



•研究报告•

基于MaxEnt模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺

马星^{1#}, 王浩^{1#}, 余蔚^{1b3,1}, 杜勇¹, 梁健超^{1b2*}, 胡慧建^{2*}, 邱胜荣⁴, 刘璐⁴

1. 广东省城乡规划设计研究院, 广州 510290; 2. 广东省科学院动物研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护与利用公共实验室, 广州 510260; 3. 中山大学航空航天学院, 广州 510275; 4. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

摘要: 随着环境问题日益突出, 生物多样性也面临着挑战。广东省丰富的水土资源孕育了大量的生物物种, 然而快速的城市扩张又对生物多样性的保护带来了一定的压力。明确广东省生物多样性保护空缺, 以便在未来城市规划布局中更好地实施保护, 缓解城市发展与生态保护之间的矛盾。空间分布格局是生物多样性保护规划的基础, 本文以全国第二次陆生野生动物资源调查鸟类数据为基础, 基于MaxEnt模型进行空间化(空间分辨率为100 m × 100 m), 通过识别热点地区, 并与现有国土规划中三条管控线对比, 识别保护空缺。本文主要有以下结果: (1)广东省建模鸟类共有13目45科173种, 其空间丰富度格局主要呈三片区分布: ①南岭片区; ②粤东片区; ③江门、阳江、云浮片区; (2)影响鸟类空间格局的环境因子在不同物种间差异明显, 总体来看土地利用类型、高程、年均温度差等因素占主导地位; (3)保护鸟类与全部鸟类的热点地区分布相似, 但空间上更为聚集, 两者的空间重叠率达63.0%, 主要分布于南岭片区、粤东片区; (4)留鸟类和迁徙鸟类的热点地区存在明显空间差异, 重叠区域仅25.3%, 留鸟类分布相对靠北而迁徙鸟类相对趋南; (5)鸟类热点分区统计对比中, 与永久基本农田的重叠率明显高于生态保护红线, 极少量分布于城镇开发边界内部, 全部鸟类、保护鸟类、留鸟类、迁徙鸟类均存在明显的保护空缺。本研究得到了精细尺度下鸟类多样性空间分布格局与保护空缺结果, 为城镇开发边界、永久基本农田、生态保护红线三条控制线内的生物多样性分区保护、管控政策实施提供了有效支撑, 为广东省的生物多样性保护、生态规划调整提供了有益参考。

关键词: 广东省; 鸟类多样性; MaxEnt模型; 热点地区; 保护空缺; 生态保护红线; 留鸟; 迁徙鸟

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于MaxEnt模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. doi: 10.17520/biods.2020229.

Ma X, Wang H, Yu W, Du Y, Liang JC, Hu HJ, Qiu SR, Liu L (2021) Analysis on the hotspot and conservation gaps of bird biodiversity in Guangdong Province based on MaxEnt model. Biodiversity Science, 29, 1097–1107. doi: 10.17520/biods.2020229.

Analysis on the hotspot and conservation gaps of bird biodiversity in Guangdong Province based on MaxEnt model

Xing Ma^{1#}, Hao Wang^{1#}, Wei Yu^{1b3,1}, Yong Du¹, Jianchao Liang^{1b2*}, Huijian Hu^{2*}, Shengrong Qiu⁴, Lu Liu⁴

1 Urban and Rural Institution in Guangdong, Guangzhou 510290

2 Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Guangzhou 510260

3 School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

4 Survey & Planning Institute of State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714

ABSTRACT

Aims: With the increasingly prominent environmental problems, biodiversity is at risk. While the rich soil and water resources in Guangdong Province, China, have given rise to a large number of species, the rapid urban expansion of the Pearl River Delta has challenged protecting biodiversity. Our goal in this study was to evaluate biodiversity conservation in Guangdong Province to better inform future urban planning so that is compatible with the protection of biodiversity and minimizes conflict between development and conservation.

收稿日期: 2021-02-07; 接受日期: 2021-04-15

基金项目: 广东省科技计划项目(2019B121202004; 2019B121202003)和广东省教育厅基础研究重点项目(2017KZDXM077)

共同第一作者 Co-first authors

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: 13570909977@139.com (胡慧建); 13760813102@163.com (梁健超)

Methods: We used bird spatial distribution data from the second terrestrial wildlife resources survey in China to create habitat suitability models using MaxEnt at high spatial resolution (100 m × 100 m). We then identified protection gaps by determining the locations of biodiversity hotspots that we compared to the ecological red line, permanent basic farmland and urban development boundary in existing urban plans.

Results: We recorded 173 species of birds belonging to 45 families and 13 orders in Guangdong Province. Regions with high species richness were mainly distributed in three areas: Nanling, Eastern Guangdong, and Jiangmen-Yangjiang-Yunfu. The environmental factors affecting the bird richness patterns significantly differed among species. In general, land use, altitude, and annual average temperature difference were dominant factors. The spatial locations of hotspots of protected birds were similar to those of all birds, with a spatial overlap rate of 63.0%. The overlap was mainly distributed in Nanling and Eastern Guangdong. By contrast, we found large apparent differences between hotspot locations of resident and migratory birds, which overlapped by only 25.3%. Most resident birds were distributed relatively close to the north, while most migratory birds tended towards the south. The overlap of hotspots with permanent basic farmland was significantly higher than the ecological red line. Only a small portion of the hotspots were distributed within the urban development boundary. Altogether, we found obvious protection gaps for all groups of birds we considered.

Conclusions: Our high-resolution bird richness maps enabled a critical evaluation of where biodiversity hotspots conflict with urban developments. Our results provide urgent support for the implementation of biodiversity zoning protection and the development of management policies within the three control lines of the urban development boundary, permanent basic farmland, and ecological red line. Ultimately, our results provide a useful reference and roadmap for biodiversity protection and ecological planning adjustment in Guangdong Province.

Key words: Guangdong Province; bird diversity; MaxEnt model; hotspot; conservation vacancies; ecological red line; resident birds; migratory birds

随着城市扩张、气候变化等因素带来的环境问题日益加剧,生物多样性面临着严峻的挑战(Rands et al, 2010)。研究生物多样性的空间分布格局并识别出热点地区,是实现生物多样性保护的有效途径(Brooks et al, 2006; 张有瑜等, 2008)。

传统的分布格局研究方法(如文献记录法、叠加分析法等)存在较大的局限性(周立志等, 1999; 吴咏蓓和张恩迪, 2000; 王金亮和陈姚, 2004; 田波等, 2008)。随着3S技术的成熟,考虑了环境异质性且精度更高的物种分布模型得到更为广泛的应用(朱耿平和乔慧捷, 2016)。物种分布模型大多对数据源有一定的要求,例如回归模型同时需要物种的“出现点”与“不出现点”的数据,而在大范围的动物调查工作中,“不出现点”数据往往难以采集(Vina et al, 2010; 齐增湘等, 2011)。最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)较好地弥补了这一缺陷,在仅有少量物种“出现点”的情况下也能输出高精度的模拟结果,作为大尺度空间分布研究的有效工具,目前已被众多生态学者应用于物种栖息地的分布模拟中(Pearson et al, 2007; Boubli & Lima, 2009; 邢丁亮和郝占庆, 2011; 崔绍朋等, 2018)。

广东省拥有丰富的水资源及充足的光热条件,动物资源尤为丰富。然而,随着珠三角地区演变为

全国城镇最为密集的地区,经济要素的高度聚集与人口流入造成了一定的环境压力(许学强和李郇, 2009),生物多样性也面临着威胁。新型国土空间规划背景下,生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界(以下简称“三线”)成为核心的规划线性要素,生态保护红线更是生态保护与修复的重要“底线”,但关于它们与生物多样性热点地区之间的空间关系却鲜有报道,不利于规划管控与决策调整。鸟类作为食物链中的中、高级消费者,对环境的变化波动有极高敏感性,其数量与分布特征对生态系统中其他成员的状况具有重要指示作用(Padoaschioppa et al, 2006),常被作为生态保护规划中的指示物种(栾晓峰, 2003; 刘吉平等, 2009; 黄越, 2015)。因此,本文以全国第二次陆生野生动物资源调查(以下简称“二调”)为基础,利用MaxEnt模型模拟了广东省鸟类的空间分布格局,并识别其热点地区。在此基础上,探讨鸟类多样性热点与“三线”(特别是生态保护红线)的空间关系,找出潜在的保护空缺,期为生物多样性的保护规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究范围

广东省地处中国大陆南部(108°13′–119°59′ E,

23°28′–25°31′ N), 面积约17.97万km², 下辖21个地级市。省内自然地理环境多样, 北部纵列山脉居多, 南部以丘陵、平原、滩涂为主。全省林地面积占比高达55.05%, 从南至北植被类型包括热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、中亚热带常绿阔叶林等。得益于绵延的海岸线与粤北南岭山地的天然庇护, 广东省终年高温多雨, 年均温达18.94–23.82℃, 年均降水量约1,672.87 mm。林木茂盛、温暖湿润的自然条件为各类野生动物提供了天然的栖息环境。本文研究的范围涵盖整个广东省, 我们将其转化为17,455,341个100 m × 100 m的网格, 以下所有分析将在此网格体系中进行。

1.2 鸟类分布数据

鸟类分布数据来源于全国第二次陆生野生动物资源调查, 广东省调查时间为2012年7月至2018年4月。“二调”在充分考虑物种的栖息地类型、活动范围、生态习性的基础上, 结合广东省地理区系和实际情况, 将广东省划分为12个地理单元, 共设180个样区, 每个调查样区大小为10 km × 10 km (图1)。

对于每一个样区, 按照1.2%的调查强度, 采用随机均匀布样法设置了6条样线, 每条样线长度为4 km, 单侧宽度为25–30 m, 鸟类调查共分繁殖季与越冬季两期进行。调查时, 2–3人成组并以步行为主, 步行速度为1–2 km/h, 借助望远镜进行观察, 并记录发现鸟类的名称、数量、距离中线的距离、地理位置、生境状况和威胁因素等信息, 同时记录样线调查的行进航迹。为确保模型精度并减少空间偏差, 我们对同一种鸟类在同一个100 m × 100 m的网格内仅保留1条观测记录, 并仅选择了观察记录大于5个的鸟类进行研究^①。最终, 共173种鸟类50,453个分布点用于本文的研究。

1.3 环境数据

基于前人的研究(吴庆明等, 2016; 郝雪娜和吴艳兰, 2017; 林源等, 2017; 崔绍朋等, 2018), 从气候、地形、生境质量、干扰强度等因素考虑, 并经过Pearson相关分析验证(附录1), 筛选出高程、年均降水量、年均温, 年均湿度、年均温度差、土地利用类型、归一化植被指数、人口密度、距离城镇距离、距离水源距离等10个影响鸟类分布的环境因子

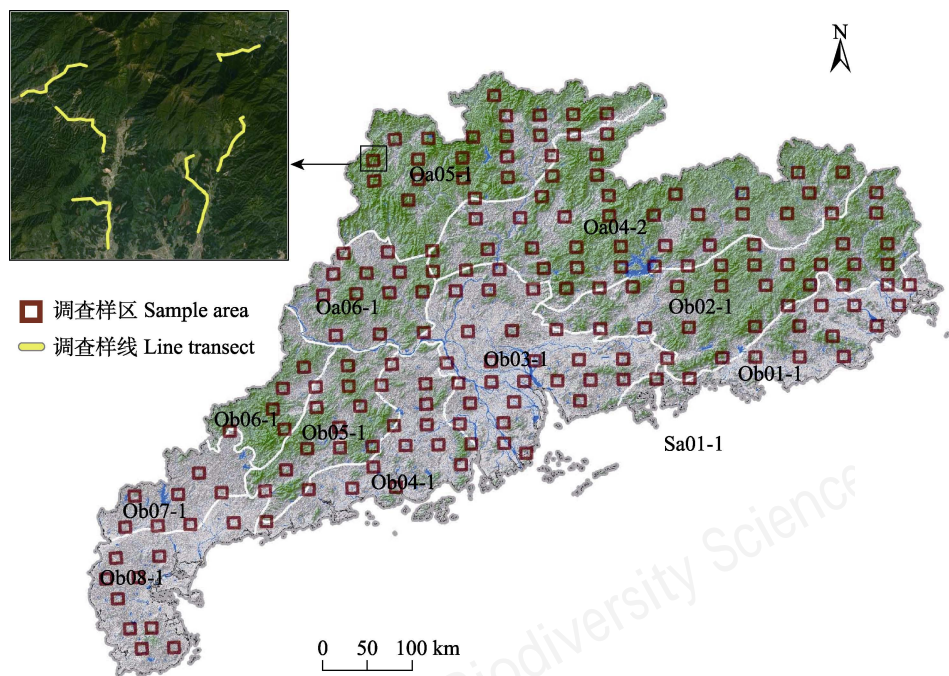


图1 研究区域与调查样区、样线分布

Fig. 1 Study area and the distribution of sample area and line transect

① 陈道剑 (2019) 广东省森林鸟类的样线有效宽度与分布格局. 硕士学位论文, 广西师范大学, 桂林.

进行模型分析(表1)。高程和归一化植被指数数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)；年均降水量、年均湿度、年均温、年均温度差来自于气象站点观测数据；土地利用类型数据来自于广东省土地利用变更调查；人口密度数据来自于百度慧眼；距离城镇距离和距离水源距离数据来自于广东省自然资源厅。源数据中，高程、距离城镇距离、距离水源距离、归一化植被指数原始分辨率为30 m × 30 m，使用最近邻法(nearest neighbor sampling)进行重采样；年均降水量、年均温、年均温度差、年均湿度原始数据为点数据，采用Kriging法将观测数据插值成同空间分辨率的数据；将以上数据统一进行归一化处理，分辨率均为100 m × 100 m，地理坐标系为

CGS_WGS_1984 (图2)。

1.4 MaxEnt模型构建

本文使用MaxEnt模型对173种鸟类(以下简称“全部鸟类”)在广东省的潜在分布区进行预测。对每一种鸟类，我们使用75%的点位作为训练数据进行分布预测，剩余出现点记录作为检验数据，为了防止计算的过拟合(over-fitting)，模型运算中采用了自动特征选择功能(auto feature function)。其余模型参数均设为默认。我们采用刀切法(Jackknife procedure)来分析每个环境变量对物种潜在分布影响的相对重要性(郝雪娜和吴艳兰, 2017)，使用受试者工作特征曲线(the receiver operating characteristics curve, ROC)下的面积值(area under the curve, AUC)来验证模型模拟结果，评价标准为：

表1 用于物种分布模型的环境因子

Table 1 Environmental factors used in species distribution models

| 环境因子 Environmental factors | 缩写 Abbreviation | 单位 Unit |
|--|-----------------|-------------------|
| 高程 Altitude | ALT | m |
| 年均降水量 Annual precipitation | AP | mm |
| 年均温 Annual mean temperature | AMT | ℃ |
| 年均湿度 Annual mean humidity | AMH | % |
| 年均温度差 Annual average temperature difference | AMTD | ℃ |
| 土地利用类型 Land use | LU | / |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI | / |
| 人口密度 Population density | PD | 人/km ² |
| 距离城镇距离 Distance from urban land | DUL | m |
| 距离水源距离 Distance from water | DW | m |

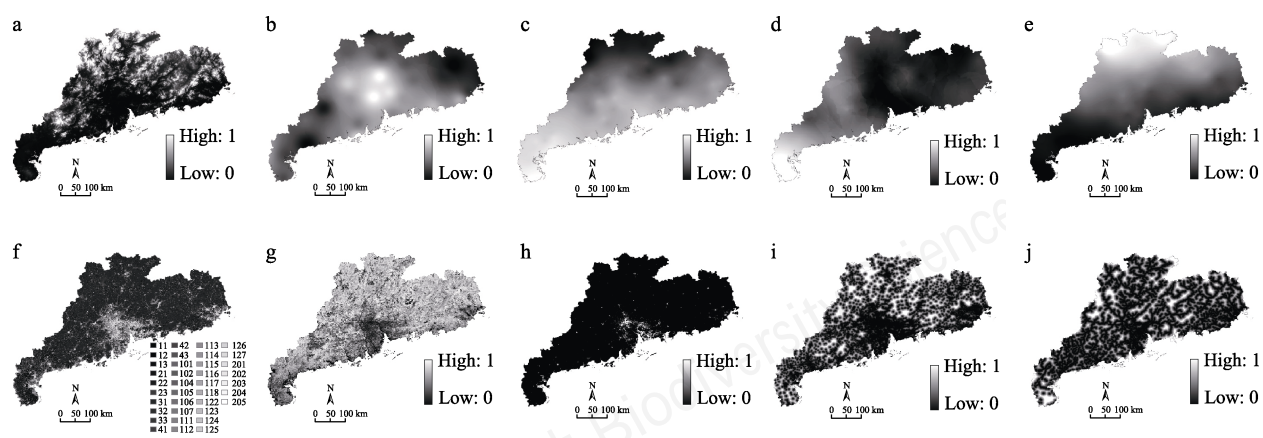


图2 影响鸟类分布的环境因子。a: 高程; b: 年均降水量; c: 年均温; d: 年均湿度; e: 年均温度差; f: 土地利用类型; g: 归一化植被指数; h: 人口密度; i: 距离城镇距离; j: 距离水源距离。

Fig. 2 Environmental factors affecting the distribution of birds. a, Altitude; b, Annual precipitation; c, Annual mean temperature; d, Annual mean humidity; e, Annual average temperature difference; f, Land use; g, Normalized difference vegetation index; h, Population density; i, Distance from urban land; j, Distance from water.

较差(0.6–0.7)、一般(0.7–0.8)、良好(0.8–0.9)和优秀(0.9–1.0)(Swets, 1988)。此外, 对于每个模型使用Subsample进行重复10次模拟, 并计算这10次交叉验证结果的平均生境适合度、AUC值以及环境变量的贡献度, 以此作为物种分布概率的预测结果、模型精度和因子作用的评价指标和标准(崔绍朋等, 2018)。选择均等测试敏感性和特异性阈值(equal training sensitivity and specificity Logistic threshold)作为阈值将平均生境适合度进行1、0二值化分割, 1表示潜在分布区, 0表示无分布。

1.5 热点地区与保护空缺分析

将所有MaxEnt模型的二值化结果进行空间叠加, 输出得到“全部鸟类”(指建模的173种鸟类)的分布格局; 根据《国家重点保护野生动物名录》、《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)附录II、《广东省重点保护陆生野生动物名录》(附录2)三个名录筛选出重点保护鸟类, 在本文中将其合称为“保护鸟类”并得到分布格局; 根据《中国鸟类分类与分布名录》(郑光美, 2005)分出“迁徙鸟、留鸟”类别, 同理得到其空间分布格局。利用自然断点(natural break)法将上述丰富度分布格局分为5类(全部鸟类中断值: 20, 35, 51, 69, 118; 保护鸟类: 3, 6, 9, 13, 22; 留鸟类: 12, 23, 34, 47, 81; 迁徙鸟类: 6, 13, 19, 26, 46), 依次为冷点地区、次冷点地区、中等地区、次热点地区、热点地区(Correa et al, 2017)。并进一步将热点地区与国土“三线”进行比对, 识别生态保护红线之外的保护空缺区域。

2 结果

2.1 鸟类的MaxEnt模型结果

参与本次建模的鸟类共有13目45科173种(附录3)。其中雀形目鸟类最多, 有105种, 占总物种数的60.3%。其中, 国家II级重点保护野生动物13种, 有黑冠鹃隼(*Aviceda leuphotes*)、白鹇(*Lophura nycthemera*)、赤腹鹰(*Accipiter soloensis*)、普通鵟(*Buteo buteo*)等; 广东省重点保护鸟类15种, 分别为白鹭(*Egretta garzetta*)、池鹭(*Ardeola bacchus*)、栗苇鳉(*Ixobrychus cinnamomeus*)、黑水鸡(*Gallinula chloropus*)等; 被列入CITES附录II的有黑鸢(*Milvus migrans*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、红嘴相思鸟(*Leiothrix lutea*)等12种。

模型显示总体物种平均AUC值为 0.819 ± 0.067

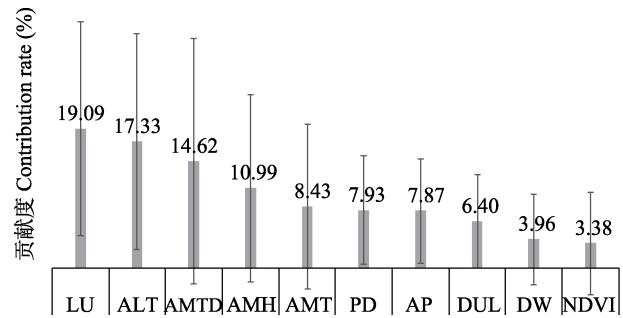


图3 环境因子的平均贡献度。缩写含义见表1。

Fig. 3 Contribution rate of environmental factors. See Table 1 for abbreviations.

(附录3), 表明绝大多数模型具有良好的预测精度。各环境因子的平均贡献度如图3所示, 总体上看对鸟类空间分布影响最大的环境因子为土地利用类型(0.19 ± 0.14), 其次为高程(0.17 ± 0.15)、年均温度差(0.14 ± 0.16)。但不同环境因素的贡献度在物种间的差异较大, 例如土地利用类型主要影响栗耳鹀(*Emberiza jankowskii*)、烟腹毛脚燕(*Delichon dasypus*)等鸟类, 高程则主要影响矛纹草鹀(*Babax lanceolatus*)、扇尾沙锥(*Gallinago gallinago*)等鸟类(附录4)。

建模结果中, 迁徙鸟类共计71种, 预测分布面积最大的为灰背鸫(*Turdus hortulorum*, 16.65万 km^2), 其次为红尾伯劳(*Lanius cristatus*, 14.47万 km^2); 留鸟共计102种, 其中大山雀(*Parus major*, 13.4万 km^2)、白喉红臀鹀(*Pycnonotus aurigaster*, 11.6万 km^2)等雀形目鸟类预测分布较为广泛。保护鸟类中, 红嘴相思鸟(13.01万 km^2)、白尾鹇(*Circus cyaneus*, 6.2万 km^2)、小鸦鹛(*Centropus bengalensis*, 5.4万 km^2)被预测为常见鸟类。

2.2 鸟类多样性格局

全部鸟类多样性高值区主要分布于Oa05-1、Oa04-2东、Ob01-1、Ob02-1、Ob04-1、Ob05-1、Ob06-1等地理单元中(图4a), 为便于描述, 本文将上述地理单元简化分为三大片区。(1)南岭片区(Oa05-1): 以韶关为中心向四周扩散, 西至大东山, 北抵蔚岭山脉, 鸟类栖息地形成以点、线连接型的高聚集区;(2)粤东片区(Oa04-2东、Ob01-1、Ob02-1): 栖息地由多个区域性斑块相连构成, 整体分布于7个地级市内(惠州、河源、梅州、潮州、汕头、揭阳、汕尾), 因九连山、七目峰山、莲花山、凤麓山脉的

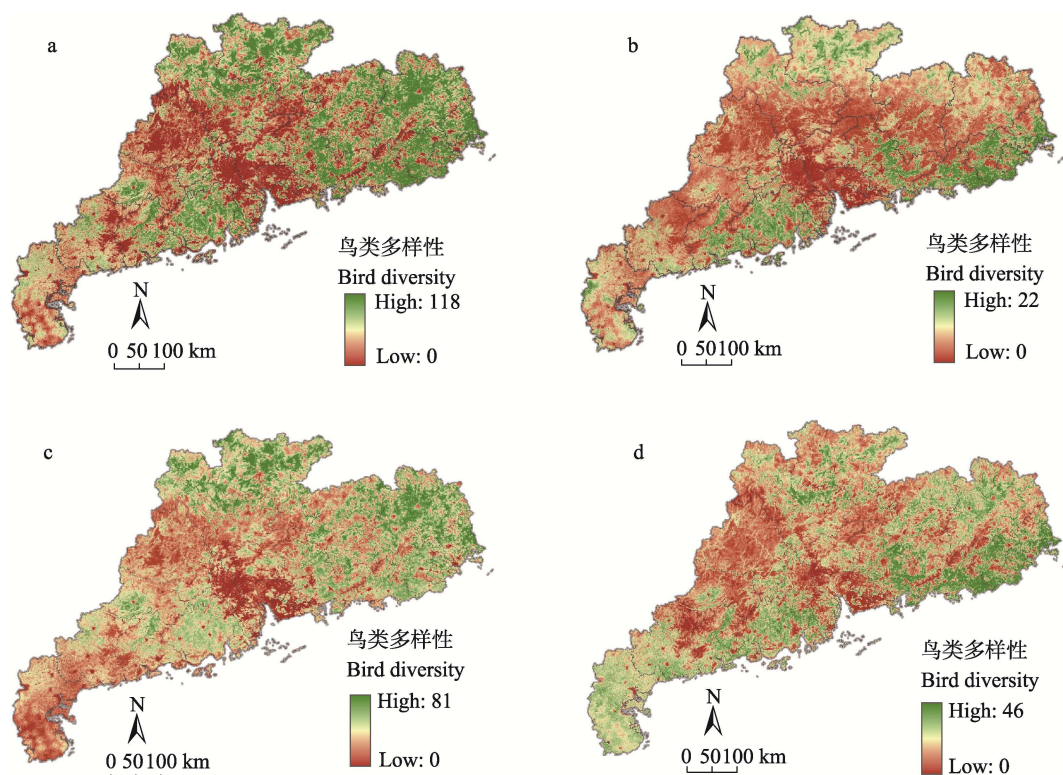


图4 广东省全部鸟类(a)、保护鸟类(b)、留鸟类(c)、迁徙鸟类(d)多样性空间分布格局

Fig. 4 Spatial patterns of all birds (a), protected birds (b), resident birds (c), migratory birds (d) biodiversity in Guangdong Province

割裂作用,河源、梅州南部等部分动物栖息地明显呈破碎状分布,不如粤东沿海地区的栖息地完整。

(3)江门、阳江、云浮片区(Ob04-1、Ob05-1、Ob06-1):江门市多样性高值区空间连片性相对较高;阳江、云浮市内两个栖息地斑块由大田顶山地、云开大山、云雾山、天露山等四山环绕而形成。

从图4b来看,保护鸟类空间分布更为聚集。南岭片区整体由外向内碎片化,中心聚集效应更为明显;粤东片区的保护鸟类丰富度格局整体向南部偏移,集中分布于惠州、汕尾、揭阳、汕头、潮州等沿海区域;江门、阳江、云浮片区综合变化较小,但云浮市对保护鸟类的适宜性明显降低。

从图4c, d来看,留鸟与迁徙鸟的分布格局存在明显的南北差异。留鸟主要的分布区相对靠北,例如粤湘边界处的蔚岭、大东山等,粤东片区中以梅州、潮州等地区为主,部分分布于云浮市内。迁徙鸟类整体分布在南部,南岭片区中主要分布于大东山南部、滑石山西部,粤东片区中主要活跃于沿海区域,广州南沙、江门等滨海地区也分布着迁徙鸟类的落脚点。

2.3 热点地区与“三线”的空间关系

全部鸟类的热点地区分布相对隔离,主要分布于南岭、粤东两大片区内,热点地区总面积为13,910.82 km²。保护鸟类的热点地区与全部鸟类的热点地区格局较为相似,两者空间重叠率为63.0%,但空间上存在一定的压缩,面积仅为4,783.28 km²,其在粤东片区的分布呈南北分化状。留鸟与迁徙鸟类的热点地区面积分别为11,290.26 km²、9,630.54 km²,两者的分布存在明显空间错位,空间重叠率仅为25.3%。分别将上述热点地区与“三线”对比,全部鸟类、保护鸟类、留鸟类、迁徙鸟类的保护空缺分别达到88.4%、95.4%、84.3%、95.4%,均存在大范围的保护空缺(表2)。

如图5所示,全部鸟类热点地区在生态保护红线内比例仅占11.6%,主要分布地为韶关市的丹霞山国家级自然保护区、南雄小流坑-青嶂山自然保护区、河源新港自然保护区、梅州市兴宁铁山渡田河自然保护区、汕尾市海丰鸟类自然保护区等周边区域;28.8%的热点地区与永久基本农田重叠,重叠部分中连片性较高的农田主要分布于南岭、粤东片区中;极少量热点地区分布于潮州、梅州市城镇开发

表2 鸟类热点地区与生态保护红线、永久基本农田和城镇开发边界的空间关系

Table 2 The relationship between species richness and the ecological red line, permanent basic farmland and the urban development boundary

| | | 生态保护红线 Ecological red line | 永久基本农田 Permanent basic farmland | 城镇开发边界 Urban development boundary | “三线”之外 Outside the three lines |
|----------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 全部鸟类 All birds | 相交面积 Intersecting areas (km ²) | 1,618.79 | 4,009.49 | 24.01 | 8,258.52 |
| | 热点地区占比 Proportion (%) | 11.6 | 28.8 | 0.2 | 59.4 |
| 保护鸟类 Protected birds | 相交面积 Intersecting areas (km ²) | 218.44 | 1,880.32 | 65.95 | 2,618.58 |
| | 热点地区占比 Proportion (%) | 4.6 | 39.3 | 1.4 | 54.8 |
| 留鸟类 Resident birds | 相交面积 Intersecting areas (km ²) | 1,776.68 | 2,856.25 | 3.17 | 6,654.16 |
| | 热点地区占比 Proportion (%) | 15.7 | 25.3 | 0.1 | 59.0 |
| 迁徙鸟类 Migratory birds | 相交面积 Intersecting areas (km ²) | 445.13 | 3,103.25 | 210.07 | 5,872.09 |
| | 热点地区占比 Proportion (%) | 4.6 | 32.2 | 2.2 | 61.0 |

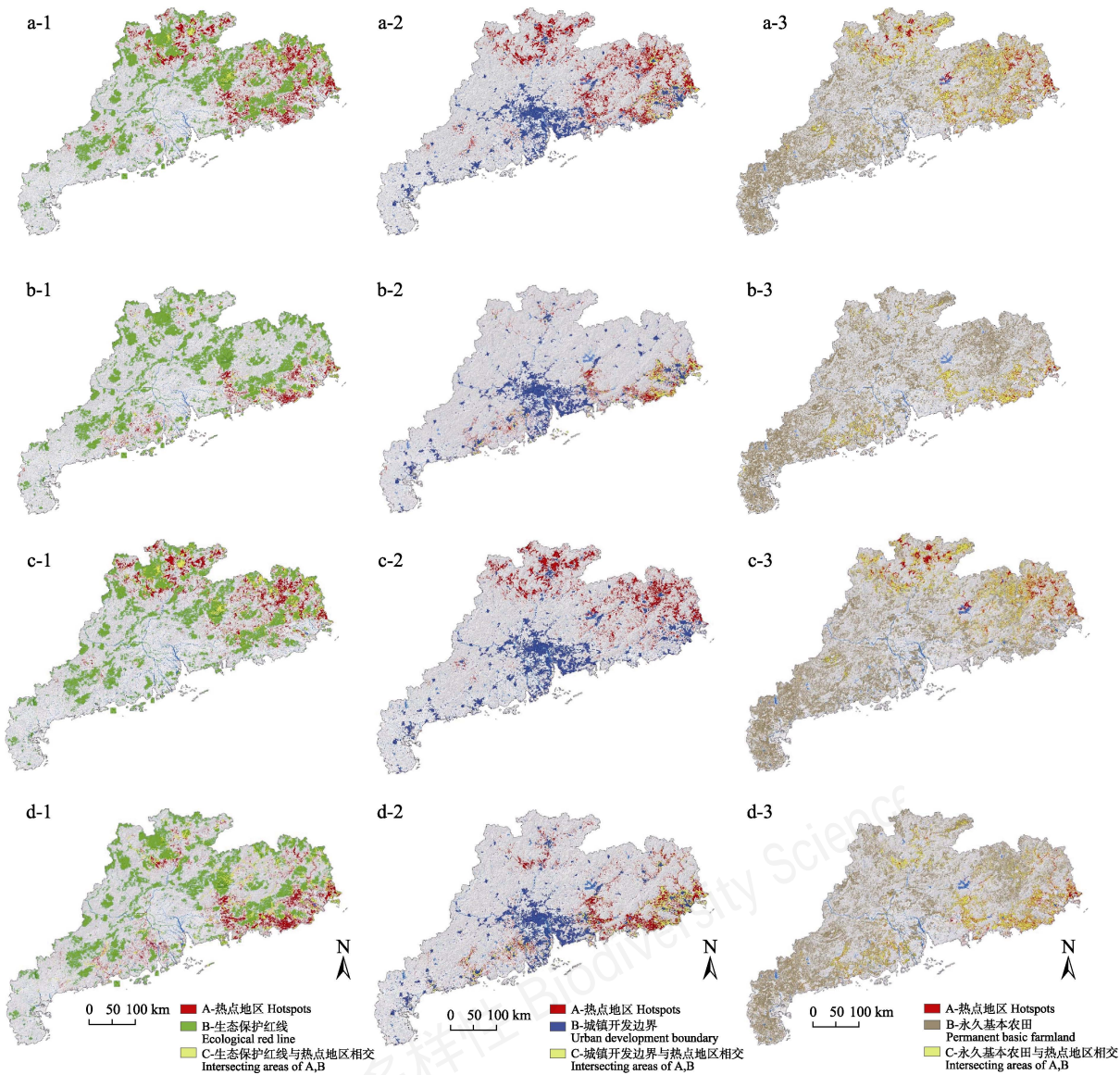


图5 全部鸟类(a)、保护鸟类(b)、留鸟类(c)、迁徙鸟类(d)与生态保护红线、城镇开发边界、永久基本农田的空间关系

Fig. 5 The spatial relationship between all birds (a), protected birds (b), resident birds (c), migratory birds (d) and ecological red line, urban development boundary and permanent basic farmland

边界内。保护鸟类热点地区中与生态保护红线相交部分仅占4.6%，其中主要分布于汕尾市海丰鸟类自然保护区、韶关丹霞山自然保护区等；39.3%与永久基本农田有明显重叠，较大重叠斑块主要分布于汕尾、揭阳、惠州、江门、阳江等地；城镇开发边界内的热点地区较少，主要分布于潮州、汕头市等区域。

留鸟热点地区位于生态保护红线内部的比例相对较高，达15.7%，主要分布于韶关丹霞山自然保护区、南岭国家森林公园、仁化森林公园、河源新港自然保护区、梅州市兴宁铁山渡田河自然保护区等区域；对于迁徙鸟类，生态保护红线内部热点地区比例仅为4.6%，主要位于汕尾市海丰鸟类自然保护区等。与永久基本农田的重叠部分中，留鸟热点地区的25.3%主要分布于南岭片区北部、粤东片区北部，而迁徙鸟类热点地区的32.3%主要分布于粤东片区南部、以及江门、阳江、云浮片区南部。从城镇开发边界的角度来看，留鸟热点地区基本上均在其外(仅占0.1%)，而迁徙鸟类热点地区在揭阳、汕头、潮州城镇区域内存在一定分布。

3 讨论

环境因子的影响随着鸟种类的不同有明显波动，而该差异恰好为具体物种的保护实施提供了相关参考。例如改善林分有利于主要受归一化植被指数影响的鸟类栖息、生存，而完善水环境可进一步丰富主要受水源地影响的鸟类。总体来看，土地利用类型对多数鸟类影响较大，土地利用类型的差异造就了不同生境条件，从而影响着鸟类多样性分布(MacArthur et al, 1962)。在不同的土地利用类型中，森林、灌丛类的生境被众多学者证实更适合鸟类生存(张跃等, 2012)，广东省鸟类多样性热点地区中，生境类型主要以耕地(38.0%)、林地(26.5%)、水域(12.6%)为主，水田等生境可能由于存在稳定的食物、水源从而更适宜鸟类聚集。另一方面，城市化是导致土地利用变化的主要原因(Vale & Vale, 1976; 郑光美, 1984; Blair, 1996; 何春阳等, 2002)，为缓解城市扩张而引发的生物多样性丧失，合理评估生物多样性并形成保护机制具有重要意义。

南岭片区鸟种最多，占总建模鸟类的68.2%，这可能是由于海拔高与地貌特殊，受第四纪末冰川影响较小，该片区保留着完好的原生与次生常绿阔叶林，南北温差使得南侧气候更为温暖湿润，同时

各个高山之间东西走向的隘口与低海拔丘陵为生物提供了通道，使得大量动物在该片区聚集(常弘等, 1997; 权擎等, 2018)，聚集物种以雀形目为主，白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)、白喉红臀鹎、暗绿绣眼鸟(*Zosterops japonicus*)、大山雀等较为常见，池鹭(*Ardeola bacchus*)和红嘴相思鸟等保护鸟类也常栖息于此。从粤东片区来看，高值区主要分布于市郊，市郊作为城市密集地区与农林用地之间的过渡地带，连接着两大生态系统，也孕育了大量杂食性鸟类，例如白喉红臀鹎、麻雀(*Passer montanus*)、黄腹山鹪莺(*Prinia flaviventris*)、鹊鸂(*Copsychus saularis*)等，多样化的生境亦使得多样性更为丰富(Lockwood & McKinney, 2001; 李俊生等, 2005)。在江门、阳江、云浮片区中，江门市的鸟类栖息地分布最为集中，其中分布较多的有长尾缝叶莺(*Orthotomus sutorius*)、白鹡鸰(*Motacilla alba*)、家燕(*Hirundo rustica*)、珠颈斑鸠(*Streptopelia chinensis*)等；广州、深圳、佛山、东莞等核心城市群由于明显的城市扩张，鸟类丰富度明显处于低值；湛江地区地势平坦，由于植被多为人工经济林(桉树、橡胶)，缺乏原生次生植被，鸟类多样性亦较低。

鸟类保护空缺大多分布于南岭、粤东片区的永久基本农田内及与其周边相连空间。通过分析发现主要由两点原因导致：第一，相较于生境植被单一、植被垂直分化不明显的纯林地，各类型的耕地能为不同食性的鸟类提供多样的食物来源，同时与周边环境的交错提高了空间异质性，生境结构复杂、食物资源丰富环境更利于鸟类生存(范喜顺等, 2005)。第二，目前生态保护红线的划定多考虑水土流失、水源涵养等生态功能评价，未充分综合生物多样性而使得大部分热点地区未被包含在内。


为保护生物资源，可在当前“三线”管控的基础上进一步明确生物多样性的保护策略。落入生态保护红线内部的热点地区，例如南岭、粤东片区，在生态保护红线和自然保护地的基础上，深化对热点地区的管控措施，健全空间监督体系与评价机制。落入城镇开发边界内的热点地区，可基于其斑块面积大小，并结合土地用途，采用构建城市生态廊道、优化城市生态空间结构等方法将生物多样性热点地区进行串联和优化，提升城市内部动物生存环境。落入永久基本农田中的热点地区，考虑优化周边空间生境结构，完善营养关系纽带，构建稳定的

农田生态系统。未落入“三线”而分布于市郊等区域的热点地区, 结合具体分布区位, 因地制宜改善林分, 充分发挥生态服务功能。但热点地区并不是因分布于“三线”内而相互独立, 空间生态学几何种群理论认为单独一个生境斑块并不能实现集合种群的长期续存(魏钰和雷光春, 2019), 因此热点地区之间的生态廊道建设意义重大, 通过内外空间廊道, 使得热点地区向外辐射并服务于次冷点、冷点地区, 逐步形成以“点-热点地区、线-生态廊道、面-热点片区”为架构的鸟类多样性保护体系。

相较于传统的文献记录法, 本文所使用的实地调查数据在时间、空间尺度上更加精准; 在热点分析中, 引入“三线”进行对比更有利于生物多样性的分区保护和政策实施。但本研究亦存在一些不足: (1) 数据来源方面, 文中鸟类数据来源于人为实地调查, 受限于调查强度的差异, 肇庆、云浮等区域的结果可能存在一定的偏差, 且调查的种群数量未能覆盖全部鸟类, 部分鸟类的点位记录较少, 因此可能导致模型结果存在误差(陈新美等, 2012); (2) 模型构建方面, 以行政边界为范围的建模结果可能会与物种客观的空间分布、迁移规律有一定偏差(Owens et al, 2013), 进而影响热点与保护空缺分析的准确性。在后续的研究中, 拟在“二调”数据的基础上, 结合地市实地调研补充完善数据基础, 进一步论证多边界情景下模型的不确定性, 并尝试构建稳定可靠的生物多样性监测机制, 服务于生物多样性保护工作的开展和实施效果监督。

致谢: 感谢广东省野生动物调查监测与生态恢复工程技术研发中心对本研究给予的帮助。同时, 感谢“广州市城市森林生态系统效益监测、分析与研究鸟类监测”、“2020年生态林业建设省级财务专项资金项目——粤港澳大湾区陆生野生脊椎动物资源监测体系建设”以及“全国第二次陆生野生动物资源调查”相关单位对本研究的支持。

ORCID

余蔚  <https://orcid.org/0000-0003-2388-1595>

梁健超  <https://orcid.org/0000-0001-9311-0150>

参考文献

Blair RB (1996) Land use and avian species diversity along an

urban gradient. *Ecological Applications*, 6, 506–519.

Boubli JP, Lima M (2009) Modeling the geographical distribution and fundamental niches of *Cacajao* spp. and *Chiropotes israelita* in northwestern Amazonia via a maximum entropy algorithm. *International Journal of Primatology*, 30, 217–228.

Brooks TM, Mittermeier RA, da Fonseca GAB, Gerlach J, Hoffmann M, Lamoreux JF, Mittermeier CG, Pilgrim JD, Rodrigues ASL (2006) Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313, 58–61.

Chang H, Chen WC, Lu KH, Lin S, Zhang GP (1997) A research on the bird community in Nanling National Nature Reserve of Guangdong Province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 36(4), 75–79. (in Chinese with English abstract) [常弘, 陈万成, 卢开和, 林术, 张国萍 (1997) 广东南岭国家级自然保护区鸟类群落的研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 36(4), 75–79.]

Chen XM, Lei YC, Zhang XQ, Jia HY (2012) Effects of sample sizes on accuracy and stability of maximum entropy model in predicting species distribution. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(1), 53–59. (in Chinese with English abstract) [陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎 (2012) 样本量对MaxEnt模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*, 48(1), 53–59.]

Correa Ayram CA, Mendoza ME, Etter A, Pérez Salicrup DR (2017) Anthropogenic impact on habitat connectivity: A multidimensional human footprint index evaluated in a highly biodiverse landscape of Mexico. *Ecological Indicators*, 72, 895–909.

Cui SP, Luo X, Li CW, Hu HJ, Jiang ZG (2018) Predicting the potential distribution of white-lipped deer using the MaxEnt model. *Biodiversity Science*, 26, 171–176. (in Chinese with English abstract) [崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚 (2018) 基于MaxEnt模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 26, 171–176.]

Fan XS, Hu DF, Chen HZ, Wang F, Su X (2005) Study on the relationship between bird community structure and forest ecology in the cultivation areas of North China Plain. *Arid Zone Research*, 22, 186–191. (in Chinese with English abstract) [范喜顺, 胡德夫, 陈合志, 王峰, 苏鑫 (2005) 华北平原耕作区鸟类群落结构与林业生态关系研究. *干旱区研究*, 22, 186–191.]

Hao XN, Wu YL (2017) Prediction of suitable habitat for overwintering hooded cranes (*Grus monacha*) based on MaxEnt modeling. *Journal of Anhui Agricultural University*, 44, 591–597. (in Chinese with English abstract) [郝雪娜, 吴艳兰 (2017) 基于MaxEnt模型的越冬白头鹤适宜生境预测. *安徽农业大学学报*, 44, 591–597.]

He CY, Shi PJ, Chen J, Xu XL (2002) Process and mechanism of urbanization in Beijing area. *Acta Geographica Sinica*, 57, 363–371. (in Chinese with English abstract) [何春阳, 史培军, 陈晋, 徐小黎 (2002) 北京地区城市化过程与机制研究. *地理学报*, 57, 363–371.]

- Huang Y (2015) The Methodology of Bird Habitats' Making and Planning at Beijing Urban Green Spaces. PhD dissertation, Tsinghua University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [黄越 (2015) 北京城市绿地鸟类生境规划与营造方法研究. 博士学位论文, 清华大学, 北京.]
- Li JS, Gao JX, Zhang XL, Zheng XM (2005) Effects of urbanization on biodiversity. Chinese Journal of Ecology, 24, 953–957. (in Chinese with English abstract) [李俊生, 高吉喜, 张晓岚, 郑筱梅 (2005) 城市化对生物多样性的影响研究综述. 生态学杂志, 24, 953–957.]
- Lin Y, Xu XY, Yi JF, Lu Z (2017) Potential predation and conservation vacancy analysis of *Syrnaticus humiae* in Guangxi based on MaxEnt model. Sichuan Journal of Zoology, 36, 328–333. (in Chinese with English abstract) [林源, 徐雪怡, 伊剑锋, 陆舟 (2017) 基于MaxEnt模型的广西黑颈长尾雉潜在栖息地预测与保护空缺分析. 四川动物, 36, 328–333.]
- Liu JP, Lü XG, Yang Q, Wang HX (2009) Wetland landscape ecological security patterns analysis and plan in northeast of Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 29, 1083–1090. (in Chinese with English abstract) [刘吉平, 吕宪国, 杨青, 王海霞 (2009) 三江平原东北部湿地生态安全格局设计. 生态学报, 29, 1083–1090.]
- Lockwood JL, McKinney ML (2001) Biotic Homogenization. Springer US, New York.
- Luan XF (2003) Studies on Avian Community of Shanghai and Planning of Conservation. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [栾晓峰 (2003) 上海鸟类群落特征及其保护规划研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- MacArthur RH, MacArthur JW, Preer J (1962) On bird species diversity. II. Prediction of bird census from habitat measurements. The American Naturalist, 96, 167–174.
- Owens HL, Campbell LP, Lynnette Dornak L, Saupe EE, Barve N, Soberón J, Ingenloff K, Lira-Noriega A, Hensz CM, Myers CE, Peterson AT (2013) Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. Ecological Modelling, 263, 10–18.
- Padoa-schioppa E, Baietto M, Massa R, Bottoni L (2006) Bird communities as bioindicators: The focal species concept in agricultural landscapes. Ecological Indicators, 6, 83–93.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography, 34, 102–117.
- Qi ZX, Xu WH, Xiong XY, Ouyang ZY, Zheng H, Gan DX (2011) Assessment of potential habitat for *Ursus thibetanus* in the Qinling Mountains. Biodiversity Science, 19, 343–352. (in Chinese with English abstract) [齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣 (2011) 基于MaxEnt模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价. 生物多样性, 19, 343–352.]
- Quan Q, Tang X, Wu Y, Zou FS (2018) β -diversity of bird assemblages in the Nanling Mountain ranges. Tropical Geography, 38, 321–327, 346. (in Chinese with English abstract) [权擎, 唐璇, 吴毅, 邹发生 (2018) 南岭山脉及周边鸟类 β 多样性分析. 热带地理, 38, 321–327, 346.]
- Rands MRW, Adams WM, Bennun L, Butchart SHM, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann JPW, Sutherland WJ, Vira B (2010) Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010. Science, 329, 1298–1303.
- Swets JA (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 240, 1285–1293.
- Tian B, Zhou YX, Zhang LQ, Ma ZJ, Yang B, Tang CD (2008) A GIS and remote sensing-based analysis of migratory bird habitat suitability for Chongming Dongtan Nature Reserve, Shanghai. Acta Ecologica Sinica, 28, 3049–3059. (in Chinese with English abstract) [田波, 周云轩, 张利权, 马志军, 杨波, 汤臣栋 (2008) 遥感与GIS支持下的崇明东滩迁徙鸟类生境适宜性分析. 生态学报, 28, 3049–3059.]
- Vale TR, Vale GR (1976) Suburban bird populations in west-central California. Journal of Biogeography, 3, 157.
- Vina A, Tuanmu M, Xu WH, Li Y, Ouyang ZY, DeFries R, Liu JG (2010) Range-wide analysis of wildlife habitat: Implications for conservation. Biological Conservation, 143, 1960–1969.
- Wang JL, Chen Y (2004) Applications of 3S technology in wildlife habitat researches. Geography and Geo-information Science, 20, 44–47. (in Chinese with English abstract) [王金亮, 陈姚 (2004) 3S技术在野生动物生境研究中的应用. 地理与地理信息科学, 20, 44–47.]
- Wei Y, Lei GC (2019) From biocenosis to ecosystem: The theory trend of conserving ecosystem integrity in national parks. Journal of Natural Resources, 34, 1820–1832. (in Chinese with English abstract) [魏钰, 雷光春 (2019) 从生物群落到生态系统综合保护: 国家公园生态系统完整性保护的演变. 自然资源学报, 34, 1820–1832.]
- Wu QM, Wang L, Zhu RP, Yang YB, Jin HY, Zou HF (2016) Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MaxEnt modeling. Acta Ecologica Sinica, 36, 3758–3764. (in Chinese with English abstract) [吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲 (2016) 基于MaxEnt模型的丹顶鹤巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. 生态学报, 36, 3758–3764.]
- Wu YB, Zhang ED (2000) Application of geographic information system in animal ecology. Ecological Science, 19, 51–56. (in Chinese with English abstract) [吴咏蓓, 张恩迪 (2000) 地理信息系统(GIS)在动物生态学中的应用. 生态科学, 19, 51–56.]
- Xing DL, Hao ZQ (2011) The principle of maximum entropy and its applications in ecology. Biodiversity Science, 19, 295–302. (in Chinese with English abstract) [邢丁亮, 郝占庆 (2011) 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 19, 295–302.]

- Xu XQ, Li X (2009) Review and preview of the urbanization in Pearl River Delta in the past 30 years of reform and opening up. *Economic Geography*, 29, 13–18. (in Chinese with English abstract) [许学强, 李郇 (2009) 改革开放30年珠江三角洲城镇化的回顾与展望. *经济地理*, 29, 13–18.]
- Zhang Y, Lei KM, Zhang YK, Xiao CL, Yang YH, Sun HO, Li SJ (2012) Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: A case study in Jiuzhaigou Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4228–4235. (in Chinese with English abstract) [张跃, 雷开明, 张语克, 肖长林, 杨玉花, 孙鸿鸥, 李淑君 (2012) 植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例. *生态学报*, 32, 4228–4235.]
- Zhang YY, Zhou LZ, Wang QS, Wang XJ, Xing YJ (2008) Distribution pattern and hotspot analysis of breeding birds in Anhui Province. *Biodiversity Science*, 16, 305–312. (in Chinese with English abstract) [张有瑜, 周立志, 王岐山, 王新建, 邢雅俊 (2008) 安徽省繁殖鸟类分布格局和热点区分析. *生物多样性*, 16, 305–312.]
- Zheng GM (1984) Ecological distribution of birds in Beijing and its vicinity during summer. *Zoological Research*, 5, 29–40. (in Chinese with English abstract) [郑光美 (1984) 北京及其附近地区夏季鸟类的生态分布. *动物学研究*, 5, 29–40.]
- Zheng GM (2005) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2005) 中国鸟类分类与分布名录. 科学出版社, 北京.]
- Zhou LZ, Li DQ, Ma Y, Ye XD (1999) GIS approaches to studying animal diversity. *Chinese Journal of Zoology*, 34(5), 52–56. (in Chinese) [周立志, 李迪强, 马勇, 叶晓堤 (1999) 地理信息系统(GIS)在动物多样性研究中的应用. *动物学杂志*, 34(5), 52–56.]
- Zhu GP, Qiao HJ (2016) Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions. *Biodiversity Science*, 24, 1189–1196. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 乔慧捷 (2016) MaxEnt模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. *生物多样性*, 24, 1189–1196.]

(责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 环境因子的相关性分析

Appendix 1 Correlation analysis of environmental factors
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020229-1.pdf>

附录2 广东省重点保护陆生野生动物名录(鸟类)

Appendix 2 List of key protected terrestrial wildlife in Guangdong Province (birds)
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020229-2.pdf>

附录3 建模鸟类点位记录及模型预测精度

Appendix 3 Bird records and statistical information on model accuracy
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020229-3.pdf>

附录4 不同环境因子主要影响的10种鸟类(降序排列)

Appendix 4 Ten species of birds mainly affected by different environmental factors (descending sort)
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020229-4.pdf>

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

附录1 环境因子的相关性分析

Appendix 1 Correlation analysis of environmental factors

| | NDVI | PD | DW | DUL | AMTD | AMT | AMH | ALT | AP | LU |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----|
| NDVI | 1 | | | | | | | | | |
| PD | −0.213 | 1 | | | | | | | | |
| DW | 0.027 | −0.081 | 1 | | | | | | | |
| DUL | 0.165 | −0.207 | 0.345 | 1 | | | | | | |
| AMTD | 0.291 | −0.091 | 0.074 | 0.246 | 1 | | | | | |
| AMT | −0.342 | 0.134 | −0.085 | −0.277 | −0.654 | 1 | | | | |
| AMH | −0.139 | −0.142 | 0.090 | 0.052 | −0.465 | 0.482 | 1 | | | |
| ALT | 0.166 | −0.148 | 0.295 | 0.561 | 0.495 | −0.537 | −0.181 | 1 | | |
| AP | −0.169 | 0.176 | −0.012 | −0.076 | −0.088 | 0.144 | −0.197 | −0.213 | 1 | |
| LU | −0.338 | 0.344 | −0.130 | −0.290 | −0.153 | 0.199 | −0.054 | −0.270 | 0.155 | 1 |

NDVI: 归一化植被指数; PD: 人口密度; DW: 距离水源距离; DUL: 距离城镇距离; AMTD: 年均温度差; AMT: 年均温; AMH: 年均湿度; ALT: 高程; AP: 年均降水量; LU: 土地利用类型。

NDVI, Normalized difference vegetation index; PD, Population density; DW, Distance from water; DUL, Distance from urban land; AMTD, Annual average temperature difference; AMT, Annual mean temperature; AMH, Annual mean humidity; ALT, Altitude; AP, Annual precipitation; LU, Land use.

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

附录2 广东省重点保护陆生野生动物名录(鸟类)

Appendix 2 List of key protected terrestrial wildlife in Guangdong Province (birds)

| 中名 Chinese name | 学名 Latin name |
|--------------------|-------------------------------|
| I 潜鸟目 | GAVIIFORMES |
| 一、潜鸟科 | Gaviidae |
| 1. 红喉潜鸟 | <i>Gavia stellata</i> |
| II 鸊鷉目 | PODICIPEDIFORMES |
| 二、鸊鷉科 | Podicipedidae |
| 2. 凤头鸊鷉 | <i>Podiceps cristatus</i> |
| III 鸻形目 | PROCELLARIIFORMES |
| 三、海燕科 | Hydrobatidae |
| 3. 黑叉尾海燕 | <i>Oceanodroma monorhis</i> |
| IV 鸛形目 | CICONIIFORMES |
| 四、鸛科(所有种) | Ardeidae |
| V 雁形目 | ANSERIFORMES |
| 五、鸭科 | Anatidae |
| 4. 鸿雁 | <i>Anser cygnoides</i> |
| 5. 豆雁 | <i>Anser fabalis</i> |
| 6. 灰雁 | <i>Anser anser</i> |
| 7. 小白额雁 | <i>Anser erythropus</i> |
| 8. 斑头秋沙鸭 | <i>Mergus albellus</i> |
| 9. 红胸秋沙鸭 | <i>Mergus serrator</i> |
| 10. 普通秋沙鸭 | <i>Mergus merganser</i> |
| VI 鸡形目 | GALLIFORMES |
| 六、雉科 | Phasianidae |
| 11. 白眉山鸲鹑 | <i>Arborophila gingica</i> |
| VII 鹤形目 | GRUIFORMES |
| 七、秧鸡科 | Rallidae |
| 12. 紫水鸡 | <i>Porphyrio porphyrio</i> |
| 13. 董鸡 | <i>Gallicrex cinerea</i> |
| 14. 黑水鸡 | <i>Gallinula chloropus</i> |
| VIII 鸻形目 | CHARADRIIFORMES |
| 八、蛎鹬科 | Haematopodidae |
| 15. 蛎鹬 | <i>Haematopus ostralegus</i> |
| 九、鹬科 | Scolopacidae |
| 16. 中杓鹬 | <i>Numenius phaeopus</i> |
| 十、反嘴鹬科 | Recurvirostridae |
| 17. 黑翅长脚鹬 | <i>Himantopus himantopus</i> |
| 18. 反嘴鹬 | <i>Recurvirostra avosetta</i> |
| IX 鸥形目(所有种) | LARIFORMES |
| X 鸛形目 | CUCULIFORMES |
| 十一、杜鹃科 | Cuculidae |
| 19. 棕腹杜鹃 | <i>Cuculus fugax</i> |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

| | |
|---------------|--------------------------------|
| XI 雀形目 | PASSERIFORMES |
| 十二、 鹟科 | Muscicapidae |
| 20. 紫寿带 | <i>Terpsiphone atrocaudata</i> |
| 21. 红嘴相思鸟 | <i>Leiothrix lutea</i> |
| 22. 银耳相思鸟 | <i>Leiothrix argenteauris</i> |
| 十三、 雀科 | Fringillidae |
| 23. 黑头蜡嘴雀 | <i>Eophona personata</i> |
| 24. 黑尾蜡嘴雀 | <i>Eophona migratoria</i> |
| 25. 黄胸鹀 | <i>Emberiza aureola</i> |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

附录3 建模鸟类点位记录及模型预测精度

Appendix 3 Bird records and statistical information on model accuracy

| 目、科、物种 Orders, families, species | 点位数 Number of survey points | 模型精度 Area under the curve (%) | 分布区面积 Distribution area (×10 ⁴ km ²) | 均等测试敏感性和特异性阈 值 Equal training sensitivity and specificity Logistic threshold | 居留型 Bird residential types |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|---|---|----------------------------------|
| I 鹈形目 PELECANIFORMES | | | | | |
| 一、鹭科 Ardeidae | | | | | |
| 1. 苍鹭 <i>Ardea cinerea</i> * | 33 | 0.842 | 1.354 | 0.429 | W |
| 2. 大白鹭 <i>Egretta alba</i> * | 45 | 0.905 | 1.280 | 0.347 | W |
| 3. 中白鹭 <i>Egretta intermedia</i> * | 15 | 0.927 | 0.630 | 0.417 | W |
| 4. 白鹭 <i>Egretta garzetta</i> * | 468 | 0.844 | 2.669 | 0.413 | R |
| 5. 牛背鹭 <i>Bubulcus ibis</i> * | 172 | 0.867 | 3.307 | 0.252 | R |
| 6. 池鹭 <i>Ardeola bacchus</i> * | 855 | 0.802 | 3.272 | 0.446 | R |
| 7. 绿鹭 <i>Butorides striatus</i> * | 40 | 0.826 | 4.121 | 0.340 | R |
| 8. 夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i> * | 63 | 0.835 | 2.409 | 0.359 | S |
| 9. 黄斑苇鹭 <i>Ixobrychus sinensis</i> * | 77 | 0.858 | 1.356 | 0.443 | S |
| 10. 栗苇鹭 <i>Ixobrychus cinnamomeus</i> * | 128 | 0.805 | 3.553 | 0.324 | R |
| II 鹰形目 ACCIPITRIFORMES | | | | | |
| 二、鹰科 Accipitridae | | | | | |
| 11. 黑翅鸢 <i>Elanus caeruleus</i> ※# | 73 | 0.823 | 1.605 | 0.430 | S |
| 12. 黑鸢 <i>Milvus migrans</i> ※# | 54 | 0.883 | 2.991 | 0.297 | W |
| 13. 蛇雕 <i>Spilornis cheela</i> ※# | 28 | 0.899 | 4.504 | 0.325 | R |
| 14. 白尾鸢 <i>Circus cyaneus</i> ※# | 7 | 0.799 | 6.176 | 0.314 | W |
| 15. 赤腹鹰 <i>Accipiter soloensis</i> ※# | 11 | 0.822 | 3.711 | 0.493 | W |
| 16. 普通鵟 <i>Buteo buteo</i> ※# | 30 | 0.855 | 2.591 | 0.400 | W |
| 17. 黑冠鹃隼 <i>Aviceda leuphotes</i> ※# | 18 | 0.803 | 3.449 | 0.365 | R |
| 18. 松雀鹰 <i>Accipiter virgatus</i> ※# | 5 | 0.862 | 4.294 | 0.325 | R |
| III 隼形目 FALCONIFORMES | | | | | |
| 三、隼科 Falconidae | | | | | |
| 19. 红隼 <i>Falco tinnunculus</i> ※# | 20 | 0.856 | 0.649 | 0.466 | R |
| IV 鸡形目 GALLIFORMES | | | | | |
| 四、雉科 Phasianidae | | | | | |
| 20. 中华鹧鸪 <i>Francolinus pintadeanus</i> | 68 | 0.768 | 1.655 | 0.292 | R |
| 21. 灰胸竹鸡 <i>Bambusicola thoracica</i> | 207 | 0.808 | 5.365 | 0.340 | R |
| 22. 白鹇 <i>Lophura nycthemera</i> ※ | 12 | 0.869 | 3.192 | 0.476 | R |
| 23. 白眉山鹧鸪 <i>Arborophila gingica</i> ※ | 9 | 0.718 | 2.208 | 0.411 | R |
| 24. 环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i> | 46 | 0.807 | 1.971 | 0.149 | R |
| V 鹑形目 GRUIFORMES | | | | | |
| 五、秧鸡科 Rallidae | | | | | |
| 25. 红脚田鸡 <i>Zapornia akool</i> | 40 | 0.774 | 2.962 | 0.408 | R |
| 26. 白胸苦恶鸟 <i>Amaurornis phoenicurus</i> | 362 | 0.740 | 8.189 | 0.299 | R |
| 27. 黑水鸡 <i>Gallinula chloropus</i> * | 77 | 0.835 | 0.997 | 0.557 | R |
| VI 鸻形目 CHARADRIIFORMES | | | | | |
| 六、鸻科 Charadriidae | | | | | |
| 28. 金眶鸻 <i>Charadrius dubius</i> | 36 | 0.844 | 1.557 | 0.432 | W |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

| | | | | | |
|---|-------|-------|--------|-------|---|
| 29. 环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i> | 6 | 0.815 | 6.481 | 0.267 | W |
| 七、反嘴鹬科 Recurvirostridae | | | | | |
| 30. 黑翅长脚鹬 <i>Himantopus himantopus</i> * | 6 | 0.972 | 0.567 | 0.434 | W |
| 八、鹬科 Scolopacidae | | | | | |
| 31. 青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i> | 6 | 0.824 | 1.976 | 0.424 | W |
| 32. 白腰草鹬 <i>Tringa ochropus</i> | 53 | 0.762 | 5.295 | 0.301 | W |
| 33. 林鹬 <i>Tringa glareola</i> | 35 | 0.871 | 2.310 | 0.331 | W |
| 34. 矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i> | 38 | 0.871 | 1.423 | 0.367 | W |
| 35. 扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i> | 5 | 0.932 | 1.961 | 0.406 | W |
| 九、燕鸻科 Glareolidae | | | | | |
| 36. 普通燕鸻 <i>Glaeola maldivaum</i> | 6 | 0.982 | 0.331 | 0.473 | S |
| 十、鸥科 Laridae | | | | | |
| 37. 红嘴鸥 <i>Chroicocephalus ridibundu</i> | 6 | 0.988 | 0.143 | 0.437 | W |
| 38. 白翅浮鸥 <i>Chlidonias leucopterus</i> * | 11 | 0.959 | 1.000 | 0.219 | W |
| VII 鸽形目 COLUMBIFORMES | | | | | |
| 十一、鸠鸽科 Columbidae | | | | | |
| 39. 山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i> | 155 | 0.761 | 4.826 | 0.389 | R |
| 40. 火斑鸠 <i>Streptopelia tranquebarica</i> | 6 | 0.833 | 3.150 | 0.354 | R |
| 41. 珠颈斑鸠 <i>Streptopelia chinensis</i> | 1,523 | 0.714 | 10.578 | 0.312 | R |
| 42. 绿翅金鸠 <i>Chalcophaps indica</i> | 5 | 0.745 | 4.866 | 0.423 | R |
| VIII 鹃形目 CUCULIFORMES | | | | | |
| 十二、杜鹃科 Cuculidae | | | | | |
| 43. 红翅凤头鹃 <i>Clamator coromandus</i> | 88 | 0.755 | 5.572 | 0.326 | R |
| 44. 大鹰鹃 <i>Cuculus sparverioides</i> | 25 | 0.984 | 0.053 | 0.470 | S |
| 45. 四声杜鹃 <i>Cuculus micropterus</i> | 32 | 0.778 | 0.973 | 0.447 | S |
| 46. 八声杜鹃 <i>Cacomantis merulinus</i> | 156 | 0.743 | 6.544 | 0.296 | S |
| 47. 小杜鹃 <i>Cuculus poliocephalus</i> | 47 | 0.889 | 0.773 | 0.322 | S |
| 48. 噪鹃 <i>Eudynamys scolopaceus</i> | 346 | 0.751 | 7.242 | 0.346 | R |
| 49. 乌鹃 <i>Surniculus lugubris</i> | 70 | 0.771 | 3.252 | 0.305 | S |
| 50. 褐翅鸦鹃 <i>Centropus sinensis</i> ** | 1,086 | 0.845 | 5.297 | 0.456 | R |
| 51. 小鸦鹃 <i>Centropus bengalensis</i> ** | 297 | 0.871 | 5.374 | 0.386 | R |
| 52. 绿嘴地鹃 <i>Phaenicophaeus tristis</i> | 5 | 0.894 | 1.658 | 0.508 | R |
| 53. 普通鹰鹃 <i>Cuculus varius</i> | 169 | 0.769 | 5.211 | 0.393 | P |
| IX 鸮形目 STRIGIFORMES | | | | | |
| 十三、鸱鸺科 Strigidae | | | | | |
| 54. 领鸺鹠 <i>Glaucidium brodiei</i> ** | 29 | 0.851 | 1.166 | 0.425 | R |
| X 夜鹰目 CAPRIMULGIFORMES | | | | | |
| 十四、雨燕科 Apodidae | | | | | |
| 55. 白腰雨燕 <i>Apus pacificus</i> | 42 | 0.847 | 1.592 | 0.407 | S |
| 56. 小白腰雨燕 <i>Apus nipalensis</i> | 151 | 0.766 | 3.165 | 0.476 | S |
| XI 咬鹃目 TROGONIFORMES | | | | | |
| 十五、咬鹃科 Trogonidae | | | | | |
| 57. 红头咬鹃 <i>Harpactes erythrocephalus</i> | 12 | 0.952 | 1.016 | 0.448 | R |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

XII 佛法僧目 CORACIIFORMES

十六、翠鸟科 Alcedinidae

| | | | | | |
|---|-----|-------|-------|-------|---|
| 58. 普通翠鸟 <i>Alcedo atthis</i> | 558 | 0.758 | 4.182 | 0.457 | R |
| 59. 白胸翡翠 <i>Halcyon smyrnensis</i> [※] | 66 | 0.795 | 2.046 | 0.420 | R |
| 60. 斑鱼狗 <i>Ceryle rudis</i> | 48 | 0.774 | 1.773 | 0.381 | R |
| 61. 蓝翡翠 <i>Halcyon pileata</i> | 5 | 0.822 | 2.981 | 0.430 | R |

十七、蜂虎科 Meropidae

| | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|---|
| 62. 蓝喉蜂虎 <i>Merops viridis</i> [※] | 41 | 0.877 | 0.954 | 0.429 | S |
| 63. 栗喉蜂虎 <i>Merops philippinus</i> [※] | 10 | 0.998 | 0.022 | 0.381 | S |

十八、佛法僧科 Coraciidae

| | | | | | |
|--------------------------------------|----|-------|-------|-------|---|
| 64. 三宝鸟 <i>Eurystomus orientalis</i> | 32 | 0.778 | 7.341 | 0.269 | S |
|--------------------------------------|----|-------|-------|-------|---|

XIII 啄木鸟目 PICIFORMES

十九、拟啄木鸟科 Capitonidae

| | | | | | |
|------------------------------------|-----|-------|-------|-------|---|
| 65. 大拟啄木鸟 <i>Psilopogon virens</i> | 101 | 0.839 | 2.999 | 0.347 | R |
| 66. 黑眉拟啄木鸟 <i>Psilopogon faber</i> | 61 | 0.875 | 3.111 | 0.220 | R |

二十、啄木鸟科 Picidae

| | | | | | |
|---|----|-------|-------|-------|---|
| 67. 黄嘴栗啄木鸟 <i>Blythipicus pyrrhotis</i> | 35 | 0.881 | 1.463 | 0.335 | R |
| 68. 斑姬啄木鸟 <i>Picumnus innominatus</i> | 30 | 0.775 | 5.552 | 0.305 | R |

XIV 雀形目 PASSERIFORMES

二十一、燕科 Hirundinidae

| | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 69. 家燕 <i>Hirundo rustica</i> | 1,213 | 0.745 | 4.849 | 0.431 | S |
| 70. 金腰燕 <i>Hirundo daurica</i> | 649 | 0.730 | 3.139 | 0.348 | S |
| 71. 烟腹毛脚燕 <i>Delichon dasyopus</i> | 12 | 0.790 | 3.458 | 0.469 | R |

二十二、 鹛 鴒 科 Motacillidae

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|---|
| 72. 白鹡鸰 <i>Motacilla alba</i> | 2,034 | 0.796 | 7.732 | 0.407 | R |
| 73. 黄鹡鸰 <i>Motacilla tschutschensis</i> | 36 | 0.777 | 4.191 | 0.276 | W |
| 74. 灰鹡鸰 <i>Motacilla cinerea</i> | 239 | 0.796 | 5.351 | 0.401 | W |
| 75. 田鸫 <i>Anthus richardi</i> | 39 | 0.783 | 3.094 | 0.282 | W |
| 76. 树鸫 <i>Anthus hodgsoni</i> | 676 | 0.740 | 6.236 | 0.380 | W |
| 77. 红喉鸫 <i>Anthus cervinus</i> | 6 | 0.843 | 2.080 | 0.333 | W |

二十三、 山椒鸟科 Campephagidae

| | | | | | |
|---|-----|-------|-------|-------|---|
| 78. 暗灰鹃鵙 <i>Lalage melaschistos</i> | 6 | 0.789 | 2.017 | 0.530 | S |
| 79. 灰喉山椒鸟 <i>Pericrocotus divaricatus</i> | 109 | 0.734 | 3.857 | 0.449 | R |
| 80. 赤红山椒鸟 <i>Pericrocotus flammeus</i> | 337 | 0.759 | 8.018 | 0.315 | R |

二十四、 鹑科 Pycnonotidae

| | | | | | |
|--|-------|-------|--------|-------|---|
| 81. 红耳鹎 <i>Pycnonotus jocosus</i> | 2,628 | 0.752 | 8.671 | 0.401 | R |
| 82. 白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i> | 2,582 | 0.797 | 5.254 | 0.473 | R |
| 83. 白喉红臀鹎 <i>Pycnonotus aurigaster</i> | 1438 | 0.726 | 11.646 | 0.275 | R |
| 84. 绿翅短脚鹎 <i>Ixos maclellandii</i> | 68 | 0.791 | 3.474 | 0.316 | R |
| 85. 栗背短脚鹎 <i>Hemixos castanonotus</i> | 489 | 0.832 | 2.558 | 0.457 | R |
| 86. 黑短脚鹎 <i>Hypsipetes leucocephalus</i> | 316 | 0.835 | 5.677 | 0.292 | R |
| 87. 领雀嘴鹎 <i>Spizixos semitorques</i> | 173 | 0.926 | 1.102 | 0.424 | R |
| 88. 黑喉红臀鹎 <i>Pycnonotus cafer</i> | 21 | 0.997 | 0.081 | 0.167 | P |

二十五、叶鹎科 Chloropseidae

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

| | | | | | |
|---|-------|-------|--------|-------|---|
| 89. 橙腹叶鹎 <i>Chloropsis hardwickii</i> | 12 | 0.718 | 3.382 | 0.489 | R |
| 二十六、伯劳科 Laniidae | | | | | |
| 90. 棕背伯劳 <i>Lanius schach</i> | 2,624 | 0.796 | 4.985 | 0.482 | R |
| 91. 红尾伯劳 <i>Lanius cristatus</i> | 21 | 0.788 | 14.469 | 0.084 | S |
| 二十七、卷尾科 Dicruridae | | | | | |
| 92. 黑卷尾 <i>Dicrurus macrocercus</i> | 165 | 0.781 | 5.104 | 0.316 | S |
| 93. 灰卷尾 <i>Dicrurus leucophaeus</i> | 6 | 0.730 | 2.748 | 0.449 | S |
| 94. 发冠卷尾 <i>Dicrurus hottentottus</i> | 40 | 0.750 | 3.422 | 0.404 | S |
| 二十八、椋鸟科 Sturnidae | | | | | |
| 95. 八哥 <i>Acridotheres cristatellus</i> | 889 | 0.799 | 3.994 | 0.429 | R |
| 96. 黑领椋鸟 <i>Gracupica nigricollis</i> | 797 | 0.827 | 3.718 | 0.395 | R |
| 97. 灰背椋鸟 <i>Sturnia sinensis</i> | 44 | 0.858 | 4.162 | 0.409 | W |
| 98. 丝光椋鸟 <i>Sturnus sericeus</i> | 207 | 0.820 | 3.669 | 0.395 | R |
| 99. 灰椋鸟 <i>Sturnus cineraceus</i> | 7 | 0.716 | 4.656 | 0.418 | W |
| 二十九、燕鵙科 Artamidae | | | | | |
| 100. 灰燕鵙 <i>Artamus fuscus</i> | 6 | 0.786 | 3.709 | 0.456 | R |
| 三十、鸦科 Corvidae | | | | | |
| 101. 松鸦 <i>Garrulus glandarius</i> | 47 | 0.725 | 4.046 | 0.369 | R |
| 102. 红嘴蓝鹊 <i>Urocissa erythrorhyncha</i> | 437 | 0.711 | 10.138 | 0.301 | R |
| 103. 灰树鹊 <i>Dendrocitta formosae</i> | 273 | 0.797 | 4.378 | 0.391 | R |
| 104. 喜鹊 <i>Pica pica</i> | 153 | 0.887 | 1.509 | 0.417 | R |
| 105. 大嘴乌鸦 <i>Corvus macrorhynchos</i> | 179 | 0.788 | 6.998 | 0.244 | R |
| 三十一、鸫科 Turdidae | | | | | |
| 106. 乌鸫 <i>Turdus merula</i> | 289 | 0.789 | 4.170 | 0.381 | R |
| 107. 白腹鸫 <i>Turdus pallidus</i> | 6 | 0.765 | 10.522 | 0.400 | W |
| 108. 灰背鸫 <i>Turdus hortulorum</i> | 15 | 0.790 | 16.651 | 0.279 | W |
| 三十二、鹟科 Muscicapidae | | | | | |
| 109. 北灰鹟 <i>Muscicapa dauurica</i> | 8 | 0.765 | 7.864 | 0.411 | W |
| 110. 白腹蓝鹟 <i>Cyanoptila cyanomelana</i> | 7 | 0.734 | 4.370 | 0.321 | P |
| 111. 海南蓝仙鹟 <i>Cyornis hainanus</i> | 14 | 0.764 | 4.792 | 0.459 | S |
| 112. 铜蓝鹟 <i>Eumyias thalassina</i> | 21 | 0.867 | 0.233 | 0.483 | S |
| 113. 红喉歌鸫 <i>Calliope calliope</i> [※] | 5 | 0.785 | 0.717 | 0.390 | W |
| 114. 白喉短翅鸫 <i>Brachypteryx leucophrys</i> | 165 | 0.825 | 1.968 | 0.420 | R |
| 115. 红胁蓝尾鸫 <i>Tarsiger cyanurus</i> | 163 | 0.858 | 2.284 | 0.374 | W |
| 116. 鹡鸰 <i>Copsychus saularis</i> | 1,876 | 0.752 | 5.312 | 0.466 | R |
| 117. 北红尾鸫 <i>Phoenicurus auroreus</i> | 910 | 0.745 | 4.557 | 0.446 | W |
| 118. 红尾水鸫 <i>Rhyacornis fuliginosus</i> | 102 | 0.931 | 1.954 | 0.224 | R |
| 119. 灰背燕尾 <i>Enicurus schistaceus</i> | 146 | 0.892 | 1.096 | 0.438 | R |
| 120. 斑背燕尾 <i>Enicurus maculatus</i> | 6 | 0.929 | 1.584 | 0.363 | R |
| 121. 小燕尾 <i>Enicurus scouleri</i> | 9 | 0.783 | 3.240 | 0.464 | R |
| 122. 黑喉石鹇 <i>Saxicola maurus</i> | 777 | 0.751 | 5.506 | 0.407 | R |
| 123. 紫啸鸫 <i>Myophonus caeruleus</i> | 113 | 0.751 | 3.573 | 0.381 | S |
| 124. 灰林鸫 <i>Saxicola ferreus</i> | 11 | 0.813 | 3.537 | 0.174 | R |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

| | | | | | | |
|-------------------------|---|-------|-------|--------|-------|---|
| 三十三、 鳞胸鹧鸪科 Pnoepygidae | | | | | | |
| 125. | 小鳞胸鹧鸪 <i>Pnoepyga pusilla</i> | 190 | 0.836 | 7.572 | 0.158 | R |
| 三十四、 林鹟科 Timaliidae | | | | | | |
| 126. | 棕 颈 钩 嘴 鹟 <i>Pomatorhinus ruficollis</i> | 1,195 | 0.759 | 4.824 | 0.460 | R |
| 127. | 斑胸钩嘴鹟 <i>Erythrogenys gravivox</i> | 32 | 0.897 | 1.577 | 0.311 | R |
| 128. | 红头穗鹟 <i>Cyanoderma ruficeps</i> | 511 | 0.833 | 3.024 | 0.435 | R |
| 三十五、 噪鹛科 Leiothrichidae | | | | | | |
| 129. | 矛纹草鹛 <i>Babax lanceolatus</i> | 8 | 0.930 | 1.343 | 0.429 | R |
| 130. | 画眉 <i>Garrulax canorus</i> ^{#※} | 840 | 0.847 | 4.466 | 0.464 | R |
| 131. | 黑脸噪鹛 <i>Garrulax perspicillatus</i> | 752 | 0.845 | 1.626 | 0.491 | R |
| 132. | 白颊噪鹛 <i>Garrulax sannio</i> | 180 | 0.797 | 3.236 | 0.396 | R |
| 133. | 黑喉噪鹛 <i>Garrulax chinensis</i> [※] | 57 | 0.812 | 1.188 | 0.478 | R |
| 134. | 黑领噪鹛 <i>Garrulax pectoralis</i> | 108 | 0.825 | 2.819 | 0.367 | R |
| 135. | 小黑领噪鹛 <i>Garrulax monileger</i> | 11 | 0.787 | 2.527 | 0.526 | R |
| 136. | 红嘴相思鸟 <i>Leiothrix lutea</i> ^{*#※} | 24 | 0.815 | 13.012 | 0.020 | R |
| 三十六、 幽鹛科 Pellorneidae | | | | | | |
| 137. | 灰眶雀鹛 <i>Alcippe morrisonia</i> | 744 | 0.840 | 3.985 | 0.387 | R |
| 138. | 褐顶雀鹛 <i>Schoeniparus brunnea</i> | 27 | 0.934 | 0.477 | 0.437 | R |
| 三十七、 莺雀科 Vireonidae | | | | | | |
| 139. | 白腹凤鹛 <i>Erpornis zantholeuca</i> | 6 | 0.843 | 3.683 | 0.414 | R |
| 三十八、 扇尾莺科 Cisticolidae | | | | | | |
| 140. | 棕扇尾莺 <i>Cisticola juncidis</i> | 41 | 0.805 | 3.809 | 0.342 | W |
| 141. | 黑喉山鹧莺 <i>Prinia atrogularis</i> | 186 | 0.829 | 2.489 | 0.469 | R |
| 142. | 黄腹山鹧莺 <i>Prinia flaviventris</i> | 1,879 | 0.800 | 10.326 | 0.344 | R |
| 143. | 纯色山鹧莺 <i>Prinia inornata</i> | 1,023 | 0.726 | 5.067 | 0.428 | R |
| 144. | 灰胸山鹧莺 <i>Prinia hodgsonii</i> | 25 | 0.990 | 0.481 | 0.035 | P |
| 145. | 长尾缝叶莺 <i>Orthotomus sutorius</i> | 2,145 | 0.788 | 11.341 | 0.346 | R |
| 三十九、 柳莺科 Phylloscopidae | | | | | | |
| 146. | 褐柳莺 <i>Phylloscopus fuscatus</i> | 477 | 0.770 | 4.627 | 0.411 | W |
| 147. | 黄腰柳莺 <i>Phylloscopus proregulus</i> | 170 | 0.811 | 2.202 | 0.469 | W |
| 148. | 黄眉柳莺 <i>Phylloscopus inornatus</i> | 326 | 0.737 | 4.952 | 0.438 | W |
| 149. | 极北柳莺 <i>Phylloscopus borealis</i> | 14 | 0.787 | 3.239 | 0.466 | W |
| 150. | 华南冠纹柳莺 <i>Phylloscopus goodsoni</i> | 10 | 0.741 | 4.986 | 0.405 | S |
| 四十、 树莺科 Cettiidae | | | | | | |
| 151. | 强脚树莺 <i>Cettia fortipes</i> | 467 | 0.832 | 10.495 | 0.389 | R |
| 152. | 栗头缝叶莺 <i>Orthotomus cuculatus</i> | 226 | 0.851 | 2.650 | 0.506 | R |
| 四十一、 莺鹟科 Sylviidae | | | | | | |
| 153. | 棕头鸦雀 <i>Sinosuthora webbiana</i> | 13 | 0.932 | 1.288 | 0.232 | R |
| 四十二、 绣眼鸟科 Zosteropidae | | | | | | |
| 154. | 暗绿绣眼鸟 <i>Zosterops japonicus</i> | 1,403 | 0.856 | 5.283 | 0.468 | R |
| 155. | 栗耳凤鹛 <i>Yuhina castaniceps</i> | 59 | 0.873 | 1.153 | 0.325 | R |
| 四十三、 长尾山雀科 Aegithalidae | | | | | | |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

| | | | | | |
|--|-------|-------|--------|-------|---|
| 156. 红头长尾山雀 <i>Aegithalos concinnus</i> | 232 | 0.790 | 3.676 | 0.418 | R |
| 四十四、 山雀科 Paridae | | | | | |
| 157. 大山雀 <i>Parus cinereus</i> | 1,707 | 0.795 | 13.494 | 0.282 | R |
| 158. 黄颊山雀 <i>Machlolophus spilonotus</i> | 40 | 0.834 | 1.539 | 0.378 | R |
| 四十五、 啄花鸟科 Dicaeidae | | | | | |
| 159. 红胸啄花鸟 <i>Dicaeum ignipectus</i> | 44 | 0.750 | 6.552 | 0.271 | R |
| 160. 朱背啄花鸟 <i>Dicaeum cruentatum</i> | 6 | 0.800 | 3.868 | 0.427 | R |
| 四十六、 花蜜鸟科 Nectariniidae | | | | | |
| 161. 叉尾太阳鸟 <i>Aethopyga christinae</i> | 590 | 0.736 | 3.390 | 0.508 | R |
| 四十七、 雀科 Passeridae | | | | | |
| 162. 麻雀 <i>Passer montanus</i> | 1,260 | 0.781 | 4.171 | 0.416 | R |
| 四十八、 燕雀科 Fringillidae | | | | | |
| 163. 金翅雀 <i>Chloria sinica</i> | 94 | 0.841 | 2.622 | 0.326 | R |
| 164. 黑尾蜡嘴雀 <i>Eophona migratoria</i> * | 31 | 0.851 | 1.513 | 0.426 | W |
| 165. 燕雀 <i>Fringilla montifringilla</i> | 10 | 0.935 | 2.275 | 0.270 | W |
| 四十九、 梅花雀科 Estrildidae | | | | | |
| 166. 白腰文鸟 <i>Lonchura striata</i> | 278 | 0.727 | 6.846 | 0.384 | R |
| 167. 斑文鸟 <i>Lonchura punctulata</i> | 565 | 0.745 | 5.412 | 0.410 | R |
| 五十、 鹀科 Emberizidae | | | | | |
| 168. 凤头鹀 <i>Melophus lathami</i> | 18 | 0.887 | 1.171 | 0.394 | R |
| 169. 小鹀 <i>Emberiza pusilla</i> | 51 | 0.797 | 4.294 | 0.292 | W |
| 170. 黄眉鹀 <i>Emberiza chrysophrys</i> | 6 | 0.782 | 1.035 | 0.437 | W |
| 171. 栗耳鹀 <i>Emberiza fucata</i> | 6 | 0.798 | 2.744 | 0.554 | W |
| 172. 灰头鹀 <i>Emberiza spodocephala</i> | 292 | 0.833 | 2.512 | 0.430 | W |
| 173. 白眉鹀 <i>Emberiza tristrami</i> | 51 | 0.842 | 2.862 | 0.429 | W |

※-国家 II 级重点保护野生动物名录; # CITES 附录 II 物种; * 广东省重点保护鸟类; R: 留鸟; W: 冬候鸟; S: 夏候鸟; P: 旅鸟。

附录4 不同环境因子主要影响的10种鸟类(降序排列)

Appendix 4 Ten species of birds mainly affected by different environmental factors (descending sort)

| NDVI | PD | DW | DUL | AMTD |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 绿翅金鸠 | 鹊鸂 | 灰棕鸟 | 朱背啄花鸟 | 斑背燕尾 |
| <i>Chalcophaps indica</i> | <i>Copsychus saularis</i> | <i>Sturnus cineraceus</i> | <i>Dicaeum cruentatum</i> | <i>Enicurus maculatus</i> |
| 松雀鹰 | 白鹊鸂 | 红嘴鸥 | 红头咬鹃 | 赤腹鹰 |
| <i>Accipiter virgatus</i> | <i>Motacilla alba</i> | <i>Larus ridibundu</i> | <i>Harpactes erythrocephalus</i> | <i>Accipiter soloensis</i> |
| 白腹蓝姬鸂 | 灰鹊鸂 | 冠纹柳莺 | 红胸啄花鸟 | 棕头鸦雀 |
| <i>Ficedula cyanomelana</i> | <i>Motacilla cinerea</i> | <i>Phylloscopus reguloides</i> | <i>Dicaeum ignipectus</i> | <i>Sinosuthora webbiana</i> |
| 矶鸂 | 金眶鸂 | 小黑领噪鸂 | 红脚苦恶鸟 | 燕雀 |
| <i>Actitis hypoleucos</i> | <i>Charadrius dubius</i> | <i>Garrulax monileger</i> | <i>Amauornis akool</i> | <i>Fringilla montifringilla</i> |
| 红头咬鹃 | 林鸂 | 矶鸂 | 白腰文鸟 | 凤头鸂 |
| <i>Harpactes erythrocephalus</i> | <i>Tringa glareola</i> | <i>Actitis hypoleucos</i> | <i>Lonchura striata</i> | <i>Melophus lathami</i> |
| 蓝翡翠 | 田鸂 | 黑鸂 | 领鸂鸂 | 黄嘴栗啄木鸟 |
| <i>Halcyon pileata</i> | <i>Anthus richardi</i> | <i>Milvus migrans</i> | <i>Glaucidium brodiei</i> | <i>Blythipicus pyrrhotis</i> |
| 普通鵟 | 麻雀 | 斑鱼狗 | 小鳞胸鸂鸂 | 领雀嘴鸂 |
| <i>Buteo buteo</i> | <i>Passer montanus</i> | <i>Ceryle rudis</i> | <i>Pnoepyga pusilla</i> | <i>Spizixos semitorques</i> |
| 矛纹草鸂 | 黄鹊鸂 | 北灰鸂 | 黄腰柳莺 | 白鸂 |
| <i>Babax lanceolatus</i> | <i>Motacilla flava</i> | <i>Muscicapa dauurica</i> | <i>Phylloscopus proregulus</i> | <i>Lophura nycthemera</i> |
| 八声杜鹃 | 灰喉山椒鸟 | 红尾水鸂 | 黄嘴栗啄木鸟 | 黑眉拟啄木鸟 |
| <i>Cacomantis merulinus</i> | <i>Pericrocotus divaricatus</i> | <i>Rhyacornis fuliginosus</i> | <i>Blythipicus pyrrhotis</i> | <i>Megalaima oorti</i> |
| 树鸂 | 乌鸂 | 红尾伯劳 | 红头长尾山雀 | 大鹰鸂 |
| <i>Anthus hodgsoni</i> | <i>Turdus merula</i> | <i>Lanius cristatus</i> | <i>Aegithalos concinnus</i> | <i>Cuculus sparverioides</i> |
| AMT | AMH | ALT | AP | LU |
| 灰胸山鸂鸂 | 普通燕鸂 | 矛纹草鸂 | 八声杜鹃 | 栗耳鸂 |
| <i>Prinia hodgsonii</i> | <i>Glaeola maldivaum</i> | <i>Babax lanceolatus</i> | <i>Cacomantis merulinus</i> | <i>Emberiza jankowskii</i> |
| 黑冠鸂隼 | 黑喉红臀鸂 | 扇尾沙锥 | 红头长尾山雀 | 烟腹毛脚燕 |
| <i>Aviceda leuphotes</i> | <i>Pycnonotus cafer</i> | <i>Gallinago gallinago</i> | <i>Aegithalos concinnus</i> | <i>Delichon dasypus</i> |
| 蓝喉蜂虎 | 红隼 | 白翅浮鸥 | 乌鸂 | 灰背鸂 |
| <i>Merops viridis</i> | <i>Falco tinnunculus</i> | <i>Chlidonias leucopterus</i> | <i>Surniculus lugubris</i> | <i>Turdus hortolorum</i> |
| 红喉鸂 | 中华鸂鸂 | 棕颈钩嘴鸂 | 冠纹柳莺 | 暗灰鸂鸂 |
| <i>Anthus cervinus</i> | <i>Francolinus pintadeanus</i> | <i>Pomatorhinus ruficollis</i> | <i>Phylloscopus reguloides</i> | <i>Coracina melaschistos</i> |
| 褐顶雀鸂 | 灰卷尾 | 环颈鸂 | 铜蓝鸂 | 白腹鸂 |
| <i>Alcippe brunnea</i> | <i>Dicrurus leucophaeus</i> | <i>Charadrius alexandrinus</i> | <i>Eumyias thalassina</i> | <i>Turdus pallidus</i> |
| 金翅雀 | 大嘴乌鸦 | 灰背棕鸟 | 黄鹊鸂 | 白腹凤鸂 |
| <i>Carduelis sinica</i> | <i>Corvus macrorhynchos</i> | <i>Sturnia sinensis</i> | <i>Motacilla flava</i> | <i>Yuhina zantholeuca</i> |
| 小燕尾 | 白胸翡翠 | 红嘴相思鸟 | 黄眉鸂 | 黄眉鸂 |
| <i>Enicurus scouleri</i> | <i>Halcyon smyrnensis</i> | <i>Leiothrix lutea</i> | <i>Emberiza chrysophrys</i> | <i>Emberiza chrysophrys</i> |
| 灰胸竹鸡 | 灰头鸂 | 池鹭 | 黄颊山雀 | 白尾鸂 |
| <i>Bambusicola thoracica</i> | <i>Emberiza spodocephala</i> | <i>Ardeola bacchus</i> | <i>Parus spilonotus</i> | <i>Circus cyaneus</i> |
| 斑胸钩嘴鸂 | 栗头缝叶莺 | 白鹭 | 紫啸鸂 | 红喉歌鸂 |
| <i>Pomatorhinus erythrocnemis</i> | <i>Orthotomus cuculatus</i> | <i>Egretta garzetta</i> | <i>Myophonus caeruleus</i> | <i>Luscinia calliope</i> |
| 暗绿绣眼鸟 | 北红尾鸂 | 大白鹭 | 红胸啄花鸟 | 青脚鸂 |
| <i>Zosterops japonicus</i> | <i>Phoenicurus aureoreus</i> | <i>Egretta alba</i> | <i>Dicaeum ignipectus</i> | <i>Tringa nebularia</i> |

马星, 王浩, 余蔚, 杜勇, 梁健超, 胡慧建, 邱胜荣, 刘璐 (2021) 基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺. 生物多样性, 29, 1097–1107. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020229>

NDVI: 归一化植被指数; PD: 人口密度; DW: 距离水源距离; DUL: 距离城镇距离; AMTD: 年均温度差; AMT: 年均温; AMH: 年均湿度; ALT: 高程; AP: 年均降水量; LU: 土地利用类型。

NDVI, Normalized difference vegetation index; PD, Population density; DW, Distance from water; DUL, Distance from urban land; AMTD, Annual average temperature difference; AMT, Annual mean temperature; AMH, Annual mean humidity; ALT, Altitude; AP, Annual precipitation; LU, Land use.

②重复出现两次的物种: 八声杜鹃 *Cacomantis merulinus*; 冠纹柳莺 *Phylloscopus reguloides*; 红头咬鹃 *Harpactes erythrocephalus*; 红头长尾山雀 *Aegithalos concinnus*; 红胸啄花鸟 *Dicaeum ignipectus*; 黄鹌鹑 *Motacilla flava*; 黄眉鹀 *Emberiza chrysophrys*; 黄嘴栗啄木鸟 *Blythipicus pyrrhotis*; 矶鹬 *Actitis hypoleucos*; 矛纹草鹬 *Babax lanceolatus*。