

贵州花溪大学城破碎化林地中 鸟类群落的小岛屿效应

朱芸^① 盛尚^① 郑进凤^{①②} 伍素^① 张凯^① 徐雨^{①*}

① 贵州师范大学生命科学学院 贵阳 550025; ② 西南大学生命科学学院 重庆 400715

摘要: 小岛屿效应打破了传统的种-面积关系认知,是当前岛屿生物地理学与生境破碎化领域的研究热点之一。然而,目前的研究缺乏以人类干扰度较高的城市破碎化生境为载体来探究小岛屿效应问题。本研究以贵州花溪大学城 30 个面积 0.25 ~ 290.40 hm² 的残存自然林地为研究区,在 2017 至 2021 年的鸟类繁殖季对林地中的鸟类进行调查。共记录到鸟类 98 种,隶属于 11 目 41 科。剔除高空飞行、非森林鸟类及偶然出现的物种后,不同斑块中的鸟类物种数介于 12 至 49 种之间,平均每个斑块 24 种。在 R 软件中利用“sars”包构建 4 种关键种-面积回归模型发现,先平后升的两段式回归模型是预测种-面积关系的最佳模型。该模型显示,在面积阈值 1.16 hm² 之上,物种丰富度随着面积的增加逐渐增多,符合传统岛屿生物地理学提出的面积效应;但是,在面积阈值 1.16 hm² 之下,物种丰富度不随面积发生显著变化,表现出小岛屿效应的特征。小岛屿效应的形成可能与喀斯特特殊地貌环境、食物资源或“中转站”、“垫脚石”等生态功能相关,其具体发生机制尚有待进一步研究。根据本研究结果,建议在城市规划建设时尽可能保护自然林地并设计绿色过渡带,在优先保护大林地斑块的同时不应忽视对具有重要生态价值的小林地斑块的保护。

关键词: 繁殖鸟类; 生境破碎化; 小岛屿效应; 种-面积关系; 城市化

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2022) 02-205-08

Small-island Effect in Bird Assemblages on Fragmented Woodlots in Huaxi University Areas, Guizhou, China

ZHU Yun^① SHENG Shang^① ZHENG Jin-Feng^{①②} WU Su^① ZHANG Kai^① XU Yu^{①*}

① School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025;

② School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: [Objectives] The small-island effect (SIE), which challenges the understanding of the traditional species-area relationship (SAR), has become one of the hot topics in the field of island biogeography and

基金项目 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目 (No. U1812401), 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2021]一般 098);

* 通讯作者, E-mail: xuyu608@gznu.edu.cn;

第一作者介绍 朱芸, 女, 硕士研究生; 研究方向: 鸟类生态学; E-mail: 20010100412@gznu.edu.cn。

收稿日期: 2021-09-01, 修回日期: 2022-01-04 DOI: 10.13859/j.cjz.202202005

habitat fragmentation. However, the existing researches have neglected to explore the SIE in fragmented urban habitats with high intensity of human disturbance. Our study examined SIE in bird assemblages on 30 fragmented woodlots ($0.25 - 290.40 \text{ hm}^2$) in Huaxi University Areas, Guizhou, Southwestern China (Fig. 1). **[Methods]** We downloaded Google imagery of the study area and used ArcGIS 10.7 to outline the boundaries of the 30 woodlots and calculate the area of each woodlot. We used the line-transect method to survey breeding birds on the 30 fragmented woodlots during the breeding seasons from 2017 to 2021, with the length of line-transects established ($82.5 - 7\,073.7 \text{ m}$) roughly proportional to the woodlots' area. We employed package "sars" in R to construct four key regression models (i.e., the left-horizontal with one-threshold model, the continuous with one-threshold model, the linear model and the null model) to predict species-area relationship, and used the Akaike's information criterion corrected for small sample size (AIC_c) to determine the most plausible model. **[Results]** Totally, we surveyed each line transect 11 times and recorded 98 bird species belonging to 11 orders and 41 families. Excluding high-flying birds, non-forest dwelling birds, and species that were recorded only once, the number of bird species recorded in different woodlots ranged from 12 to 49, with an average of 24 species per woodlot. Among the four key regression models we constructed, the left-horizontal with one threshold regression model, which had the lowest AIC_c value, was the best model for predicting species-area relationship, and the difference in AIC_c value between it and the next best model was more than 2 (Table 1). The results indicated the left-horizontal with one threshold regression model was the most plausible model for predicting species-area relationship. The model showed that above the area threshold of 1.16 hm^2 , the species richness increased with the woodlot's area (Fig. 2), consistent with the area effect proposed by the traditional island biogeography. Whereas, below the area threshold of 1.16 hm^2 , species richness did not change significantly with the area (Fig. 2), suggesting a SIE. **[Conclusion]** In conclusion, our study revealed the existence of SIE in bird assemblages in Huaxi University Areas, Guizhou. We speculate that the emergence of SIE in bird assemblages may be related to the unique karst environment, food resources, and ecological function of "transfer station" and "stepping stone". Although further studies that target at examining the underlying mechanisms for the SIE are needed, we suggest that habitats protection and fragmentation greenways as strategies in urban planning and construction and that protecting small woodlots with important ecological value should not be neglected while giving priority to the protection of large woodlots.

Key words: Breeding bird; Habitat fragmentation; Small-island effect; Species-area relationship; Urbanization

生境破碎化 (habitat fragmentation) 是指原本连续成片的生境, 由于人类干扰或自然变化, 逐渐变成一个个大小不一且相互分散隔离的斑块的现象 (Fahrig 2003)。在生境破碎化进程中, 由于生境斑块的面积不断减小, 斑块之间的隔离度逐渐增大, 阻碍了物种扩散和基因交流, 对生物多样性格局和物种维持造成影响。因此, 研究生境破碎化对该地生物多样性的生态效应, 是生态学和保护生物学领域的重要研

究内容。

岛屿生物地理学理论 (island biogeography) 常被用于解释生境破碎化对生物多样性的影响问题。该理论认为物种丰富度与斑块面积成一定比例关系, 即种-面积关系 (species-area relationship, SAR) (Macarthur et al. 1967), 在一定范围内, 面积越大, 物种的丰富度越高, 该理论得到了多数研究的支持。近年来小岛屿效应 (small-island effect, SIE) 的提出, 打破

了这一关系认知，认为在一定面积阈值之下，物种丰富度与斑块面积不再是线性关系（Whitehead et al. 1969, Lomolino et al. 2001, Triantis et al. 2006），对深入认识生境破碎化的生态影响和实施物种保护具有重要意义（Wang et al. 2018a）。目前，已经有不少研究评估了岛屿生境系统中的小岛屿效应，但来自不同生物类群或不同研究地点的结果仍存在争议（Triantis et al. 2012）。比如，Chen 等（2019）发现千岛湖陆桥岛屿上的大中型兽类群落具有小岛屿效应，而 Wang 等（2012）报道千岛湖陆桥岛屿上鸟类群落不存在小岛屿效应。就小岛屿效应而言，Qie 等（2011）发现，阿马拉亚半岛肯尼尔湖陆桥岛屿中蜚螳群落的最佳种-面积模型为先缓后升的两段式回归模型，而 Wang 等（2018b）却发现，先平后升的两段式回归模型是预测千岛湖两栖类动物小岛屿效应的最佳模型。Wang 等（2018a）以全球 90 个岛屿系统为对象，荟萃分析了小岛屿效应存在的原因和潜在影响因素，发现岛屿数量、面积范围的大小、物种数变化范围、岛屿类型和物种

类群是决定小岛屿效应存在与否的主要因素。

当前，由城镇化建设导致的生境破碎化问题日益突出（Johnson et al. 2017）。与陆桥岛屿等破碎化生境相比，城镇建设所导致的景观类型及空间形态变化更加复杂，且易受到人类活动干扰，对城市生物多样性的保护提出了巨大的挑战（Wang et al. 2013）。然而，现有研究忽略了以城市化形成的斑块生境为载体分析小岛屿效应（Petel et al. 2004, Palmer et al. 2008, Fitzimons et al. 2011）。因此，本研究以贵州花溪大学城 30 个破碎化自然林地作为研究区，面积介于 0.25 hm² 至 290.40 hm² 之间，检验鸟类群落中是否存在小岛屿效应，以此探索生境破碎化对生物多样性的影响，为合理开展城市规划和实施物种保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究区位于贵州贵阳贵安新区花溪大学城（26°21′~26°24′ N, 106°30′~106°40′ E, 海拔约 1 200 m；图 1）。该区域为典型的喀斯特地

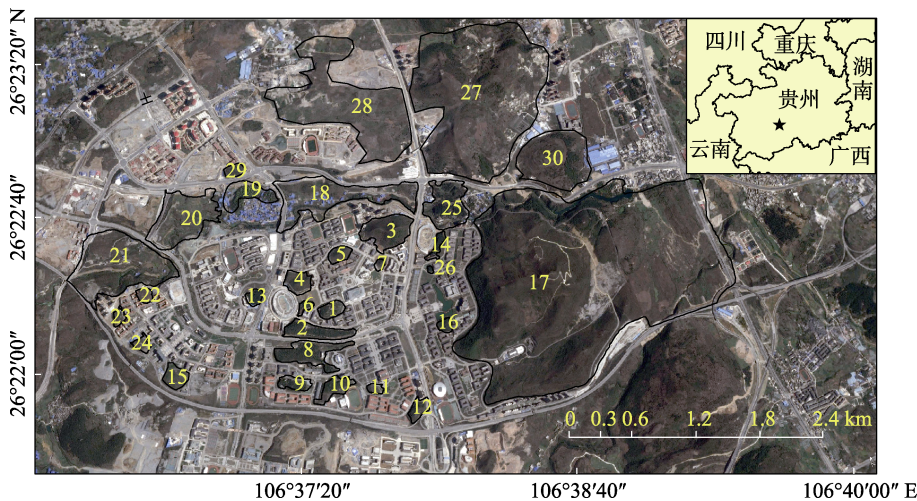


图 1 贵州花溪大学城的位置及 Google 卫星地图下 30 个林地斑块的分布

Fig. 1 Map showing the location of Huaxi University Areas in Guizhou Province and the distribution of 30 fragmented woodlots overlaid on Google imagery

右上角插图★号所示为贵州花溪大学城位置。

★ in the upper right inset shows the location of Huaxi University Areas in Guizhou Province.

貌; 年均气温约为 15.7 °C, 年均降水量约为 1 070 mm, 全年阳光充足, 雨水充沛, 属于亚热带湿润温和型气候。大学城自 2009 年开始建设, 此后各个高校陆续入驻, 原本农田环绕的连续自然林地逐渐变成了被道路或建筑分割的斑块林地。本研究选择其中残存的 30 个斑块作为研究地点, 面积 0.25 ~ 290.40 hm², 林地斑块及周围高校建筑区和交通道路组成的镶嵌体总面积约为 1 500 hm²。不同斑块间的植被组成差异较大, 主要由暖性松林、常绿落叶阔叶林、落叶阔叶灌丛和禾草灌草丛组成(曹朝阳 2021)。

1.2 研究方法

1.2.1 样线设置 鸟类多样性的调查采用样线法。首先, 下载研究区的 Google 卫星地图, 利用 ArcGIS 10.7 (ESRI 2020) 勾勒出 30 个斑块的边界, 计算每个斑块的面积。依据 Schoereder 等(2004)和斯幸峰(2014), 在每个斑块中设置与其面积大小成正比的固定长度样线, 长度介于 82.5 至 7 073.7 m 之间; 为减少取样误差, 样线尽可能穿越斑块的中心位置, 详见郑进凤等(2021)。

1.2.2 野外调查 在 2017 至 2021 年鸟类的繁殖季节(4 至 8 月)开展鸟类调查。其中, 前 3 年 2017 至 2019 年仅对 1 至 26 号斑块进行了调查, 每年调查 3 或 4 轮; 2020 年对 1 至 26 号斑块进行了 1 轮调查。2020 和 2021 年, 对 27 至 30 号斑块进行了 11 轮调查。通过 5 年的调查, 所有斑块皆被调查了 11 轮。一般由 2 名固定人员协作完成一轮调查, 调查在无风、无雨、无雾晴好天气的 7:00 ~ 10:00 时和 16:00 ~ 18:00 时进行。调查人员在样线上的行走速度约为 1.5 km/h, 记录样线两侧 50 m 范围内看到或听到的鸟类, 详见郑进凤等(2021)。

1.3 数据分析

首先, 综合 2017 至 2021 年对 30 个斑块 11 轮调查数据统计研究区的鸟类多样性, 并统计每个斑块的鸟类物种数和国家重点保护动物、中国特有鸟类。鸟类分类和中国特有鸟类

参照《中国鸟类分类与分布名录》(第三版)(郑光美 2017), 重点保护动物的保护等级参照《国家重点保护野生动物名录》(国家林业和草原局 2021)。

然后, 将记录到的猛禽与水鸟、家燕(*Hirundo rustica*)、金腰燕(*Cecropis daurica*)、小白腰雨燕(*Apus nipalensis*)等非森林鸟类和仅记录到 1 次的鸟类数据予以剔除(郑进凤等 2021), 构建种-面积模型检验是否具有小岛屿效应。依据 Chen 等(2020), 分别构建如下三种经典种-面积模型: 先平后升的两段式回归模型(the left-horizontal with one-threshold model)(Lomolino et al. 2001)、先缓后升的两段式回归模型(the continuous with one-threshold model)(Gentile et al. 2005, Dengler 2010)及线性模型(the linear model)(Preston 1962)。此外, 构建只有截距的零模型(the null model)作为对比。上述 4 种模型的公式分别为, $\log S = c + (\log A > T) z_1 (\log A - T)$, $\log S = c + (\log A \leq T) z_1 \log A + (\log A > T) [z_1 T + z_2 (\log A - T)]$, $\log S = c + z_1 \log A$, $\log S = c + 0 \log A$, 式中, S 代表物种丰富度, A 代表林地斑块的面积, c 代表截距, z_1 、 z_2 代表斜率, T 代表断点处的面积对数, 均为种-面积关系模型的拟合参数。括号中的逻辑表达式($\log A > T$)和($\log A \leq T$)表示如果逻辑表达式成立, 那么返回值 1, 否则返回值 0。

参照赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)来评判模型效果(Burnham et al. 2002), $A_{IC} = 2(K + 1) + n \ln(S_{SE} / n)$, $A_{ICc} = A_{IC} + 2K(K + 1) / (n - K - 1)$, 式中, A_{IC} 为赤池信息量准则值, K 为所拟合模型中参数的数量, n 为观测值数目, S_{SE} 为残差平方和, A_{ICc} 为小样本赤池信息量准则值。

在本研究中, 由于样本量较小, 因此使用小样本赤池信息量准则值(A_{ICc})来评判模型。小样本赤池信息量准则值越小, 则模型越优, 若次优模型与最优模型的小样本赤池信息量准则值之差小于或等于 2, 即 $\Delta A_{ICc} \leq 2$, 则认

为次优模型与最优模型具有同等解释效力 (Burnham et al. 2002)。上述统计分析在 R.4.0.5 中使用 sars 程序包 (Matthews et al. 2019) 执行。

2 结果

2.1 物种多样性

2017 至 2021 年对 30 个斑块的 11 次调查中,共记录到鸟类 98 种,隶属于 11 目 41 科(鸟类名录信息详见 <https://figshare.com/s/4e4f7dc27ff314bbef06>), 包含国家 II 级保护野生动物红隼 (*Falco tinnunculus*)。剔除高空飞行、非森林鸟类及偶然出现的物种后,共记录到鸟类 75 种,隶属于 5 目 31 科。不同斑块中的鸟类物种数介于 12 至 49 种之间,平均每个斑块有 24 种,其中,雀形目鸟类最多,达 68 种,鸡形目鸟类最少,仅环颈雉 (*Phasianus colchicus*) 1 种。

2.2 种-面积关系

所构建的 4 种种-面积关键模型中 (表 1),先平后升的两段式回归模型 (图 2a) 的小样本赤池信息量准则值最小 ($A_{ICc} = 173.08$), 其次是先缓后升的两段式回归模型 (图 2b, $A_{ICc} = 175.58$)、线性回归模型 (图 2c, $A_{ICc} = 176.65$) 和零模型 (图 2d, $A_{ICc} = 228.01$)。最优模型 (先平后升的两段式回归模型) 与次优模型 (先缓后升的两段式回归模型) 的 ΔA_{ICc} 大于 2, 表明先平后升的两段式回归模型是拟合种-面积关

系的最佳模型。
根据最优模型即先平后升的两段式回归模型 (图 2a), 面积大小排列第 6 的 16 号斑块处于阈值折点, 该斑块面积为 1.16 hm^2 。在面积临界阈值 1.16 hm^2 之上, 鸟类物种丰富度随斑块面积增大而逐渐增加; 而在面积阈值 1.16 hm^2 以下, 物种丰富度与面积的拟合线为一条水平线, 即鸟类物种丰富度没有随面积增加或减少而发生显著变化 (图 2a), 表明存在小岛屿效应。

3 讨论

本研究以贵州花溪大学城破碎化自然林地 为研究区, 揭示了鸟类群落存在小岛屿效应。数据分析发现, 在林地面积阈值 1.16 hm^2 之上, 物种丰富度与林地斑块的面积存在显著正相关 (图 2a), 即斑块面积越大, 鸟类物种丰富度越高, 反之鸟类物种丰富度越低, 表明生境破碎化对物种多样性具有明显的负效应。通常而言, 斑块面积越小, 所能提供的栖息地、巢址资源和食物资源等也就越少, 受选择性灭绝等 作用的影响, 一些对面积敏感的物种可能率先 从斑块中消失, 因此物种丰富度较低 (Christoph et al. 2008, 张明海等 2014)。
但是, 在面积阈值 1.16 hm^2 之下, 物种丰 富度与面积的拟合线为一条水平线, 即鸟类物 种丰富度没有随面积增加或减少而发生显著变 化 (图 2a), 表明存在小岛屿效应。一些研究 已经报道, 在陆桥岛屿等破碎化生境中的生物

表 1 贵州花溪大学城 30 个破碎化林地中鸟类群落种-面积关系的 4 种关键模型及参数统计值
Table 1 Summary statistics for four key models examining species-area relationship for bird assemblages on 30 fragmented woodlots in Huaxi University Areas, Guizhou, China

模型 Model	似然函数对数 The log-likelihood (log L)	参数数量 Number of estimable parameters (K)	赤池信息量准则值 Akaike information criterion (A_{IC})	小样本赤池信息量准则值 Akaike's information criterion corrected for small sample size (A_{ICc})
先平后升的两段式模型 Left-horizontal with one-threshold model	- 81.74	4	171.48	173.08
先缓后升的两段式模型 Continuous with one-threshold model	- 81.54	5	171.83	175.58
线性模型 Linear model	- 84.86	3	175.73	176.65
零模型 Null model	- 111.78	2	227.56	228.01

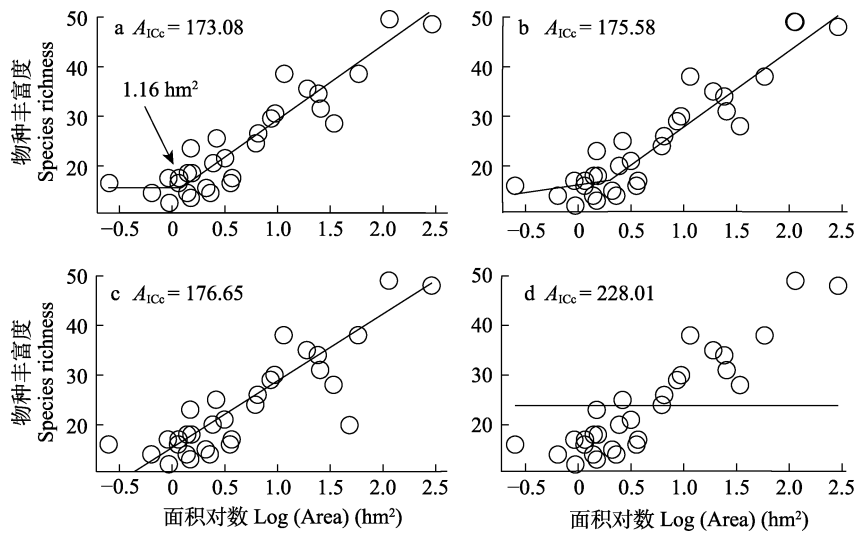


图2 预测贵州花溪大学城 30 个破碎化林地中鸟类群落种-面积关系的四种关键模型

Fig. 2 Four key models to predict species-area relationship for bird assemblages on 30 fragmented woodlots in Huaxi University Areas, Guizhou, China

a. 先平后升的两段式回归模型; b. 先缓后升的两段式回归模型; c. 线性模型; d. 零模型。

a. The left-horizontal with one-threshold model; b. The continuous with one-threshold model; c. The linear model; d. The null model.

群落存在小岛屿效应 (Qie et al. 2011, Wang et al. 2018b, Chen et al. 2019), 但是在城市破碎化生境中报道不多 (Petel et al. 2004, Palmer et al. 2008, Fitzimons et al. 2011)。当前, 关于小岛屿效应形成机制的假说有四种, 面积独立灭绝假说 (Macarthur et al. 1967)、生境质量假说 (Niering 1963, Whitehead et al. 1969)、营养假说 (Anderson et al. 2001, Barrett et al. 2003) 和干扰假说 (Lomolino 2000, Lomolino et al. 2001)。其中, 面积独立灭绝被认为是小岛屿效应产生的关键因素, 例如, Chen 等 (2020) 通过对舟山群岛蝴蝶群落分析指出, 在一定面积阈值之下, 小岛屿可能缺少某些特殊的生境, 蝴蝶群落具有独立于面积的高灭绝率, 物种丰富度普遍较低, 因而形成小岛屿效应。正如前述, 在本研究区面积大于 1.16 hm^2 的林地斑块中, 受选择性灭绝的作用鸟类物种丰富度随面积减少而降低。但是, 先平后升的两段式回归模型 (图 2a) 表明, 在面积阈值 1.16 hm^2 之下的小斑块中, 鸟类物种丰富度高于传统线性模

型 (图 2c) 的预测值, 说明面积独立灭绝假说可能并不适用于解释本研究所发现的小岛屿效应。

本研究目前尚不清楚是什么机制导致花溪大学城的鸟类群落出现了小岛屿效应, 推测可能与喀斯特生境异质性和食物资源有关。在贵州喀斯特地区, 山高坡陡, 坡向差异和坡度影响着水热条件分布, 加之强烈、不稳定的化学溶解作用, 易形成不均一的异质性生境。此前已有研究表明, 物种的空间分布除了受面积影响之外, 还可能受到生境类型的影响, 不同生境中可能出现不同的物种 (Xie et al. 2021)。在本研究区, 先前调查已揭示不同林地斑块间木本植物和鸟类物种组成均有较大差异 (曹朝阳 2021, 郑进凤等 2021)。喀斯特生境异质性可能导致不同斑块间物种组成存在一定差异, 在一些具有特殊生境的小斑块中可能具有一些特定的物种, 从而导致在一定面积阈值之下斑块面积不再是决定物种丰富度的主要原因, 因此产生了小岛屿效应。

再者,小岛屿效应的产生可能与食物资源相关。食物资源的丰富度、可获得性和空间分布可驱动生物对生境的选择(范言广 2020, 韩联宪等 2021)。例如,本研究的 26 号斑块面积仅为 0.25 hm^2 , 却有 16 种鸟类。26 号斑块毗邻学校食堂, 人类活动时营养物质的溢出可能吸引一些适应能力强的鸟类前来觅食, 如麻雀 (*Passer montanus*)、白颊噪鹛 (*Garrulax sannio*) 和黄臀鹌 (*Pycnonotus xanthorrhous*) 等, 从而导致其具有较高的物种多样性。

此外,小岛屿效应的产生还可能与“中转站”和“垫脚石”等生态功能有关。从本研究区林地斑块的地理分布格局来看,26 号斑块位于鸟类物种丰富度较高的 17、25 和 3 号三个斑块之间(图 1),可能充当鸟类在不同斑块间活动的中转站或垫脚石(Chen et al. 2019)。在野外调查中,调查者偶有发现一些物种,如山斑鸠(*Streptopelia orientalis*)和红嘴蓝鹊(*Urocissa erythrorhyncha*)等,从邻近的 17 号斑块飞来,在 26 号斑块作短暂停留后,又飞往附近的 25 号或 3 号斑块。因此,在破碎化生境中,一些小斑块可承担中转站或垫脚石的生态作用(Gilpin 1980),从而导致面积效应减弱,形成了小岛屿效应(Gilpin 1980, Sillero et al. 2018)。

虽然小岛屿效应产生的具体机制还有待进一步结合物种生活史特性、斑块地理环境特征等因子开展综合分析(Chen et al. 2020),但目前的研究结果揭示,随着生境的进一步破碎化,大斑块的数量逐渐减少,彼此孤立隔离的小斑块数量增加,可能对种间基因交流产生负效应(俞文灏等 2019)。因此,在城市规划建设时应尽可能保护自然林地免遭破坏,同时因地制宜地设计斑块间的绿色过渡带。在现有破碎化生境中,大斑块为物种提供了更多的觅食和栖息地资源,能维持更高的物种多样性,因此城市化建设实践中应予以优先保护。但是,小岛屿效应表明,一些具有独特生境类型或利于物种扩散交流的小林地斑块对维持物种多样性亦不可或缺,在保护实践中不应被忽视(Lomolino

et al. 2001)。

致谢 感谢龙盛尧、冉小东、田佼、郇合、任云芳、雷小琴、刘宇、唐蓉、贺霜、陈月红等同学参与野外鸟类调查工作。

参 考 文 献

- Anderson W B, Wait D A. 2001. Subsidized island biogeography hypothesis: another new twist on an old theory. *Ecology Letters*, 4(4): 289–291.
- Barrett K, Wait D A, Anderson W B. 2003. Small island biogeography in the Gulf of California: lizards, the subsidized island biogeography hypothesis, and the small island effect. *Journal of Biogeography*, 30(10): 1575–1581.
- Burnham K P, Anderson D R. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-theoretic Approach*. New York, USA: Springer, 60–71.
- Chen C W, Xu A C, Ding P, et al. 2019. The small-island effect and nestedness in assemblages of medium-and large-bodied mammals on Chinese reservoir land-bridge islands. *Basic and Applied Ecology*, 38: 47–57.
- Chen C W, Xu A C, Wang Y P. 2020. Area threshold and trait-environment associations of butterfly assemblages in the Zhoushan Archipelago, China. *Journal of Biogeography*, 48(4): 785–797.
- Christoph F J M, Fründ J, Lizano W P, et al. 2008. Ecological correlates of vulnerability to fragmentation in Neotropical bats. *Journal of Applied Ecology*, 45(1): 381–391.
- Dengler J. 2010. Robust methods for detecting a small island effect. *Diversity and Distributions*, 16(2): 256–266.
- Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI). 2020. ArcGIS. Ver. 10.7. [CP/OL]. [2021-08-08]. <http://www.esrichina.com.cn/>.
- Fahrig L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1): 487–515.
- Fitzimons J A, Antos M J, Palmer G C. 2011. When more is less: Urban remnants support high bird abundance but diversity varies. *Pacific Conservation Biology*, 17(2): 97–109.
- Gentile G, Argano R. 2005. Island biogeography of the Mediterranean sea: the species-area relationship for terrestrial isopods. *Journal of Biogeography*, 32(10): 1715–1726.
- Gilpin M E. 1980. The role of stepping-stone islands. *Theoretical*

- Population Biology, 17(2): 247–253.
- Johnson M T J, Munshi-South J. 2017. Evolution of life in urban environments. *Science*, 358(6363): eaam8327.
- Lomolino M V. 2000. Ecology's most general, yet protean pattern: the species-area relationship. *Journal of Biogeography*, 27(1): 17–26.
- Lomolino M V, Weiser M D. 2001. Towards a more general species-area relationship: diversity on all islands, great and small. *Journal of Biogeography*, 28(4): 431–445.
- Macarthur R H, Wilson E O. 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, State of New Jersey, USA: Princeton University Press, 19–67.
- Matthews T J, Triantis K A, Whittaker R J, et al. 2019. Package 'sars'. Ver. 1.3.0. [CP/OL]. [2021-08-08]. <https://cran.r-project.org/web/packages/sars/>.
- Niering W A. 1963. Terrestrial ecology of Kapingamarangi Atoll, Caroline Islands. *Ecological Monographs*, 33(2): 131–160.
- Palmer G C, Fitzsimons J A, Antos M J, et al. 2008. Determinants of native avian richness in suburban remnant vegetation: Implications for conservation planning. *Biological Conservation*, 141(9): 2329–2341.
- Petel T P, Lill A. 2004. Bird communities of some urban bushland fragments: Implications for conservation. *Australian Field Ornithology*, 21(1): 21–32.
- Preston F W. 1962. The canonical distribution of commonness and rarity: Part I. *Ecology*, 43(2): 185–215.
- Qie L, Lee T M, Sodhi N S, et al. 2011. Dung beetle assemblages on tropical land-bridge islands: small island effect and vulnerable species. *Journal of Biogeography*, 38(4): 792–804.
- Schoereder J H, Galbiati C, Ribas G R. 2004. Should we use proportional sampling for species-area studies? *Journal of Biogeography*, 31(8): 1219–1226.
- Sillero N, Biaggini M, Corti C. 2018. Analysing the importance of stepping-stone islands in maintaining structural connectivity and endemism. *Biological Journal of the Linnean Society*, 124(1): 113–125.
- Triantis K A, Sfenthourakis S. 2012. Island biogeography is not a single-variable discipline: the small island effect debate. *Diversity and Distributions*, 18(1): 92–96.
- Triantis K A, Vardinoyannis K, Tsoilaki E P, et al. 2006. Re-approaching the small island effect. *Journal of Biogeography*, 33(5): 914–923.
- Wang Y P, Chen C W, Millien V. 2018a. A global synthesis of the small-island effect in habitat islands // 浙江省科学技术协会. 浙江省动物学会第十三次会员代表大会暨学术研讨会论文摘要集. 宁波 2018-11, 19.
- Wang Y P, Ding P, Chen S H, et al. 2013. Nestedness of bird assemblages on urban woodlots: Implications for conservation. *Landscape and Urban Planning*, 111: 59–67.
- Wang Y P, Wang X, Wu Q, et al. 2018b. The small-island effect in amphibian assemblages on subtropical land-bridge islands of an inundated lake. *Current Zoology*, 64(3): 303–309.
- Wang Y P, Zhang M, Wang S Y, et al. 2012. No evidence for the small-island effect in avian communities on islands of an inundated lake. *Oikos*, 121(12): 1945–1952.
- Whitehead D R, Jones C E. 1969. Small islands and the equilibrium theory of insular biogeography. *Evolution*, 23(1): 171–179.
- Xie R L, Zhao G F, Yang J H, et al. 2021. eDNA metabarcoding revealed differential structures of aquatic communities in a dynamic freshwater ecosystem shaped by habitat heterogeneity. *Environmental Research*, 201: 111602.
- 曹朝阳. 2021. 贵州花溪大学城破碎化自然林地中木本植物多样性及空间分布格局研究. 贵阳: 贵州师范大学硕士学位论文, 26–32.
- 范言广. 2020. 食物资源变化对升金湖越冬白额雁生境选择和觅食行为的影响. 合肥: 安徽大学硕士学位论文, 41–45.
- 国家林业和草原局. 2021. 国家林业和草原局 农业农村部公告 (2021 年第 3 号) (国家重点保护野生动物名录). [EB/OL]. [2021-08-08]. <https://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>.
- 韩联宪, 徐永春. 2021. 钳嘴鹳北扩到中国. *森林与人类*, (2): 48–59.
- 斯幸峰. 2014. 片段化生境中繁殖鸟类群落的物种周转与 β 多样性. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 16–18.
- 俞文灏, 吴保锋, 刘勇波. 2019. 生境破碎化对动植物遗传多样性的影响研究进展. *应用与环境生物学报*, 25(3): 743–749.
- 张明海, 马建章. 2014. 野生动物生境破碎化理论探讨. *野生动物学报*, 35(1): 6–14.
- 郑光美. 2017. *中国鸟类分类与分布名录*. 3 版. 北京: 科学出版社, 1–410.
- 郑进凤, 唐蓉, 贺霜, 等. 2021. 贵州花溪大学城破碎化林地鸟类多样性与嵌套分布格局. *生物多样性*, 29(5): 661–667.