

DOI: 10.5846/stxb202205151366

王玉霞,汪博,吴雪飞.用地紧凑变化对武汉市绿色空间生境质量的影响.生态学报,2023,43(14):5726-5739.

Wang Y X, Wang B, Wu X F. Impact of land use compactness change on the habitat quality of green space in Wuhan City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (14): 5726-5739.

用地紧凑变化对武汉市绿色空间生境质量的影响

王玉霞,汪博,吴雪飞*

华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430072

摘要:城市化以及人类活动所造成的土地利用变化严重影响了城市绿色空间生境质量,从而引起了一系列生态环境危机。如何科学合理协调用地建设与绿色空间生境质量的关系是城市可持续发展的重要内容。尽管当前不少学者探究了建设用地扩张强度、景观格局变化、土地利用类型变化等因素对自然生境的影响,但用地紧凑视角下用地规模、形态、强度等方面如何影响生境质量仍少有研究。以武汉市三个建设时期(2005、2013、2018年)为例,首先从生境适宜度与生境承载力视角出发构建生境质量综合评价体系,围绕土地利用强度以及土地功能布局,构建用地紧凑度评价指标体系;其次依据三个时期生境质量的热点分布情况将样本网格划分为生境冷点区、生境热点区以及生境变化区;最后通过相关性与空间自相关分析,探究生境质量与用地紧凑度的相关性及其在空间上的关联格局。结果表明:(1)武汉市用地紧凑变化对生境质量有消极影响,2005年至2018年生境质量由0.624下降到0.578,其时空分异特征明显,在三个时期内均呈现中心低、边缘高的分布特征,总体上退化速度加快,城市生境质量的提升工作效果不显著,城市发展边界是生境质量退化的重点区域。(2)不同区间生境质量受用地紧凑度影响的程度呈现出明显的差异性,生境冷点区受用地紧凑度影响最为显著,生境变化区内其与建设用地密度、居住用地密度、路网密度、土地聚集度、土地利用多样性、公交站点密度等存在较强的相关性。(3)用地紧凑因子均会对周边区域生境质量产生潜在影响,建设用地密度、土地聚集度、土地利用多样性、用地混合度、路网密度五项指标不仅对所处地块生境质量造成影响,还与周围地块生境质量退化有着密切联系,对生境影响范围较广,用地整合度对生境质量影响较小。研究结果对优化用地格局、维持生境高质量、实现用地高效配置、完善绿色空间生态系统具有重要参考意义。

关键词:绿色空间;生境质量;用地紧凑度;相关性分析;双变量空间自相关

Impact of land use compactness change on the habitat quality of green space in Wuhan City

WANG Yuxia, WANG Bo, WU Xuefei*

College of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430072, China

Abstract: Changes of land use caused by urbanization and human activities have seriously affected quality habitat of urban green space, resulting in a series of environmental crises. How to strategically coordinate the relationship between land use construction and green space habitat quality is an important part of urban sustainable development. Although many scholars have explored the impact of many factors on natural habitats, from intense expansion of land construction, landscape pattern change, to land use type change and more, there is still little research on how land use scale, shape, intensity and other aspects affect habitat quality from the perspective of compact land use. Take the three construction periods in Wuhan (2005, 2013 and 2018) for an example. This paper firstly constructs a comprehensive evaluation system of habitat quality from the perspective of habitat aptness and carrying capacity, and a land use compactness evaluation system is built based on land use intensity and land function layout. Secondly, the paper divides the study sample into cold spot area, hot spot

基金项目:国家自然科学基金面上项目(3197140471)

收稿日期:2022-05-15; 网络出版日期:2023-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuxf@mail.hzau.edu.cn

area and habitat change area according to the hot spot distribution of habitat quality in the three periods. Finally, through correlation and spatial autocorrelation analysis, the paper explores the relationship between habitat quality and land use compactness in addition to its spatial correlation pattern. The results show that: (1) The compact change of land use in Wuhan has a negative impact on local habitat quality. From 2005 to 2018, the habitat quality decreased from 0.624 to 0.578, and its spatial and temporal differentiation characteristics were obvious, showing a low quality in center area and high quality in periphery across the three periods. The overall degradation of habitat quality is accelerated, and the improvement of urban habitat quality is not significant. The urban development boundary is the key area of habitat quality degradation; (2) The degree to which the habitat quality is affected by the compactness of land use in different areas shows obvious differences. The cold spot area of habitat is most significantly affected by the compactness of land use. The affect in habitat change area has strong correlations with the density of construction land, residential land, road network, land aggregation, diversity of land use, and density of bus stops; (3) The compactness of land use, as a factor, will have a potential impact on the habitat quality of the surrounding area. The five indicators of construction land density, land aggregation, land use diversity, land mix, and road network density not only affect the habitat quality of the land parcel, but also have a close relationship with the degradation of the habitat quality of the surrounding land parcel. They have a wide range of impacts on the habitat, and the integration of land use has a small impact on the habitat quality. The research results have significant references for optimizing land use pattern, maintaining high quality of habitat, realizing efficient land allocation and improving green space ecosystem.

Key Words: green space; habitat quality; land use compactness; correlation analysis; bivariate space autocorrelation

城市绿色空间为生物提供高质量的栖息地与迁徙觅食廊道^[1],其在缓解城市化对城市生物多样性威胁方面发挥着重要作用^[2]。然而在快速的城镇化进程中,无序粗放的土地开发模式使得大量生态用地或被直接侵占,生境面积减少;城市中绿色空间被建成建筑以及荒地所封闭隔开^[3],影响了不同景观斑块之间生态要素的循环^[4];同时大量外来植物物种影响本地物种的比例和组成^[5],这些严重影响了城市绿色空间的生境质量。近年来学者们通过引入紧凑城市的概念以优化指导未来的城市规划以及土地利用,城市用地紧凑发展被认为是可持续发展的有效途径^[6],协调生态用地与建设用地对实现土地高效集约利用、促进生态环境保护、维持区域生境安全具有重要意义。

城市化所带来的土地利用改变是人类活动的侧面反应,也是当下自然生境最直接的威胁^[7]。目前包括国际地圈生物圈计划(IGBP)在内的多个国际项目都已开始关注土地利用变化对区域生境质量的影响^[8],国内在城市尺度上多从建设用地扩张强度、景观格局变化、土地利用类型变化等简单数量维度探究人类活动对自然生境的影响^[9-11],对于用地规模、形态、强度等方面缺少综合关注。王秀明等^[12]通过对韶关市生境质量的影响研究证明了土地利用类型、海拔、坡度等自然因素是城市绿地生境质量变化的重要原因。何建华等^[13]通过相关性分析发现新城的开发对城市林地的占用、对水体的分割是典型栖息地斑块周边生境质量下降的主要原因。梁晓瑶等^[14]以黑龙江省为例,通过多尺度加权回归分析,证明了植被净初级生产力、年均温度、年均降雨量、海拔高度以及土壤表层 pH 值等自然要素以及 PM_{2.5} 排放总量、人口总量、地区生产总值等社会经济要素均会在不同尺度上对生境质量产生影响。城市用地紧凑度是从土地利用的角度出发评估城市紧凑程度,其结果主要反应城市土地的集约性以及功能的混合性^[15],是制定城市发展模式的重要策略和手段。

生境质量是指栖息地为生物提供生存与繁衍等基本需求的能力的高低^[16],与物种密度呈正相关^[17],是生物多样性的重要空间反应。目前生境质量城市尺度上的评估监测多以模型评估为主,应用最广泛的是的 InVEST 模型中的“InVEST-Habitat Quality”模块,但这种方法本质上是用地类型的扩展表现,受土地利用的影响较大^[18],无法对城市化与生境质量间的内在联系与影响机制提供科学的研究基础。结合遥感技术的指标法是近年来进行快速生物多样监测与评估的重要方法。彭建等^[19]从生态系统服务本身的价值、生境能力的

差异以及人类活动对生境质量的威胁等三个方面构建了典型旅游城市黄山市的生境质量评价模型;高玲等^[20]结合生境质量修正系数以及综合了自然因素、管理因素、距离因素的生态位系数对生态系统服务价值量进行调整。谢余初等^[21]通过生境质量指数、植被净初级生产力、景观结构指数三个方面进行综合指数计算,对生物多样性进行定量精细化地评估;总的来说生态系统服务能够反映生境为生物种群提供生存发展的能力情况,生境自身表现出的物理化现象、气象、环境因子能反应生境的现状的适宜情况。

本研究以武汉市为例构建城市绿色空间生境质量评价体系,分析武汉市绿色空间生境质量时空分布情况以及热点区域识别;同时构建网格尺度城市用地紧凑指标体系,探究不同生境区域的用地紧凑影响因子,揭示用地紧凑因子与生境质量在空间上的关联,明晰用地集约与生境质量耦合协调目标下不同用地指标的控制要点,从而为用地和生境的协同策略提供依据和支撑,为不同城市发展阶段的规划建设提供切实的参考。

1 研究区域概况

武汉市(图 1)地处江汉平原,东西宽约 134 km,南北长约 155 km,总面积达到了 8569.15 km²,全市有硚口、汉阳、江岸等 13 个行政区,包含中心城区 7 个以及远郊区 6 个区。作为长江经济带核心城市,武汉市的生态资源要素丰富多样,具有山、水、田、城相互交融形成独特的生态格局。2007 年中部崛起战略之后,武汉市加快了城市发展的步伐,城市扩张活动剧烈。

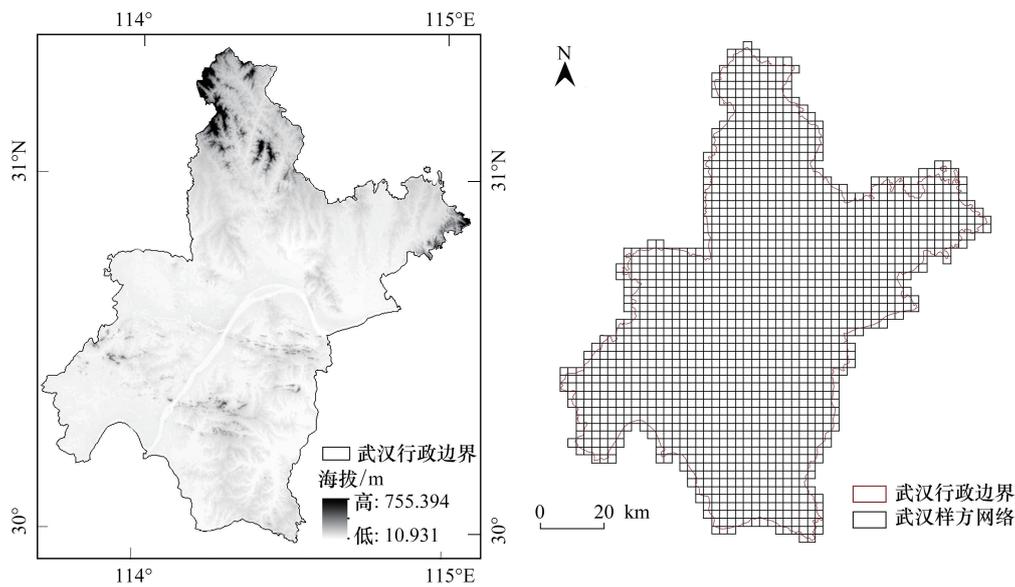


图 1 研究区域及空间采样网格

Fig.1 Study area, spatial sampling grid

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

2005 年的 Landsat5 以及 2013、2018 年的 Landsat8 卫星影像数据均来自于地理空间数据云。土地利用数据依据土地利用/土地覆盖变化(LUCC)分类体系进行分类,参照同时期的高分辨率卫星影像地图对分类结果进行验证修改,分别得到三个时期土地利用二级分类数据;卫星影像与路网数据通过 BIGEMAP 下载器获取,基于监督分类和目视解译对研究区域内的建设用地进行分类,根据研究区情况和研究目的,将建设用地按照城乡建设用地分类标准划分为居住用地、公共管理和公共服务用地、商业服务设施用地、工业用地、物流仓储用地、道路与交通设施用地、公用设施用地、其他用地 8 类用地,以此作为城市用地紧凑度计算的依据。降

雨、辐射等气候数据均通过中国气象数据网进行下载,在 ArcGIS 中对点数据利用克里金插值进行栅格化处理。武汉市 2018 年的公交站点数据通过高德地图进行数据爬取。

2.2 综合生境质量评价体系构建

从生物多样性角度来看,生境质量要素主要突出体现在“质”与“量”两个方面。“质”为生物生存的适宜性,是由生态系统中各种自然环境要素组成的生境本底,“量”则直观反应了生境空间内各种生物的存在数量以及种类,是由各种生物要素组成的生境能力。基于以上考量本研究从生境适宜性与生境承载力两个视角从生境本底、生境能力两个方面建立城市绿色空间生境质量评价体系(表 1)。

表 1 生境质量评估指标体系

Table 1 Indicator for Assessment of Habitat Quality

目标层 Destination layer	一级指标 Level indicators	二级指标 The secondary indicators	解释及意义 Interpretation and Significance
生境质量 Habitat quality	生境本底	干度	反映地表建筑指数和裸土指数。
		绿度	反映地表植被变化。
		湿度	反映地表植被、水体和土壤的湿度情况。
		热度	反映地表作物、植被等生长与分布的热环境。
	生境能力	植被覆盖	反映植被通过植被叶冠等部分在地面的投影面积占比,反应植被的覆盖程度。
		净初级生力	反映绿色植物有机物净生产量。
		水源涵养	反映不同生境的雨水截留能力。

目前使用生境适宜性模型多是通过物种的生态位需求来预测物种的潜在分布,常用的生态位联系变量就是气候、地形、地质、覆被等自然环境因素^[22]。研究表明影响城市空间的环境因素也通过许多组成部分影响城市生态系统的平衡,从而影响城市绿色空间的质量^[23]。由干度、绿度、湿度、热度主成分分析得到的遥感生态指数(RSEI)生态指数能较好地反应研究区域整体的生态环境质量状况以及时空分异特征^[24],反应区域生境对生物生存条件的满足情况。

生境作为生物的栖息载体,承担着重要的生物过程功能,因此基于生境承载力视角的生境能力是生境质量的另一种体现,主要通过城市绿色空间内的生物量进行反应。相关研究表明,植被覆盖度能有效地反应生境的健康^[25],净初级生产力在影响物种丰富度方面作用明显^[26]。栖息地空间内可用水量是生物的生存的重要条件^[27]。土壤生物多样性的保护被认为维持生态过程的重要方向,尤其是在城市环境中^[28]。而有研究表明土壤水分与落叶量呈相关关系,凋落物可以减少水分流失,为土壤生物提供更多的生存空间^[29]。因此从动物、植物、微生物三个层面,选取植被覆盖度、净初级生产力以及水源涵养力三个指标综合反映城市绿色基础设施的生境能力情况,从栅格尺度分析其时空变化特征。生境空间的质量是由其对生物的环境适宜性以及空间的承载力共同组成,借鉴许田等^[30]的生态系统服务价值模型结合水源涵养对生境能力进行调整,得到生境能力分布栅格图像。

$$Q_i = \left[\frac{FVC_i}{FVC_{mean}} + \frac{NPP_i}{NPP_{mean}} + \frac{WCA_i}{WCA_{mean}} \right] / 3$$

式中, Q_i 为生境能力, FVC_i 为植被覆盖度, NPP_i 为净初级生产力, WCA_i 分别为栅格内的水源涵养量, FVC_{mean} 、 NPP_{mean} 和 WCA_{mean} 分别为研究区内的植被覆盖度、净初级生产力以及水源涵养量的均值。

在 ArcGIS 中建立 2.5 km 渔网,对生境本底与生境能力分别进行分区统计,将统计后的属性表“表转 Excel”,并在 Excel 中进行平均值统计并进行归一化,将计算完成的结果在 ArcGIS 中“Excel 转表”并连接到渔网中进行图像显示,利用栅格计算器输入相应公式计算得到生境能力值,本研究认为由生境本底和生境能力同等重要,在 ArcGIS 中利用栅格计算器将生境本底与生境能力计算结果进行等权叠加得到综合生境质量分布图。

2.3 用地紧凑度指标选取

城市用地紧凑度是从土地利用的角度出发评估城市紧凑程度,其结果主要反应城市土地的集约性以及功能的混合性^[15]。目前对于紧凑城市的不同用地特征出现了大量的研究,如开发利用强度、土地利用效率、混合发展、交通联系密切等方面,但对城市内部的功能布局以及建设强度等综合评价不足,参考张楠楠等^[31]的研究成果,从土地利用强度、土地利用形态、土地功能布局三个方面构建用地紧凑指标,但目前土地利用形态通过使用长度、面积和点数等基本度量来构建某种指数,对区域发展过程中的大小与形状进行描述,但是由于周长和面积等空间测量的不确定性,分形维度指数、几何形状指数等形状指标通常无效,不同时间或不同地点的指标值也总是无法相互比较的,且一般对于发展形态的紧凑研究对象基本是城市整体,而在网格尺度上少有关关注土地的形态;土地利用强度旨在反应城市的建设开发活动,表示人类建设活动对生态空间直接的破坏程度,当前研究中对用地紧凑度的评价主要以建设用地在城市空间中的占比为依据进行衡量,包括建设用地密度^[32]、居住用地密度、建筑密度、容积率、路网密度^[33];高强度的土地利用仅是城市用地紧凑的一个表征,不考虑用地间的联系程度及组织形式可能会导致土地的低效利用与无序蔓延,土地功能布局强调混合多功能用地的土地利用多样性和利用效率,土地聚集度^[34]表示最大用地斑块占土地总面积的比例,反应土地的连续开发程度;土地整合度是用地面积和土地斑块数量比例,体现土地的破碎化程度,其值越大平均用地斑块面积越高,相对来说土地功能越少;土地利用多样性指数^[32]可以反映用地类型的多样化;用地混合度^[35]反应不同用地的功能以及利用率的信息熵,会通过影响人类活动强度、配套设施建设、出行距离、空间活力水平等影响城市生境。公交站点^[36]的兴趣点(POI)数据虽然与传统的土地利用数据不同,但可以反映土地利用格局。综上所述,考虑到网格尺度的可行性、数据的可获取性以及对城市发展规划的参考价值,从土地利用强度、土地功能布局两方面构建了 10 个生物多样性影响因子——城市用地紧凑指标体系(表 2)。

表 2 城市用地紧凑度评估指标

Table 2 Urban land compactness evaluation index

目标层 Destination layer	分类 Classification	评价指标 Evaluation index	测算方法 Calculating methods
土地利用紧凑 Land use Compactness	土地利用强度	建设用地密度(X_1)	建设用地/规划用地面积
		居住用地密度(X_2)	居住用地/建设用地面积
		建筑密度(X_3)	$\sum_{i=1}^n \ln \frac{S_i}{S}$ ①
		容积率(X_4)	$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times C_i)}{S}$ ②
		路网密度(X_5)	路网长度/用地面积
	土地功能布局	土地聚集度(Y_1)	a_{\max}/A ③
		土地整合度(Y_2)	网格面积/土地斑块数量
		土地利用多样性(Y_3)	网格内用地类型数量/总用地类型数
		用地混合度(Y_4)	$-\sum_{j=1}^m (P_j)(\ln P_j)$ ④
		公交站点密度(Y_5)	公交站点数量/研究区域面积

i 表示单元的编号, n 表示单元总数, S_i 为该单元的建筑基底面积, S 为单元总面积; C_i 为 i 单元内的建筑高度, a_{\max} 表示单元中最大斑块的面积, A 表示单元建设用地的总面积, j 表示用地类型, m 表示用地类型数量, P_j 表示第 j 种用地类型面积占建设用地面积的比例; ①建筑密度: 表示研究区内建筑建设开发的集聚强度以及空间开放度; ②容积率: 表示城市建设空间的容纳能力, 相同建设用地面积, 容积率越高说明城市空间越纵向扩展; ③土地聚集度: 表示区域建设用地中, 面积最大的建设用地占比, 反应了该区域土地利用开发的连续程度; ④用地混合度: 表示城市土地利用的混合程度, 反应土地的不同功能以及利用率, 其中 $\sum_{j=1}^m P_j = 1$

2.4 热点分析与样本分区

研究参考相关文献^[37-38], 并从 1 km 到 4 km 间隔 0.5 建立一个样本网格, 对不同网格尺度生境质量进行

莫兰指数计算比较其尺度效应,防止出现距离耦合特征,最终选取 2.5 km×2.5 km 的网格尺度对生境质量进行均值统计,利用 ArcGIS 中的 Getis-Ord G_i^* 工具统计和识别具有显著性的热点和冷点,揭示武汉市绿色空间生境质量在空间上的分布特征,同时依据三个时期冷热点情况划分不同生境状态样本网格,分区进行探索。

2.5 相关性分析

Spearman 相是一种计算两个变量间直线相关的方法,可以通过 SPSS 实现。相关性系数范围在 0—1 之间,0.3 以上可以认为两者间具有相关性,值越高两者间的相关程度越大,而相关系数在 0.3 以下基本可以认定为二者没有相关关系,公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, R 为相关系数, n 为因子的样本数量, \bar{x} 为综合生境质量的平均值, \bar{y} 为用地紧凑因子的平均值。

空间自相关分为全局与局部空间自相关。由相关性分析发现武汉市用地紧凑与生境质量间存在较大的相关性,但结果仅能反映全部样本间不同属性值的相关系数^[39],并没有考虑到空间上分布的差异性。因此本研究借助 GeoDa 平台,利用空间自相关理论分析用地紧凑与生境质量间的空间关联性以及时序演变特征。双变量 Moran's I 是通过建立空间滞后模型来计算样本单元自身的质量与邻近单元网格的用地紧凑指标是否存在聚集效应来判断两者间的空间关联性。其中莫兰指数散点图的一、二、三、四象限分别表示高-高、低-高、低-低、高-低聚集区。利用双变量全局自相关对聚集区域进行可视化,生成 2018 年生境质量与用地紧凑度各指标间的空间联系的局部指标(LISA)聚类图。图中高-高表示生境质量高值区域与用地紧凑度高值表现出聚集效应,同样的高-低表示生境质量高值区域与用地紧凑度低值区域表现出聚集效应,低-低、低-高以此类推。

3 结果与分析

3.1 综合生境质量空间分布

计算结果(图 2)显示 2005、2013、2018 年武汉市绿色空间生境质量的均值分别为 0.624、0.584、0.578,生境质量不断下降。由图 2 可以看出武汉市三个时期综合生境质量主要呈现中低边高的分布特征,生境等级较高的区域主要分布在周边城区如黄陂区、新洲区、东西湖区、蔡甸区、江夏区、汉南区等,这些区域开发程度相对较低,土地利用类型主要以耕地林地为主,生境完整度、生物丰富度以及多样性较高。低值区域主要分布在中部城市建成区周边,以武昌、江汉、硚口区、汉阳等中部老城区为主,其用地类型主要为公园绿地,受人为因素影响较大,人工种植环境是主要的生境形式,绿地多为独立个体且较为破碎。

3.2 综合生境质量热点分析

由计算可知武汉市 2005、2013、2018 年绿色空间生境质量指数呈上升趋势。三个时期的 Moran's I 指数分别为 0.67、0.74、0.75, Z 值远大于 1.96,这表明 13 年间武汉市绿色空间生境质量高低与空间分布呈显著的正相关关系,城市空间内有稳定的集聚效应,即生境质量高低会受周围生境质量情况的影响。

热点区分布结果(图 3)显示在城市北边与南边,热点区由林地、耕地等代表性绿色空间组成,人类建设活动少,生境质量呈现高水平聚集状态分布在城市北部以及南部的远郊地带。从变化上来看北部热点区域范围在逐渐减少,与西北部山区不同,东北部多为平原区,这主要生境基底为耕地,因而受频繁的人类活动对生境的干扰变得更加明显,使得 2005—2018 年间武汉市的热点区域在西南至东北走向更加明显。受城市建设活动的影响,城市中部的生境退化区域也呈现出强烈的聚集效应,在城市中心形成了生境冷点区,且聚集范围有逐渐扩大的趋势。

本研究结合武汉市三个时期绿色空间生境质量热点区域进行区域划分,将三个时期中除 2018 年以外,至少有一期为热点区域的网格样本定为生境热点区,共 723 个样本网格,主要是 2005—2018 年间生境质量均呈优质状态的绿色空间,这些地区生境植被繁茂、食物充足,长期为生物提供良好的栖息环境,是武汉市重要的

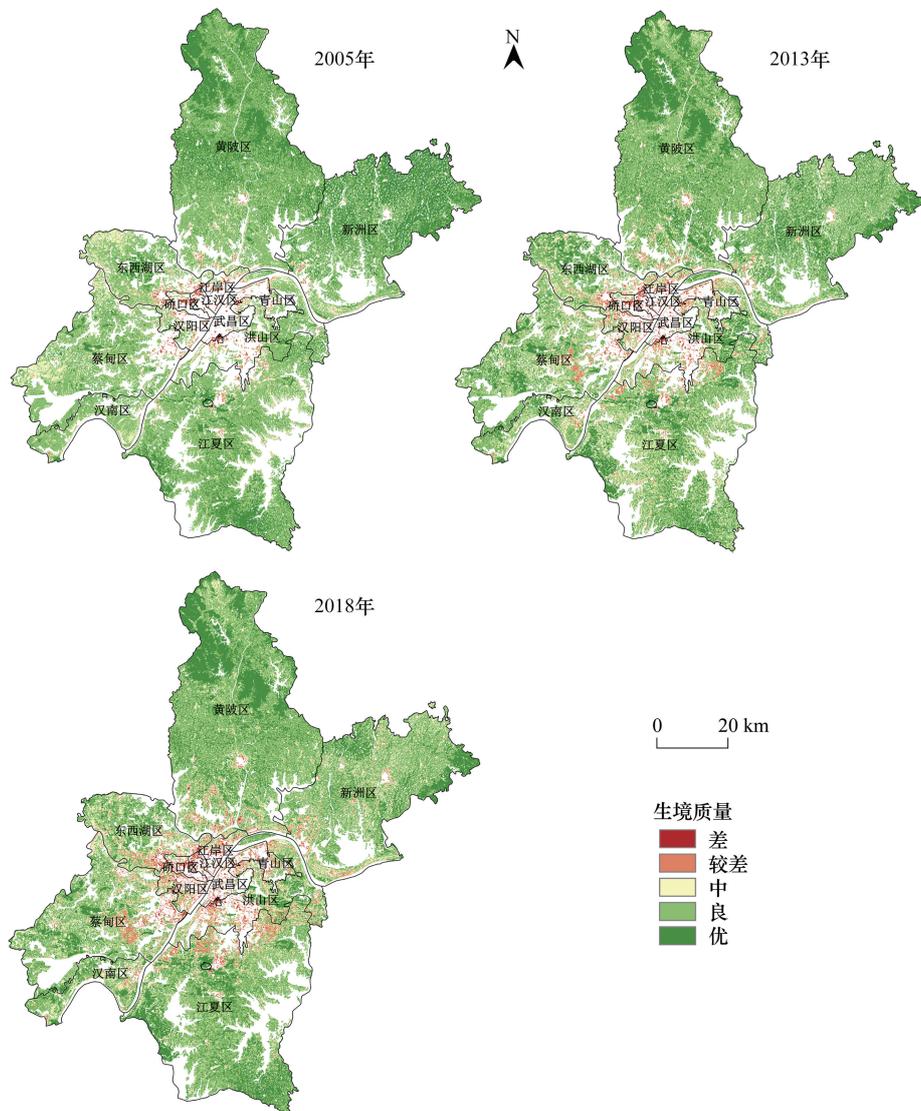


图 2 综合生境质量分布

Fig.2 Distribution of comprehensive habitat quality

生态空间;一期以上为冷点的网格筛选为生境冷点区(181个样本网格),代表的是受到建设用地以及人类威胁的城市低质量生境区,大部分是中心城区的人工、或半自然绿地;剩余网格样本组成生境变化区(共631个样本网格),主要由于13年间其生境发生了明显的变化,生境状态不稳定。分区结果(图4)反应了不同生境等级稳定状态的综合分布。

3.3 用地紧凑度空间特征

由用地紧凑度计算结果(图5)可以看出,武汉市的用地紧凑度呈现出明显的梯度特征,城市边缘、北部山区以及市内大面积水域受人工建设影响较小。建设用地密度由内向外逐渐减小,在中心区域表现出高强度的开发建设;居住用地在城市中心区域出现了高密度、集中布置的情况,远郊区则恰好相反,住宅用地大量散布分布范围广,密度低;建筑密度与容积率表现出来的紧凑程度相似,武汉市人口分布具有明显的集聚性,但同时也说明中心城区过于拥挤,缺乏开放空间。长江两岸建筑开发不仅在占地面积上展现了极大的开发力度,高度上也表现出了对江景资源的利用,出现了大量的超高层建筑。结合建设用地密度来看,东湖、汤逊湖等生态湿地则更加注重景观的开阔性,虽然周边出现了大量的建筑,但层高普遍低于长江两岸,这个结果与武汉市

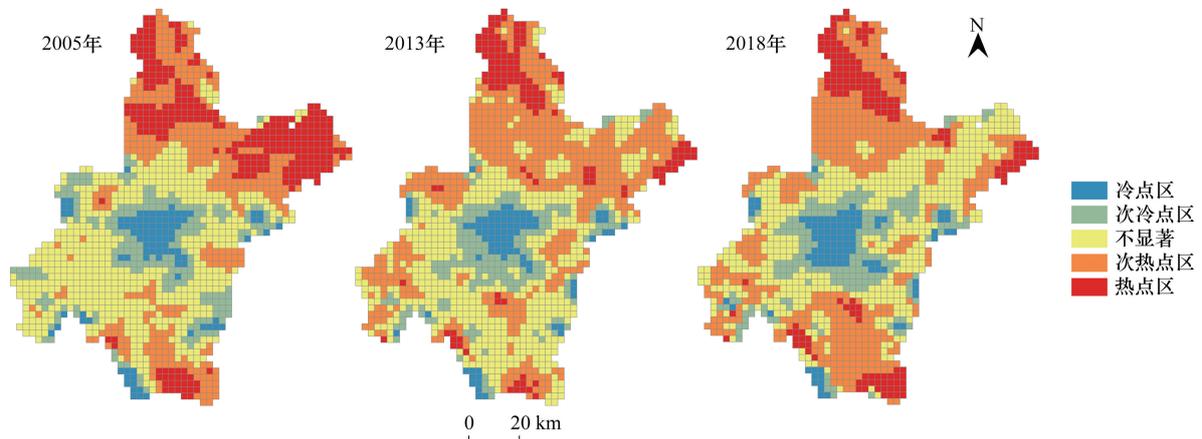


图3 综合生境质量空间热点变化特征

Fig.3 Characteristics of spatial hotspot changes of comprehensive habitat quality

1999年提出建设滨江、滨湖城市特色的现代化城市发展目标相一致;路网密度结果与建设用地密度分布情况较为相似,分布面积广泛,表明国际性综合交通枢纽、国家中心城市与大武汉建设目标初见成效。城市路网覆盖密度增加速度非常大,路网系统整体逐渐完善,但西北部近郊区道路建设相对于用地建设存在滞后现象。

由功能布局的紧凑指标计算结果来看,城市边缘聚集度高于中心城区是由于城市边缘的用地建设类型较为单一,建设用地斑块少,而城市中心的建设融合了更多功能的用地斑块,数量多功能混杂,土地聚集度与土地整合度为反向紧凑指标;土地利用多样性没有出现较大的差异分布,但在汉江流域由于临空港经济技术开发区的建设,大量招商引资,出现了产业集聚以及配套设施的建设,因此土地利用多样性较大;结合土地利用多样性结果来看,武汉市的土地混合利用程度在城市中心区的分布明显更加均衡,表明中心城区各种功能用地的建设有一定的同步性,面积分配较为合理;公交站点分布结果表现出极度的不平衡,站点集聚在中心城区的小范围内。

3.4 皮尔逊相关性分析

由皮尔逊相关性分析结果(图6)可知,首先生境冷点区生境质量低主要受土地利用强度的影响,由于建设开发强度过大,占据了生态用地大大降低了中心区域生态完整性,大量的不透水铺装以及城市排水措施使得生境储水能力较差,人类活动频繁破坏了城市中心公园绿地等绿色空间的生物活动,建筑的高密度开发阻挡了城市中仅有的绿色植物光合作用,降低了绿色空间生境质量;其次,反映的交通布局公交站点分布密度与土地利用类型的多样性是生境质量影响的次要因子,土地功能布局对中心城区的影响相对较小。土地聚集度、土地整合度用地混合度在生境冷点区对生境质量的影响较小,说明在生境质量低值区域,适当提高土地的聚集度、整合度以及混合度不会对生境质量造成较大的影响。

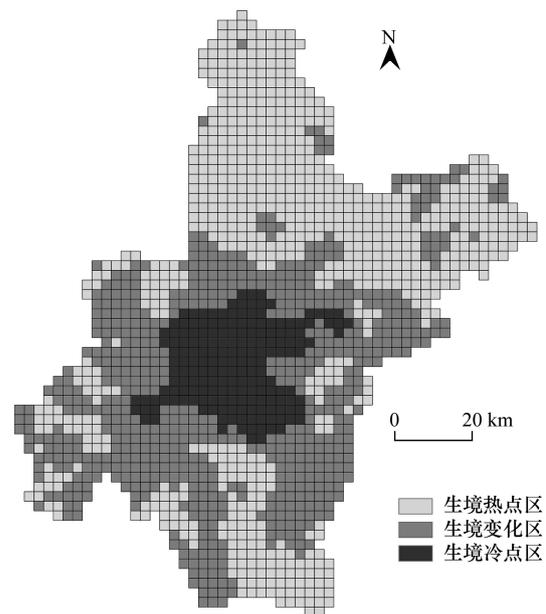


图4 样本网格划分与分布

Fig.4 Sample meshing and distribution

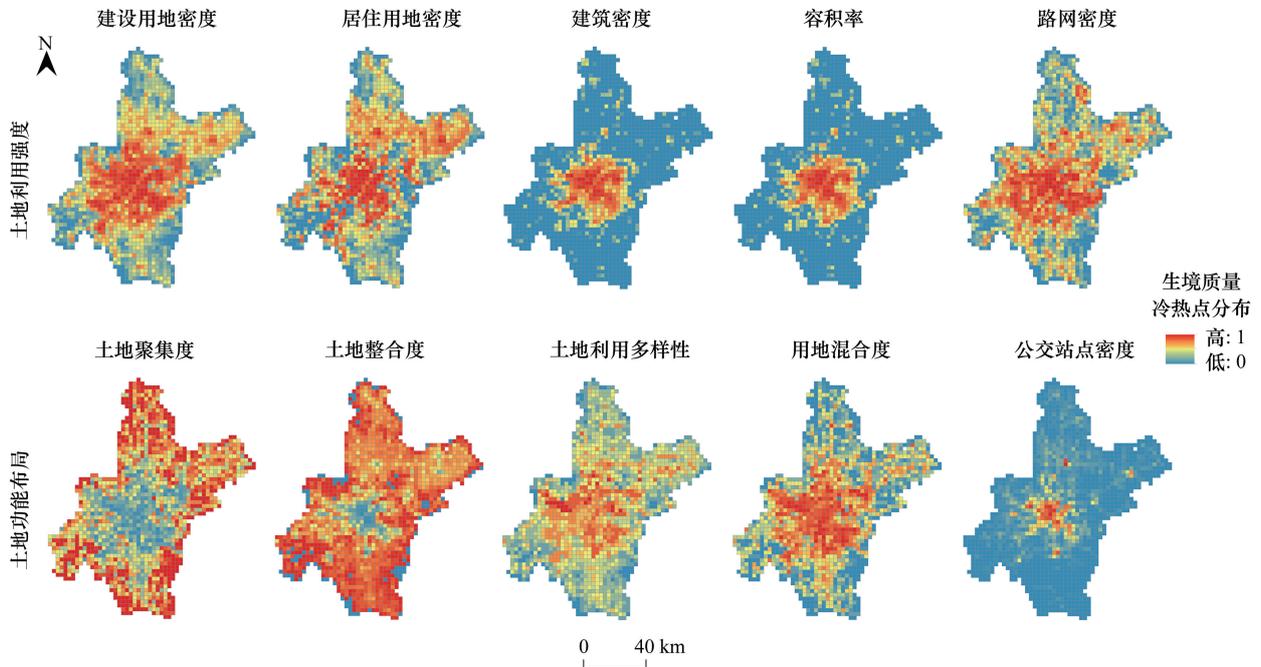


图 5 用地紧凑度空间梯度

Fig.5 Spatial gradient of land use compactness

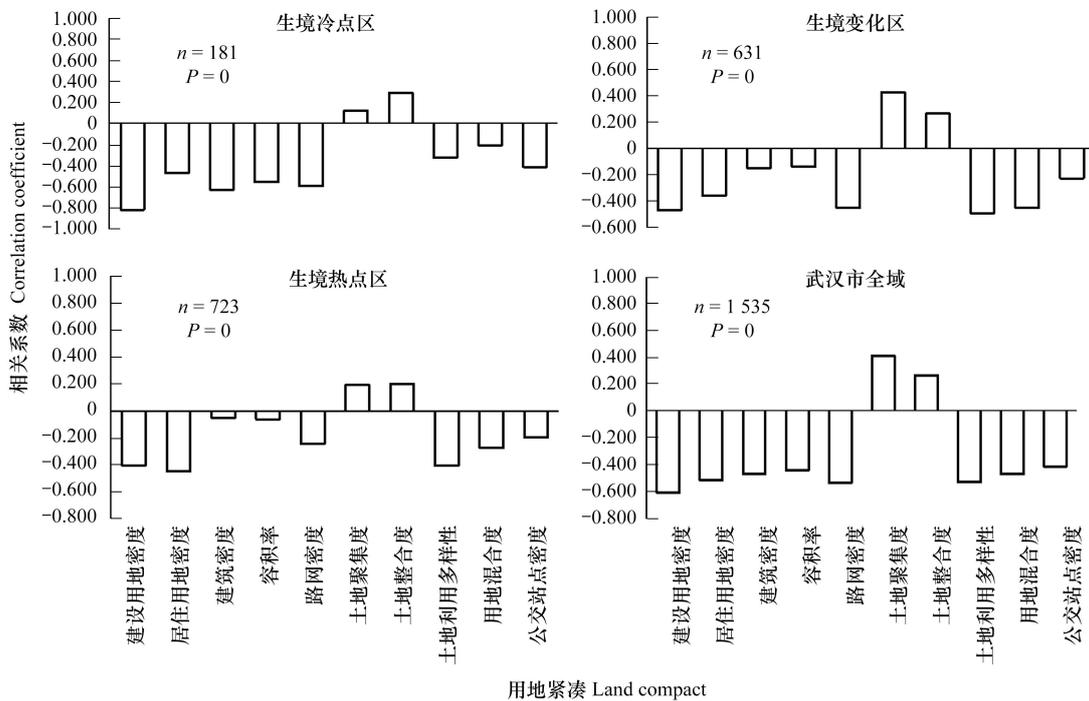


图 6 城市用地紧凑与生境质量的相关性系数

Fig.6 Correlation coefficient between urban land compact and habitat quality

在生境质量变化较大的生境变化区正处在城市规划的重要地段,了解这个区域生境质量的用地紧凑影响因子能够对将要进行的城市建设提供一定的参考。由结果可知这个区间的生境质量受用地强度与土地功能布局的影响相近,建设用地密度、居住用地密度、路网密度、土地聚集度、土地利用多样性、公交站点密度均与

生境质量有中等程度相关性。在生境变化区与生境热点区建设用地密度、居住用地密度与路网密度相对来说数量较小,对生态的破坏相对中心区还不明显。而土地利用的多样性以及混合程度反应了近郊或远郊由于工业的建设以及商业服务配套设施越多样,人类活动越频繁,对生境质量的影响也就越大。

3.5 全局空间自相关

由图 7 可以发现:建设用地密度、土地聚集度、土地利用多样性、用地混合度在四个象限均有分布,但是二、四象限分布较多,表明生境质量与这四项目标存在明显的空间负相关关系,即建设用地密度越小、土地连续开发程度越低、土地利用类型越少、混合开发程度越小的区域其周围生境质量越高,换言之这四项目标不仅对本样本区间的生境质量造成影响,还会通过一系列潜在的中间因子间接影响到周围样本的生境质量;居住用地密度、建筑密度、容积率、土地整合度、公交站点密度大多数样本处在单一象限或象限分布不明显,但总得来说依然存在微弱的空间负相关关系。结合前面相关性分析结果,居住用地密度、建筑密度、容积率、公交站点密度与生境质量存在较强的相关性,但空间相关性较低,说明增加居住密度、建筑密度、容积率与公交站点密度主要通过直接改变用地性质对生境质量造成影响或影响范围较小,对周围生境的连锁辐射破坏较少,而整合度始终不会对生境质量造成显著影响。

3.6 局部空间自相关

从双变量空间自相关分析结果(图 8)可以看出,土地利用强度方面来说,建设用地强度与路网密度的低-高类型较多,而高-高聚集类型较少说明在城市发展初期阶段,各类用地建设还不完善,高质量生境周边的用地建设与交通建设是生境质量的一个很大的制约因素。建筑密度与容积率则有大量样本表现出了高-高的聚集特征,表明在生境变化区,适当提高建筑密度与容积率是解决城市用地发展问题的重要参考方法。居住密度高-高样本数量处于前两者之间,表明生境质量与居住密度是具有可调控的方法,高居住用地密度不一定会侵害生境质量,但是相较于建筑密度与容积率来说,较高的居住密度会带来大量的人类出行活动,对周边生境的影响是复杂多变的,因此居住用地密度与绿色空间生境质量的平衡需要进一步对其进行研究。

就土地功能布局来看,土地聚集度、土地利用多样性、用地混合度表现出相似的聚集分布,以生境质量低值与用地紧凑指标高值聚集为主,较少出现高-高聚集,表明这三个功能布局指标对相邻生境质量有较高的影响,同时在生态保护区出现了少量的低-低聚集情况,分布零散,影响范围广,应当引起足够的重视;用地整合度与生境质量的空间聚类与其他指标相比出现了极大的反差,在远郊的生态保护区出现了大量的低-低聚集,表明远郊区建设用地整合度与生境质量存在一定的共振现象,但不能解释为生境退化的原因,这与双变量相关性结果一致;公交站点密度与生境质量出现了大量的高-高集聚现象,这说明公交站点的数量并不会直接影响周边生境质量。

4 结论与讨论

4.1 讨论

作为生态系统重要的服务功能之一,生境质量在确定物种的生长、发育、繁殖和分布方面起着重要作用^[40]。对于城市尺度的生境质量的衡量暂未出现统一的标准,模型法与实地调研法都具有极大的限制,结合遥感技术的指标法是近年来进行快速生物多样性监测与评估的重要方法^[19-20]。本研究基于遥感监测的方法从生境适宜性和生境承载力两个方面出发,构建了从生境本底与生境能力两方面度量生境质量的指标体系,拓展了网格尺度上生境质量定量研究的视角与方法,使监测生物多样性的历史变化成为可能。研究的不足之处在于:(1)本研究尝试从生境本底与生境能力两个方面构建生境质量监测体系,但是由于部分生物数据难以获取,评价因子依然不够全面;(2)以网格尺度进行耦合协调度模型的应用研究虽然能够在空间上城市的协调发展分异情况,但是由于行政边界是城市基本空间组织单元,以网格尺度探究空间分布缺少与行政边界相联系,也无法在网格尺度上对城市进行进一步研究。

武汉作为我国内陆最大的水陆空交通枢纽,城市正处于快速发展阶段,扩张活动剧烈^[41]。土地利用变化

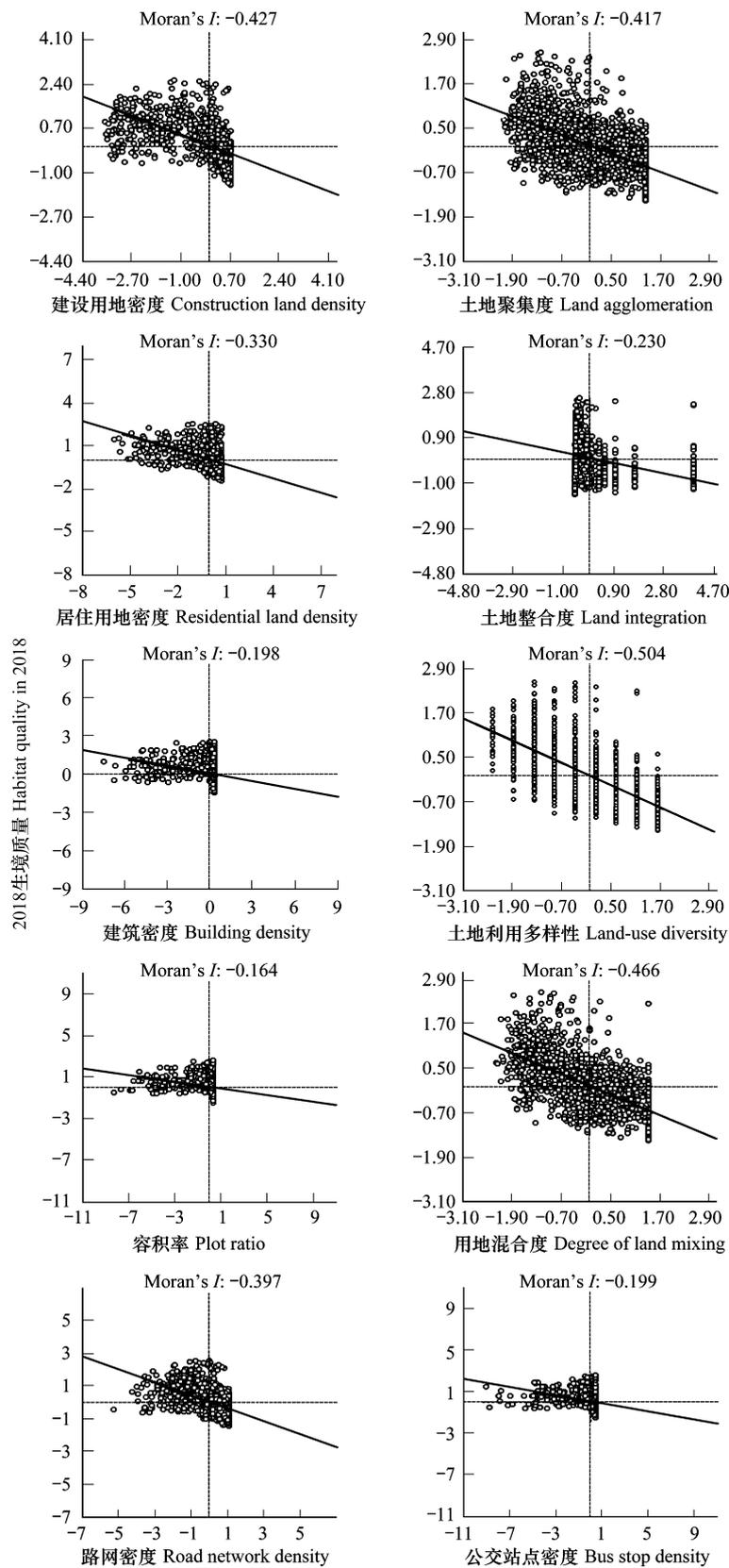


图 7 生境质量与用地紧凑全局空间自相关分析

Fig.7 Global spatial autocorrelation analysis of habitat quality and land use compactness

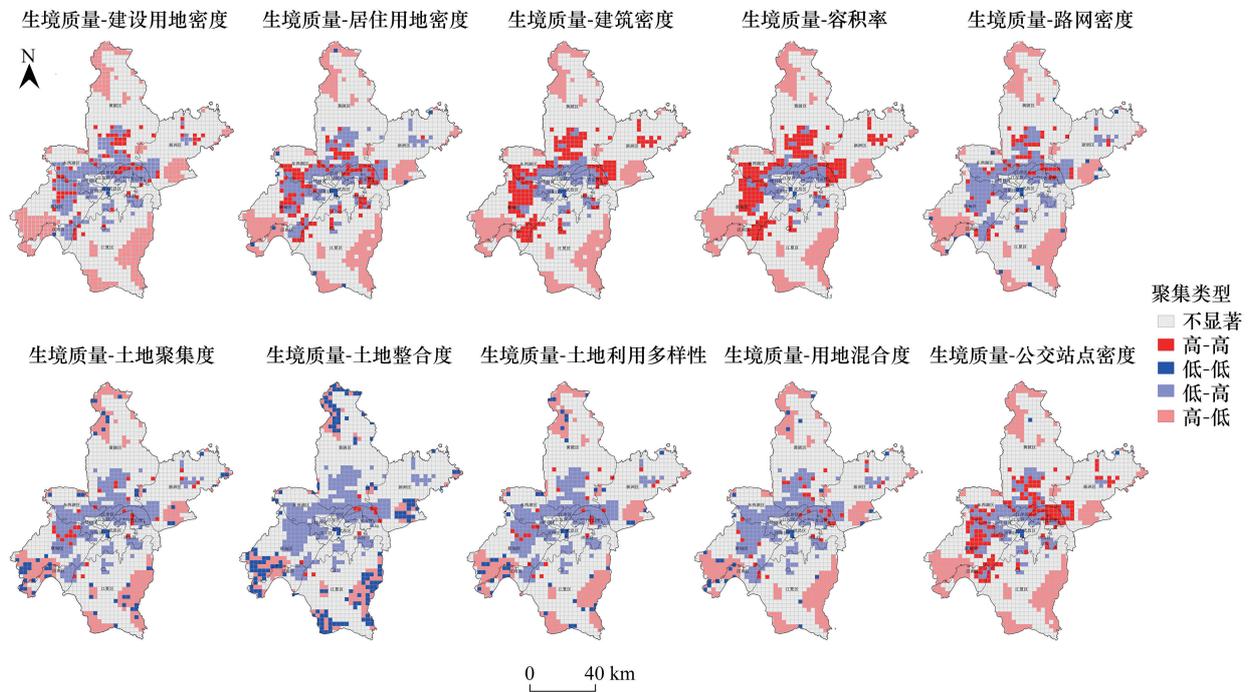


图 8 生境质量与用地紧凑度局部空间自相关

Fig.8 Local spatial autocorrelation between habitat quality and land use compactness

带来的生态用地减少、生态服务功能降低、环境污染以及生态系统的退化等众多环境问题,已经成为制约城市可持续发展进程的主要因素^[42-43]。武汉市绿色空间生境保护应当结合生境适宜性和生境承载力评价,在明确保护主体动态监测生物多样性热点区域的基础上整合绿色空间区域特征,分级建立保护修复策略;同时城市中心区域成为生境质量退化的重点区域,该区域应当控制用地无序开发,选择合理的开发位置,并整合现有功能区域,对建设用地集中开发,布局各区功能主体,早日实现城乡绿化一体化进程。

4.2 结论

以 2005、2013、2018 年武汉市绿色空间为例,本文首先从生境本底与生境能力两个方面探究这三年土地政策出台前后生境质量的时空变化情况,其次以 2018 年为例探究不同生境质量热点区域绿色空间生境质量受紧凑用地因子的影响指标以及影响程度。通过分析可以得出:

(1) 2005 年至 2018 年武汉市生境质量由 0.624 下降到 0.578,差与较差等级的生境质量面积呈增加趋势,而优良等级生境减少的面积占比由 2005—2013 年的 12.97%到 2013—2018 年的 4.33%,退化速度加快,且绿色空间生境质量呈现显著的时空分异特征。城市北部与南部是主要的热点区域,拥有连续的大面积耕地林地,人为干扰较小,分布大量小规模、大范围的农村居民点,这些地区不是城市重点开发对象,自然条件优越、生物资源丰富,承担着生物多样性的保护的重要功能,其不属于规划的重点区域,今后的生态规划应突出其生态安全屏障的作用。

(2) 不同区间生境质量受用地紧凑影响呈现明显的差异性。因此在追求城市紧凑发展的基础上,如何最小程度地影响城市绿色空间生境质量是用地紧凑影响因子筛选的重点,强调在不同区域进行城市建设活动应关注其本身的生境基底,因地制宜。建设用地密度在三个区域都是生境质量的重大威胁因素,因此通过生境质量监测选择合理的城市发展空间,有助于减少建设用地开发带来的生境损失,相对来说生境质量较低的区域开发比生境质量高值区域节约更大的成本,可以最小程度地破坏原有生态系统与生物链的完整性;其次在城市开发过程中应整合现有功能区域,对建设用地集中开发,布局各区功能主体,在高度紧凑区域提高城市用地混合度,减少建设用地密度,避免建设高层楼房,增加绿色空间绿色植物的生长空间;城市道路是城市建设

活动的重要基础, 串联了各个功能区, 同时也决定了人类的活动轨迹与范围。在建设面积一定的情况下减少道路数量尽可能做到最大的可达性; 最后在开发强度低的区域需避免过多功能用地的布置, 建筑密度与容积率对其影响较小, 可以建设高楼, 并依据实际情况增加建筑密度, 与自然空间充分接触。

(3) 用地紧凑因子均会对周边区域生境质量产生潜在影响。除用地整合度以外, 建设用地密度、土地聚集度、土地利用多样性、用地混合度、路网密度等五项指标不仅对所处地块生境质量造成影响, 还是周围地块生境质量退化的重要原因, 生境影响范围较广, 是今后用地开发关注的主要指标。从空间分布来看, 在城市扩张的边缘区域建筑密度与容积率出现了大量高-高聚集, 表明在土地状态不稳定的变化区域适当提高建筑密度与容积率是城市紧凑发展的关注方向之一。值得关注的是武昌与汉阳部分区域生境质量与用地紧凑因子始终处于低低聚集状态, 今后应对此区域重点进行改善。

致谢:感谢洪永凌、洪歌、黎梦娜等同学帮助图像处理。

参考文献 (References):

- [1] Milanovich J R, Peterman W E, Barrett K, Hopton M E. Do species distribution models predict species richness in urban and natural green spaces? A case study using amphibians. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107(4): 409-418.
- [2] Beninde J, Veith M, Hochkirch A. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*, 2015, 18(6): 581-592.
- [3] Tian Y, Jim C Y, Wang H. Assessing the landscape and ecological quality of urban green spaces in a compact city. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 97-108.
- [4] Zhao F, Tang L, Qiu Q, Wu G. The compactness of spatial structure in Chinese cities: measurement, clustering patterns and influencing factors. *生态系统健康与可持续性: 英文*, 2020(1): 6(1), 1743763.
- [5] Liang Y, Li J, Li J Valimaki S K. Impact of urbanization on plant diversity: A case study in built-up areas of Beijing. *Forestry Studies in China*, 2008, 10(3): 179-188.
- [6] 蓝婷, 唐立娜, 徐智邦, 贾玉秋. 基于文献计量的城市空间紧凑度研究知识图谱分析. *生态学报*, 2022, 42(4): 1645-1654.
- [7] Newbold T, Hudson L N, Hill S, Contu S, Lysenko I. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [8] Tang F, Fu M, Wang L, Song W, Yu J, Wu Y B. Dynamic evolution and scenario simulation of habitat quality under the impact of land-use change in the Huaihe River Economic Belt, China. *Plos One*, 2021, 16(4): 0249566.
- [9] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 In VEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究 —— 以北京为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 553-562.
- [10] 戴云哲, 李江风, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1340-1351.
- [11] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [12] 王秀明, 刘谱承, 龙颖贤, 张音波, 梁炜, 洪曼, 余晓东. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 381-388.
- [13] 何建华, 王春晓, 刘殿锋, 程航, 石青青. 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. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(4): 903-916.
- [14] 梁晓瑶, 袁丽华, 宁立新, 宋长青, 程昌秀, 王翔宇. 基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(6): 864-872.
- [15] 陈华斌. 紧凑型城市空间发展模式探讨——以济南为例. *规划师*, 2007, (B04): 59-61.
- [16] 刘方田, 许尔琪. 基于土地利用的新疆兵团与非兵团生境质量时空演变的对比. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2341-2351.
- [17] Horne B V. Density as a Misleading Indicator of Habitat Quality. *The Journal of Wildlife Management*, 1983, 47(4): 893.
- [18] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 12-22.
- [19] 彭建, 徐飞雄, 吴见, 邓凯, 胡婷. 典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究——以黄山市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2397-2409.
- [20] 高玲, 赵智杰, 张浩, 关学斌, 肖明. 基于生境质量与生态区位的海口市生态系统服务价值估算. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48

- (5): 833-840.
- [21] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 胡宝清, 王克林. 基于综合指数法的白龙江流域生物多样性空间分异特征研究. *生态学报*, 2017, 37(19): 6448-6456.
- [22] Hirzel A H, Le Lay G, Helfer V, Randin C, Guisan A. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological Modelling*, 2006, 199(2): 142-152.
- [23] Stańescu A. Quality parameters of urban green spaces. *Scientific Papers-Series B, Horticulture*, 2013: 381-386.
- [24] 魏凌伟, 兰思仁, 熊慧锦, 沈钦炜, 陆东芳, 陈小英. 1988—2018 年武夷山自然保护区生境质量评价. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2021, 41(4): 93-102.
- [25] 刘文平. 基于景观服务的绿色基础设施规划与设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [26] Luck G W. The relationships between net primary productivity, human population density and species conservation. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(2): 201-212.
- [27] Mortelletti A, Sozio G, Boccacci F, Ranchelli E, Cecere J G, Battisti C, Boitani L. Effect of habitat amount, configuration and quality in fragmented landscapes. *Acta Oecologica*, 2012, 45: 1-7.
- [28] Hågvar S. The relevance of the Rio-Convention on biodiversity to conserving the biodiversity of soils. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/2/3): 1-7.
- [29] Smith J, Chapman A, Eggleton P. Baseline biodiversity surveys of the soil macrofauna of London's green spaces. *Urban Ecosystems*, 2006, 9(4): 337-349.
- [30] 许田, 李政海, 牛建明, 鲍雅静, 程岩, 吕海燕, 王海梅, 高吉喜. 纵向岭谷区不同景观类型的服务价值. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2009-2015.
- [31] 张楠楠, 吴雪飞. 城市用地紧凑变化对河岸带生境的影响——以汉江小流域武汉段为例. *中国园林*, 2021, 37(12): 87-91.
- [32] 郭洪旭, 黄莹, 赵黛青, 肖荣波. 基于格网法的城市空间紧凑度研究——以广州市天河区为例. *国际城市规划*, 2016, 31(4): 51-57.
- [33] 卢锐, 朱喜钢. 城市新区规划中空间紧凑测度方法研究——以黄石、宁波、南京新区规划为例. *上海城市规划*, 2015(3): 87-93.
- [34] 贾梦圆, 刘晓阳, 陈天, 范斐. 中国地级及以上城市紧凑度测度. *城市问题*, 2019(11): 4-12.
- [35] 朱鹏祥. 低碳视角下的城市碳排放时空分布特征与空间管控研究——以合肥市为例[D]. 合肥安徽建筑大学, 2020.
- [36] Yue Y, Zhuang Y, Yeh A, Xie J Y, Ma C L, Li Q Q. Measurements of POI-based mixed use and their relationships with neighbourhood vibrancy. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(4): 658-675.
- [37] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [38] 谢怡凡, 姚顺波, 邓元杰, 贾磊, 李园园, 高晴. 延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2020, 28(4): 575-586.
- [39] 常玉旸, 高阳, 谢臻, 张天柱, 于希泽. 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 848-859.
- [40] Cushman S A. Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: a review and prospectus. *Biological Conservation*, 2006, 128(2): 231-240.
- [41] 金贵, 吴锋, 李兆华, 郭柏枢, 赵晓东. 快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析. *生态学报*, 2017, 37(23): 8048-8057.
- [42] 白立敏. 基于景观格局视角的长春市城市生态韧性评价与优化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [43] Wang Y Y, Liu Y J, Zhou G L, Ma Z P, Sun H R, Fu H. Coordinated relationship between compactness and land-use efficiency in shrinking cities: a case study of northeast China. *Land*, 2022, 11(3): 36