

基于生物多样性认知与评估的丽江市古城区城乡绿色空间规划策略研究

Urban-rural Green Space Planning Strategies Based on Biodiversity Cognition and Assessment: A Case Study of Lijiang Gucheng Area

李雯萱 王燚 罗聘杰 宋钰红*

LI Wenxuan, WANG Yi, LUO Pinjie, SONG Yuhong*

基金项目: 云南省高层次人才培养支持计划“产业技术领军人才”专项(编号: YNWR-CYJS-2020-022)

摘要

为从生物多样性保护视角出发进行绿色空间规划,探究生物多样性认知与评估的关系,运用MaxEnt模型分析云南省丽江市古城区绿色空间的生物多样性分布格局,通过问卷调查公众对古城区生物多样性的认知,分析其影响因素。结果表明:生物多样性适生区集中分布于山地、湖泊和水库周围,呈现出“北低南高”的分布特征;公众对古城区生物多样性认知整体呈现出“两乡两镇较高,建成区内公园为认知最高点”的特征。通过空间自相关性分析可知,生物多样性分布指数与生物多样性认知指数在区域范围内呈负相关性,呈集聚的分布态势。基于研究结果,提出绿色空间优化、生物多样性认知提升、公众认知与实际生物多样性偏差区域规划3个方面的古城区绿色空间规划策略。

Abstract

To conduct green space planning from the perspective of biodiversity conservation and explore the relationship between biodiversity cognition and assessment, this study used the MaxEnt model to analyze the biodiversity distribution in the green spaces of the Gucheng Area in Lijiang City, Yunnan Province. Additionally, a questionnaire survey was conducted to investigate public cognition of biodiversity in the Gucheng Area and analyze the factors influencing it. The results showed that the biodiversity suitable areas are concentrated around mountains, lakes and reservoirs, presenting a distribution characteristic of lower in the north and higher in the south; the public's overall cognition of biodiversity in the Gucheng Area is characterized by higher levels in two townships and two towns, with urban parks in the built-up area as the cognition peak. Spatial autocorrelation analysis reveals that the biodiversity distribution index and the biodiversity cognition index exhibit a negative correlation and an agglomerated distribution pattern across regional scales. Based on the research results, three strategies for green space planning in the Gucheng Area were proposed, including green space optimization, biodiversity cognition promotion, and targeted planning for areas with deviations between public cognition and actual biodiversity levels.

文章亮点

1) 运用MaxEnt模型对丽江市古城区城乡绿色空间生物多样性分布情况进行评估,利用调查问卷法探究古城区公众对生物多样性的认知情况。2) 通过空间自相关分析法探究生物多样性实际分布与公众认知之间的联系,提出既能满足公众需求又能保护生物多样性的城乡绿色空间规划策略。

生物多样性是生态文明建设的基础,生物栖息地破坏、生物多样性丧失已成为人类面临的重大风险挑战之一。习近平总书记联合国生物多样性峰会上发表的重要讲话指出,

要站在对人类文明负责的高度,尊重自然、顺应自然、保护自然,探索人与自然和谐共生之路,促进经济发展与生态保护协调统一,共建繁荣、清洁、美丽的世界。以习近平新时

关键词

生物多样性; 绿色空间; MaxEnt模型; 空间自相关

Keywords

Biodiversity; Green space; MaxEnt model; Spatial autocorrelation

收稿日期: 2025-01-08

修回日期: 2025-03-10

代中国特色社会主义思想为指导, 认真落实习近平生态文明思想, 坚持生态优先、绿色发展, 将生物多样性保护理念融入生态文明建设全过程, 从生物多样性保护视角出发进行绿色空间规划策略的研究, 是风景园林适应新时期发展的重要方向和领域。

世界卫生组织将绿色空间定义为“任何覆盖着植被的城市土地”^[1]。国内绿色空间研究主要涉及绿色空间要素的恢复与保护、绿色空间网络的规划与管理^[2]。以往研究大多直接采用土地利用分类进行绿色空间识别, 然而这种方法并未考虑绿色空间和植被覆盖密度的关系^[3]。植被覆盖度可衡量城市不同地区的植被量, 其等级划分可用于统计城市植被分布健康情况^[4]。目前, 许多国内学者基于 Landsat 遥感影像, 通过计算归一化植被指数 (NDVI) 来提取城乡绿色空间, 如朱格格^[5]等结合 Landsat 影像和土地利用分类提取长沙市绿色空间; 曾欣怡^[6]利用 NDVI 解译昆明市中心城区绿色空间。

生物多样性评估是保护生物多样性的前提, 包括分布格局、指数、生态服务评估等^[7]。物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 是基于物种分布数据和环境变量得出二者关系, 并预测目标物种在研究区域分布格局的研究方法^[8]。有学者提出以实地考察记录的物种数据为基础进行单元制图并评估生物多样性, 此方法准确性强却需要花费大量的人力与时间^[9]。也有学者如杨丽雯^[8]、胡文佳^[10]等基于最大熵模型 (MaxEnt) 对单一物种适生区进行预测; 李晖^[11]、董笑语^[12]等学者通过分析关键物种分布区域, 提出城市生物多样性保护策略。其中 MaxEnt 模型是以最大熵理论和机器学习方法为基础, 根据物种已知的分布信息, 建立物种与环境条件的函数关系, 预测物种潜在分布区域的模型^[13], 此方法准确性高、样本量要求低, 且能考虑不同变量间的相互作用^[13]。

生物多样性保护研究往往忽略了与生物共生的人的作用, 缺少公众认知角度的研究。在城乡绿色空间中, 人与自然的联系是密不可分且相互影响的, 公众的认知往往决定其保护生物多样性的积极性, 而公众对生物多样性的认知可能与真实情况存在着一定的差异^[14]。1989 年, Kaplan 夫妇^[15]进行了人类认知环境模式的相关研究, 研究结论表明体验是人类认知环境最重要的途径, 环境中支持人类活动的元素和空间在促进人类的环境认知中起到重要的作用。David L Uzzell^[16]研究发现公众对生活环境的认知及评价是当时环境问题的根源。梁慧仪等^[14]学者通过游客受雇拍照法 (Visitor Employed Photography, VEP) 和问卷调查法分析植物多样性与人类认知偏好的关系, 提出城市绿地生物多样性保护与景观规划策略。因此, 有必要通过提高公众对生物多样性认知和评价, 最大程度发挥绿地效益, 解决环境问题。

云南是我国生物多样性最丰富的省份, 也是我国重要的生物多样性宝库和西南生态安全屏障。其中丽江市因生物多样性极为丰富, 在生态安全屏障建设中具有举足轻重的作用。研究丽江市古城区城乡绿地空间中生物多样性认知与评估的

关系, 对生物多样性和野生动植物保护工作起到重要作用, 对保障地区生态安全、生态环境保护、推进生态文明建设以及促进经济社会可持续发展具有十分重要的意义。

因此, 本研究通过 Maxent 模型对丽江古城区城乡绿色空间生物多样性分布情况进行评估, 同时结合调查问卷法探究古城区公众对生物多样性的认知情况; 利用空间自相关分析, 探究生物多样性实际分布情况与公众对生物多样性认知之间的关系; 最终根据不同分布区域提出相应的规划策略。研究旨在满足公共游憩与生物多样性保护的需求, 为城乡绿色空间规划管理提供新的理论指导与实践方法, 具有重要的现实意义。

1 研究区概况

丽江市总面积为 20 600 km², 下辖 5 个行政区, 其中古城区土地面积为 1 262.78 km²。丽江市自然保护地多, 生态环境敏感性高; 森林覆盖率高, 生态安全屏障作用明显; 生态系统类型多样性丰富。古城区地处低纬度高原, 属亚热带季风气候, 具有干湿季分明、四季不分明、雨热同季、冬春干旱少雨、夏秋多雨等山地气候特点; 主要植被类型包括半湿润常绿阔叶林、硬叶常绿阔叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林、温性针叶林等; 凭借独特的地理位置和自然条件, 形成丰富的生物多样性, 具有猕猴 *Macaca mulatta*、凤头鹰 *Accipiter trivirgatus*、红隼 *Falco tinnunculus*、血雉 *Ithaginis cruentus*、红腹角雉 *Tragopan temminckii*、白腹锦鸡 *Chrysolophus amherstiae* 等 35 种珍稀濒危陆生野生动物, 以及国家一级保护植物红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *chinensis*、二级保护植物滇山茶 *Camellia reticulata* 等珍稀野生植物^[17]。但古城区在生物多样性保护方面存在问题: 地区植被恢复、生态环境治理难度大; 林业生物物种保护面临挑战; 森林资源监管执法力量有所削弱; 林业和草原有害生物防治难度日益加大等^[17]。

2 研究方法与数据

2.1 数据来源与处理

2.1.1 关键物种分布数据

濒危物种通常对于生存环境的要求更为严格, 同时对人类活动干扰和环境变化的抵抗能力相对较弱, 因此研究区域内能保障其生存的生境大概率同样适合其他物种的生存^[18~19], 并且能作为替代指标有效反映生物多样性水平^[20~21]。本文通过《云南省各州市分布的国家重点保护野生动植物名录 (2021 年)》《中国生物多样性红色名录—高等植物卷 (2020)》《中国生物多样性红色名录—脊椎动物卷 (2020)》等筛选出红豆杉等 8 个物种为研究的关键物种 (表 1)。关键物种样本量越大, MaxEnt 物种预测模型的精度 AUC 值越稳定^[22~23]。故研究通过全球生物多样性信息服务网络平台 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF) 获取各物种分布的点位数据, 剔除干扰点

后共筛选出关键物种的 200 个分布点位，均满足 MaxEnt 模型模拟需求，且 *AUC* 值也较稳定，最终将其保存为 csv 格式。

2.1.2 环境因子数据

已有研究发现，通常过参数化比缺少参数更有利于模型的表现，环境变量的共线性并不会影响 MaxEnt 模型的表现^[24-25]；但当物种分布点数量少于环境变量时，过参数化会导致模型过度拟合^[24,26]，该情况下有必要对环境因子进行筛选。研究利用 SPSS 软件对丽江市主城区内 27 个环境变量进行 Pearson 相关性分析，通过计算不同因子间的相关系数，筛选出相关系数绝对值小于 0.8 的环境因子，最终根据显著相关性和场地实际情况筛选出气候年平均气温、高程、土地覆被类型、夜间灯光等 15 个环境因子用于构建模型（表 2，图 1）。

2.1.3 问卷调查数据

本文通过问卷调查的方法探究公众对主城区生物多样性的认知情况，问卷包括 3 个方面内容：1）受访者基础信息；2）公众认知中主城区生物多样性较高地点；3）影响生物多样性感知的因素等。研究根据 Kaplan 夫妇^[15]提出的景观认知理论设计生物多样性认知问卷，并基于影响景观认知的两大要素——元素（content）和结构（spatial configuration），结合生物多样性认知的实际研究，将各景观要素进行分类、合并，并拓展出“其他”类和“感知特征”2 个类别（表 3）。

研究于 2023 年 12 月 1 日至 12 月 15 日，在主城区下辖的 2 个乡 2 个镇以及 7 个街道采用随机抽样方法，对公众进行访问式调查，现场填写问卷并回收。共发放问卷 220 份，其中有效问卷 205 份。研究通过“两步路户外助手”软件将收集到的位置数据导出并进行整理统计，共获取生物多样性认知点 463 个。此外，人均生物多样性概念科普、标记认知地图和问题作答的总时长约 10 min。

2.2 研究方法

2.2.1 绿色空间识别

研究采用像元二分模型估算主城区植被覆盖度 *FVC*，从而根据植被覆盖密度划分绿色空间^[26]。首先，将 L1C 级

别的卫星遥感影像进行大气校正，得到 L2A 级别的遥感影像。接着通过红外波段和近红外波段计算出归一化植被指数 *NDVI*，选取 5%~95% 的置信区间，计算 *FVC*^[6]。根据植被覆盖度分级原则^[27]，并参考《土地利用现状分类》（GB/T 2010—2017）和《城市绿地分类标准》（CJJ/T 85—2017），以及研究区域实际情况，研究将 *FVC* 大于 0.60 的区域提取为绿色空间，计算公式^[28]如下：

表 2 MaxEnt 模型环境因子
Tab.2 MaxEnt model environmental factor

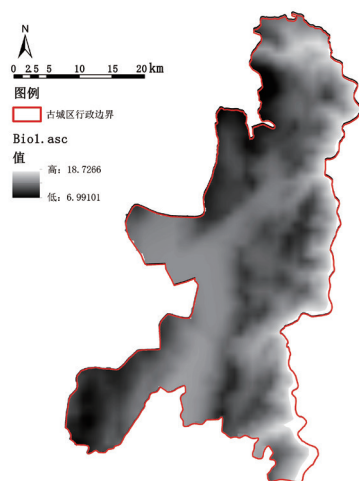
类别	数据名称	英文缩写	数据来源
气候因子	气候年平均气温	Bio1	国际气候网站 (https://worldclim.org/)
	平均气温日较差	Bio2	
	等温性	Bio3	
	气温季节性变动系数	Bio4	
	年平均降水量	Bio12	
	降水量季节变异系数	Bio15	
	最湿季度降水量	Bio16	
地形因子	高程	ELEVATION	中国科学院地理空间数据云平台 (https://www.gscloud.cn/)
	坡向	ASPECT	通过高程 DEM 数据计算获得
	坡度	SLOPE	
生境因子	距河流距离	DIS_RIV	从全国地理信息资源目录服务系统获取 1：25 万河流、水体矢量数据，通过 ArcGIS 中欧氏距离工具计算获得
	距水面距离	DIS_WAT	
	归一化植被指数	NDVI	从地理空间数字云 (https://www.gscloud.cn/) 获取 Landsat-8 卫星遥感影像图，通过 ArcGIS 计算获得
	土地覆被类型	LC	中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台
	夜间灯光	NL	珞珈一号夜间灯光数据 (http://59.175.109.173:8888/app/login.htm)

表 1 关键物种名录
Tab.1 Keystone taxa list

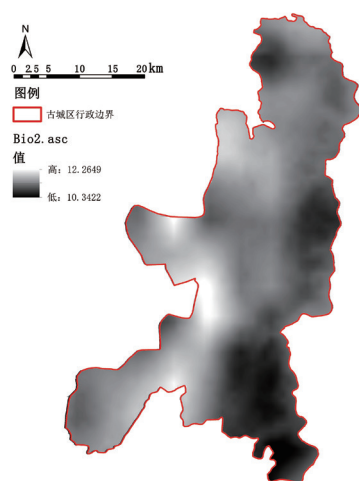
关键物种	物种濒危等级	样本量
红豆杉 <i>Taxus wallichiana</i> var. <i>chinensis</i>	VU	50
云南榧 <i>Torreya yunnanensis</i>	EN	35
白及 <i>Bletilla striata</i>	EN	22
丽江杓兰 <i>Cypripedium lichiangense</i>	CR	6
黄胸鹀 <i>Emberiza aureola</i>	CR	15
青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	CR	24
绿尾虹雉 <i>Lophophorus lhuysii</i>	EN	23
草原雕 <i>Aquila nipalensis</i>	EN	25

表 3 生物多样性认知影响要素及其分类
Tab.3 Influencing factors of biodiversity cognition and their classification

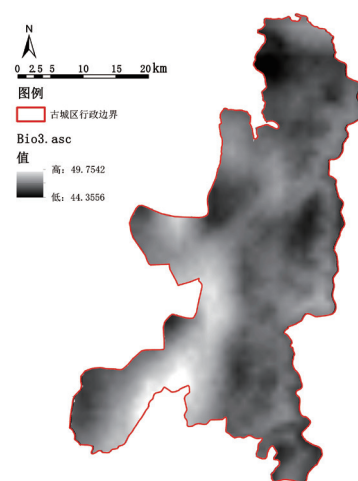
要素	类别
元素	水体、景观建筑、硬质铺装、植物、动物、地形（山石）
平面结构	开敞、密闭、半开敞
立面结构	单层、复层
感知特征	听觉感知、视觉感知、嗅觉感知、触觉感知
其他	养护管理、科普宣传、美学价值、熟悉程度、可达性



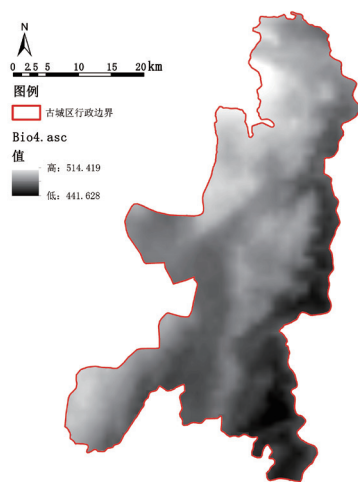
a.Bio1



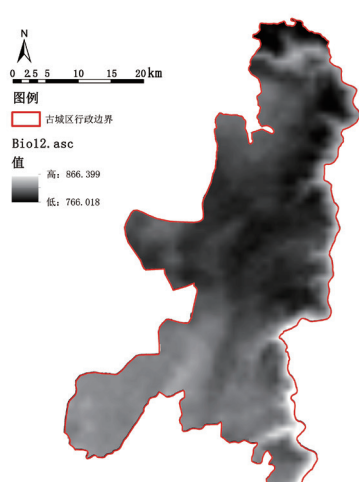
b.Bio2



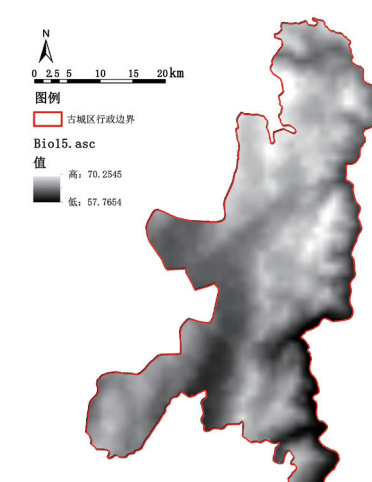
c.Bio3



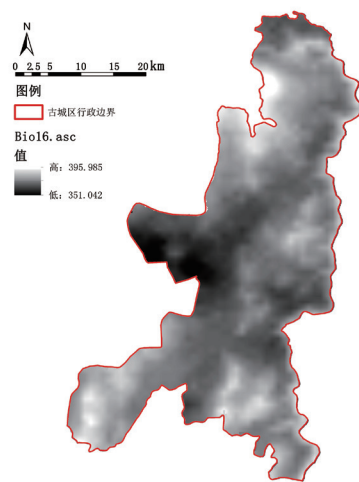
d.Bio4



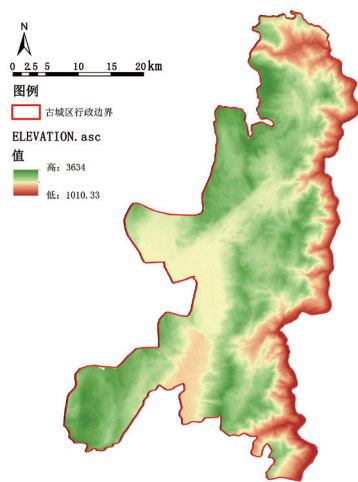
e.Bio12



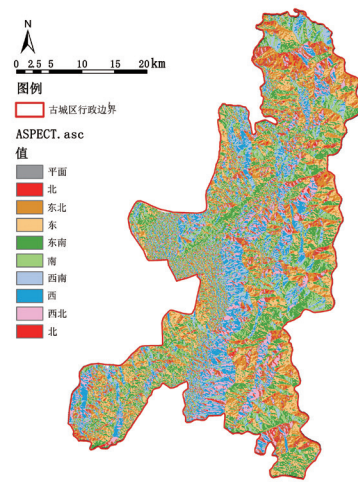
f.Bio15



g.Bio16



h.ELEVATION



i.ASPECT

图1 环境因子模型

Fig.1 Environmental factors model

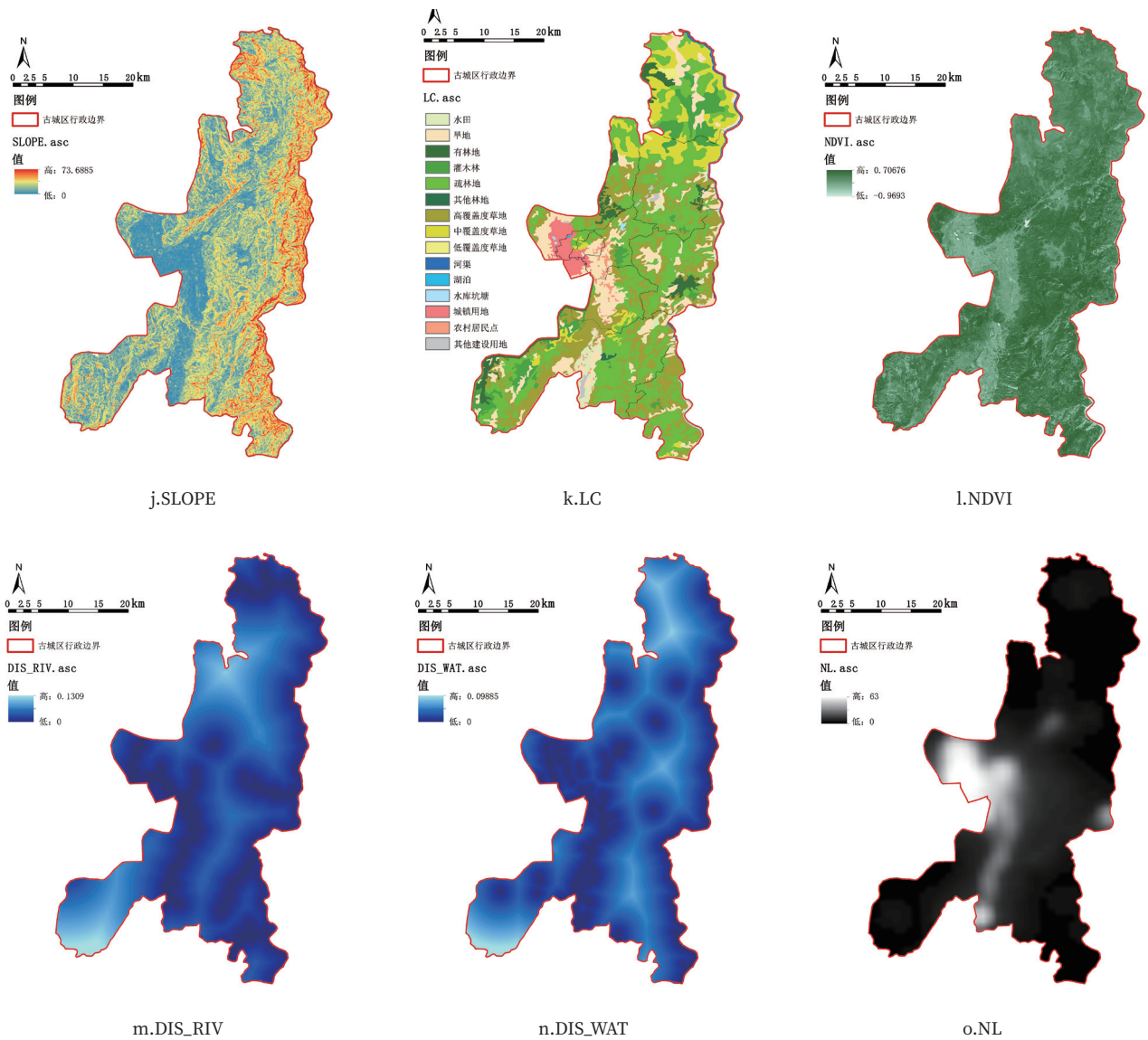


图1 环境因子模型 (续)

Fig.1 Environmental factors model (Continued)

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中, NIR 为近红外波段像素值; RED 为红波段像素值; $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖的 $NDVI$ 值; $NDVI_{veg}$ 为完全被植被覆盖的 $NDVI$ 值。

2.2.2 关键物种适生区分布预测

MaxEnt 模型利用计算机模拟熵的分布, 将已知物种分布点的像元作为样本, 根据环境变量如气候、海拔、土壤类型等得出约束条件, 通过计算系统具有最大熵时的状态来模拟物种的分布^[13], 计算公式为:

$$H(p) = -\sum_x p(x) \ln p(x) \quad (3)$$

式中, $H(p)$ 为熵值; x 表示环境变量, 即为自变量, $p(x)$ 为环境变量出现的概率。满足最大熵原则的概率分布

(吉布斯分布) 形式为^[29]:

$$p(x) = \exp \sum_{i=1}^l \gamma_j f_j(x) / z \quad (4)$$

式中, l 为环境变量的个数; γ_j 为不同环境变量的权重, $f_j(x)$ 为第 j 个环境变量; z 为归一化常数。

研究首先将物种分布数据和环境因子数据导入 MaxEnt, 设置响应曲线参数, 分析环境因子对模型的响应并绘制图纸, 并运用刀切法判断环境变量对模型的重要性^[30]。接着选取 75% 的随机样本分布点用作训练模型, 其余 25% 用于验证 MaxEnt 模型, 验证方法为交叉验证 (Cross-validation), 重复运行次数为 10 次, 迭代 1 000 次后得到物种的分布阈值^[12]。最后采用 ROC 曲线 (Receiver Operating Characteristic curve) 下的面积 AUC 值, 评估模型预测的准确度, AUC 值范围为 [0,1], 值越接近 1 代

表预测结果的真实性越高^[31]。

2.2.3 公众生物多样性认知调查

本文通过问卷调查的方法探究公众对古城区生物多样性的认知情况, 获得古城区生物多样性认知的影响因素。运用 ArcMap 中 Spatial Analyst 的核密度分析工具对生物多样性认知点数据进行量化分析, 获得古城区生物多样性认知的分布格局。研究将每个数据点的数据和带宽作为核函数的参数得到 N 个核函数, 再进行线性叠加形成核密度的估计函数, 归一化后获得概率密度函数^[32-33], 公式为:

$$f_n = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \frac{x-x_i}{h} \quad (5)$$

式中, f_n 是点或线要素的核密度估算值; h 为搜索半径; n 是要素的样本数量; $x-x_i$ 是 2 个要素之间的估计距离; k 为核密度函数。

2.2.4 空间自相关性分析

研究对古城区的生物多样性分布与认知进行双变量空间相关性分析。首先将研究区域网格化, 使用 ArcMap 中的创建渔网工具, 将研究区划分为 180 m×180 m 的网格, 再利用 ArcGIS 的区域分析工具提取出每个网格的生物多样性分布指数平均值与生物多样性认知指数平均值。最后在 GeoDa 软件中对生物多样性分布与认知数据进行全局空间自相关及局部空间自相关分析, 量化其空间特征并绘制 LISA (Local Indicators of Spatial Association) 聚类图。

3 结果与分析

3.1 绿色空间分布

古城区绿色空间面积为 847.56 km², 占研究区域总面积 67.1%, 整体呈现出“西部少, 东部多, 建成区内点状分散分布, 山区成片集中分布”的特征 (图 2)。在建成区内部的绿色空间包括公园绿地和滨水绿地, 如蛇山公园、黑龙潭、清溪水库等; 远离城区的绿色空间基本为森林公园和自然山林, 包括大东乡麻地坪山、七河镇五台山、金江白族乡麻地坪、青刺湾等。

3.2 关键物种适生区分布

研究利用 Maxent 模型, 对古城区关键物种的潜在分布区域进行了预测, AUC 值为 0.864, 结果为高准确性 (图 3)。接着, 将 100 次重复运算的平均值分布图导入 ArcGIS10.8 并转换为栅格文件, 对图层进行重分类, 参考 2 次模型训练的敏感度、特异性和最大值, 采用自然间断分级法 (Jenks)^[11] 对适生区进行定义 (表 4)。

古城区关键物种潜在分布主要呈现出北少南多, 集中于山地、湖泊和水库周围的特征 (图 4)。关键物种在建成区内点状散布于公园, 如清溪水库、黑龙潭公园与中济海公园及其周围绿地; 在临近建成区多呈点状、少呈片状分布, 如余路垛山峰一带, 团山水库及其附近山峰; 在远离建成区则集中成片分布, 如麻地坪、青刺湾-骡子山一带, 白石岩-双贵峰-雷打山一带山峰。

3.3 环境因子分析

基于 Maxent 模型的刀切法可以分析各环境因子对关键

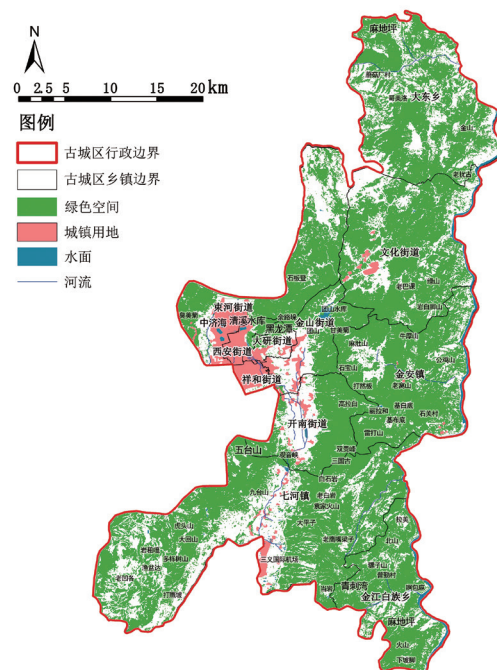


图 2 古城区城乡绿色空间分布

Fig.2 Distribution of urban and rural green spaces in Gucheng Area

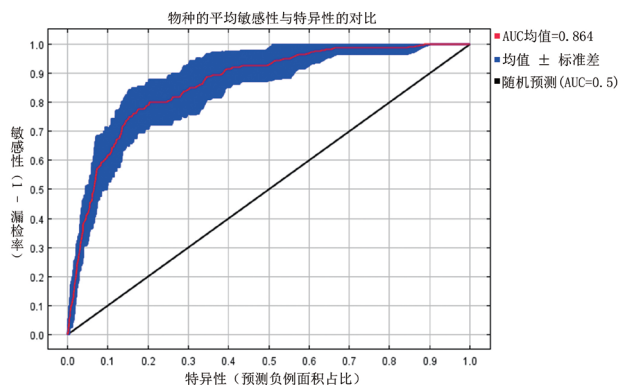


图 3 ROC 曲线

Fig.3 Receiver Operating Characteristic curve

物种分布的影响^[34]。研究表明, 归一化植被指数、距水面距离、土地覆被类型是对模型贡献率最高的 3 个因子, 累计贡献率为 55% (表 5); 置换重要性排名前三的分别为归一化植被指数、高程、气温季节性变动系数。

从环境因子对关键物种生境适宜性的具体响应来看 (图 5), 归一化植被指数在高于 -0.15 时关键物种的生境适宜性随 $NDVI$ 增加而升高, 指数约为 0.3 时生境适宜性最高; 距水面越近, 关键物种的生境适应性越高; 土地覆被类型为有林地时关键物种的生境适应性最高; 高程达到 3 500 m 时关键物种的生境适宜性最高; 平均气温日较差在低于 10.4 °C 时关键物种生境适宜性稳定且最高; 气温季

3.4 绿色空间生物多样性分布格局

通过综合叠加绿色空间、关键物种潜在分布空间, 将关

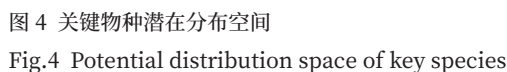


图 4 关键物种潜在分布空间
Fig.4 Potential distribution space of key species

Tab.4 Delineation and statistics of suitable habitats for keystone taxa

表 5 各环境因子贡献率与置换重要性
Tab.5 The percent contribution and importance of
environmental factors

表 5 各环境因子贡献率与置换重要性
Tab.5 The percent contribution and importance of
environmental factors

Figure 1 consists of six subplots, each showing the relationship between a different environmental factor and the ecological suitability index (y-axis, ranging from 0.2 to 1.0). The x-axis for each plot represents a specific factor:

- a. 归一化植被指数 (Normalized Vegetation Index):** The x-axis ranges from -0.9 to 0.9. The suitability index starts high (around 0.9) for negative values, drops to a minimum (around 0.25) near 0, and then rises to a peak (around 0.85) for positive values.
- b. 距水面距离 (Distance from Water):** The x-axis ranges from -0.01 to 0.10 km. The suitability index is high (around 0.95) for negative values, drops sharply to around 0.75 at 0.01 km, and then remains relatively stable between 0.75 and 0.85 for positive distances.
- c. 土地覆被类型 (Land Cover Type):** The x-axis lists various land cover types: 建设用地 (Built-up land), 旱地 (Dry land), 有林地 (Forest), 灌木林 (Shrubland), 疏林地 (Sparse forest), 其他林地 (Other forest), 高寒草甸 (Alpine meadow), 中寒草甸 (Temperate meadow), 低寒草甸 (Cold meadow), 水田 (Paddy field), and 湖泊 (Lake). The suitability index peaks at 有林地 (Forest) and is lowest at 水田 (Paddy field) and 湖泊 (Lake).
- d. 高程 (Elevation):** The x-axis ranges from 1000 to 3500 m. The suitability index increases steadily with elevation, starting near 0.1 at 1000 m and reaching 1.0 at 3500 m.
- e. 平均气温日较差 (Average daily temperature range):** The x-axis ranges from 10.2 to 12.4 °C. The suitability index starts high (around 0.95) for low values, drops to around 0.75 at 10.6 °C, rises to a peak (around 0.9) at 11.8 °C, and then drops sharply to around 0.3 at 12.4 °C.
- f. 气温季节性变动系数 (Coefficient of seasonal temperature variation):** The x-axis ranges from 440 to 520. The suitability index peaks at around 450 and then decreases steadily to around 0.3 at 520.

图 5 生境适宜性对主要环境因子的响应曲线
Fig.5 Response curves of habitat suitability to major environmental factors

键物种出现概率大于 0.8 的绿色空间设置为核心绿色空间，关键物种出现概率为 0.7~0.8 的绿色空间设置为中适生区绿色空间，关键物种出现概率小于 0.7 的绿色空间设置为非适生区绿色空间（表 6）。

古城区绿色空间生物多样性分布区域即为核心绿色空间和中适生区绿色空间，总面积占古城区绿色空间的 15.9%，绿色空间生物多样性分布区主要集中于山地、湖泊和水库周围绿地（图 6），与关键物种潜在分布特征相似。然而，建成区的部分区域虽为关键物种适生区，但 *FVC* 值较低，未能形成有效的绿色空间。研究进一步确定了古城区绿色空间内的生物多样性分布情况。

3.5 生物多样性认知空间分布与影响因素

研究运用 ArcMap 中 Spatial Analyst 中的核密度分析工具对高生物多样性认知点数据进行量化分析（图 7）。公众对古城区生物多样性认知分布呈现出“两乡两镇较高，建成区最高”的特征。建成区生物多样性认知热点区域主要为各类滨水绿地，如黑龙潭、清溪水库、中济海、团山水库等；2 个乡的生物多样性认知热点区域主要为金江白族乡的青刺湾、普勤村、江边村、金江村、阿包麻、骡子山等；2 个镇的生物多样性认知热点区域主要为金安镇东面山峰以及丽拉和山峰。

问卷调查表明，环境中具有丰富的植物是提升公众生物多样性认知的关键所在；优美自然的水体景观和生动有趣的动物也能增添环境生机。开敞或半开敞的平面结构、多层的立面结构能促进公众的生物多样性认知。植物的季相变化、形态等视觉感知，以及鸟叫虫鸣等听觉感知能通过直观简单的方式传达生物多样性的环境信息。环境具有较高的美学价值、精细的养护管理和浓厚的科普宣传氛围是提高公众生物多样性认知水平的优势所在。同时，对环境的熟悉程度以及环境可达性影响着公众生物多样性认知的清晰完善程度（图 8）。

3.6 空间自相关双变量分析

Moran's I 的值域为 [-1,1]，Moran's I 大于 0 为正相关，小于 0 为负相关；绝对值越大，相关程度越大；当 Moran's I 为 0 时，全局空间显著无关^[35]。*P* 值代表概率，反映某一事件发生的可能性大小。在空间相关性的分析中，*P* 值表示所观测到的空间模式是由某一随机过程创建而成的概率。*Z* 得分表示标准差的倍数。研究通过 ArcMap 提取、计算得到每个网格中的生物多样性分布指数平均值与生物多样性认知指数平均值。在 GeoDa 软件中对古城区绿色空间内生

物多样性分布与生物多样性认知进行双变量全局自相关分析(图 9)，得到 Moran's I 为 -0.077 1，小于 0；*P* 值为 0.001，小于 0.05；*Z* 值为 43.966 6，这说明生物多样性分布与生物多样性认知在区域范围内呈负相关性，呈集聚的分布态势。

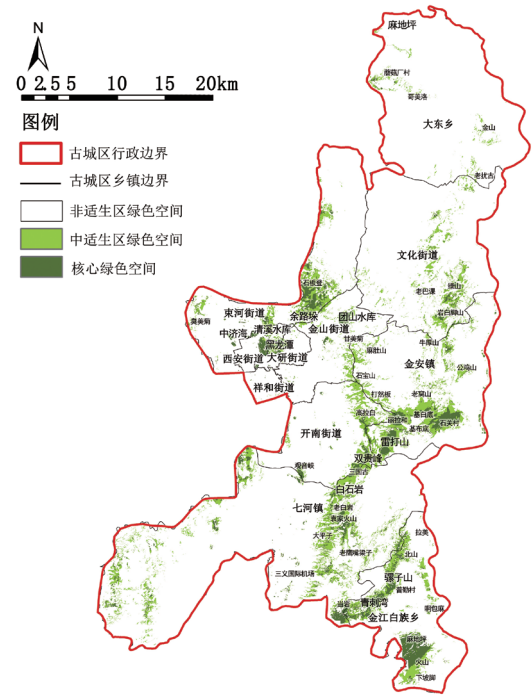


图 6 绿色空间生物多样性分布
Fig.6 Distribution of biodiversity in green spaces

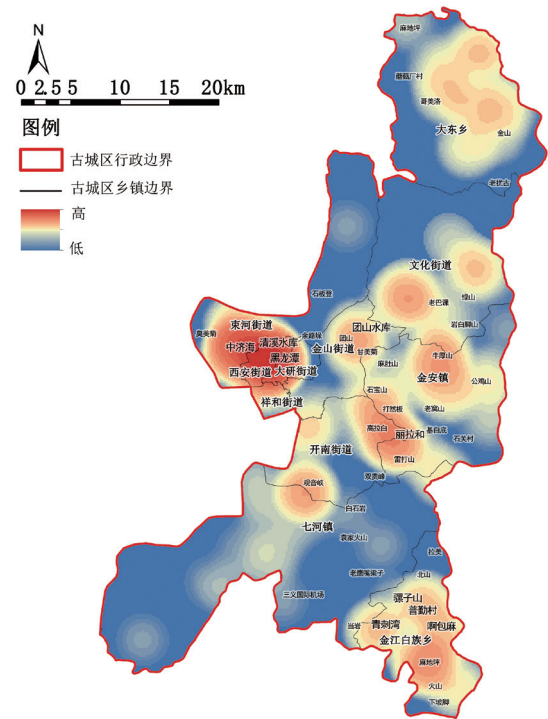


图 7 生物多样性认知分布
Fig.7 Biodiversity cognitive distribution

表 6 绿色空间生物多样性分区统计

Tab.6 Zoning statistics of biodiversity in green spaces

出现概率	绿色空间生物多样性适生区划分	面积 /km ²	占绿色空间的比重
> 0.8	核心绿色空间	42.28	5.0%
0.7~0.8	中适生区绿色空间	92.80	10.9%
< 0.7	非适生区绿色空间	712.48	84.1%

由图9可知,样本点基本分布于第IV象限——生物多样性分布高值区域与生物多样性认知低值区域,以及第III象限——生物多样性分布低值区域与生物多样性认知低值区域,呈现显著的聚集空间特征。

由LISA聚类图(图10)可知,丽江市古城区绿色空间主要以高生物多样性分布指数和低生物多样性认知指数(HL型)、低生物多样性分布指数和低生物多样性认知指数(LL型)为主,且在大东乡、束河街道北部、文化街道西北部、七河镇西南部以及东部等区域集中成片分布;其次为高生物多样性分布指数和高生物多样性认知指数(HH型),以及低生物多样性分布指数和高生物多样性认知指数(LH型)。HL型区域以自然山峰为主,丰富的自然环境以及较少的人类活动痕迹使其成为主要的生物多样性适生区;但由于尚未纳入相关规划且远离人类活动区,缺乏生物多样性科普教育,公众对其生物多样性认知程度较低。LL型区域广泛分布于远离建成区的草地形中,此部分区域多为生物多样性非适生区绿色空间,同时远离人类聚居区域,生物多样性宣传较少,缺乏相关的科普设施,导致公众对该区域生物多样性认知程度较低。HH型主要分布于建成区内的公园绿地,如清溪水库、黑龙潭等,或远离建成区的乡镇附近山峰。这些区域为公众日常休憩娱乐的绿地,具有完善的养护管理和科普教育设施,生物多样性易被公众所感知;同时,古城区建成区内的公园以水为中心,是关键物种聚居的关键区域。此外,LH型多分布于建成区中。建成区内除保护较完整的公园外,部分区域受建筑侵占、环境破坏等人为因素的影响,野生动植物分布稀少且生境质量较差,生物多样性分布指数较低;但由于与人类活动紧密关联,生物多样性易被公众认知。

4 讨论

4.1 问题分析

古城区生物多样性分布的核心绿色空间面积为42.28 km²,中适生区绿

色空间面积为92.80 km²,两者占绿色空间的15.9%。建成区及周边的绿色空间分布较为零散,大部分为细碎的斑块,如黑龙潭公园,清溪水库等;远郊区多为自然山林构成的核心绿色空间。但仍有核心绿色空间未被纳入城市绿地规划中,可见古城区现行的保护体系依旧存在不足。

生物多样性认知的高值区域为公众熟悉程度较高的公园绿地,此类区域与公众的日常生活息息相关,得到广泛宣传。古城区远郊生态基底较好的区域,缺少以生物多样性为特色的生态旅游产品和旅游路线的宣传,导致公众对其生物多样性认知不足。此外,大多数公众对生物多样性保护的了解不充分,具有保护意识,但缺乏实际保护行动;目前在进行绿色空间规划设计时,现有规划工作对科普宣教系统不够重视,有利于提升生物多样性认知的景观设施设计不足。

4.2 基于生物多样性的绿色空间优化策略

针对丽江市古城区绿色空间生物多样性现行保护体系的不足以及生物多样性认知景观设施缺乏的问题,应建设古城区城乡生物多样性生态网络,完善古城区生物多样性保护体系;并在适宜地区开展再利用、城市绿地建设等生态恢复措施,强化关键物种的保护,扩大关键物种分布和核心绿色空间的范围;营造公众参与性生态景观,加强生物多样性的科普宣传与教育。

绿色空间景观规划是一项综合性的工作,其目标不仅在于优化和恢复自然生态系统、促进生物之间的交流和流动,还在于为公众提供丰富而有益的生态系统服务。研究发现,古城区的公众对于生物多样性及其生活环境中的绿色空间的关注度和参与度不高。因此,在制定生态景观规划方案时,应遵循以人为本原则,在追求生态平衡的同时,关注人类的需求和体验,努力实现人与自然和谐共生。可通过营建公众参与性生态景观,鼓励公众亲近自然、参与生态保护,培养其生态保护意识,将生态理念融入公众的

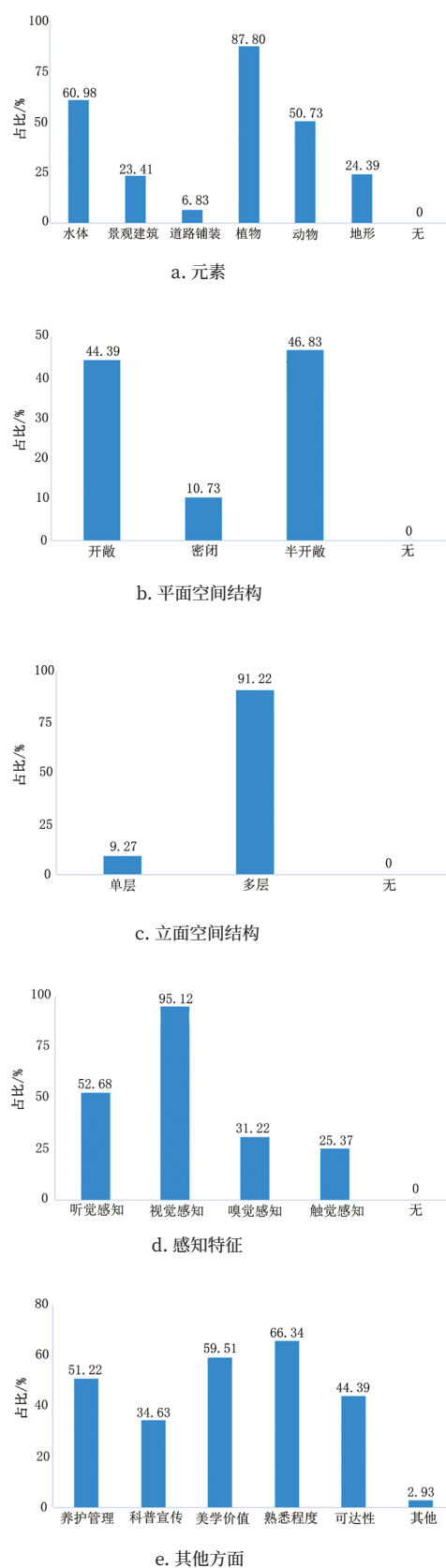


图8 生物多样性认知影响因素

Fig.8 Factors influencing biodiversity cognition

日常生活,这有助于提升人们对生物多样性的认知和参与度。具体来说,首先应丰富动植物种类、增加灵动的水体、设置开敞或半开敞的平面空间结构和多层的立面空间结构、营造优美的视觉景观效果、重视自然的声音以及良好的科普宣传和养护管理等。同时应重视绿色空间的宣传工作,突出其生物多样性特色;完善绿色空间的科普宣教系统,融合现代科

技,实现科普宣教系统的信息化与智能化。最后应注重远郊区域生物多样性的利用,建设基础设施,使公众可以更方便地到达此类区域。

研究表明,公众认知与实际生物多样性存在偏差。在进行老城区绿色空间景观规划时,应采取全面统筹、分区规划原则,根据 LISA 聚类图将老城区划分为 HL 型、LL 型、HH 型以及 LH 型 4 类区域,分区开展生态及景观质量提升规划。HL 区域的生态环境较好,物种丰富,需对关键物种进行综合监测和保护,科学实施生态修复工程,提高生态系统的稳定性;针对景观设施不足问题,需对其景观设施如道路、休憩平台等进行优化设计。LL 区域的生态环境较差,需通过全面实施污染防控、生态修复、生态净化等方式,提升内部栖息地环境的连通性和生境质量,最大程度恢复该区域的自然属性;同时应加强城市管理,可采用垂直绿化、阳台绿化、屋顶绿化等方法提升城市区域的生物多样性水平。HH 区域的生态环境良好,将其划定为生物多样性保护区域持续保护,使该区域发挥出生物多样性保护的最大效益;同时完善其景观设施,保持并加强保护性管理措施。LH 区域的景观设施相对完善,但生态环境较差,并非实际的生物多样性热点区域,因此该区域应优化生境结构,增加植物层次,优化植物配置;经科学评估后,采用逐步引入的方法填补现有生态系统中缺失的关键物种,定期监测引入后关键物种及生态系统的变化,以促进生态平衡,提升实际的生物多样性。

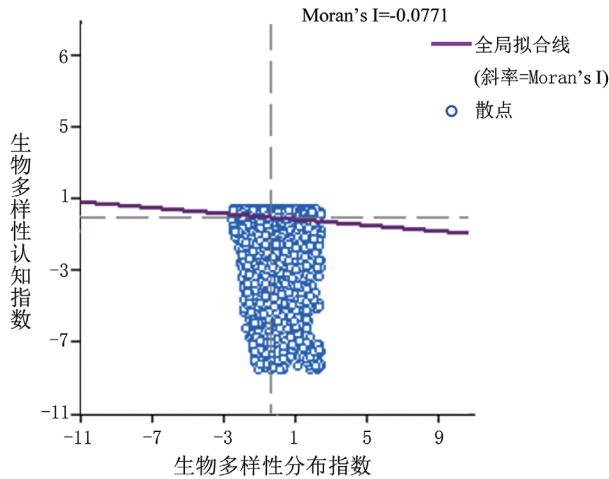


图 9 生物多样性分布与认知莫兰指数散点图
Fig.9 Scatter plot of biodiversity distribution and cognition Moran index

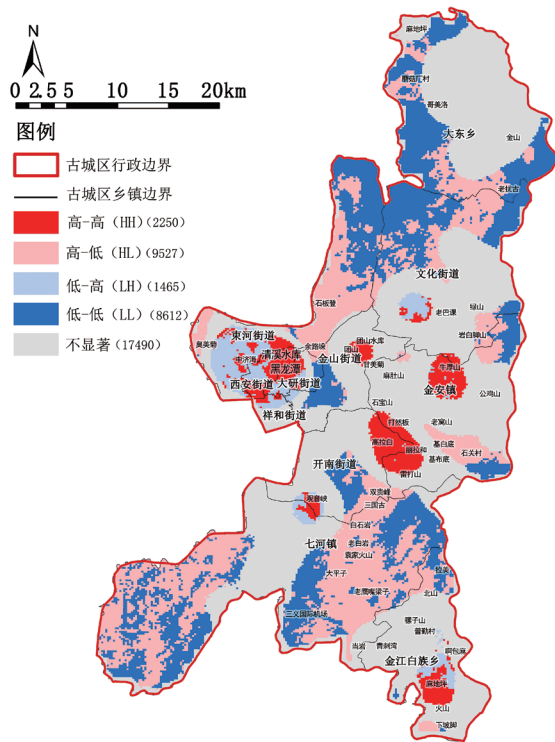


图 10 生物多样性分布与认知双变量 LISA 聚类图
Fig.10 LISA cluster map of biodiversity distribution and cognition

5 结论

本研究运用 MaxEnt 模型对老城区城乡绿色空间生物多样性分布进行识别,同时通过问卷调查老城区生物多样性认知情况,并通过空间自相关性分析两者的空间特征。研究发现,老城区绿色空间总面积为 847.56 km²,生物多样性分布核心绿色空间和中适生区绿色空间占研究区绿色空间面积的 15.9%,主要呈现出北少南多,集中于山地、湖泊和水库周围的特征。老城区生物多样性认知在两乡两镇较高,而建成区为公众生物多样性认知的最高点。NDVI、距水面距离、土地覆被类型、高程和气温季节性变动系数等环境因子对生物多样性分布具有重要影响;动植物种类与数量、空间开敞类型以及多层立面结构、视觉和听觉感知,以及其他方面的美学价值、科普宣传和养护管理是影响公众生物多样性认知水平的关键所在。老城区绿色空间主要以高生物多样性分布指数和低生物多样性认知指数(HL型)、低生物多样性分布指数和低生物多样性认知指数(LL型)为主。最后,基于研究成果,从绿色空间优化、生物多样性认知提升以及公众认知与实际生物多样性偏差区域规划 3 个方面,提出优化策略。

本研究以丽江市老城区城乡绿色空间为例,将生物多样性评估与公众认知相结合,探究基于生物多样性保护的城乡绿色空间格局优化策略,同时满足生物多样性保护与公众游憩的需求,既保护生态环境又符合风景园林以人为本的原则,为城乡绿色空间规划管理提供新的理论指导与实践方法。

但研究仍存在一定局限性：首先关键物种点位数据主要来自 GBIF，未进行实地勘察以及 GPS 定位收集，忽略了时间因素下物种点位的实际变化，可能导致数据偏差。其次，研究忽略了土地利用的真实情况，例如部分关键物种高适生区为建设用地，不属于城乡绿色空间范围。因此，未来研究可结合实地调研，对少量样本数据进行 GPS 精准定位，以提高模型精确度；并在生物多样性的评估时叠加生境质量与生境敏感性分析，避免最大熵模型对土地利用情况的忽略。

注：图片均为作者自绘。

参考文献：

- [1]WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. Urban green spaces: a brief for action[R/OL]. [2025-03-10]. <https://iris.who.int/handle/10665/344116>.
- [2] 冯一凡, 冯君明, 李翹. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43 (14) : 5648-5661.
- [3] 刘畅, 张晓瑞. 城市绿色空间研究进展与展望[J]. 河北地质大学学报, 2024, 47 (1) : 92-98.
- [4]ZHANG W, YANG J, MA L, et al. Factors affecting the use of urban green spaces for physical activities: Views of young urban residents in Beijing[J]. Urban Forestry&Urban Greening, 2015, 14 (4) : 851-857
- [5] 朱格格, 陈雨如, 杨佩, 等. 长沙市主城区绿色空间格局演变与地表温度的空间关系[J]. 江苏林业科技, 2023, 50 (2) : 42-47.
- [6] 曾欣怡, 宋钰红. 基于关键物种与生境质量评估的昆明市主城区绿色空间生物多样性分布格局研究[J]. 中国园林, 2023, 39 (9) : 126-132.
- [7] 王琦, 史娜娜, 韩煜, 等. 中国陆域生物多样性综合评估指标体系构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (8) : 2773-2782.
- [8] 杨丽雯, 张渊媛, 杨峰, 等. 基于最大熵模型的麋鹿潜在栖息地分析与保护对策[J]. 生态学杂志, 2024, 43 (8) : 2539-2550.
- [9] 刘文平, 宇振荣. GIS 支持下北京市海淀区生境服务制图研究[J]. 生态科学, 2017, 36 (2) : 144-151.
- [10] 胡文佳, 晁碧霄, 王玉玉, 等. 基于最大熵模型的福建省红树林潜在适生区评估[J]. 中国环境科学, 2020, 40 (9) : 4029-4038.
- [11] 李晖, 刘彦, 黄伊琳, 等. 基于 Maxent 模型的深圳湾鸟类热点生境判别及修复研究[J]. 中国园林, 2022, 38 (12) : 14-19.
- [12] 董笑语, 黄涛, 潘雪莲, 等. 深圳市陆域野生保护动植物热点分布区辨识及保护对策[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (11) : 3722-3737.
- [13]PHILLIPS J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, et al. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190 (3-4) : 231-259.
- [14] 梁蕙仪, 高天, 董山榕, 等. 咸阳市小西湖湿地公园植物多样性认知与游憩偏好研究[J]. 园林, 2022, 39 (11) : 51-59.
- [15]KAPLAN R, KAPLAN S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective[M]. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1989.
- [16]UZZELL D L. The psycho-spatial dimension of global environmental problems[J]. Journal of Environmental Psychology, 2000, 20 (4) : 307-318.
- [17] 丽江市人民政府. 丽江市中心城区城市生物多样性保护规划 (2022—2035 年) [EB/OL].[2024-11-05]. <https://lijiang.gov.cn/>.
- [18]HAYWARD M W. Using the IUCN Red List to determine effective conservation strategies[J]. Biodiversity and Conservation, 2011, 20 (12) : 2563-2573.
- [19]DUDLEY N, STOLTON S, SHADIE P, et al. Guidelines for applying protected area management categories[M]. Gland, Switzerland: IUCN, 2008.
- [20]LAWLER J J, WHITE D, SIFNEOS J C, et al. Rare species and the use of indicator groups for conservation planning[J]. Conservation Biology, 2003, 17 (3) : 875-882.
- [21]WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. Ecological Applications, 2011, 21 (2) : 335-342.
- [22]WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, et al. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. Diversity and Distribution, 2008, 14 (5) : 763-773.
- [23] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学, 2012, 48 (1) : 53-59.
- [24] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (6) : 2116-2128.
- [25]KRAMER-SCHADT S, NIEBALLA J, PILGRIM J D, et al. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models[J]. Diversity and Distributions, 2013, 19 (11) : 1366-1379.
- [26] 马志勇, 沈涛, 张军海, 等. 基于植被覆盖度的植被变化分析[J]. 测绘通报, 2007 (3) : 45-48.
- [27] 李坤, 张梦园, 李逸伦, 等. 云南石林风景区石漠化自然恢复过程中植被覆盖度及空间格局演变[J]. 生态学杂志, 2025, 44 (5) : 1626-1635.
- [28] 徐嘉慧, 王世东. 矿业城市植被覆盖度空间提取及时空分析：以徐州市为例[J]. 草原与草坪, 2021, 41 (3) : 91-98.
- [29] 熊东阳, 张林, 李国庆. 基于最大熵模型的遥感土地利用多分类研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35 (2) : 140-148.
- [30] 季乾昭, 王荣兴, 黄志旁, 等. 样本量与研究范围变化对 MaxEnt 模型准确度的影响——以黑白仰鼻猴为例[J]. 兽类学报, 2019, 39 (2) : 126-133.
- [31]HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve[J]. Radiology, 1982, 143 (1) : 29-36.
- [32]SWETS J A. Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems[J]. Science, 1988, 240 (4857) : 1285-1293.
- [33] 张桂铭, 朱阿兴, 杨胜天, 等. 基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法[J]. 生态学报, 2013, 33 (23) : 7590-7600.
- [34] 谢孟, 张学星, 罗燕, 等. 基于 MaxEnt 模型的云南干热河谷适生树种选择[J]. 生态学报, 2024, 44 (9) : 3689-3707.
- [35] 夏圣洁, 陈慧儒, 张钧韦, 等. 生态用地动态演变与热环境的空间自相关分析——以山西中部城市群为例[J]. 中国环境科学, 2024, 44 (2) : 1032-1040.

作者简介：

李雯萱 /2000 年生 /女 /云南大理人 /硕士 /西南林业大学园林园艺学院 (昆明 650224) /专业方向为风景园林规划与设计

王燧 /1997 年生 /男 /云南文山山人 /西南林业大学园林园艺学院 (昆明 650224) /在读博士研究生 /研究方向为风景园林规划与设计

罗聘杰 /1998 年生 /男 /广东梅州人 /硕士 /嘉应学院土木工程学院 (梅州 514015) /专业方向为风景园林规划与设计

宋钰红 (* 通信作者) /1970 年生 /女 /浙江嵊州人 /硕士 /西南林业大学园林园艺学院、国家林业与草原局西南风景园林工程技术研究中心 (昆明 650224) /教授, 博士生导师 /研究方向为风景园林规划设计、民族园林、乡村景观 /E-mail: songyuhong@swfu.edu.cn