

DOI: 10.5846/stxb202207242116

魏文飞, 包玉, 王志泰, 陈信同, 孙玉真, 曾慕琳, 莫亚国. 喀斯特多山城市生境质量对土地利用变化的时空响应——以贵阳市为例. 生态学报, 2023, 43(10): 3920–3935.

Wei W F, Bao Y, Wang Z T, Chen X T, Sun Y Z, Zeng M L, Mo Y G. Spatio-temporal responses of urban environment quality to land use change in mountainous cities of Karst areas. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3920–3935.

喀斯特多山城市生境质量对土地利用变化的时空响应 ——以贵阳市为例

魏文飞¹, 包玉¹, 王志泰^{1,2,*}, 陈信同¹, 孙玉真¹, 曾慕琳¹, 莫亚国¹

1 贵州大学林学院, 贵阳 550025

2 贵州大学风景园林规划设计研究中心, 贵阳 550025

摘要:在喀斯特地区,随着城市的快速扩展,城市建设用地在山间平缓地带延展,大量的自然山体被包围,最终被镶嵌于城市建成区内,形成了城市遗存山体。喀斯特多山城市内部的城市遗存山体是城市生境的主要组成部分,具有多种不可替代的生态系统服务功能。以典型喀斯特多山城市贵阳市建成区为例,基于 2008—2018 年土地利用数据和 InVEST 模型定量分析研究区土地利用、景观格局和生境质量时空演变特征。最后利用地理加权回归模型揭示生境质量与土地利用变化之间的响应关系。研究结果表明:(1)2008—2018 年耕地、城市遗存山体、林地在研究期间分别减少 94.56 km²、8.74 km²、6.8 km²,土地利用变化主要以耕地、城市遗存山体和林地转化为建设用地为主,景观斑块破碎化和空间异质性逐渐加强。(2)2008—2018 年生境质量空间聚集效应明显,平均水平较低且呈现下降的趋势,低水平生境质量面积占比从 2008 年的 38.29% 增加到 2018 年的 60.32%。适中和高水平生境质量面积占比分别下降 1.95% 和 4.15%,生境质量退化面积达 82.78 km²;较高水平生境质量面积占比增加 3.98%。生境质量斑块表现出趋于破碎化、多样化和均匀化的特征,高水平区主要分布在城市公园和城市遗存山体所在区。(3)城镇绿地、城市遗存山体、林地和水体土地利用变化与生境质量总体呈正相关,建筑用地、交通用地、耕地和未利用地土地利用变化与生境质量总体呈负相关;人类活动对生境质量变化起主导作用。(4)城市遗存山体是多山城市高水平生境质量的主要贡献源,但在 2008—2018 年随着城市土地利用的复杂化程度增加,城市遗存山体生境质量退化明显。本研究有助于进一步了解喀斯特多山城市土地利用变化与生境质量之间的关系,可为我国乃至世界其他类似地区生态保护与景观规划提供科学支持。

关键词:多山城市;土地利用;InVEST 模型;生境质量;时空响应

Spatio-temporal responses of urban environment quality to land use change in mountainous cities of Karst areas

WEI Wenfei¹, BAO Yu¹, WANG Zhitai^{1,2,*}, CHEN Xintong¹, SUN Yuzhen¹, ZENG Mulin¹, MO Yaguo¹

1 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Landscape Architecture Planning and Design Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: In the karst area along with the rapid expansion of the city, the urban construction land extends in the gentle area between the mountains, and a large number of natural mountains were surrounded by construction land, and finally were inlaid in the urban built area, forming the urban remnant mountains (URMs). The URMs in karst mountainous cities were the main part of urban habitat and have many irreplaceable ecosystem service functions. Taking the built-up area of Guiyang city, a typical karst mountainous city, as an research area, the temporal and spatial evolution characteristics of land use,

基金项目:贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般 458);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z011);国家自然科学基金(32060367)

收稿日期:2022-07-24; 采用日期:2023-01-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ztwang@gzu.edu.cn

landscape pattern and habitat quality (HQ) were studied based on the land use data from 2008 to 2018 by InVEST model. Finally, the geographical weighted regression model was used to reveal the response relationship between HQ and land use change. The results showed that: (1) from 2008 to 2018, the areas of cultivated land, URMs and woodland decreased by 94.56 km², 8.74 km² and 6.8 km² respectively. The land use change was mainly dominated by the transformation of cultivated land, URMs and woodland into construction land, and the fragmentation of landscape patches and spatial heterogeneity were gradually strengthened. (2) The spatial aggregation effect of HQ was obvious from 2008 to 2018, with a low average, and the proportion of low level HQ area increased from 38.29% in 2008 to 60.32% in 2018. The proportion of moderate and high level HQ area decreased by 1.95% and 4.15% respectively, the degraded HQ area reached 82.78 km², and the proportion of comparatively high level HQ area increased by 3.98%. The patches of HQ tended to be fragmented, diversified and uniform, and the high HQ areas mainly distributed in the urban parks and the URMs. (3) The HQ was positively correlated with the land use change of urban green space, URMs, woodland and water, but negatively correlated with the changes of land use of construction land, transportation land, cultivated land and unused land. The HQ changes were dominated by human activities. (4) URMs were the main contribution sources of high level HQ in mountainous cities. However, from 2008 to 2018, with the increase of the complexity of urban land use, the HQ of URMs was obviously degraded. This study contributes to further understanding of the relationship between land use change and HQ in karst mountainous cities and could provide scientific support for ecological conservation and landscape planning in China and other similar regions around the world.

Key Words: mountainous city; land use; InVEST model; habitat quality; spatial and temporal response

生境质量是指生态系统提供维持物种适宜生存条件的能力,能够在一定程度上反映区域物种多样性和生态服务水平^[1]。随着全球城市化与城市人口的急剧增长,至 2050 年,全球约 70%的人口将居住于城市中^[2]。人类与自然之间的联系正在急剧减弱,城市生境质量将成为评价城市高质量可持续发展和城市居民生态福祉的重要因素^[3]。许多城市正在经历大规模的土地利用转换^[4],城市地区不断向边界外自然区域扩张,大量自然区域迅速丧失、分裂、退化^[5],产生了诸如水土流失、环境污染、生境退化、生物多样性减少、生态系统失衡等一系列城市环境问题^[6-8]。改善城市生态环境,提升城市人居环境质量,实现人与自然各谐共处的可持续发展,已经成为城市规划的一个关键目标^[9]。生境质量评估作为城市生态安全的重要表征,能够反映区域生物多样性和生态服务水平,日益成为生态安全领域的研究热点^[10]。

从目前研究来看,生境质量评价主要包括实地调查和模型模拟两种方法^[11]。实地调查通过构建评价指标进行野外调研,进而获得研究区生境质量参数对生境质量进行评价^[12]。但实地调查费时费力,仅适用于小面积或特定生境调查,而且实地调查难以对生境质量变化进行长期动态监测。近年来随着遥感技术的发展,基于多期遥感影像进行动态分析研究生境质量变化的学者较多,如生境适宜性指数模型(HSI)、最大熵模型(MaxEnt)、生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)、生态系统服务的社会价值模型(SolVES)等模型被应用于生境质量的评估研究当中^[13-17]。其中 InVEST 模型因计算精确、结果可视化、运用成本低等特性被广泛运用,该模型中的生境质量模块,可以结合物种栖息地的生境适宜性和人为干扰对生物多样性的威胁绘制生境质量图谱^[18]。

近年来,国内外学者针对城市生境质量评价及其影响因素开展了大量研究,取得了丰硕成果。然而,由于区域、目标和对象的不同,研究结果迥然不同。以往研究主要集中于流域尺度以及行政区尺度上人类活动对自然生境的影响^[10,19-21]。然而在城市建成区域内进行生境质量评价,对城市绿色基础设施的规划、建设、管理以及城市绿地景观格局优化具有重要意义。众所周知,城市建成环境主要以不透水表面为主,各类建设用地和人工景观对城市生境产生了负面影响^[22]。虽然有相关学者对城市建成区生境质量行了评估,但由于研究区绿地类型多以人工绿地为主导导致研究结果不具有普遍性^[23],在喀斯特地区,随着城市的快速扩展,城市

建设用地在山间平缓地带延展,大量的山体被割裂、包围,最终被镶嵌于城市建成区内,形成城市遗存山体(Urban Remnant Mountains, URM_s)^[24],这些城市遗存山体保存了完整的自然生境^[25]。对镶嵌有遗存山体的多山城市进行生境质量评价,对多山城市自然生境的保护以及城市绿地系统的规划具有重要意义。然而,目前在喀斯特多山城市生境质量评价方面的研究却鲜见报道。

土地利用直接表征人类活动对自然生态系统的利用和改造,被视为生境质量下降的关键因素^[26–27]。土地利用变化从根本上改变了生态系统的组成和配置(包括比例、结构和强度的变化),最终影响物种栖息地斑块之间的能量流动和物质循环^[22]。国内外相关学者对土地利用变化与生境质量演变之间的关系展开了大量研究,现阶段研究主要集中在生境质量评估、未来生境质量变化模拟以及生境质量演变驱动因素三个方面^[28–30],且相关研究主要集中在非喀斯特地区,而关于喀斯特多山城市生境质量演变的相关研究相对较少^[31]。喀斯特多山城市人工环境中大量城市遗存山体的存在,使得多山城市建成环境中的生境质量具有其特殊性和一定的优势,但由于相关基础研究薄弱,对城市遗存山体的生态环境效益和生态系统服务功能的认识不足。在城市用地紧张的背景下,在“向山要地”的发展思想驱动下,城市遗存山体被大量开挖和蚕食,其自然生境被大量破坏^[32]。因此对多山城市建成区生境质量进行评估,研究土地利用变化与生境质量之间的关系,对于权衡多山城市开发建设和城市自然生境保护之间的关系,促进城市高质量可持续发展的相关规划编制和政策制定具有重要的实际意义,对于揭示多山城市人工系统与自然系统之间的动态关系具有一定的科学意义。

基于此,本研究以中国西南喀斯特地区典型多山城市——贵阳市为例,选择 2008—2018 年贵阳市城市建设速度最为迅速的十年为研究时段,通过景观格局指数分析,InVEST 模型和地理加权回归模型等方法旨在探索以下问题:(1)研究区 2008—2018 年土地利用变化情况以及景观斑块特征;(2)揭示 2008—2018 年研究区生境质量时空演变特征,探寻多山城市高水平生境质量的主要贡献源;(3)阐明土地利用变化与生境质量演变之间的相关关系;(4)验证 InVEST 模型运用于建成区尺度进行研究是否具有可行性? 研究结果可为多山城市高质量发展、城市规划与管理、城市生态保护提供参考价值。

1 研究区概况

贵阳市(26°11′—26°55′N, 106°07′—107°17′E)位于贵州省中部,云贵高原中部,长江与珠江之间的分水岭地带。地形属于丘陵盆地区,主要由喀斯特山地和丘陵组成。全地形西南高东北低,平均海拔约 1100 m,属于亚热带湿润温和气候,年平均气温 15.3℃,年平均总降水量 1129.5 mm。截至 2018 年底,辖 6 区、3 县、1 县级市,常住人口 488.19 万,城市人口 368.24 万,城镇化率 75.43%,中心城区建成区面积 368.68 km²。近年来,快速城市化发展使得贵阳市建成区土地利用和景观格局变化更加强烈,形成了“城在山中,山在城间”的独特景观格局^[24]。尤其在 2008—2018 年十年间,贵阳市城市建设迅速,建成区面积扩张达 236.68 km²,占 2018 年建成区面积的 64.2%。截止 2018 年底贵阳市建成区内存在城市遗存山体共计 539 座,总面积达 47.8 km²,小于 10 hm²的中小型山体有 416 座。本研究以贵阳市 2018 年建成区边界为研究范围,选择白云区、观山湖区、云岩区、乌当区、南明区、花溪区为研究区。研究区概况如图 1 所示。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

贵阳市建成区 2008、2013、2018 年高清卫星航拍影像图(0.5 m 空间分辨率)从 91 卫图下载。以贵阳市 2018 年贵阳市建成区边界为研究范围,首先在 ENVI 5.3 中通过图像加强、几何校正和地图投影等预处理;其次根据《土地利用分类标准》(GB/T21010—2017)在 ArcMap 10.2 软件中通过目视解译将各期土地利用分为建筑用地、交通用地、城镇绿地、林地、水域、耕地、城市遗存山体、未利用地等八种土地利用类型,建立土地利用空间属性数据库,用于分析研究区土地利用变化情况。DEM 数字高程数据来源于地理空间数据云官网

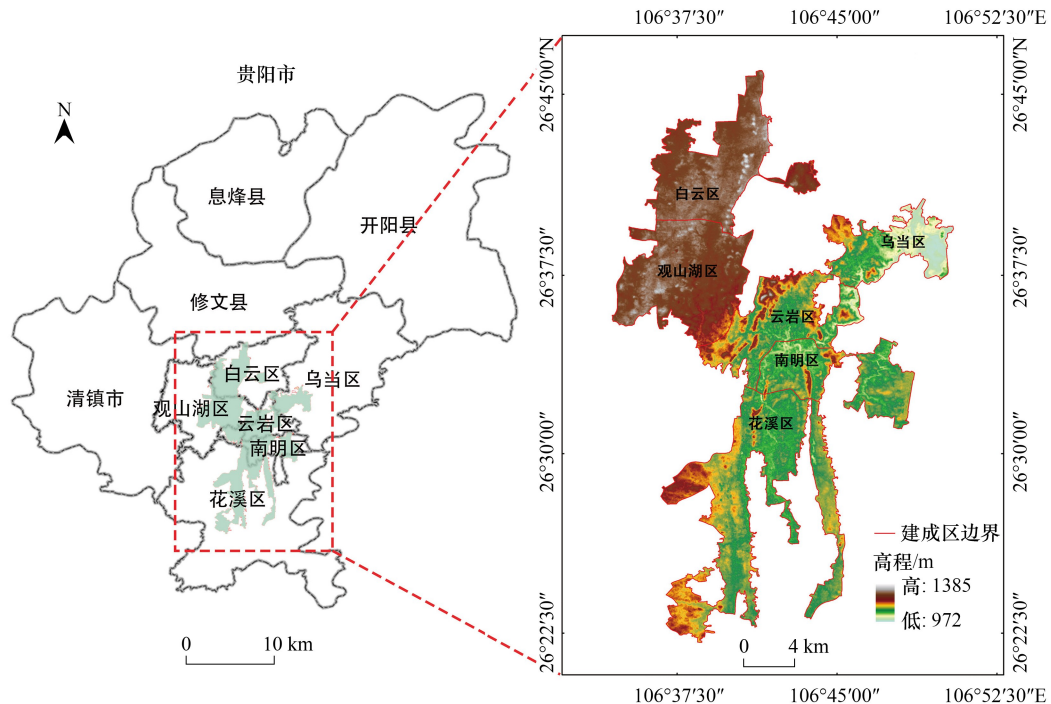


图1 研究区位置及范围

Fig.1 Location and scope of the study area

(<http://www.gscloud.cn/>)。贵阳市建成区相关规划资料《贵阳市城市总体规划(2009—2020年)》《贵阳市公园城市建设规划(2015年)》《贵阳市山体公园规划(2015—2020年)》《贵阳市中心城区山体保护利用专项规划(2016—2030年)》,贵阳1:10000地形图(用于识别城市遗存山体)等来源于贵阳市相关政府部门。社会经济统计资料来源于贵阳市统计局以及贵阳市人民政府官网。

2.2 研究方法

2.2.1 景观格局指数分析

本研究在类型水平和景观水平上选取以下景观格局指数来检验研究区土地利用变化的变化情况。景观水平选取斑块密度(PD)、平均斑块面积(AREA_MN)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、面积加权平均分形维数(FRAC_AM)、景观蔓延度(CONTAG)、散布于并列指数(IJI)、景观聚集度指数(AI)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)。类型水平选取PD、AREA_MN、LPI、LSI、FRAC_AM、IJI、AI。以上各景观指标的生态学意义及计算公见Fragstats 4.2软件教程。

2.2.2 InVEST模型生境质量评估

本研究采用InVEST(V.3.9.0)模型中生境质量模块,结合土地利用适宜性和生物多样性信息对研究区生境质量进行评估。InVEST模型计算得到生境质量值的区间范围处于0—1之间,越接近1,生境质量越好,越有利于维持生物多样性。利用InVEST模型(V.3.9.0)生境质量模块得到2008,2013,2018年贵阳市生境质量空间分布图。采用自然断点法将生境质量评估结果分为低质量[0—0.2]、较低质量(0.2—0.4)、适中质量(0.4—0.6)、较高质量(0.6—0.8)和高质量(0.8—1.0)五个水平。生境质量的评估关键参数设置如下:

(1)威胁源以及最大影响距离。建设用地是人类改造自然环境的突出表现,反映了人类活动对自然生态系统的威胁。耕地和未利用地作为一种半自然半人工环境,对自然生态系统构成了一定程度的威胁。因此,本研究将建设用地、耕地、交通用地和未利用地作为威胁因素。通过查阅文献综述和专家访谈,确定威胁因子的权重、最大影响距离^[10,16,31],如表1所示。

(2)每种土地利用类型所能提供的生境适宜性及对每种威胁源的敏感性。参考InVEST模型的推荐值,

通过引用他人文献和专家咨询,结合类似地区现有研究进行设定。由于贵阳市城市遗存山体 and 林地以乔木、灌木为主,是主要物种栖息地,河流为主要生态河道系统^[24]。因而城市遗存山体、城镇绿地中乔木、灌木高覆盖率区域,林地,自然河流的生境适宜性最高。然而,单一的人工环境几乎没有生境适宜性。生境敏感性是指每种生境类型对威胁的相对敏感性。主要基于生态学和景观生态学基本理论,结合生物多样性保护原则设置。一般来说,自然环境对外部威胁因素最敏感,其次是半人工环境,而人工环境基本不受影响^[10,16,31]。表 2 显示了本研究中不同景观类型的生境适宜性、对威胁因素的敏感性。

表 1 威胁因子的权重赋值和最大影响距离

Table 1 Weight assignment and maximum impact distance of threat factors

威胁因子 Threat factors	最大影响距离/km The maximum influence distance/km	权重 Weight	衰退模式 Decay type
农业用地 Cultivated land	1	0.7	线性衰退
建设用地 Construction land	5	1	指数衰退
交通用地 Traffic land	5	0.5	线性衰退
未利用地 Unused land	2	0.4	线性衰退

表 2 不同土地类型对威胁因子的敏感性

Table 2 Sensitivity of different land types to threat factors

土地类型 Land-use types	生境适宜性 Habitat Suitability	威胁源 Threats			
		农业用地 Cultivated land	建筑用地 Construction land	交通用地 Traffic land	未利用地 Unused land
自然河流 Natural rivers	0.8	0.65	0.75	0.7	0.2
旱田 Dry land	0.4	0.3	0.5	0.45	0.3
构筑物 Structure	0	0	0	0	0
低覆盖乔灌 Low cover trees and shrubs	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
水池 Reservoir pond	0.4	0.4	0.5	0.5	0.2
硬质铺装 Rigid pavement	0	0	0	0	0
高覆盖乔灌 High cover trees and shrubs	0.9	0.8	0.5	0.5	0.7
未利用地 Unused land	0	0	0	0	0
草地 Grassland	0.5	0.3	0.7	0.7	0.3

InVEST 模型基于以上参数与土地利用数据最终生成生境质量图,计算生境质量需要首先计算生境退化度,计算公式如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} r_y \left(\frac{\omega}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) \times i_{rxy} \beta_x S_{jr}$$
$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性})$$
$$i_{rxy} = \exp \left(\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{指数})$$

式中, D_{xj} 、 R 、 Y_r 和 ω_r 分别代表生境退化度、威胁源个数、威胁源栅格数及威胁源 r 的权重; r_y 为栅格 y 的胁迫值; i_{rxy} 表示栅格 y 对栅格 x 的胁迫水平; β_x 是威胁源对栅格 x 的可接近性; S_{jr} 表示生境类型 j 对威胁源 r 的敏感度; d_{xy} 表示生境对威胁源的欧氏距离; d_{rmax} 代表威胁源 r 对生境的最大干扰半径。

在生境退化度基础上计算生境质量,公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right]$$

式中, Q_{ij} 代表生境质量指数; D_{ij} 表示生境退化度; H_j 为生境适宜度; k 代表半饱和常数, 数值为最大退化度的一半; z 表示归一化常量, 一般取值 2.5。

2.2.3 空间自相关分析

空间自相关可以分析事物的空间分布规律, 研究空间中某个单元与周围单元间的某个属性值之间的相关性程度, 分为全局空间自相关和局部空间自相关。本研究采用全局空间自相关来描述生境质量的整体分布情况。公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, I 为全局莫兰指数 (Moran's I); n 为空间单元个数, x_i 和 x_j 分别为区域 i 和 j 的生境质量观测值; w_{ij} 为区域 i 和 j 的空间邻接关系。 I 的取值一般在 $[-1, 1]$ 之间; 小于 0 表示在空间呈负相关, 大于 0 表示在空间呈正相关; 等于 0 表示不相关随机分布。该值越趋近于 0 表示两个变量间的全局相关关系越弱。通常用 Z 值进行显著性检验, 当 $|Z\text{score}| > 1.96$ ($P = 0.05$) 时, 表明存在显著的空间自相关性。

2.2.4 地理加权回归分析

参考 Yang 以及王惠等人的研究, 采用自适应方法来确定权重, 并选择校正后的 Akaike 信息准则 (AICC) 样本来确定最佳带宽^[16,33]。采用 200 m×200 m 网格提取生境质量和土地利用变化面积。以研究区内各类土地利用变化面积量为解释变量, 以生境质量变化为因变量, 利用 Arc Map 10.2 平台的地理加权回归工具进行回归分析, 探讨其相关关系。地理加权回归模型公式如下^[34]:

$$Y_i = \beta(u_i, v_i) \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

式中, (u_i, v_i) 是第 i 个采样点的坐标, β_0 是该模型的常数, β_k 表示第 i 个采样点的 k 回归参数, ε_i 表示第 i 个采样点的残差, β 是地理坐标 (u_i, v_i) 的函数。如果与地理坐标无关, 则将上述公式转换为一般的线性回归。每个采样点的参数估计与由空间权重函数构造的加权距离矩阵有关。空间权重是基于不动点 i 周围特定区域内的点, 反映出与不动点密切相关的点, 并表征了相关性的程度。Brunsdon、Fotheringham 和 Charlton 提出了一个单调递减函数高斯函数来表示空间权重与空间距离之间的关系^[35], 公式如下:

$$\omega_{ij} = e^{-\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2}$$

式中, ω_{ij} 表示采样点 i 与采样点 j 之间的空间权重, d_{ij} 表示两点之间的距离, b 为带宽, 表示距离与权重之间的非负衰减参数。 b 的值越大, 权重随距离的增加或减小就越慢, 反之亦然。当带宽 b 趋于无穷时, 所有不动点的权重都等于 1。当 b 距离观测点 i 有一定距离时, 权重将接近于 0。

3 结果

3.1 土地利用动态变化

2008—2018 年研究区土地利用类型发生不同程度的变化, 建筑用地一直是研究区主要土地利用类型 (图 2)。2008—2013 年研究区主要土地利用类型为耕地、建筑用地、城市遗存山体、城镇绿地, 占研究区总面积的 87.99%, 2013—2018 年交通用地取代耕地成为主要土地利用类型, 说明这 5 年城市道路建设带动城市建

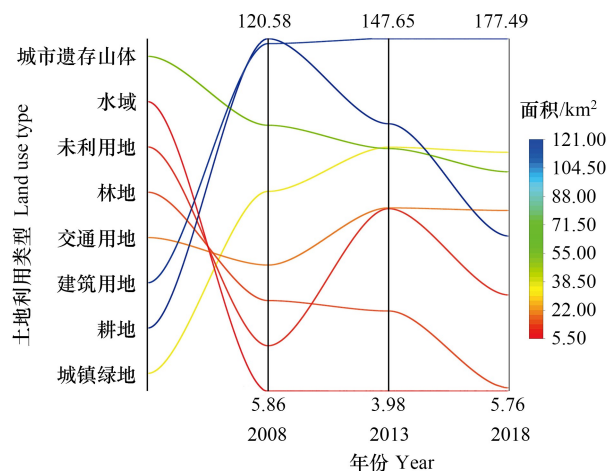


图 2 2008—2018 年贵阳建成区土地利用变化

Fig.2 Land use variation in built-up area of Guiyang from 2008 to 2018

设快速扩张。此外,耕地、城市遗存山体、林地_{在研究期间分别减少 94.56 km²、8.74 km²、6.8 km²。由图 3 可知建筑用地不断扩大,面积占比从 2008 年的 31.21%增加到 2018 年的 47.89%(为 2008 年的 1.54 倍)。城镇绿地的面积显著增加 26.26 km²,水体和林地面积变化则不太明显。}

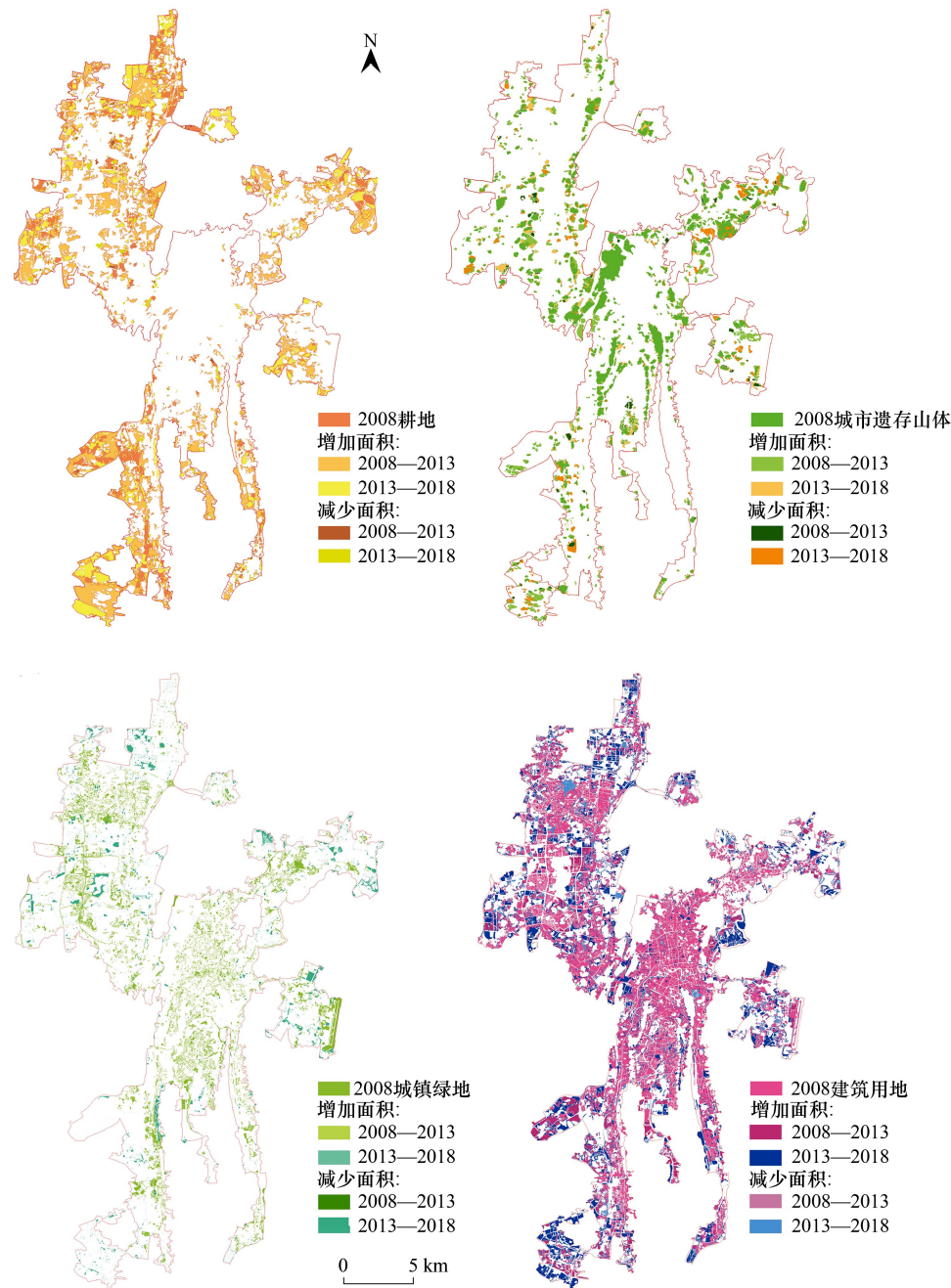


图 3 2008—2018 年贵阳市建成区主要土地利用类型空间变化
Fig.3 Spatial variation of main land use types in built-up areas of Guiyang from 2008 to 2018

研究区土地利用转移矩阵如表 3 所示。2008—2018 年以耕地和城市遗存山体转为建筑用地为主要土地利用变化类型。特别是 2008—2013 年,耕地减少面积占 2018 年总面积的 51.64%,耕地转为建筑用地区主要集中在观山湖区、白云区、花溪区南部以及乌当区东北部。城市遗存山体转为建筑用地区主要分布于乌当区、观山湖区、花溪区等快速城市化区域。2008—2018 年城市遗存山体减少 8.74 km²,占 2008 年城市遗存山体面

积的 15.24%。其中 2013—2018 年城市遗存山体增加 0.79 km²,通过分析相关政策文件可知城市遗存山体面积增加与贵阳市政府《贵阳市中心城区山体保护利用专项规划(2016—2030 年)》文件的发布有关。2008—2018 年城镇绿地增加 26.26 km²,主要以耕地和建筑用地转入为主。其次,有 9.34 km²城镇绿地转为建筑用地。总体来看,研究区土地利用变化迅速,城市扩展过程中人地矛盾较大,研究区土地利用变化表现出建筑用地和交通用地快速扩张,耕地、城市遗存山体大面积减少,城镇绿地缓慢增加的特点(图 3)。

表 3 2008—2018 年贵阳市建成区土地利用变化矩阵/km²Table 3 Land use variation matrix (km²) in built-up area of Guiyang from 2008 to 2018

时间 Time	土地利用类型 Land use types	城镇绿地 Urban green space	耕地 Cultivated land	建筑用地 Building land	交通用地 Traffic land	林地 Woodland	未利用地 Unused land	水域 Water	城市遗 存山体 Urban remnant mountains	总计 Total
2008—2013 年	城镇绿地	18.18	1.30	9.34	1.48	0.43	0.80	0.15	0.84	32.51
	耕地	11.40	51.56	30.40	5.65	3.39	13.47	0.46	4.24	120.58
	建筑用地	9.92	2.78	93.69	3.53	0.41	4.16	0.07	1.11	115.67
	交通用地	1.86	0.32	2.19	12.42	0.05	0.23	0.09	0.13	17.28
	林地	1.72	1.62	2.10	0.51	3.11	2.52	0.03	1.13	12.74
	未利用地	1.59	0.34	4.02	1.23	0.02	1.10	0.01	0.32	8.64
	水域	1.38	0.49	0.51	0.15	0.04	0.08	3.13	0.08	5.86
	城市遗存山体	2.48	3.30	5.40	1.09	1.58	3.47	0.04	39.99	57.36
2013—2018 年	总计	48.53	61.71	147.65	26.06	9.04	25.84	3.98	47.83	370.64
	城镇绿地	31.33	1.28	10.59	1.47	0.24	0.98	1.05	1.59	48.53
	耕地	8.29	20.50	18.59	3.38	2.00	5.28	0.60	3.07	61.71
	建筑用地	8.13	1.96	127.03	4.10	0.43	4.18	0.17	1.66	147.65
	交通用地	1.77	0.10	2.34	21.54	0.03	0.16	0.01	0.10	26.05
	林地	2.32	0.31	1.79	0.33	2.23	0.61	0.01	1.43	9.04
	未利用地	4.93	0.35	14.04	2.10	0.38	2.53	0.37	1.13	25.84
	水域	0.17	0.06	0.18	0.06	0.00	0.01	3.49	0.01	3.98
2013—2018 年	城市遗存山体	1.84	1.46	2.93	0.39	0.62	0.91	0.05	39.63	47.83
	总计	58.77	26.02	177.49	33.38	5.94	14.66	5.76	48.62	370.64

3.2 景观格局变化

2008—2018 年景观水平景观指标变化如图 4 所示。PD 增加,AREA_MN 减少,表明研究区景观斑块空间异质性和破碎化程度增加。LPI 显著增加说明最大斑块对城市景观格局的影响逐渐减弱。LSI 在缓慢增加后快速增加表明 2008—2018 年景观斑块逐渐呈现不规则状态。FRAC_AM 指标先减少后增加反映了景观斑块形状复杂程度在 2008—2013 年降低,而在 2013—2018 年增加。CONTAG 先减少后增加表明研究区景观斑块在 2008—2013 年经历了空间分割,景观破碎化严重,2013—2018 年景观斑块又趋于集中分布。IJI 的变化趋势表明 2008—2018 年景观斑块聚集程度具有减弱的趋势。SHEI 与 SHDI 的变化趋势相类似表明景观复杂程度先升高后降低。2008—2013 年景观斑块多样性、复杂性和均匀性均有所增加,景观斑块类型的面积比例差异减弱,景观聚集性增加,而 2013—2018 年正好与此相反。

类型水平景观指标变化如图 5 所示。城镇绿地的 PD 值最大,未利用地以及林地的 PD 值较小,说明城镇绿地景观异质性与破碎度程度较高。耕地、城市遗存山体、林地的 AREA_MN 减少表明此三类景观斑块空间异质性和破碎化程度在研究期间逐渐降低,交通用地、建筑用地、未利用地的 AREA_MN 显著增加说明此三类景观斑块空间异质性和破碎化程度在研究期间逐渐增加。耕地、未利用地、建筑用地、城市遗存山体的 FRAC_AM 逐渐减少说明这几类景观斑块边界形状复杂性程度逐渐降低。LPI 变化趋势表明耕地、交通用地、建筑用地是研究区主导景观。交通用地 LPI 逐渐增加,建筑用地与耕地 LPI 逐渐减小,城镇绿地、林地和水体

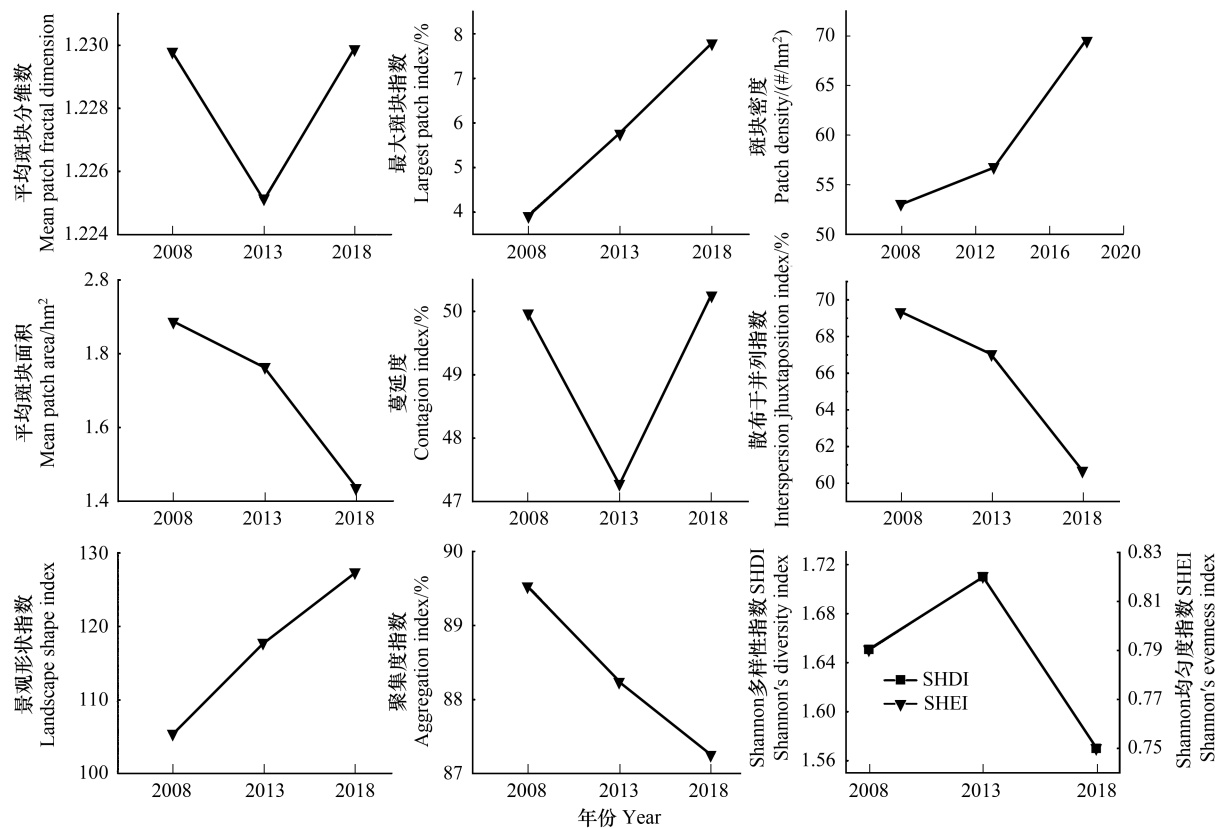


图 4 2008—2018 年贵阳建成区景观水平景观格局指数变化

Fig.4 Index variation of landscape pattern at landscape level in Guiyang built-up area from 2008 to 2018

LPI 变化趋势较为稳定。城市遗存山体的 IJI 值逐渐减小表明城市遗存山体与其他用地类型的邻接度在研究期间逐渐减弱。除交通用地与城镇绿地的 AI 在 67.18%—74.82%之间波动外,其他土地类型的 AI 均较处于较高水平,说明交通用地和城镇绿地的连通性与其他土地利用类型相比较低。

3.3 2008—2018 年生境质量时空演变规律

3.3.1 2008—2018 年生境质量变化

由表 4 和图 6 可知,研究区总体生境质量水平较低,2008—2018 年研究区平均生境质量分别为 0.267、0.201 和 0.177,呈逐渐下降趋势。低和较低水平生境质量面积总和超过了 50%。2008—2018 年低水平和较

表 4 贵阳建成区 2008—2018 年各水平生境质量面积

Table 4 Habitat quality area at each level in built-up area of Guiyang from 2008 to 2018

生境质量水平 Habitat quality level	自然断点法分类区间 Classification intervals of the natural breakpoint method	2008		2013		2018	
		km ²	%	km ²	%	km ²	%
低 Low	[0—0.2]	141.91	38.29	199.59	53.85	224.69	60.62
较低 Relatively low	(0.2—0.4]	124.33	33.54	65.97	17.80	49.46	13.34
适中 Moderate	(0.4—0.6]	54.38	14.67	58.40	15.76	47.14	12.72
较高 Comparatively high	(0.6—0.8]	17.94	4.84	17.71	4.78	32.68	8.82
高 High	(0.8—1.0]	32.08	8.65	28.97	7.82	16.67	4.50
最高生境质量 Maximum habitat quality		0.895		0.878		0.869	
平均生境质量 Average habitat quality		0.267		0.201		0.177	

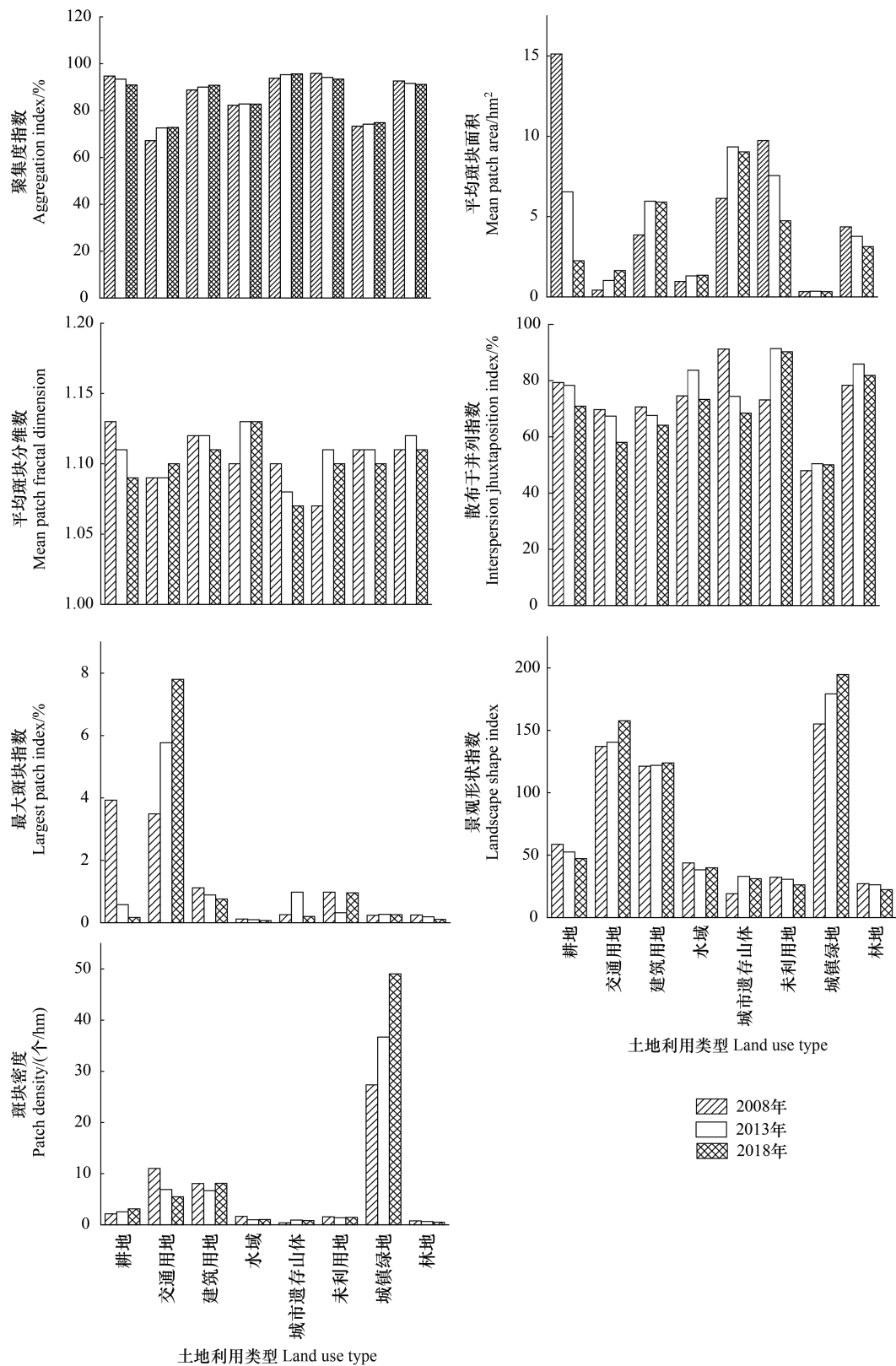


图5 2008—2018年贵阳建成区类型水平景观格局指数变化

Fig.5 Index variation of landscape pattern at class level in Guiyang built-up area from 2008 to 2018

高水平生境质量面积分别增加 82.72 km²、14.74 km², 其他水平生境质量面积减少。研究区生境质量在 2008—2018 年发生了剧烈变化, 低水平生境质量面积占比从 2008 的 38.29% 增加到 2018 年的 60.32%。适中水平、高水平生境质量面积占比分别下降 1.95%、4.15%。较高水平生境质量面积占比增加 3.98%。2008—2013 年低水平生境质量面积显著增加, 较低水平生境质量面积显著减少。2013—2018 年除低和较高水平生境质量面积增加外其他水平生境质量面积逐渐降低, 其中较高水平生境质量面积占比增加 4.04%, 这与 2016 年贵阳市发布城市遗存山体相关保护文件有关。

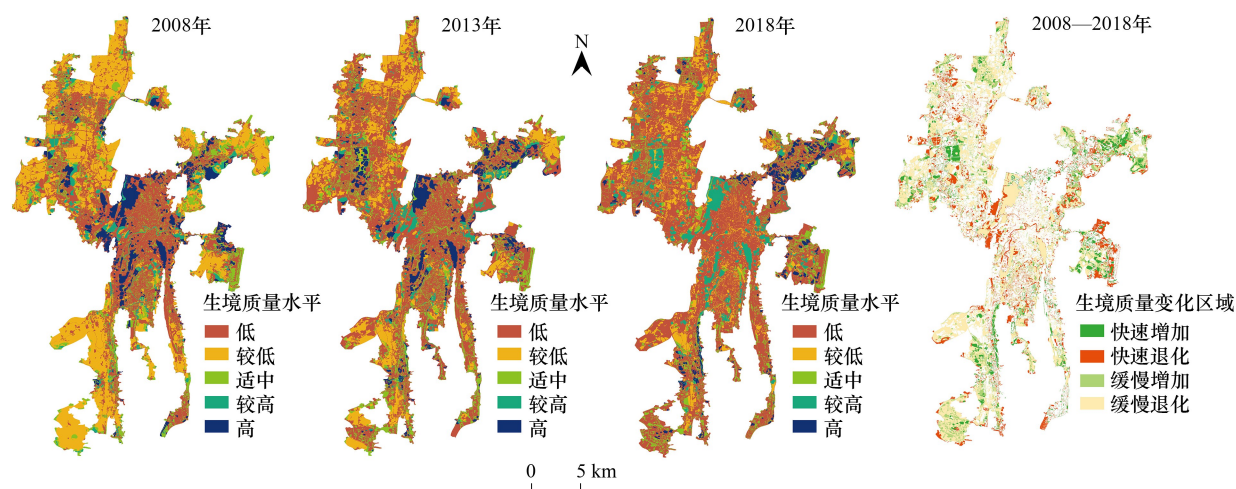


图 6 不同时间节点贵阳建成区 InVEST 模型生境质量评估与时空变化

Fig.6 Habitat quality assessment and spatio-temporal variation of InVEST model in built-up area of Guiyang at different time points

3.3.2 生境质量空间格局变化

由图 6 可知研究区生境质量空间聚集效应显著, 生境质量分布范围具有边缘效应。高水平生境质量区主要集中在高海拔和建筑密度较低的区域, 其中城市遗存山体以及林地所在区域是主要聚集区。高植被覆盖、相对高海拔使这些地区人为干扰较低, 生境质量较好。适中生境质量主要集中在花溪区、南明区、乌当区等区域, 且大多用地类型以城镇绿地和被建筑用地所包围的城市遗存山体为主, 随机性分布较为明显。低水平生境质量聚集区以中心城区为主, 并在空间分布上呈现强烈的空间聚集效应, 可见城市致密化过程加剧了城市生境的退化和丧失。2008、2013 和 2018 年全球莫兰指数分别为 0.476、0.431、0.425, (P 值等于 0, Z 得分大于 2.58), 说明研究区生境质量在 2008—2018 年具有显著的空间聚集效应。全局莫兰指数在研究期间有一定程度的下降, 表明生境质量空间聚集效应正在逐渐减弱。

由图 7 可知, 研究区生境质量空间聚集效应显著。2008—2018 年生境质量冷热点空间分布格局发生了剧烈变化, 其中乌当区、花溪区以热点区增加为主, 而白云区以冷点区增加为主。分析贵阳市相关规划文件可知, 乌当区和花溪区生境质量热点分布区增加与退耕还林、城市公园的建设和城市遗存山体保护工作密切相关。白云区冷点区增加是因为该地区为工业区, 存在大量的工厂。观山湖公园、十里河滩湿地公园、黔灵山公园、乌当区新添公园、贵阳森林公园、贵阳药用植物园等城市公园所在区生境质量较为稳定, 研究期间一直处于热点区。这从另一个角度说明了大面积城市公园的建设可以提高城市生境质量。

3.4 生境质量演变与土地利用变化响应关系

由表 5 可知地理加权回归模型检验 R^2 调整前后均高于 0.75, 模型拟合效果较好。图 8 土地利用变化与生境质量演变回归系数空间分布表明。城镇绿地变化与生境质量演变总体呈正相关, 回归系数为正的区域的面积占比 70% 左右, 主要集中在快速城市化区域, 土地利用以城市建筑用地、耕地、城市遗存山体等转化为城镇绿地为主。回归系数为负的区域在整个研究区都有分布, 主要表现为城镇绿地转为建筑用地和交通用地。城

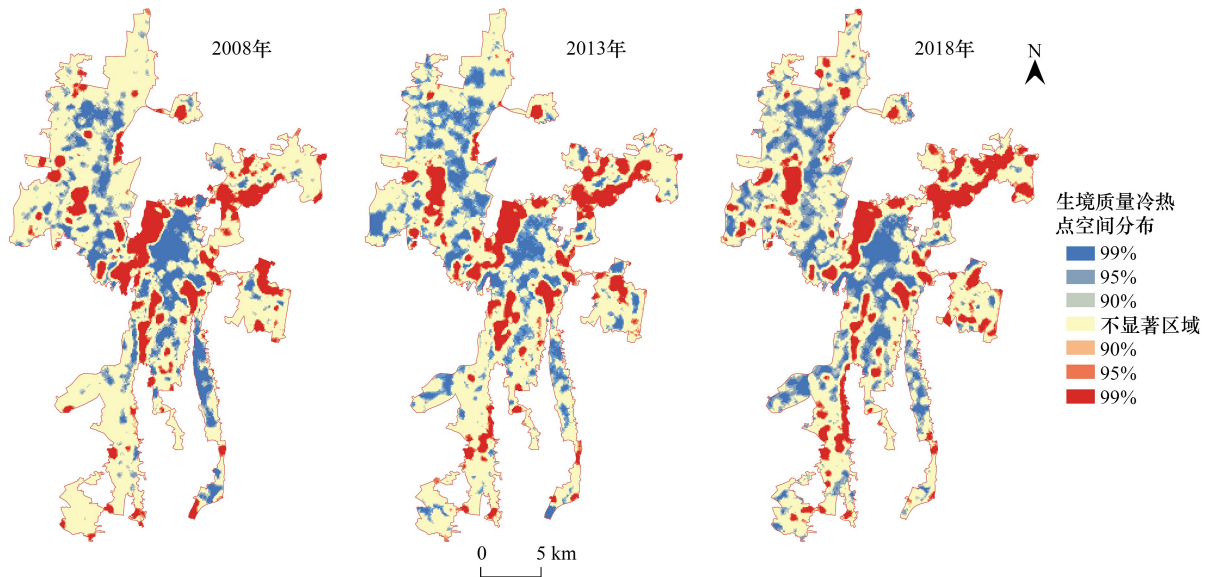


图7 贵阳建成区生境质量冷热点分析

Fig.7 Analysis of cold and hot spots of habitat quality in built-up area of Guiyang

红色为热点区域、蓝色为冷点区域、黄色为不显著区域

市遗存山体变化与生境质量演变呈正相关区域分布明显,主要集中于观山湖区、花溪区和乌当区。结合图3可知回归系数为正的区域在2008—2018年有大量城市遗存山体改造为城市山体公园,部分城市遗存山体退耕还林,这说明城市遗存山体公园化利用对其生境质量的影响较低。回归系数为负的区域主要以云岩区、南明区和白云区为主,土地利用以城市遗存山体转化为建筑用地和交通用地为主。

表5 地理加权回归模型参数估计及检验结果

Table 5 Geographic weighted regression model parameter estimation and test results

时间 Time	带宽 Bandwidth	残差平方 Residual squares	有效值 Effective number	Sigma	AICc	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2
2008—2018 年	391.5317	290275156346.7486	2336.4304	5962.6359	213633.9603	0.8290	0.7801

2008—2018年林地与生境质量演变呈正相关区土地利用变化主要以林地转为城镇绿地为主。呈负相关区主要集中在观山湖、云岩区北部和乌当区,土地利用变化表现为林地转为建设用地、交通用地、未利用地。耕地与生境质量演变成正相关区土地利用变化表现为耕地转换为林地或者城市遗存山体。回归系数呈负相关区表现为耕地转化为建筑用地和交通用地。水体土地利用变化转为城镇绿地地区与生境质量演变呈正相关,呈负相关区表现为水体转为建筑用地和交通用地。未利用地土地利用变化与生境质量演变呈正相关区主要分布在研究区边缘地带,主要转为城镇绿地,呈负相关区主要集中于花溪区南部以及中心城区,主要转为建筑用地。建筑用地、交通用地土地利用变化与生境质量演变总体呈负相关,在整个研究区都有分布。

4 讨论

4.1 多山城市土地利用变化对城市生境的影响具有空间异质性

生境质量的空间分布反映了人类活动和自然因素是影响生境质量空间分布的重要原因,这与 Yohannes 等学者的研究结果一致^[36]。建筑用地、交通用地、耕地、未利用地等生境适宜性较低的土地利用类变化对生境质量演变的负向效应显著。城镇绿地、水体、林地等生境适宜性较高的土地利用面积变化对生境质量变化的正向效应显著,这与其他学者在河北太行山、吉林长春、粤港澳大湾区等地区的研究相似^[10,16,20]。贵阳市

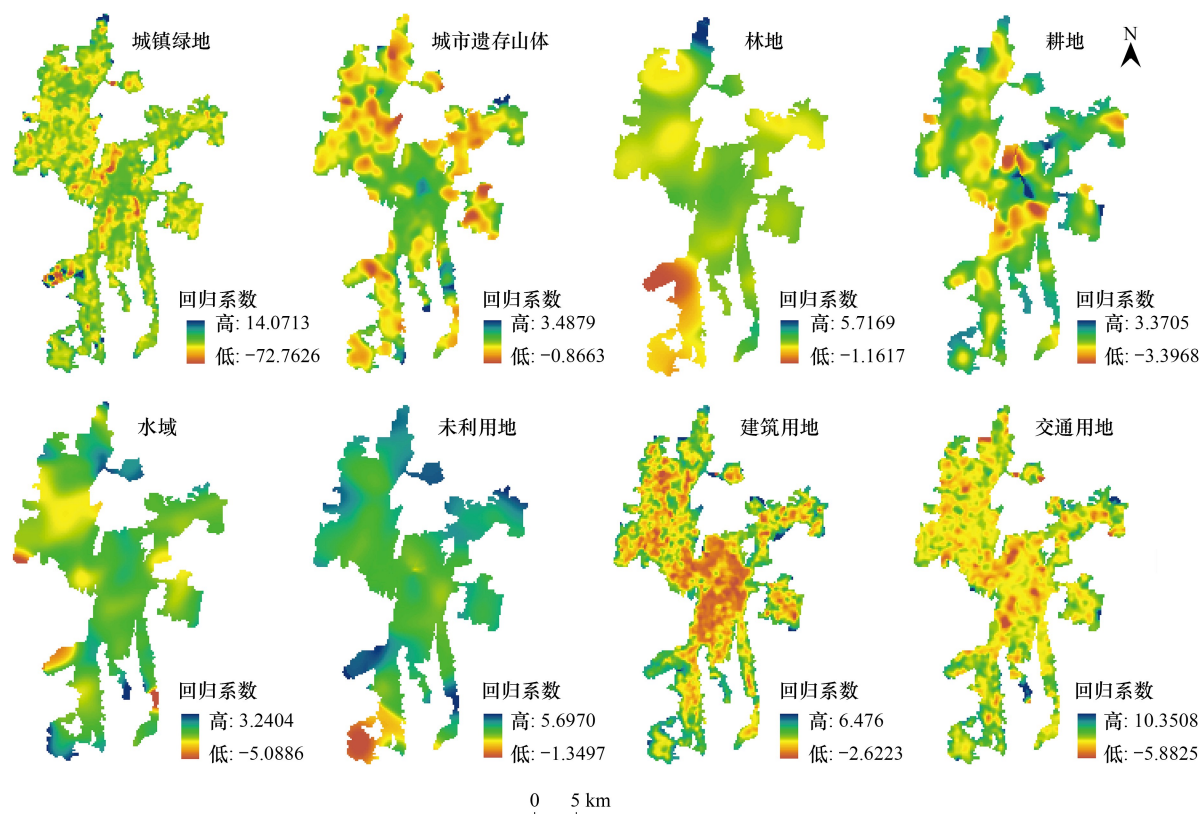


图 8 2008—2018 年贵阳建成区土地利用变化与生境质量变化地理加权回归回归系数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of geographically weighted regression coefficients of land use change and habitat quality variation in built-up area of Guiyang from 2008 to 2018

地处黔中岩溶地区腹地,遗存于建成区内部的喀斯特山体资源丰富,随着城市化进程形成了典型的“城在山间,山在城中”的独特的城市景观格局^[37],土地利用变化相比较于其他地区城市更为复杂,景观斑块空间异质性较高^[32]。城市遗存山体的存在使其城市发展过程中建筑用地的空间分布较为分散,进而导致城市生境质量在空间分布上呈现点核分布特征。2008—2018 年贵阳市中心城区建筑用地面积逐渐增加,呈现水漫式扩大的“蔓延”格局,建筑用地以渗透化的方式蚕食城市遗存山体,导致城市遗存山体的生境质量有所降低。另外建筑用地的不断扩大对生境质量的影响主要表现为高水平生境质量区大面积的减少和空间割裂,自然景观斑块破碎化,降低了研究区生境质量斑块的连通性,进而导致多山城市生境质量具有较强的空间异质性^[38]。研究区高水平生境质量区主要分布在城市遗存山体和大面积城镇绿地所在区。低水平生境质量区主要分布在建筑用地、交通用地聚集区,这与 Xie 和 Bai 等学者在其他地区的研究结果相似^[6,10]。随着城市化进程加快、经济发展、人口聚增,人地矛盾日益突出,城市建设活动改变了原始物种栖息地的土地利用类型,形成了新的威胁源。在多山城市,自然生境斑块周边城市景观斑块被挤压和分割,导致区域生境质量水平持续下降,增强了生境质量的空间异质性^[39-40]。因此,多山城市在经济快速发展的同时,应该严格控制建筑用地的盲目扩张,改善城市内部自然景观斑块的空间格局分布状态,进而增强城市生境质量的景观连通性^[41]。

4.2 城市遗存山体是多山城市高水平生境质量的主要贡献源

以贵州高原为中心的中国南方岩溶地区,是世界上岩溶发育景观类型最典型、最复杂、最丰富的地区,也是面积最大、最集中的生态脆弱区^[42]。随着城市的扩张,大量自然山体以孤峰或者群峰的地貌形态存在于建成区的人工环境之中,形成了岛屿或类似于岛屿的自然和半自然残存生境^[37]。与城市中其他人工自然环境不同,城市遗存山体作为喀斯特地区独有的景观类型,具有丰富的植被资源和独特的特征形态^[43]。研究区生

境质量较高区大多为城市遗存山体所在区域,随着研究区土地利用变化的影响城市遗存山体生境质量有所退化,但是总体处于较高水平(图9),从城市遗存山体生境质量时空分布来看,城市遗存山体高水平生境质量退化迹象明显,同时城市遗存山体生境质量具有一定的边缘效应,通过分析城市遗存山体周边土地利用可知城市遗存山体周边城市基质环境的变化对城市遗存山体的生境质量具有较大影响。

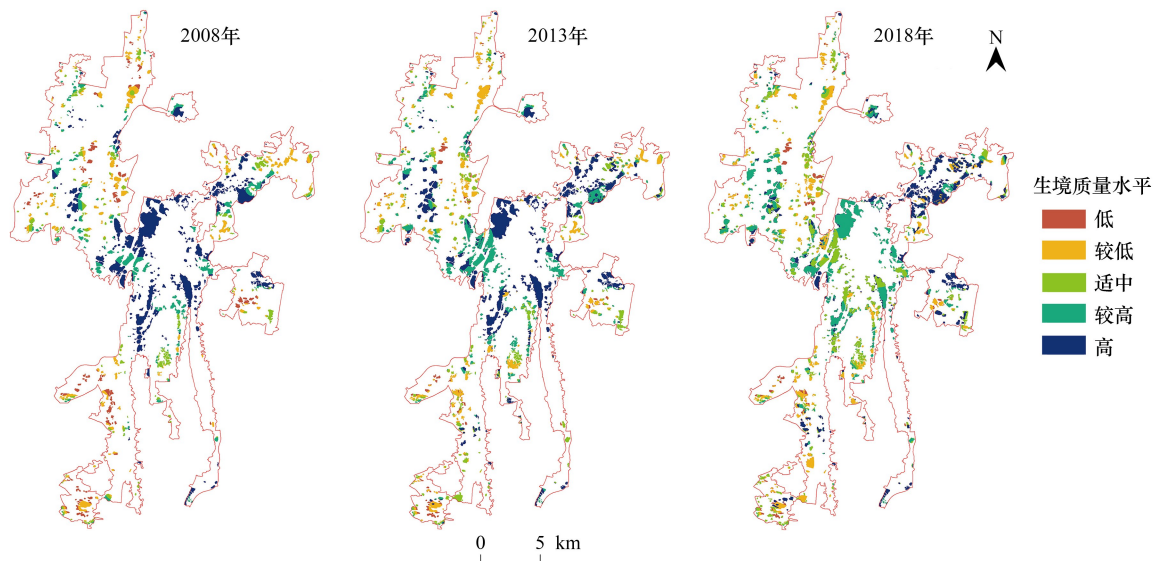


图9 2008—2018年贵阳建成区城市遗存山体生境质量时空分布格局

Fig.9 Spatio-temporal distribution pattern of URMs habitat quality in built-up area of Guiyang from 2008 to 2018

乔灌木覆盖率作为生境质量评估的重要基础,Kong等学者发现城市遗存山体植物物种多样性与城市空间形态之间的响应关系始于400 m,显著性主要体现在600 m^[44]。汤娜等学者发现自然状态下城市遗存山体植物物种多样性与公园化利用的城市遗存山体植物物种多样性之间差异性不大,但是自然状态下的城市遗存山体群落结构断层严重^[35]。其他学者研究发现城市遗存山体可以提供多种生态系统服务功能,特别是在缓解城市热岛效应、净化城市水环境、维持城市生物多样性等方面^[45—47],本研究也佐证了这一点。随着城市致密化程度的增加城市遗存山体大面积减少,加强城市遗存山体生态环境管理,如何妥善处理城市扩张与城市遗存山体之间的关系迫在眉睫。虽然相关政策制定者在2016年出台了城市遗存山体保护政策,但是在城市遗存山体的保护方面不应该只有城市遗存山体这一景观类型,而应在距离城市遗存山体合理位置通过布置人工绿地斑块来提高其抗干扰能力,进而提高城市遗存山体的生境水平,为城市高质量发展提供生态保障。

4.3 研究局限与展望

考虑到研究数据的局限性以及模型测定的准确性,本研究有一些不足之处需要进一步改进:(1)由于InVEST模型没有准确的参数设置以及标准的计算方法,本研究使用的相关参数根据InVEST模型操作手册、相关文献、专家经验进行设定,参数的设置可能会导致模型的评估结果出现偏差;(2)空间异质性是景观斑块空间斑块性和空间梯度的综合反映,过分依赖于空间尺度的选择,本研究以200 m×200 m网格进行提取分析,尺度大小有待进一步讨论。除此之外,本研究只进行了生境质量的计算,InVEST模型集成了多种生态系统服务评价模型,除生境质量模块外,如碳储量、水土保持等可用于分析贵阳市未来生态系统服务功能的综合变化^[16]。

由于城市遗存山体具有较高的生境质量,而植被覆盖率作为衡量生境质量高低的关键因素,我们建议在下一步的研究工作中,对城市遗存山体自然生境微观尺度进行研究。以自然生境为参考中心点,从中心点往城市用地方向设置样带。每隔一定距离(用半径 R 表示),测算空间形态结构指标,并用不同半径 R 点上的空间形态结构指标与中心点自然生境的物种多样性指数进行相关性分析。随着半径 R 增大,当城市空间形态

结构指标与植物物种多样性相关关系不再显著时,这时的 R 值则为山体周边 R 半径范围内用地性质改变对城市自然生境造成影响的空间阈值,最后绘制影响范围梯度图,以此为相关规划部门提供理论参考。

5 结论

本研究以喀斯特岩溶多山城市中国贵州省贵阳市为研究区,对土地利用变化与生境质量时空演变关系展开研究。研究区土地利用转移复杂,不同土地利用类型的景观格局表现不同的变化趋势,但是总体表现城市遗存山体和耕地减少,建设用地和交通用地增加的特征。多山城市生境质量空间聚集效应明显,生境质量空间分布格局呈现为岛屿状或者类岛屿状分布。2008—2018 年城市遗存山体是多山城市高水平生境质量主要贡献源,生境质量一直处于较高水平。同时,城市遗存山体受到其周边城市土地利用的直接或间接影响,生境质量呈现逐渐退化的趋势。城镇绿地、城市遗存山体、林地和水体土地利用变化与生境质量演变呈正相关,建筑用地、交通用地、耕地和未利用地土地利用变化与生境质量演变呈负相关。本研究预期的意义与目标基本达到,研究结果将为多山城市国土空间规划和城市生态保护提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Zhang X R, Song W, Lang Y Q, Feng X M, Yuan Q Z, Wang J T. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104957.
- [2] Müller A, Bøcher P K, Svenning J C. Where are the wilder parts of anthropogenic landscapes? A mapping case study for Denmark. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 144: 90-102.
- [3] Soga M, Gaston K J. Extinction of experience: the loss of human-nature interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(2): 94-101.
- [4] Ramalho C E, Laliberté E, Poot P, Hobbs R J. Complex effects of fragmentation on remnant woodland plant communities of a rapidly urbanizing biodiversity hotspot. *Ecology*, 2014, 95(9): 2466-2478.
- [5] Esbah H, Cook E A, Ewan J. Effects of increasing urbanization on the ecological integrity of open space preserves. *Environmental Management*, 2009, 43(5): 846-862.
- [6] Xu X, Xie Y J, Qi K, Luo Z K, Wang X R. Detecting the response of bird communities and biodiversity to habitat loss and fragmentation due to urbanization. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1561-1576.
- [7] Huang J L, Tang Z, Liu D F, He J H. Ecological response to urban development in a changing socio-economic and climate context: policy implications for balancing regional development and habitat conservation. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104772.
- [8] Fan F F, Wen X J, Feng Z M, Gao Y, Li W J. Optimizing urban ecological space based on the scenario of ecological security patterns: the case of central Wuhan, China. *Applied Geography*, 2022, 138: 102619.
- [9] Lin J Y, Huang J L, Prell C, Bryan B A. Changes in supply and demand mediate the effects of land-use change on freshwater ecosystem services flows. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143012.
- [10] Bai L, Xiu C L, Feng X H, Liu D Q. Influence of urbanization on regional habitat quality: a case study of Changchun City. *Habitat International*, 2019, 93(1): 102042.
- [11] Yu W Y, Ji R P, Han X Z, Chen L, Feng R, Wu J W, Zhang Y S. Evaluation of the biodiversity conservation function in Liaohe delta wetland, northeastern China. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(4): 798-805.
- [12] 刘华, 蔡颖, 於梦秋, 龚蕾婷, 安树青. 太湖流域宜兴片河流生境质量评价. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1288-1295.
- [13] Yu W, Wen J, Chen X J, Gong Y, Liu B L. Trans-Pacific multidecadal changes of habitat patterns of two squid species. *Fisheries Research*, 2021, 233: 105762.
- [14] 刘玮, 辛美丽, 周健, 詹冬梅, 丁刚, 吴海一. 基于生境适宜性指数模型的俚岛海黍子生境层级分布. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1061-1068.
- [15] Wang Y Y, Chao B X, Dong P, Zhang D, Yu W W, Hu W J, Ma Z Y, Chen G C, Liu Z H, Chen B. Simulating spatial change of mangrove habitat under the impact of coastal land use: coupling MaxEnt and Dyna-CLUE models. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147914.
- [16] Yang Y Y. Evolution of habitat quality and association with land-use changes in mountainous areas: a case study of the Taihang Mountains in Hebei Province, China. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107967.
- [17] 张红娟, 高艳, 华亚伟, 李言言, 张越, 刘康. SolVES 模型价值转移方法对不同空间尺度的响应评估. *生态学报*, 2019, 39(24): 9233-9245.
- [18] Li M Y, Zhou Y, Xiao P N, Tian Y, Huang H, Xiao L. Evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in northwest Hubei Province from 2000 to 2020 based on the InVEST model. *Land*, 2021, 10(8): 857.
- [19] Chen M J, Bai Z K, Wang Q R, Shi Z Y. Habitat quality effect and driving mechanism of land use transitions: a case study of Henan water source

- area of the middle route of the south-to-north water transfer project. *Land*, 2021, 10(8): 796.
- [20] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Estimating the characteristic spatiotemporal variation in habitat quality using the InVEST model—a case study from Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1008.
- [21] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 陈小花, 吴庭天, 李苑菱. 基于 InVEST 模型的海南岛三大流域生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2022, 33(09): 2511-2520.
- [22] 潘耀, 尹云鹤, 侯文娟, 韩皓爽. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特. *生态学报*, 2022, 42(19): 7978-7988.
- [23] 李亚楠, 多玲花, 张明. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测——以江西省南昌市为例. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 345-354.
- [24] 王志泰, 包玉, 王志杰. 城市遗存喀斯特自然山体资源及其公园化利用: 以黔中多山城市为例. 北京: 科学出版社, 2022.
- [25] 汤娜, 王志泰, 包玉, 陈信同, 马星宇, 韦光富. 城市基质对城市遗存自然山体植物群落物种多样性的影响——以贵阳市为例. *生态学报*, 2022, 42(15): 6320-6334.
- [26] Chen W X, Zeng J, Li N. Change in land-use structure due to urbanisation in China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128986.
- [27] 聂宇, 杨彦敏, 王一航, 刘志锋, 何春阳, 陈歆. 拉萨市城关区近 50 年城市扩展过程对自然生境质量的综合影响. *生态学报*, 2022, 42(6): 2202-2220.
- [28] 程鹏, 闵敏, 赵微, 赵可. 资源型城市生境质量空间分异格局及其影响机理研究——以唐山市为例. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(5): 636-649.
- [29] 高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 汪翔, 范业婷, 朱青, 吕立刚. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1001-1013.
- [30] Chu L, Zhang X R, Wang T W, Li Z X, Cai C F. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao=the Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [31] 景晓玮, 赵庆建. 基于 InVEST 模型的贵州省生境质量时空变化研究. *国土与自然资源研究*, 2021(5): 1-5.
- [32] 任梅, 包玉, 何立影. 喀斯特山地城市绿地景观格局研究——以安顺市为例. *山地农业生物学报*, 2018, 37(6): 54-62.
- [33] 王惠, 许月卿, 刘超, 黄安, 卢龙辉, 郑伟然. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(3): 509-518.
- [34] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, 74(368): 829-836.
- [35] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [36] Yohannes H, Soromessa T, Argaw M, Dewan A. Spatio-temporal changes in habitat quality and linkage with landscape characteristics in the Beressa watershed, Blue Nile Basin of Ethiopian Highlands. *Journal of Environmental Management*, 2021, 281: 111885.
- [37] 汤娜, 王志泰. 黔中城市喀斯特山体遗存植物群落公园化利用响应. *生态学报*, 2021, 41(8): 3033-3052.
- [38] Li W J, Wang Y, Xie S Y, Cheng X. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148311.
- [39] [Ding Q L, Chen Y, Bu L T, Ye Y M. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River Delta by coupling FLUS with InVEST model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): 2389.
- [40] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 马学成, 胡宝清. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. *地理科学*, 2018, 38(6): 979-986.
- [41] Tang Y H, Gao C, Wu X F. Urban ecological corridor network construction: an integration of the least cost path model and the InVEST model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(1): 33.
- [42] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
- [43] 向杏信, 王志泰, 范春苗, 邓国平. 喀斯特多山城市植物群落物种多样性空间分异特征——以安顺市为例. *西部林业科学*, 2021, 50(2): 56-61.
- [44] Kong N, Wang Z T. Response of plant diversity of urban remnant mountains to surrounding urban spatial morphology: a case study in Guiyang of Guizhou Province, China. *Urban Ecosystems*, 2022, 25(2): 437-452.
- [45] Yu D Y, Shi P J, Liu Y P, Xun B. Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area. *Ecological Engineering*, 2013, 53: 205-216.
- [46] Chen X T, Wang Z T, Bao Y. Cool Island effects of urban remnant natural mountains for cooling communities: a case study of Guiyang, China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 102983.
- [47] Brunbjerg A K, Hale J D, Bates A J, Fowler R E, Rosenfeld E J, Sadler J P. Can patterns of urban biodiversity be predicted using simple measures of green infrastructure? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 143-153.