土空间动态度;U<sub>a</sub> 表示某一种国土空间的初始面积;U<sub>b</sub> 表示该国土空间的期末面积。T 为年数,本文 T=20 时,则 K 指整个时期的年均变化率。

综合国土空间动态度则是表示研究区内各种国

土空间类型综合变化的特点,公式<sup>[23]</sup>为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{\sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:R 表示研究区综合国土空间动态度;LU<sub>i</sub> 表示研究起始时国土空间面积;ΔLU<sub>i-j</sub> 表示在研究时段内第 i 类国土空间面积向其他国土空间面积转换的数值;T 为本研究的研究时长,即 20 a。

1.3.2 生境质量评价模型 生境质量代表生物生存所依赖的生态环境的优劣程度,也代表其为空间内生物生存提供能源以及维持生物生存的能力<sup>[24]</sup>。生态系统服务的基础为生境质量,其优劣决定了生物栖息地的好坏。本文利用 InVEST 模型中的生境质量模块进行评估,先选取威胁生态环境的威胁源,计算出各种威胁源的负面影响程度,由此评估出生态环境的退化程度。基于生境退化度以及适宜度指标评估区域的生境质量<sup>[7]</sup>。根据经验,一个地区对土地过度利用会提高其威胁源的数量,这样也就会影响周边地区,造成周边地区生境质量降低<sup>[25]</sup>。这种影响会随着距离的增加而减少,这种减少规律可以利用线性或指数距离衰减函数表征,具体为公式<sup>[26]</sup>为。

$$i_{rxy} = 1 - \left( \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[ - \left( \frac{2.99}{d_{rmax}} \right) \right] \quad (\text{指数衰退}) \quad (4)$$

式中:*i<sub>rxy</sub>* 为 *x* 处栅格受到 *y* 处栅格中 *r* 威胁源的作用程度;*d<sub>xy</sub>* 为 *x* 处栅格与 *y* 处栅格之间的距离;*d<sub>rmax</sub>* 代表 *r* 威胁源所能影响到的最大范围,可参考表 1。

假设 *j* 是 *x* 栅格处的生境类型,*D<sub>xj</sub>* 表示 *x* 处受到的总威胁,其计算公式<sup>[14]</sup>如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (5)$$

式中:*R* 为威胁因子总个数;*w<sub>r</sub>* 代表权重;*Y<sub>r</sub>* 代表威胁因子 *r* 的栅格数量;*r<sub>y</sub>* 代表不同地类栅格上威胁源的个数;*β<sub>x</sub>* 代表栅格 *x* 处生境被保护的程, *S<sub>jr</sub>* 代表 *j* 种地类对 *r* 威胁源的敏感程度,详见表 2。

最后得到生境质量的公式<sup>[26]</sup>为:

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}}{D_{xj} + kz} \right) \right] \quad (6)$$

式中:*Q<sub>xj</sub>* 表示 *j* 地类在栅格 *x* 处的生境质量;*H<sub>j</sub>* 表示 *j* 地类的生境适宜度;*z* 表示评估模型过程中需要的默认参数,根据经验设置为 2.5;*k* 表示半饱和和常数,通常为生境退化度的半值。

生境质量的评估数值范围在 0 到 1 之间,即生境适宜程度最低时为 0,最高时为 1。

表 1 威胁源权重和最大影响距离  
Table 1 Weight and maximum influence  
distance of threat factors

威胁因子	相对权重	最大影响 距离/km	空间衰退 类型
旱地	0.3	1	线性
水田	0.3	1	线性
工矿用地	0.5	5	指数
农村居民点	0.6	6	指数
城镇用地	1.0	10	指数

## 2 结果与分析

### 2.1 国土空间概念界定

国土空间是指在各种要素相互作用下所共同构成的复杂系统,包括土地资源、矿产资源、水资源和人口资源等要素。其中土地资源作为生态文明建设的空间支撑载体,是国土空间中的核心要素。国土空间是将全部自然资源包含在内的统一有机整体,作为不同尺度不同等级生态系统的载体,其与生态系统过

程、功能和格局等之间相互作用和影响。在宏观层面上,主要是根据土地在人类社会的发展进程中所展现出的多种功能,将国土空间按不同功能划定功能分区。在微观上,国土空间的类型主要是根据土地属性进行划分。土地利用变化不仅反映了国土空间格局和结构的变化,还体现了人文系统和自然系统的相互作用关系。国土空间功能分区的划定是研究国土空间特征机制的关键环节,从土地利用的视角对国土空间功能分区进行划分已经得到普遍认可。国土具有生产功能、生活功能和生态功能,生态功能作为基础功能,是其他两种功能的前提,三者是相辅相成的统一整体。以土地利用的主体功能为基础,基于土地功能,将国土空间划分为三生空间,即生产空间、生活空间和生态空间。生产空间、生活空间和生态空间是国土空间开发利用活动中人地关系的核心。从三生空间的视角,探索国土空间的数量、结构、利用强度和类型转换等方面的时空演变规律,对促进国土空间适度、有序、可持续开发利用极为重要。

表 2 生境适宜度及其对威胁源的相对敏感度

Table 2 Habitat suitability and sensitivity of habitat types to each threat

土地利用类型		生境	威胁因子				
一级	二级	适宜度	旱地	水田	工矿用地	农村居民点	城镇用地
耕地	水田	0.4	1	0	0.2	0.35	0.5
	旱地	0.3	0	1	0.2	0.35	0.5
	有林地	1	0.6	0.5	0.8	0.7	0.9
林地	灌林地	0.7	0.4	0.3	0.7	0.4	0.6
	疏林地	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.8
	其他林地	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.8
草地	高覆盖度草地	0.7	0.45	0.4	0.15	0.45	0.6
	中覆盖度草地	0.6	0.5	0.45	0.2	0.5	0.65
	低覆盖度草地	0.4	0.55	0.5	0.25	0.55	0.7
水域	河渠	1	0.6	0.5	0.45	0.6	0.8
	湖泊	0.9	0.65	0.55	0.5	0.65	0.85
	水库坑塘	0.9	0.7	0.6	0.55	0.7	0.9
	滩地	0.6	0.75	0.65	0.6	0.75	0.95
建设用地	城镇用地	0	0	0	0	0	0
	农村居民点	0	0	0	0	0	0
	其他建设用地	0	0	0	0	0	0
未利用地	沼泽地	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8
	裸土地	0	0	0	0	0	0
	裸岩石质地	0	0	0	0	0	0

开展三生空间视角国土空间特征分析的前提是构建国土三生空间分类体系。在三生空间的理论框架下,定义生产空间、生活空间和生态空间与各类土地利用类型之间的对应关系。根据《土地利用现状分类》国家标准,遵从功能主导性、可操作实用性原则,考虑到数据的可获取性和研究尺度选取的科学性,将

一级类用地中的耕地界定为生产空间;建设用地界定为生活空间;林地、草地、水域及未利用土地等以自然属性和生态功能为主的用地类型界定为生态空间。

### 2.2 国土空间时空变化特征

2.2.1 国土空间时空变化总体特征 从三生空间角度分析国土空间变化可知(表 3),湖北省国土空间中生



态空间占比最高,所占比例在 60%左右。其次是生产空间占比在 37%左右。最低为生活空间,仅 3%左右。从 2000—2020 年研究区国土空间的变化趋势来看,生产空间大体呈持续缩小的变化趋势,20 年间生产空间所占比例缩减了 1.44%。生活空间呈持续扩大的趋势,研究期间所占比例扩大了 1.37%。生态空间呈先扩大后缩小的变化趋势,在 2010 年占总国土空间比例 60.43%达到峰值。出现上述变化的原因主要是随着经济的迅速发展,城市化进程的不断推进,大量耕地被占用转为建设用地,从而造成生产空间缩小,而生活空间持续扩大。生态空间出现先扩大后缩小的变化主要是受到多种因素共同作用的影响,包括生态系统的自然演变和人类活动的影响,退耕还林还草政策使生产空间向生态空间转变呈扩大趋势,而经济的发展和人类活动的持续干扰导致生态空间缩小。

对三生空间中不同土地利用类型进行分析可知,研究区主要土地利用类型为林地和耕地,并且两种用地类型合计占比超过 84%。从五期土地利用结构数据可以发现,占比最多的用地类型均为林地,占比均

超过 49%。2000—2020 年林地面积呈现逐渐减少的趋势,且林地主要分布在鄂西地区。其次,所占比例较高的地类为耕地,其呈现出逐渐减少的趋势,但所占比例依然全部超过 35%,空间上主要分布在湖北省西北部襄阳地区和东南部江汉平原地区。草地、水域、建设用地占比维持在 12%~15%,其中,草地基本维持平衡状态,水域和建设用地逐年增加。未利用地为湖北省土地利用占比最少的用地类型,占比均小于 0.5%。根据研究区土地利用变化率可以发现:林地表现为逐年减少,林地减少了 0.68%,耕地、草地以及未利用地都表现为先减少后增加,建设用地和水域面积呈现先增加后减少。过去 20 年间湖北省经济发展迅速,居民住宅用地、交通建设用地的扩张是引起建设用地面积增长的直接原因;水域变化率为 7.75%,主要原因是水利工程的修建增加了水库的面积,渔业的发展促进了流域沿线的水产养殖<sup>[27-28]</sup>。2000—2020 年,林地和草地减少幅度较小,主要是由于政府政策的转变,退耕还林、还草政策的实施,导致其变化范围减小。

表 3 湖北省国土空间结构

Table 3 Territorial spatial structure of Hubei Province

年份	单位	生产空间	生活空间	生态空间			
		耕地	建设用地	林地	草地	水域	未利用地
2000	面积/km <sup>2</sup>	69665.07	5146.18	92836.19	7054.17	10811.98	436.59
	比例/%	37.46	2.77	49.93	3.79	5.81	0.23
2005	面积/km <sup>2</sup>	68806.86	5420.58	92769.36	7030.30	11495.97	427.13
	比例/%	37.00	2.92	49.89	3.78	6.18	0.23
2010	面积/km <sup>2</sup>	66798.95	6779.44	92737.62	6962.61	12292.29	379.30
	比例/%	35.92	3.65	49.87	3.74	6.61	0.20
2015	面积/km <sup>2</sup>	65534.51	8390.55	92357.65	6888.22	12409.68	369.58
	比例/%	35.24	4.51	49.67	3.70	6.67	0.20
2020	面积/km <sup>2</sup>	66946.40	7681.75	92203.43	6988.76	11649.56	384.11
	比例/%	36.02	4.13	49.61	3.76	6.27	0.21

2.2.2 国土空间动态度评价 通过对研究区内的单一国土空间动态度进行分析,可以清楚看出研究期间不同国土空间的净增减和变化速度。生产空间和生活空间在整个研究期内表现为相反的变化趋势,2000—2015 年,研究区内生活空间为正值,而生产空间为负值,即生活空间在这一时期呈净增加趋势,而生产空间呈减少的趋势。2015—2020 年,生产空间呈净增加而生活空间呈净减少的变化趋势。生态空间在前十年表现为净增加趋势,在后十年表现为净减少的趋势。从 20 年的变化趋势来看,生态空间的年均动态变化度接近于零,而生活空间和生产空间的年均动态变化度分别为 2.46%和 0.2%。

对湖北省综合国土空间动态度测算,可以分析研

究期内湖北省国土空间的总体变化情况。由公式(2)可得到湖北省 2000—2020 年各时段综合国土空间动态度。在过去 20 年间,湖北省不同时段综合国土空间动态度变化规律不同,综合表现为 M 型变化趋势。其中 2005—2010 年该项指标值最大,为 9.42%,说明这一时期湖北省国土空间变化最剧烈;2000—2005 时段较短,综合国土空间动态度最小,为 3.09%。2010—2015 年综合国土空间动态度为 6.13%,2015—2020 年综合国土空间动态度为 7.43%,由此可见,20 年间湖北省国土空间的开发速率呈现上下波动的状态,在 2005—2010 年和 2015—2020 年两个时间段达到了峰值。

2.2.3 国土空间类型转换 由 2000—2020 年国土空间转移情况可知,生产空间向生活空间发生转变的

区域主要位于城市主城区周边,例如武汉中心城区、黄冈中心城区以及十堰中心城区周边,发生这些转变的原因主要是由于城市的扩张需要占用城市周边的耕地,使得生产空间向生活空间发生了转变。生产空间向生态空间转变的区域主要发生在水域用地周边,例如长江沿线以及湖泊周边区域。生态空间发生转移最多的面积是向生产空间的转变,主要发生在鄂西的林区以及鄂中的农业主产区,发生这种转变的原因主要与林地转变为耕地以及未利用地开垦为耕地有关。而生活空间向生态和生产空间的转移比例非常低,这主要是由于向建设用地转变的不可逆性,即其他用地转为建设用地较容易,而建设用地向其他用地转变困难。

通过空间叠加分析得到 2000—2020 年研究区国土空间类型转换规律,分析生态空间、生产空间和生活空间 3 种空间类型的整体转入和转出情况。3 种空间类型相互之间转变的总面积为 18 983.18 km<sup>2</sup>,转移变化率达到 10.21%。这其中转变最多的为生产空间至生态空间的类型,转移比例 3.86%。排序第二的是生态空间至生产空间类型,转移比例为 3.29%。排序第三的为生产空间至生活空间类型,转移比例为 1.71%。排序最后的转变类型为生活空间至生态空间,仅为 0.07%。这也反映了退耕还林还草政策扩大了生产空间,然而随着城市的扩张,人类干扰活动增强,生态空间向生产生活空间的转变日益增多。

### 2.3 生境退化度时空变化特征

生境退化度指数处于 0~1 之间,值越大生境质量退化程度越严重。依据 InVEST 模型运行结果,得到研究区 2000—2020 年的生境退化程度平均值(图 1)和生境退化度空间分布情况(图 2),并计算得到生境退化度变化率。研究区 2000—2020 年五期生境质量退化指数表现为先升高后降低的变化趋势,前 3 个时间段内的生境退化度分别提高了 0.67%,1.42%,1.70%,即研究区生境质量有退化风险。2015—2020 年生境质量

下降 0.64%,可见生境退化度的变化率呈先升高后降低的趋势,即在 2015 年以前人类活动程度逐渐增强,生态系统受到了由人类活动所带来的干扰,从而致使生境退化指数逐渐升高,2015 年以后生态环境恶化的趋势得到缓解,生境退化的速度降低。

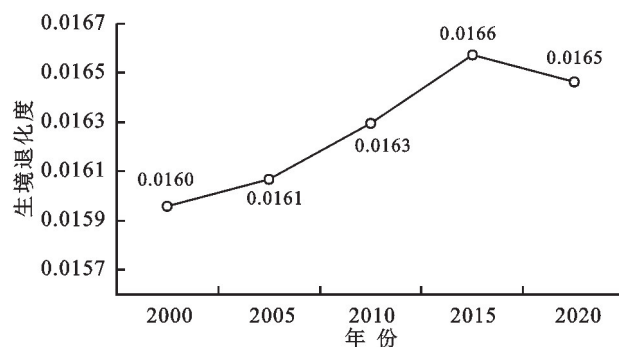


图 1 2000—2020 年湖北省生境退化度变化

Fig. 1 Changes of habitat degradation degree in Hubei Province from 2000 to 2020

依据图 2 可知生境退化度在空间分布上表现为东高西低的空间格局。高值区域主要分布于鄂东武汉城市圈周边以及中部江汉平原地区,这些区域主要为重点开发区和农产品主产区,经济发展较快,受人类活动干扰强度大。生境退化度低值区主要分布在鄂西神农架、恩施、宜昌和十堰等地区,这些地区主要为山区,海拔高且植被覆盖度高,开发难度相对较大,因此受人类活动干扰强度小。生境退化度的空间变化反映了区域生境质量的退化严重程度。生境退化度的分布与变化情况显示,在区域经济发展较快的区域其生境质量更易被破坏,尤其是城市扩张对生境产生破坏的影响,故生境退化高值区域多分布于城市建成区周边,同时城市建成区内部退化度为低值状态是因为其生境已遭到严重破坏且难以恢复。在山脉、河流和湖泊等开发难度较大的区域其生境质量越难受到干扰,基本保持原有的状态,在以上区域的边缘地区人类活动强度低,但仍会造成一定的干扰,故其边缘地区的退化度较低且范围较小。

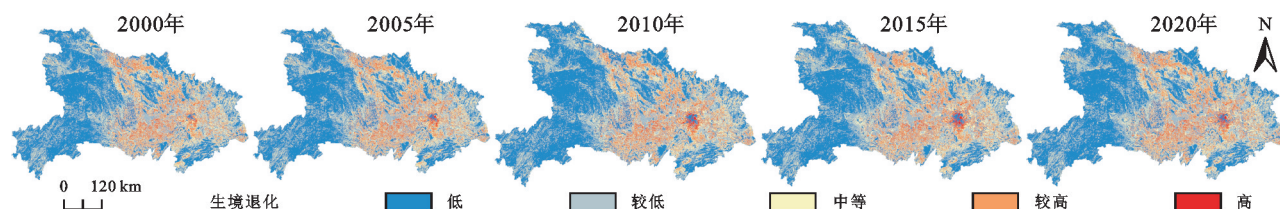


图 2 2000—2020 年湖北省生境退化度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of habitat degradation degree in Hubei Province, 2000—2020

### 2.4 生境质量时空演变特征

从时间上分析,2000—2020 年 5 个时期的平均生境质量依次为 0.610 3,0.611 7,0.610 9,0.604 7,0.605 9,表现为升高—降低—升高的波动变化(图 3)。生境质量面

积顺序为较低>高>中等>较高>低,研究区面积最大的生境类别为较低级,其次为高级,面积最小的生境类别为低级。这一时期,不同等级生境质量面积占总面积的比例变化程度很小,总体来看,其中低等级生境质量

面积所占比例大体表现为升高的变化趋势,较低级和较高级面积逐渐降低,由此可以看出生境质量由高等级向低等级转变,研究区生境质量有退化风险。通过分析可知,2000年生境质量占比中,高级和较高级占 42.36%,较低级和低级占 40.17%,中级占 17.47%。但是到 2020 年,低级生境面积增长至 4.16%,比 2000 年的 2.8%增长了 1.37%;较低级生境面积下降至 36.25%,比 2000 年的 37.37 下降了 1.12%;较高级生境面积则由 2000 年地 14.99%下降至 14.54%。可见研究区生境质量正在由高等级向低等级转变。

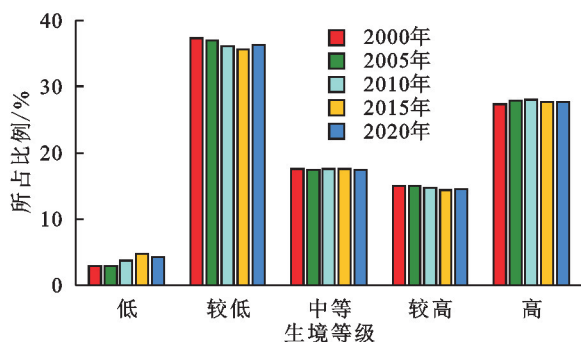


图 3 2000—2020 年湖北省生境等级直方图

Fig. 3 Habitat quality histogram of Hubei Province, 2000—2020

本文运用 InVEST 模型中的生境质量模块进行评估得到五期结果,为了清晰说明研究区生境质量变

化特点,将 2000—2020 年五期研究区生境质量分布图在 ArcGIS 软件中划分为 5 个等级,依次为低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和高(0.8~1)。通过分析图 4 发现,研究区大部分地区 20 年间里生境质量比较稳定,变化程度较小,总体呈“西北高、东南低”的空间格局。生境质量较高的地区位于神农架林区、兴山县、远安县和五峰土族自治县等地区,主要得益于较高的植被覆盖率,较好的生态环境,从而生境质量相对较高。生境质量升高的地区主要分布在江汉平原地区,例如监利县、江陵县、公安县、石首市以及洪湖市等地,这些地区生境质量的提升,主要是由于越来越多的渔业养殖,从而也增加了水域面积。研究区东南部生境质量降幅较大,包括江岸区、伍家岗区、猇亭区和黄石港区等部分区县,主要因为这些地区经济迅猛发展,城市快速扩张,原有的生态用地被越来越多的城镇工矿用地以及交通等建设用地占用,所以这些地区生境质量下降较快。与此同时,生产生活中“三废”的排放也不可避免地影响周边生境质量的下降,直接导致其生态环境的破坏,威胁周边地区生物多样性。研究区其他地区生境质量的变化也主要受控于城镇向周边扩张,占用了周边的耕地、草地,导致其生境质量向更低转换。

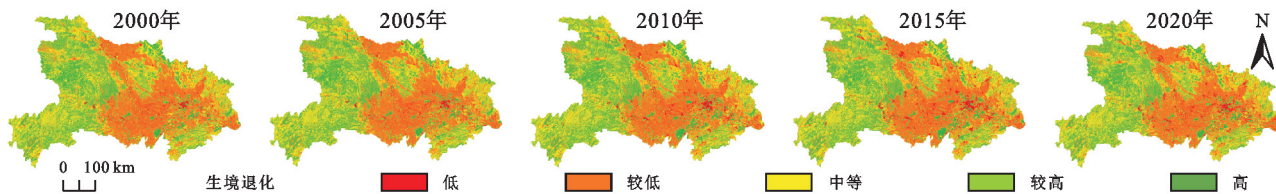


图 4 2000—2020 年湖北省土地利用生境质量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of land use habitat quality in Hubei Province, 2000—2020

## 2.5 国土空间变化对生境质量的影响

通过叠加分析得到湖北省 2000—2020 年不同国土空间类型转换中生境质量变化均值。由表 4 中可以看出,20 年间,生境质量下降的国土空间类型主要发生在生态空间向生产空间及生活空间的转变,同时生产空间向生活空间的转变也使生境质量呈下降趋势,生境质量下降幅度最大的国土空间转换类型是生态空间向生活空间的转变,平均生境质量下降 0.730 9。平均生境质量上升的国土空间转换类型主要有生产空间向生态空间转变类型,以及生活空间向生产空间、生态空间转变类型,其中平均生境质量上升幅度最大的是生活空间向生态空间的转变,20 年间其平均生境质量总计上升 0.034 2。总体来看,生态空间的增加有助于改善区域生境质量,而生活空间的增多则会降低区域生境质量,即林地、草地和水域用地面积的增加有助于提高生境质量,而建设用地面积的增

加则会降低生境质量,耕地向建设用地的转变也会促使区域生境质量降低。由此可见,建设用地的增加成为湖北省 20 年间生境质量下降的主要原因。

表 4 不同国土空间类型转移生境质量变化

Table 4 The change of habitat quality in different territorial space types

2000 国土空间类型	2020 国土空间类型	面积/km <sup>2</sup>	生境质量变化
生态空间	生态空间	110051.90	0.0084
生态空间	生产空间	64.38	-0.3677
生态空间	生活空间	753.38	-0.7309
生产空间	生产空间	66836.14	-0.0111
生产空间	生态空间	975.77	0.4557
生产空间	生活空间	1802.58	-0.3628
生活空间	生活空间	5123.46	-0.0413
生活空间	生产空间	1.36	0.2835
生活空间	生态空间	87.47	0.7322



### 3 讨论

以“长江经济带”的中部核心区湖北省作为研究区,通过 InVEST 模型评估湖北省长时序的生境质量,分析其时空演变规律。同时基于国土空间演变特征,分析不同国土空间类型转换对区域生境质量的影响程度,以期为湖北省国土空间规划和生态保护实践提供科学依据。

研究表明近 20 年来湖北省生境质量呈现降低趋势,区域生境质量有退化风险,这与朱丹丹等<sup>[29]</sup>和 Xiao 等<sup>[30]</sup>研究成果较为一致。此外,本研究还从三生空间的视角出发,探究了国土空间类型转变与生境质量的响应机制,对于平衡区域发展和生境质量之间的矛盾具有重要参考价值。研究结果显示:导致湖北省生境质量降低的国土空间转换类型主要有生态空间转为生产空间、生态空间转为生活空间以及生产空间转为生活空间。发生这些转变的区域主要位于鄂西的林区、鄂中的农业主产区以及各城市主城区周边,发生这些转变的原因主要是由于城市的扩张需要占用城市周边的耕地,使得生产空间向生活空间发生了转变。湖北省生境质量总体处于中等水平,但是近年来随着经济快速发展,建设用地急剧扩张,生活空间持续增加,从而导致生境质量大体表现为降低趋势,区域生境质量有退化风险。生境质量呈西北高、东南低的格局,可见鄂西北神农架林区以及恩施州等地区,由于其特殊的地貌植被环境为生物提供了良好的栖息地,同时健全的生态屏障有效降低了人类活动造成的干扰。而鄂东武汉城市圈地区,由于近年来经济发展迅速,城市化进程推进,各类生态空间以及生产空间均向生活空间发生转变,导致生境质量下降。因此如何阻止区域内生境质量退化并对生境退化区域进行恢复成为决策者需要考虑的关键问题。

建设用地扩张占用其他生态用地是造成区域生境质量下降的关键因素,在未来制定湖北省域国土空间规划过程中,对于鄂东武汉城市圈地区需通过科学的规划方式控制建设用地规模,提高现有生活空间的节约集约利用水平,在符合国土空间规划的城镇开发边界布局的基础上,深入挖掘当前生活空间的开发潜力,防止建设用地的无序扩张。同时提升主城区内部及边缘的植被覆盖率,将有效改善城市范围内的生境质量水平。对于鄂中江汉平原地区,严格落实耕地保护政策,限制生产空间向生活空间的转变,确保生产空间充分发挥粮食主产区以及生态用地的功能。对于鄂西北地区,林地草地是其主要植被类型,生境质量的退化与两种地类的缩减息息相关,因此,在维持经济稳定增长的同时,合理配置生态用地,优化建设用地、林地和草地等空间格局可有效预防生境质量退化。在

未来国土空间规划中科学合理划定自然保护区和生态保护红线,构建生态安全格局,对于鄂西北地区而言,将有效预防生态空间向其他空间的转变,减少人类活动的干扰,使生境质量始终保持在较高水平。总体来看,平衡区域生境质量和经济发展之间的矛盾,注重提高和修复区域生境质量,从而促进湖北省整体区域内的经济发展与生态保护之间协调发展。

本研究的不足之处在于仅针对生境质量对国土空间变化的响应进行了研究,在未来的研究中可结合模型的其他子模块,如碳储存服务、水源涵养服务等,定量评估国土空间变化与多种生态系统服务之间的响应关系,综合评估国土空间变化的生态效应。同时在研究时间尺度上针对现状国土空间和生境质量进行分析,在未来的研究中,可深入开展对未来时期的国土空间变化和生境质量模拟预测研究,及时掌握未来时期区域生态系统的演变方向,以期为生态保护政策的制定提供依据。

### 4 结论

(1) 湖北省国土空间中生态空间占比最高,所占比例在 60% 左右。其次是生产空间占比在 37% 左右。最低为生活空间仅占 3% 左右。2000—2020 年,生产空间大体呈持续缩小的变化趋势,生活空间呈持续扩大的趋势,生态空间呈先扩大后缩减的变化趋势。其中生产空间主要分布在中部地区江汉平原等地;生活空间主要分布在鄂东南部武汉城市圈地区以及其他城市中心地区;生态空间整体上主要分布在鄂西地区、鄂东北和鄂东南地区。

(2) 2000—2020 年湖北省单一国土空间动态度中,生活空间和生态空间呈先净增加后净减少的趋势,生产空间与其变化趋势相反,从 20 年的变化趋势来看,生态空间的年均动态变化度接近于零,而生活空间和生产空间的年均动态变化度分别为 2.46% 和 0.2%。湖北省不同时段综合国土空间动态度变化规律综合表现为 M 型变化趋势。研究期内国土空间内发生转移的面积总共 18 983.18 km<sup>2</sup>,其中,生产空间向生态空间转化面积最多,占比 3.97%;转移比例最低的为生活空间向生态空间转变类型,仅占 0.11%。

(3) 2000—2020 年湖北省平均生境质量分别为 0.610 3, 0.611 7, 0.610 9, 0.604 7, 0.605 9, 表现为升高—降低—升高的波动变化。生境质量退化指数表现为先升高后降低的变化趋势,2000—2015 年生境退化度分别提高了 0.67%, 1.42%, 1.70%, 即研究区生境质量有退化风险。2015 年以后生态环境恶化的趋势得到缓解,生境退化的速度降低。湖北省境内较低等级生境质量的面积最大,其次是高等级生境,而低等级生境面积占比最小。生境质量空间分布格局



总体呈“西北高、东南低”的空间格局。

(4) 20年间,生境质量下降幅度最大的国土空间转换类型是生态空间向生活空间的转变,平均生境质量下降 0.730 9。平均生境质量上升幅度最大的国土空间转换类型是生活空间向生态空间的转变,总计上升 0.034 2。总体来看,生态空间的增加有助于改善区域生境质量,而生活空间的增多则会降低区域生境质量,即建设用地的增加成为湖北省 20 年间生境质量下降的主要原因。

#### 参考文献(References):

- [1] 何改丽,李加林,刘永超,等.1985—2015 年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析[J].自然资源学报,2019,34(1):66-79.  
He G L, Li J L, Liu Y C, et al. Spatio-temporal analysis of land development and utilization intensity in Tampa Bay watershed from 1985 to 2015. [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(1):66-79.
- [2] 刘孟竹,张红娟,王彦芳,等.基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究[J].水土保持研究,2021,28(3):156-162.  
Liu M Z, Zhang H J, Wang Y F, et al. Characteristics of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of Northern China based on land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):156-162.
- [3] Sharma R, Nehren U, Rahman S A, et al. Modeling land use and land cover changes and their effects on biodiversity in central Kalimantan, Indonesia[J]. Land, 2018,7(2):57.
- [4] 李营,张峰,杨海军,等.生物多样性生态功能区生境质量变化遥感监测研究[J].环境与可持续发展,2016,41(2):46-48.  
Li Y, Zhang F, Yang H J, et al. On habitat quality change monitoring by remote sensing in eco-functional area of biological diversity[J]. Environment and Sustainable Development, 2016,41(2):46-48.
- [5] 陈晓杰,王静,孔雪松,等.武汉城市圈生态足迹时空差异及其与经济协同性[J].生态学杂志,2020,39(10):3452-3462.  
Chen X J, Wang J, Kong X S, et al. Spatiotemporal differences of ecological footprints and synergistic relationship to economic development in Wuhan urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(10):3452-3462.
- [6] Chen X J, Wang J. Quantitatively determining the priorities of regional ecological compensation for cultivated land in different main functional areas: a case study of Hubei Province, China[J]. Land, 2021,10(3):247.
- [7] 刘园,周勇,杜越天.基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2429-2440.  
Liu Y, Zhou Y, Du Y T. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River economic belt based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(10):2429-2440.
- [8] 赵晓同,王建,苏军德,等.基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J].农业工程学报,2020,36(18):301-308.  
Zhao X J, Wang J, Su J D, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(18):301-308.
- [9] 潘健峰,马月伟,陈艳,等.社会-生态耦合分析视角下普达措国家公园生物多样性价值评估[J].生态与农村环境学报,2022,38(5):609-620.  
Pan J F, Ma Y W, Chen Y, et al. Biodiversity assessment of pudacuo National Park from the perspective of coupled social-ecological system[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(5):609-620.
- [10] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.  
Huang C H, Yang J, Zhang W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(12):3360-3367.
- [11] 陈晓杰,张长城,张金亭,等.基于 CASA 模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素:以湖北省为例[J].水土保持研究,2022,29(3):253-261.  
Chen X J, Zhang C C, Zhang J T, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution patterns of vegetation net primary productivity and its influencing factors based on CASA model: a case study of Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):253-261.
- [12] Zhang H W, Lang Y Q. Quantifying and analyzing the responses of habitat quality to land use change in Guangdong Province, China over the past 40 years[J]. Land, 2022,11(6):817.
- [13] 徐梦菲,孙一帆,汪霞.郑州市土地利用/覆被变化与生境质量的时空演变及情景预测[J].水土保持通报,2024,44(2):364-377.  
Xu M F, Sun Y F, Wang X. Spatiotemporal evolution and scenario prediction of land-use/land-cover changes and habitat quality in Zhengzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):364-377.
- [14] 袁文华,范文君,李建春,等.黄河流域典型县域生境质量的时空分异特征及影响因素研究[J].生态与农村环境学报,2024,40(5):622-633.  
Yuan W H, Fan W J, Li J C, et al. Research on the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of ecological quality in typical counties in the Yellow River basin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(5):622-633.

- [15] 吴艳霞,刘方南,陈宝童.黄河流域下游城市群生境质量时空演变及其驱动因素[J].水土保持通报,2023,43(4):396-404.  
Wu Y X, Liu F N, Chen B T. Spatial and temporal evolution and drivers of habitat quality of urban agglomeration in lower Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):396-404.
- [16] 张亚丽,黄柱军,田义超,等.桂西南喀斯特峰丛洼地流域生境质量时空变化及驱动机制[J].生态与农村环境学报,2024,40(7):877-887.  
Zhang Y L, Huang Z J, Tian Y C, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of habitat quality in the Karst Peak cluster depression basin of southwestern Guangxi[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(7):877-887.
- [17] 霍艾迪,刘琪,李心悦,等.秦岭北麓沔河流域矿区生境质量的时空演变及驱动因素分析[J].农业工程学报,2024,40(8):223-231.  
Huo A X, Liu Q, Li X Y, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of habitat quality in Xiangyu mining area, Feng River basin, north foot of Qinling Mountains of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(8):223-231.
- [18] Xie B, Zhang M M. Spatio-temporal evolution and driving forces of habitat quality in Guizhou Province[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):6908.
- [19] 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.
- [20] 石小伟,冯广京,苏培添,等.大都市郊区土地利用时空演变特征与生境质量评价[J].农业工程学报,2021,37(4):275-284.  
Shi X W, Feng G J, Su P T, et al. Spatiotemporal evolution of land use and habitat quality assessment in the suburbs of metropolitan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(4):275-284.
- [21] Li Y N, Duo L H, Zhang M, et al. Assessment and estimation of the spatial and temporal evolution of landscape patterns and their impact on habitat quality in Nanchang, China[J]. Land, 2021,10(10):1073.
- [22] 时振钦,邓伟,张少尧.近25年横断山区国土空间格局与时空变化研究[J].地理研究,2018,37(3):607-621.  
Shi Z Q, Deng W, Zhang S Y. Spatial pattern and spatio-temporal change of territory space in Hengduan Mountains Region in recent 25 years[J]. Geographical Research, 2018,37(3):607-621.
- [23] 路昌,张抒恒,曾蓉,等.黄河下游地区国土空间动态变化及生态服务功能交叉敏感性研究[J].农业资源与环境学报,2023,40(4):976-988.  
Lu C, Zhang S H, Zeng R, et al. Land space dynamic changes and cross-sensitivity of ecological service function in the lower Yellow River reaches[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(4):976-988.
- [24] 何建华,王春晓,刘殿锋,等.大城市边缘区土地利用变化对生境质量的影响评价:基于生态网络视角[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):903-916.  
He J H, Wang C X, Liu D F, et al. Evaluating the impact of land use change on habitat quality in metropolitan fringe areas from A perspective of ecological network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(4):903-916.
- [25] 于婧,陈艳红,彭婕,等.基于GIS和Fragstats的土地生态质量综合评价:以湖北省仙桃市为例[J].生态学报,2020,40(9):2932-2943.  
Yu J, Chen Y H, Peng J, et al. Comprehensive evaluation on land ecological quality based on GIS and Fragstats: A case study in Xiantao City, Hubei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9):2932-2943.
- [26] 王培家,章锦河,杨良健,等.典型旅游城市生态系统服务时空演变及其影响因素:以黄山市为例[J].生态学报,2024,44(9):3897-3910.  
Wang P J, Zhang J H, Yang L J, et al. Spatio-temporal evolution of ecosystem services in a typical tourist city and its influencing factors: a case study of Huangshan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(9):3897-3910.
- [27] 杨倩.湖北汉江流域土地利用时空演变与生态安全研究[D].武汉:武汉大学,2017.  
Yang Q. Spatial-Temporal Evolution of Land Use and Ecological Security in Hanjiang River Basin, Hubei Province[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [28] 周致远,孙小舟,赵虎,等.湖北汉江生态经济带土地利用与覆盖变化研究[J].中国农学通报,2014,30(34):68-73.  
Zhou Z Y, Sun X Z, Zhao H, et al. Land use and cover change in Hubei Han River ecological economic zone[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014,30(34):68-73.
- [29] 朱丹丹,安睿,刘艳芳,等.湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(4):799-809.  
Zhu D D, An R, Liu Y F, et al. Analysis of spatial-temporal difference in synergistic trade-offs of ecosystem services in Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(4):799-809.
- [30] Xiao P N, Zhou Y, Li M Y, et al. Spatiotemporal patterns of habitat quality and its topographic gradient effects of Hubei Province based on the InVEST model[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023,25(7):6419-6448.