

典型喀斯特山地城市镶嵌山体斑块格局时空变化特征

王志杰^{1,2}, 代磊¹, 周学霞¹, 胡嫦月¹, 苏嫒³

(1.贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025;

2.山地生态与农业生物工程协同创新中心, 贵阳 550025; 3.贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

摘 要:喀斯特山地城市镶嵌山体对生物多样性保护、生态系统健康稳定、生态系统服务具有重要的作用和功能。为探明喀斯特山地城市镶嵌山体斑块的时空变化,以典型喀斯特山地城市贵阳市中心城区为对象,运用 2000—2020 年 5 期高分辨率遥感影像,采用 GIS 空间分析、探索性空间数据模型、景观格局分析方法,从规模、形态和空间分布方面,分析了快速城市化背景下山体斑块格局的时空变化特征。结果表明:(1) 贵阳市中心城区山体斑块数量和面积分布广泛,但 20 年间山体斑块数量减少 30 座,面积减幅达 25.2%,表现出先切割打碎后吞并侵占的特征,其中大型山体规模持续减小,其他各类型山体数量和面积呈“先增后减”的变化趋势。(2) 山体斑块分维数接近 1,整体形状较为规则,2000—2020 年山体斑块形状指数增大近 1.12 倍,斑块形状总体呈现复杂化、破碎化的趋势;但大型、中大型山体斑块形状更加规则化,而其他类型山体斑块形状日趋复杂破碎。(3) 山体斑块具有极显著的空间聚集效应,最邻近指数介于 0.766 9~0.841 4,全局性空间聚类标准化 Z 值小于-2.58,以小面积山体斑块的聚集为主,分布具有明显的空间异质性。20 年间,空间聚集效应减弱,高密度区逐渐萎缩,低密度区不断扩散且呈集中连片趋势;并且山体斑块的潜在生态连通性水平持续降低。

关键词:格局变化;镶嵌山体斑块;探索性空间数据分析;潜在生态连通性;喀斯特山地城市

中图分类号:P968;S766;X24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0197-08

Spatiotemporal Characteristics of Patch Pattern of Mosaic Mountain in Typical Karst Mountainous Cities

WANG Zhijie^{1,2}, DAI Lei¹, ZHOU Xuexia¹, HU Changyue¹, SU Yuan³

(1.College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.Collaborative Innovation Center for Mountain Ecology & Agro-Bioengineering, Guiyang 550025, China; 3.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The mosaic mountain landscape in karst mountainous cities plays an important role in biodiversity protection, ecosystem health and stability, and ecosystem services. In order to reveal the spatiotemporal variation of mosaic mountain patches in karst mountainous cities, taking the central urban area of Guiyang City center as an example, we used the high-resolution remote sensing images from 2000 to 2020, and adopted GIS spatial analysis, exploratory spatial data model and landscape pattern analysis etc., to analyze the spatiotemporal characteristics of mosaic mountain patch pattern under the background of rapid urbanization from the aspects of scale, morphology and spatial distribution. The results show that: (1) the number and area of mountain patches widely distributed in the central urban area; In the past 20 years, the number and area of mountain patches had decreased by 30 and 25.2%, respectively, showing the characteristics of cutting and smashing first and then annexing and occupying; the area and quantity of large mountains decreased continuously, while the number and area of other types of mountains presented a change trend of ‘first increase and then decrease’; (2) the shape of mountain patches was relatively regular with the fractal dimension close to 1; from 2000 to 2020, the shape of mountain patches presented a trend of complexity and fragmentation. the shape index increased by 1.12 times; the shapes of large and medium-sized mountain patches tended to be

收稿日期:2021-05-30

修回日期:2021-06-04

资助项目:国家自然科学基金项目(42061039,41071319);贵州大学培育项目(贵大培育[2020]46);贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

第一作者:王志杰(1986—),男,甘肃会宁人,副教授,博士,研究方向:喀斯特山地区域与景观生态、山地生物多样性保护。E-mail:zjwang3@gzu.edu.cn

通信作者:苏嫒(1986—),女,陕西延安人,高级实验师,硕士,研究方向:喀斯特山地区域与景观生态。E-mail:ysu@gzu.edu.cn

more regular, while the other types of mountain patches were increasingly complex and fragmented; (3) the mountain patches had significant spatial aggregation effect with the average nearest neighbor ratio ranging from 0.766 9 to 0.841 4, and the Z value of Getis-Ord General less than -2.58 ; the aggregation of small mountain patches was dominant, and the distribution had obvious spatial heterogeneity; however, the spatial aggregation effect weakened, the high-density area gradually shrunk, and the low-density area continued to spread and showed a concentrated contiguous trend; and the potential ecological connectivity level of mountain landscape patches continued to decrease.

Keywords: pattern changes; mountain landscape patch; exploratory spatial data model; potential ecological connectivity; karst mountainous cities

我国西南岩溶地区城市内大量分布的喀斯特山体与城市建筑交织,形成独特的“城—山”镶嵌的喀斯特城市景观,星罗密布的镶嵌山体斑块既是喀斯特山地城市内重要的资源环境斑块和生态斑块,对城市生态系统健康和稳定、生物多样性维持和保护、生态系统服务具有重要的意义^[1-3];也是喀斯特山地城市扩张过程中不断包围进城、并持续破坏干扰形成的残存斑块,具有生态脆弱性强、生态风险高等特点^[4-5]。镶嵌山体既为喀斯特山地城市增添了独特的绿色生态本底,同时也在一定程度上限制着城市扩张建设的发展空间。近年来,随着城市化进程的不断加快,导致山体斑块的原生生境不断消失或“岛屿化”,破坏生物物种的栖息地,致使本地物种丢失或减少,生物多样性降低,对城市生态系统服务造成严重影响^[2,4]。而基于岛屿生物地理学理论的研究认为,生境面积越大越有利于植物多样性保护,生境面积是影响植物物种丰富度和多样性的主要因子^[6],大多数功能群与生境面积正相关,当生境斑块面积下降时,斑块内部生境丧失,造成植物多样性的下降,且定居能力小的物种在生境面积变小后更容易灭绝^[7-8]。因此,关于喀斯特城市镶嵌山体的生态保护和科学合理开发利用,一直是喀斯特山地城市发展与生态建设中需协调的重要命题。

已有学者针对喀斯特山地城市景观格局变化对山体斑块的影响^[5,9]、山体生物多样性时空格局变化^[2,4]、以及山体公园化利用等^[1,10]方面开展了部分研究,同时,也有学者将山体作为喀斯特城市绿地系统的一部分,通过对城市绿地景观格局的变化,探讨了山体(山体绿地)的景观变化特征^[11-12]。但总体上,对于喀斯特山体城市内镶嵌山体的相关研究依然十分薄弱。快速城市化和生态文明建设双重背景下,喀斯特山地城市镶嵌山体规模发生什么变化?形态特征及其时空分布状况如何?及其演变规律是什么?这些科学问题既是了解喀斯特山地城市生态家底的基础,也可为开展喀斯特山地城市生物多样性保护、生态安全网络格局构建、以及生态系统服务提升等相

关研究提供重要的数据支撑和科学依据,更是喀斯特山地城市协调发展与保护的关系,促进生态文明城市建设中破解“城—山”相关科学问题的首要任务。

基于此,本研究以贵阳市中心城区为研究对象,以城区内镶嵌喀斯特山体斑块为对象,运用 GIS 和遥感等空间信息技术,采用探索性空间数据分析、景观格局分析等方法,并借鉴图论算法理论,通过解译建立 2000—2020 年研究区山体斑块时空属性数据库,从山体斑块规模、形态、空间分布 3 个维度,分析在快速城市化背景下,贵阳市中心城区山体斑块格局近 20 a 时空动态变化特征,以期为喀斯特山地城市镶嵌山体的科学保护与合理开发利用、生物多样性维持与保育、生态廊道与生态安全网络构建提供重要的数据基础,为喀斯特山地城市新型城镇化与生态文明城市建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵阳市地处黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带。中心城区($26^{\circ}21'—26^{\circ}48' N, 106^{\circ}30'—107^{\circ}55' E$),国土面积约 $1\ 180\ km^2$ (图 1)。气候区划属亚热带季风湿润气候,年均气温 $15.3^{\circ}C$ 左右,年均降水量 $1\ 197\sim 1\ 248\ mm$ 。地形起伏大、地块破碎、切割纵深,喀斯特发育强烈,地表渗透性强,山地面积占 52.30% ,平均海拔 $1\ 100\ m$ 左右,土壤类型以黄壤为主^[13-14]。2004 年贵阳市被授予首个“国家森林城市”称号,2008 年被授予“国家园林城市”称号,境内喀斯特山体资源分布广泛,生态环境比较优势突出,有避暑之都之誉;据统计,2017 年贵阳市城镇化率达到 74.8% ,2018 年建成区绿化覆盖率 41.22% ,森林覆盖率 52.0% ^[15],生物多样性丰富,生物物种占全国的 70% 左右^[16]。近年来,贵阳市生态文明示范城市和大生态战略行动建设推进中,大力推进山体公园化开发利用,打造以“千园之城”为显著标志生态文明城市。但随着贵阳市社会经济的飞速发展,城市化进程加快,2005—2015 年城镇用地面积增加 181.37% ,城市

扩展强度达18.14%^[17],并且2010年之后,贵阳市城市化进程进入高速扩张阶段,扩增速度高达27.40 km²/a^[18],迫使大量的喀斯特山体被迫进城,城市镶嵌山体也不断被切割、破坏和蚕食^[2]。因此,本研究以贵阳市中心城区为对象具有很好的典型性和代表性。

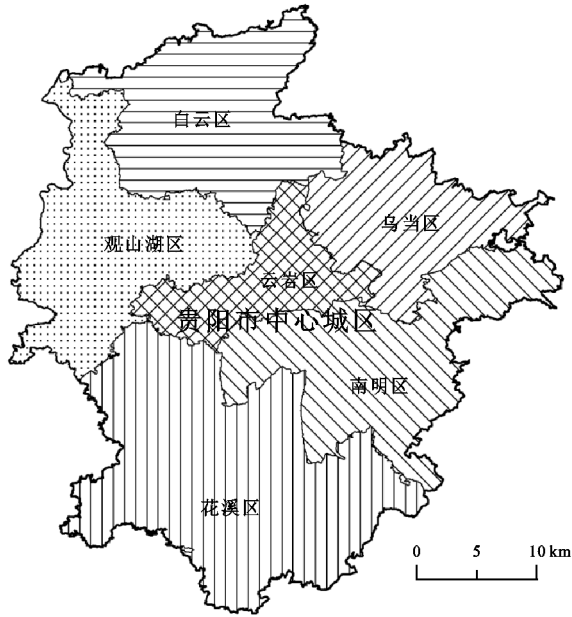


图1 研究区示意图

1.2 数据源

本研究以91卫图平台提供的贵阳市中心城区2000

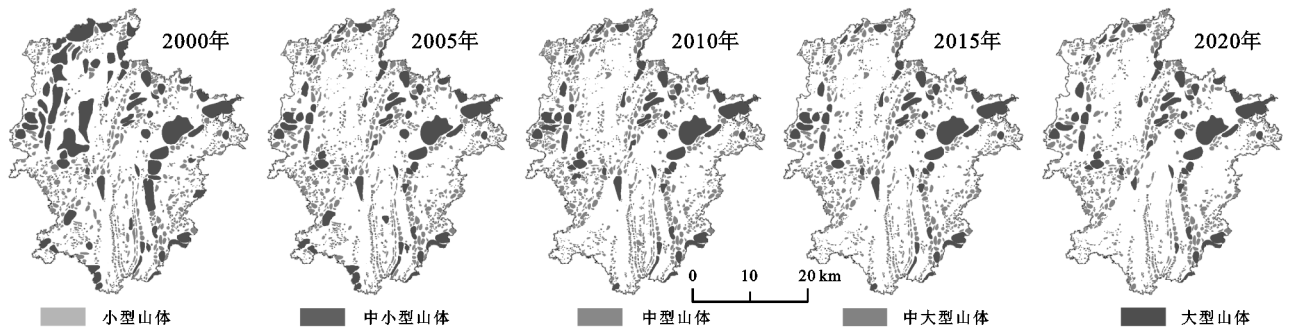


图2 2000—2020年不同规模山体斑块空间分布

1.3.2 山体斑块规模特征分析 依据贵阳市中心城区不同时期镶嵌山体时空属性数据库,基于ArcGIS 10.6软件平台,统计各山体斑块的数量和面积,采用山体斑块数量和斑块面积两个指标,分析2000—2020年贵阳市中心城区镶嵌山体斑块规模特征及其变化。

1.3.3 山体斑块形态特征分析 依据景观格局分析方法,选取斑块形状指数、分维数为山体斑块形态评价指标,基于Fragstats 4.2景观格局指数分析软件,提取不同时期不同山体斑块类型水平和景观水平上的相关景观格局指数,分析2000—2020年贵阳市中心城区镶嵌山体斑块形状特征及其变化。计算公式如下:

$$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \quad (1)$$

年、2005年、2010年、2015年和2020年等5期Google earth高分辨率遥感图像为主要数据源,空间分辨率为1 m×1 m,坐标系统统一重投影为CGCS 2 000投影坐标系统。辅助数据源包括研究区1:1万地形图、数字高程模型(空间分辨率为5 m×5 m)、行政区划边界等。

1.3 研究方法

1.3.1 山体斑块勾绘与分类 基于ArcGIS 10.6软件平台,对照Google Earth三维高分辨率遥感历史影像,结合研究区数字高程模型和1:1万地形图数据,运用目视解译方法,将研究区2000—2020年不同时期内镶嵌山体斑块空间矢量化,建立贵阳市中心城区镶嵌山体时空属性数据库,并通过野外实地调查,选取117座不同规模的山体,对山体斑块的位置及斑块边界解译精度进行验证,山体斑块的位置解译精度为100%,斑块边界勾绘精度达95%以上,满足本研究的精度要求。进而,借鉴相关学者在城市森林和城市绿地景观斑块特征研究中,对城市森林和绿地景观斑块大小分类的方法^[19-20],结合喀斯特山地城市镶嵌山体的实际情况,按不同山体规模大小,将贵阳市中心城区山体分为小型山体(≤1 hm²)、中小型山体(1~10 hm²)、中型山体(10~50 hm²)、中大型山体(50~100 hm²)和大型山体(>100 hm²)等5类(图2),分析不同规模山体斑块格局时空变化特征。

$$SHAPE = \frac{p_{ij}}{\min p_{ij}} \quad (2)$$

式中:FRAC为斑块分维度指数,无量纲,数值范围^[1-2],指数值趋近于1代表山体斑块形状越规则,值越大,斑块形状越复杂;SHAPE为斑块形状指数,无量纲,数值范围^{[1,∞)},指数值越大代表山体斑块形状越不规则; p_{ij} 代表第*j*类第*i*个山体斑块的周长(m); a_{ij} 代表第*j*类第*i*个山体斑块的面积(m²)。

1.3.4 山体斑块分布特征分析 采用最邻近指数(Average nearest neighbor ratio, ANN)、全局空间聚类检验(Getis-Ord General G)、核密度估计(Kernel density estimation, KDE)和山体斑块生态连通性分析等方法,分析不同时期镶嵌山体斑块的空间分布及

其动态变化特征。

平均最邻近指数的核心思想是通过测量每个斑块质心与其最邻近图斑质心位置的距离,计算所有最邻近距离的平均值,将其与假设随机分布的平均距离比较,判断山体斑块是否为聚集分布,并通过标准化 Z 值,比较观测平均距离和期望平均距离的差异与标准误差来检测二者聚集或分散的程度^[21-22]。计算公式如下:

$$ANN = \frac{D_o}{D_e} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{d_i}{n})}{\sqrt{n/A}/2} \quad (3)$$

$$Z = \frac{D_o - D_e}{SE} \quad (4)$$

式中: D_o 为每个山体斑块质心与其最邻近斑块质心的观测平均距离; D_e 为假设随机模式下山体斑块质心的期望平均距离; n 为山体斑块总数; d 为距离; A 为研究区面积。 $ANN < 1$, 说明山体斑块整体为聚集分布, 反之, 趋向于随机分布; Z 为平均最邻近指数的显著性统计量(标准化 Z 值), 在 0.05 的置信水平下 $|Z| = 1.96$, 当 $|Z| > 1.96$ 表示山体斑块呈显著聚集状态, 在 0.01 置信水平下 $|Z| = 2.58$, 当 $|Z| > 2.58$ 表示山体斑块具有极显著聚集效应; SE 表示山体斑块平均最邻近距离的方差。

全局空间聚类检验是从全局角度检测山体斑块的分布模式, 用以判断山体斑块是高值聚集还是低值聚集^[23]。计算公式为:

$$G(d) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_i x_j / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \quad (5)$$

$$Z(G) = [G(d) - E(G)] / \sqrt{\text{var}(G)} \quad (6)$$

式中: d 为距离(m); $w_{ij}(d)$ 为以距离规则定义的权重(山体斑块面积); x_i 和 x_j 分别是 i 和 j 区域的观测值; $G(d)$ 为观测值; $Z(G)$ 为观测值的标准化 Z 值; $E(G)$ 和 $\text{var}(G)$ 分别为 $G(d)$ 的期望值和方差。如 $G(d)$ 为正值, 且 $Z(G)$ 统计显著, 说明山体斑块存在空间聚集, 且为大面积山体族群; 如 $G(d)$ 为负值, 且 $Z(G)$ 统计显著, 说明山体斑块为小面积山体族群聚集。

核密度估计属于非参数密度估计的一种统计方法, 可根据输入的山体斑块数据集计算整个研究区的聚集状况, 所得到的连续表面能够表征研究区范围内山体斑块的密度分布特征^[21,24]。模型如下:

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n k(\frac{d_i}{h}) \quad (7)$$

式中: $f(x, y)$ 为位于 (x, y) 位置的密度估计; n 为观测数值, 即山体斑块数; h 为带宽或平滑参数; d_i 为 (x, y) 位置距离第 i 个山体斑块的距离, k 为核函数, 满足“距离衰减”效应。

山体斑块作为特殊的资源环境斑块, 在山体城市

生态系统中发挥着重要的物质循环、能量流动和信息传递的基本生态功能, 一般认为山体斑块越大, 斑块生态流的扩散距离越长, 而山体斑块越小, 斑块生态流的扩散距离越短。因此, 参考范敏等^[25]对于景观斑块面积对物种多样性影响的尺度依赖性和空间尺度效应, 结合喀斯特城市镶嵌山体格局与生物多样性相关研究^[4,9], 本研究假定维持小型山体斑块生态流的距离为 100 m, 中小型山体斑块为 200 m, 中型山体斑块为 300 m, 中大型山体斑块为 400 m, 大型山体斑块为 500 m。如果以不同规模的每一座山体斑块计算欧氏距离, 进而叠加成一组数据, 如所有山体斑块相应阈值的欧氏距离分布图斑相互交叠, 则最终的欧氏距离分布图斑为一个斑块, 此时则说明所有山体斑块潜在生态连接性为 100%; 如所有山体斑块相应阈值的欧氏距离分布图斑完全不交叠, 则最终的欧氏距离分布图斑数等于山体斑块数目, 此时则说明所有山体斑块潜在生态连接性为 0; 介于二者之间说明山体斑块有一定的潜在生态连接性, 图斑数越少, 连接性越大, 图斑数越多, 连接性越小。

$$NMConP = \text{Count} [\bigcup_{i=1}^n \text{Dis}_x(M_{ij})] \quad (8)$$

$$RMconP = NMConP/n \quad (9)$$

$$MMConP = \max [\text{Area}(MconP_k)] \quad (10)$$

式中: $NMConP$ 为潜在生态连通斑块数量, 取值范围 $[1, n]$, 值越小, 代表山体斑块的潜在连通性水平越高; M_{ij} 代表第 j 类的第 i 座山体斑块; $RMConP$ 为潜在生态连通性山体斑块占比; n 为山体斑块总数量; $MMConP$ 为最大潜在生态连通性图斑面积; $MconP_k$ 为第 k 个潜在生态连通性图斑。

2 结果与分析

2.1 山体斑块规模特征

统计分析不同时期不同规模山体的数量特征, 可以看出: 2000—2020 年, 贵阳市中心城区内镶嵌有大小不一、形态各异各类山体斑块数量达 1 275 ~ 1 657 座, 且以中小型山体和中型山体为主, 二者占山体总数的 84.4% ~ 86.6%, 其中: 中小型山体最多, 占各时期山体总数的 54.6% ~ 58.1%, 其次为中型山体, 占 28.5% ~ 30.4%。20 a 间, 山体斑块总数量的变化总体以 2010 年为界, 由 2000 年的 1 305 座“持续增多”至 2010 年的 1 657 座, 而后“持续减少”至 2020 年的 1 275 座, 总体减少 30 座。不同规模山体斑块数量的变化趋势不同, 2000—2010 年, 除大型山体外, 其他类型山体数量均呈现增多趋势; 2010—2020 年, 所有类型山体的数量均不同程度的减少(表 1)。

表 1 2000—2020 年不同规模山体斑块数量统计

年份	小型 山体	中小型 山体	中型 山体	中大型 山体	大型 山体	合计
2000	71	712	390	64	68	1305
2005	89	879	445	72	58	1543
2010	94	963	472	76	52	1657
2015	89	822	427	67	49	1454
2020	76	700	387	63	49	1275

山体斑块的面积变化方面(图 3),2000—2020 年,研究区山体斑块总面积呈持续减小的趋势,从 2000 年的 394.41 km²,减少至 2020 年的 294.84

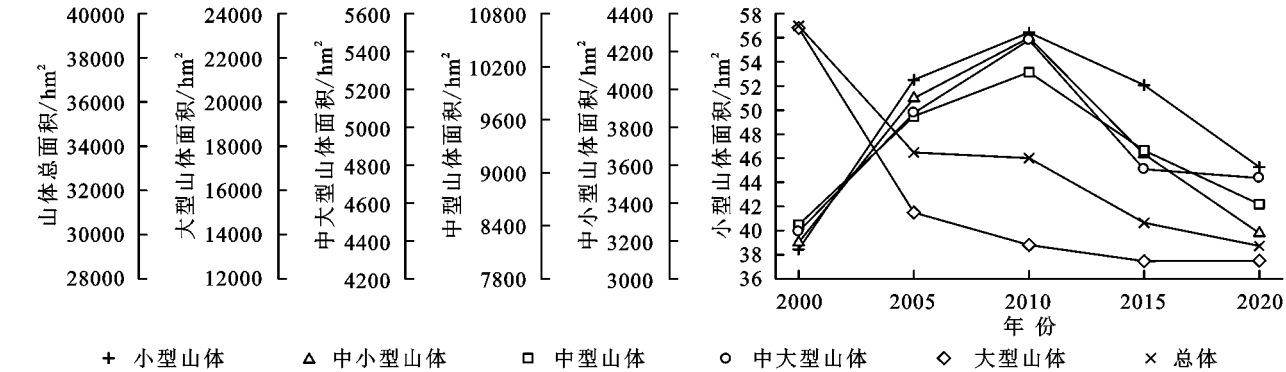


图 3 2000—2020 年不同规模山体斑块面积变化

2.2 山体斑块形态特征

分析不同山体斑块形状指数的变化,可以发现(表 2):同一年份不同类型山体斑块形状指数整体表现为大型山体>中大型山体或中型山体>中小型山体或小型山体的特征,说明小面积山体斑块形状更加规则,而大面积山体斑块形状相对复杂。同类型山体不同年份的山体斑块形状指数表现为:小型山体、中小型山体和中型山体斑块形状指数呈波动上升趋势,分

别从 2000 年的 1.243 6,1.222 1,1.281 0 增长为 2020 年的 1.262 7,1.242 0,1.287 4,而中大型山体和大型山体斑块形状指数呈现“升—降—升”但总体下降的趋势。总体而言,山体斑块形状指数的总体变化特征表现出“V”型变化趋势,2000—2010 年山体斑块形状指数持续减小,之后急剧增大,至 2020 年达到最大值,为 2.579 3,比研究初期增大近 1.12 倍,说明近 20 a 间贵阳市中心城区山体斑块形状总体上趋于复杂化。

别从 2000 年的 1.243 6,1.222 1,1.281 0 增长为 2020 年的 1.262 7,1.242 0,1.287 4,而中大型山体和大型山体斑块形状指数呈现“升—降—升”但总体下降的趋势。总体而言,山体斑块形状指数的总体变化特征表现出“V”型变化趋势,2000—2010 年山体斑块形状指数持续减小,之后急剧增大,至 2020 年达到最大值,为 2.579 3,比研究初期增大近 1.12 倍,说明近 20 a 间贵阳市中心城区山体斑块形状总体上趋于复杂化。

表 2 2000—2020 年山体斑块形状变化

景观格局指数	年份	小型山体	中小型山体	中型山体	中大型山体	大型山体	中心城区总体
斑块分维数 (FRAC)	2000	1.0543	1.0385	1.0401	1.0376	1.0438	1.0625
	2005	1.0509	1.0406	1.0422	1.0407	1.0446	1.0628
	2010	1.0542	1.0403	1.0430	1.0398	1.0461	1.0616
	2015	1.0523	1.0396	1.0393	1.0339	1.0422	1.0624
	2020	1.0568	1.0410	1.0410	1.0346	1.0437	1.0700
斑块形状指数 (SHAPE)	2000	1.2436	1.2221	1.2810	1.2954	1.3946	2.2945
	2005	1.2283	1.2361	1.2986	1.3318	1.4008	2.2427
	2010	1.2491	1.2339	1.3036	1.3189	1.4211	2.1777
	2015	1.2361	1.2299	1.2741	1.2611	1.3815	2.2807
	2020	1.2627	1.2420	1.2874	1.2678	1.3925	2.5793

从山体斑块分维数来看(表 2),不同类型山体斑块分维数介于 1.033 9~1.056 8,中心城区总体山体斑块分维数介于 1.061 6~1.07,斑块分维数均接近于 1,山体斑块形状整体较为规则,接近于简单的几何形状。2000—2020 年小型山体斑块分维数表现出

“降—升—降—升”的“W”型波动变化趋势,其他各类型山体斑块分维数均表现出“升—降—升”的“N”型波动变化趋势,与斑块形状指数的变化规律相似。小型山体、中小型山体和中型山体斑块分维数在 20 a 间表现出上升的趋势,由 2000 年的 1.054 3,1.038 5,

1.040 1,分别增大至 2020 年的 1.056 8,1.041 0,1.041 0,说明近 20 a 间,较小面积山体斑块的形状趋于复杂化;而中大型山体和大型山体斑块分维数在研究时段内总体表现出小幅下降的趋势,斑块形状趋于规则化的特征。总体而言,研究区山体斑块分维数在 2000—2020 年期间呈现波动增加的趋势,进一步说明贵阳市中心城区山体斑块形状受人类活动的不断干扰,更加复杂化和不规则化。

2.3 山体斑块分布特征

利用 ArcGIS 10.6 软件的 Nearing 工具,计算贵阳市中心城区不同时期山体斑块的最邻近距离指数(ANN),可以看出(表 3):2000—2020 年,贵阳市中心城区山体斑块的 ANN 指数介于 0.766 9~0.841 4,均小于 1,表明山体斑块的空间分布均存在聚集效应,并且标准化 Z 值均小于-2.58,说明在 0.01 的显著性水平下,近 20 a 间贵阳市中心城区山体斑块空间分布的聚集效应极为明显($p<0.01$)。对比不同年份的 ANN 值发现,2000—2005 年,ANN 值略有上升,表明这一时期山体斑块的聚集化程度有所加强,而 2005 年之后,ANN 值持续减小,山体斑块的聚集化态势不断减弱,至 2020 年达到最小,为 0.766 9,山体斑块聚集程度最弱。

表 3 平均最邻近指数统计

年份	观测平均 距离/m	期望平均 距离/m	最邻近 指数 ANN	标准化 Z 值	p 值
2000	494.96	600.92	0.8237	-12.186	0.0000
2005	464.95	552.62	0.8414	-11.921	0.0000
2010	447.49	532.22	0.8408	-12.397	0.0000
2015	467.16	569.23	0.8207	-13.081	0.0000
2020	466.16	607.82	0.7669	-15.921	0.0000

从不同时期山体斑块的全局性空间聚类分析(Getis-Ord General G)结果也可以看出(表 4):20 a 间,贵阳市中心城区山体斑块全局性空间聚类分析的标准化 Z 值介于-4.16~-3.76,均小于-2.58($p<0.01$),进一步说明山体斑块具有极显著的聚集效应;

表 5 2000—2020 年山体斑块不同核密度等级面积比例

核密度等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低密度	223.30	18.92	208.41	17.66	187.17	15.86	272.67	23.10	372.55	31.56
中密度	700.73	59.37	600.54	50.87	591.22	50.09	644.62	54.61	594.12	50.33
中高密度	254.50	21.56	349.07	29.57	349.24	29.59	256.72	21.75	206.77	17.52
高密度	1.85	0.16	22.41	1.90	52.79	4.47	6.40	0.54	7.02	0.59
合计	1180.38	100.00	1180.42	100.00	1180.42	100.00	1180.42	100.00	1180.47	100.00

通过不同规模山体不同欧式距离阈值的潜在生态连通性分析,可以看出(图 5):2000—2020 年,贵阳市中心城区山体斑块的潜在生态连通图斑数

并且观测值均小于期望值,表明山体斑块的空间分布聚集具有低值聚集特征,即以小面积山体聚集为主。

表 4 全局性空间聚类检验分析

年份	观测值	期望值	标准化 Z 值	p 值
2000	0.000006	0.000017	-4.158	0.0000
2005	0.000006	0.000014	-4.088	0.0000
2010	0.000007	0.000014	-4.067	0.0000
2015	0.000007	0.000015	-3.804	0.0001
2020	0.000008	0.000017	-3.760	0.0002

利用 ArcGIS 10.6 软件的 Kernel Density 工具对贵阳市中心城区不同时期山体斑块进行核密度分析,运用等间距法,对各时期山体斑块核密度空间分布图进行分级处理,统计分析不同核密度等级的山体斑块空间分布格局变化特征,可以看出(表 5,图 4):2000—2020 年研究区山体斑块核密度平均值介于 1.378 4~1.713 5 座/km²,以 2010 年为界,呈先增后减的趋势,其中,2010 年山体斑块核密度平均值最大,为 1.713 5 座/km²,2020 年仅为 1.378 4 座/km²,比研究初期 2000 年核密度平均值(1.526 6 座/km²)减小近 1.1 倍。山体斑块核密度空间分布呈“多核分布、高密度边缘分布”的格局特征,研究区北部、西南部、南部、东部和东北部各有一个高值分布区,东北—西南向形成 2 条山体斑块核密度高值分布带,与北部核密度高值区交叉形成 2 个核密度低值分布片区(建设用地的主要分布区)。总体上,山体斑块核密度空间分布反映出“高密度山体斑块环绕、低密度山体斑块镶嵌”的景观格局,2000—2010 年,随着研究区城市化发展对大面积山体的不断切割,这一时期山体斑块的中高密度和高密度分布区面积不断扩大,二者面积比例由 2000 年的 21.72%,增至 2010 年的 34.06%;2010—2020 年,由于大面积山体切割程度减弱,但城市建设对小面积山体的蚕食和侵占加剧,山体斑块的高密度和中高密度区面积比例呈持续减小,至 2020 年,二者面积比例仅占 18.01%;与之对应地,低密度区面积比例自 2010 年之后持续增大,至 2020 年达到 31.56%,且表现出连片发展的趋势。

(NMConP)呈波动增多趋势,2000 年仅为 35 个,2020 年增至 62 个,增加近 2 倍;单位数量潜在生态连通图斑指数(RMConP)表现出持续增大的特征,

2000 年为 0.026 8 年、2020 年增至 0.048 6,增幅达 81.34%;而最大潜在生态连通图斑面积(MMConP)则表现为持续减小的特征,2000 年达 924.79 km²,至 2020 年减小约 251.56 km²,仅为 673.23 km²,这说明

近 20 a 间由于城市化发展和人类活动的强烈干扰,随着大面积山体不断被割裂,小面积山体不断被蚕食,研究区山体斑块的生态距离持续变大,山体斑块间生态流阻力增加,潜在生态连通性水平不断降低。

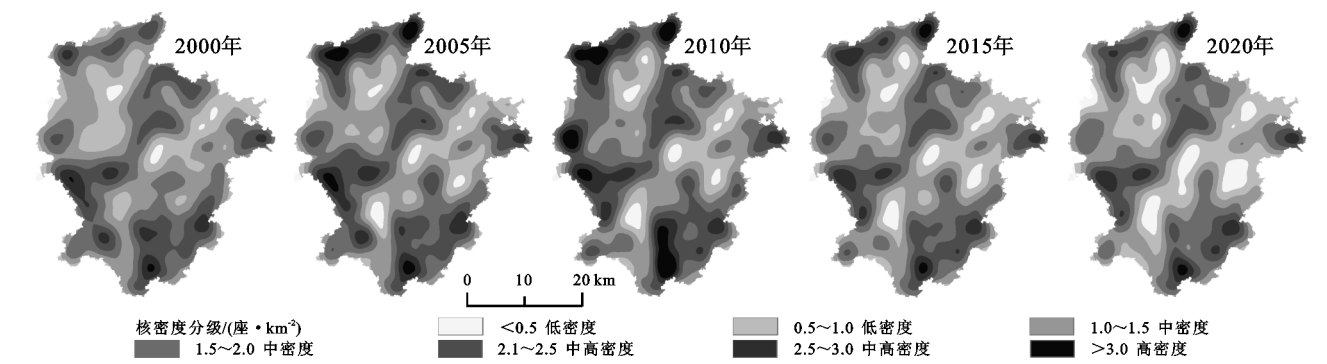


图 4 2000—2020 年山体斑块核密度等级空间分布

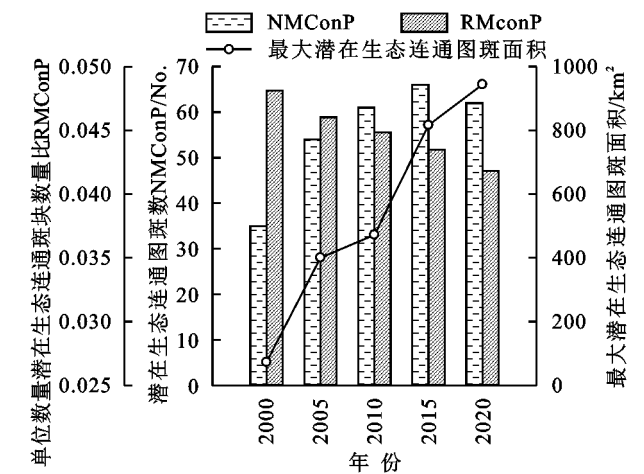


图 5 2000—2020 年山体斑块潜在生态连通性

3 结论

(1) 贵阳市中心城区镶嵌山体斑块数量和面积分布广泛,但随着城市化进程的不断加快,2000—2020 年,山体斑块的数量和面积明显减少,其中大型山体斑块面积和数量呈持续减少的趋势,其他各类型山体斑块数量和面积,以 2010 年为界,呈“先增后减”的变化趋势。

(2) 受长期城市化过程的影响,研究区内山体斑块的形状整体上较为规则,但研究时段内表现出复杂化、破碎化的趋势,不同类型山体斑块形状变化趋势不同,大型、中大型山体斑块形状更加趋于规则化,而面积相对较小的其他类型山体斑块形状日趋复杂破碎。

(3) 贵阳市中心城区山体斑块具有极显著的空间聚集效应,且以小面积山体斑块的聚集为主,空间分布具有明显的空间异质性。高密度山体主要分布在城区周边,对人口密集的中心城区形成环抱之势。但随着山体斑块被不断切割、破坏、吞并、侵占,其空间聚集效应

减弱,高密度区面积分布逐渐萎缩,低密度区分布不断扩散且呈集中连片趋势;并且山体斑块的潜在生态连通性水平持续降低。形成“城外大山头、城边小山聚、城内山渐失、望山山远离”的格局和发展趋势。

总体而言,2000—2020 年贵阳市中心城区内大量分布的喀斯特山体斑块在规模、形状和空间分布等方面均表现出退化趋势,对城市生物多样性保护和维持、生态系统健康和稳定、生态系统服务提升和提质造成严重威胁,今后,须深刻认识到山体斑块对喀斯特山地城市的重要生态和景观作用与功能,科学协调快速城市化发展与山体生态保护的关系,尽可能减少对山体斑块的不合理干扰和破坏,加强山体斑块的生态连通性水平,完善以山体斑块为主要生态斑块和生态结点的生态廊道构建,筑牢喀斯特山地城市绿色生态屏障,为喀斯特山地城市生物多样性保护与维持、生态系统服务提升的生态文明建设提供保障。

参考文献:

[1] 张远,王志泰.岩溶地区山地城市山体绿地资源公园化利用初探:以黔中城市为例[J].山地农业生物学报, 2016,35(4):30-35.

[2] 曾雨静.山地城市生物多样性保护规划策略研究[D].贵阳:贵州大学,2018.

[3] 王剑强,王志泰.基于缓解热岛效应的山地城市生态斑块研究:以贵州省贞丰县为例[J].西北林学院学报, 2014,29(2):232-236.

[4] 李睿.黔中山地城市植物物种多样性空间格局研究[D].贵阳:贵州大学,2019.

[5] 李睿,王志泰,包玉.快速城市化背景下黔中多山城市扩展模式及景观格局动态:以安顺市为例[J].水土保持研究, 2020,27(4):376-384,391.

[6] Shaffer M L. minimum population sizes for species con-

- ervation[J]. Bioscience, 1981, 31(2): 131-134.
- [7] Bruun H H. Patterns of species richness in dry grass-land patches in an agricultural landscape[J]. Ecography, 2000, 23(6): 641-650.
- [8] 高俊峰, 马克明, 冯宗炜. 景观组成、结构和梯度格局对植物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1087-1094.
- [9] 任梅. 基于景观生态分析的山地城市绿地格局研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [10] 张瑾琿, 王志泰, 邢龙. 基于空间分析法的喀斯特山体公园空间承载力及提升策略: 以黔灵山公园为例[J]. 中国园林, 2020, 36(3): 120-125.
- [11] 丁妮, 吕徐. 喀斯特山地城市绿地景观格局分析[J]. 北方园艺, 2020(3): 85-92.
- [12] 伍斌, 王志杰, 潘远珍. 基于 GIS 的安顺市景观格局空间梯度分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 214-223.
- [13] 姚岚, 吴次芳, 陆张维. 喀斯特地区城镇化质量与土地利用系统健康协同演化关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 768-778.
- [14] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [15] 李雪冬, 杨广斌, 周越, 等. 基于 3S 技术的岩溶地区城市景观生态安全评价: 以贵阳市为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 340-348.
- [16] 林丽平. 喀斯特贵阳市森林物种多样性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [17] 韩会庆, 王喆, 张英佳, 等. 2005—2015 年贵阳市生境退化程度对土地利用变化的响应[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 185-191.
- [18] 刘玺, 何守阳, 刘贝贝. 岩溶山区城镇化进程的土地利用景观格局演变特征: 以贵阳市为例[J]. 地球与环境, 2019, 47(4): 527-536.
- [19] 佟济宏. 北京市主城区城市森林空间分布及结构特征分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [20] 李洋. 重庆市主城区城市森林分类及特征分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [21] 冯佰香, 李加林, 何改丽, 等. 农村居民点时空变化特征及驱动力分析: 以宁波市北仑区为例[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 523-533.
- [22] 姜广辉, 何新, 马雯秋, 等. 基于空间自相关的农村居民点空间格局演变及其分区[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 265-273.
- [23] 陈宗峰, 李裕瑞, 刘彦随. 黄土丘陵沟壑区乡村聚落分布格局特征与类型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 266-274, 316.
- [24] 马林兵, 魏慧丽, 曹小曙. 基于 FCD 数据的城市有效路网密度评价: 以广州荔湾区和越秀区为例[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 541-554.
- [25] 范敏, 彭羽, 王庆慧, 等. 景观格局与植物多样性的关系及其空间尺度效应: 以浑善达克沙地为例[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2450-2461.

(上接第 196 页)

- [23] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [24] 许静. 不同试验方法测定田间持水量的对比研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] 水利部. 土工试验方法标准[S]. GB/T50123-2019, 2019.
- [26] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media; Manual Version 4.17[Z]. Riverside, CA, USA: Univeristy of California, 2013.
- [27] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles-ScienceDirect[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [28] 吴辰, 郝振纯, 鲁承阳, 等. 五道沟地区土壤水分动态变化规律及模拟研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 138-142.
- [29] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[M]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [30] 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球 1.5°C 增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.
- [31] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC 及气候变化对龙川江流域径流的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 7-15.
- [32] 班春广, 徐宗学, 苟娇娇, 等. 1973—2015 年年楚河上游流域径流变化趋势及驱动因素分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2019, 55(6): 748-754.
- [33] 罗宇, 穆兴民, 高鹏, 等. 延河流域潜在蒸散发时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 306-313.