

DOI: 10.5846/stxb202004301073

罗绮琪, 胡慧建, 徐正春, 丁志锋, 杨锡涛, 陈秋菊, 张春霞, 李爱英, 邹洁建, 叶冬梅, 王家彬, 张志翔, 梁健超. 基于 Maxent 模型的粤港澳大湾区水鸟多样性热点研究. 生态学报, 2021, 41(19): 7589-7598.

Luo Q Q, Hu H J, Xu Z C, Ding Z F, Yang X T, Chen Q J, Zhang C X, Li A Y, Zou J J, Ye D M, Wang J B, Zhang Z X, Liang J C. Hotspots of the waterbirds diversity in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on Maxent model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7589-7598.

## 基于 Maxent 模型的粤港澳大湾区水鸟多样性热点研究

罗绮琪<sup>1,2</sup>, 胡慧建<sup>1</sup>, 徐正春<sup>2</sup>, 丁志锋<sup>1</sup>, 杨锡涛<sup>1</sup>, 陈秋菊<sup>4</sup>, 张春霞<sup>4</sup>, 李爱英<sup>4</sup>, 邹洁建<sup>5</sup>, 叶冬梅<sup>6</sup>, 王家彬<sup>6</sup>, 张志翔<sup>3</sup>, 梁健超<sup>1,3,\*</sup>

1 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

2 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

3 北京林业大学, 生态与自然保护学院, 北京 100083

4 广东省林业调查规划院, 广州 510520

5 广东省野生动物救护中心, 广州 510520

6 中山市自然保护地管护中心, 中山 528400

**摘要:** 粤港澳大湾区拥有丰富的滨海湿地和水网湿地, 是水鸟迁徙路线上的重要栖息地。基于 55 种水鸟的分布数据和 15 个环境变量数据, 利用最大熵模型(Maximum Entropy model)分析了粤港澳大湾区水鸟多样性的空间分布格局及热点地区。研究表明: 影响水鸟潜在分布的主要环境因子依次是降雨量季节变化、土地利用类型、距离水源的距离, 水鸟丰富度最高出现在粤港澳大湾区的东南区域, 呈现往内陆地区逐渐降低的趋势, 与当地水资源空间分布一致。水鸟多样性热点地区分布在东南部沿海一带, 集中在珠海、江门、深圳、中山等市。研究结果能为粤港澳大湾区水鸟多样性保护规划提供参考, 对维持该区域生态系统安全和稳定具有重要意义。

**关键词:** 水鸟; 粤港澳大湾区; Maxent 模型; 生物多样性格局

## Hotspots of the waterbirds diversity in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on Maxent model

LUO Qiqi<sup>1,2</sup>, HU Huijian<sup>1</sup>, XU Zhengchun<sup>2</sup>, DING Zhifeng<sup>1</sup>, YANG Xitao<sup>1</sup>, CHEN Qiuju<sup>4</sup>, ZHANG Chunxia<sup>4</sup>, LI Aiyong<sup>4</sup>, ZOU Jiejian<sup>5</sup>, YE Dongmei<sup>6</sup>, WANG Jiabin<sup>6</sup>, ZHANG Zhixiang<sup>3</sup>, LIANG Jianchao<sup>1,3,\*</sup>

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

2 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Forestry Surveying and Designing Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510520, China

5 Wildlife Rescue Centre of Guangdong Province, Guangzhou 510520, China

6 Zhongshan Management Centre of the Natural Protected Area, Zhongshan 528400, China

**Abstract:** The Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GHMGBA) has abundant wetland resource, and is

**基金项目:** 广东省科技计划项目(2019B121202003, 2019B121202004); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011282); 广东省科学院科技发展专项(2018GDASCX-0107)

收稿日期: 2020-04-30; 修订日期: 2021-03-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13922339577@139.com

regarded as important habitat for migratory waterbirds. Here, we use the Maxent model to explore the spatial pattern and hotspots of waterbirds diversity in the GHMGBA, based on the occurrence records of 55 waterbirds and 15 environmental variables. The results showed that precipitation seasonality, land cover, and distance to the nearest surface water were the main environmental factors affecting the potential distribution of waterbirds. In general, richness of waterbirds was highest in the southeast, and exhibited a trend of gradually declining to the inland area, which is consistent with the spatial patterns of local water resources. Waterbird hotspots are located in the southeast coastal area of the GHMGBA, especially in Zhuhai, Jiangmen, Shenzhen, and Zhongshan cities. Our results not only could provide a reference for conservation planning of waterbirds, but also are conducive to maintaining the safety and stability of the ecosystem in this region.

**Key Words:** waterbirds; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; Maxent model; biodiversity pattern

生物多样性的空间分布长期以来是生态学、生物地理学、保护生物学等学科的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。特别是,随着近年来全球变化的影响,物种栖息地退化、破碎化及丧失等问题日趋严重,全球生物多样性面临前所未有的威胁<sup>[3-4]</sup>。在此背景下,研究并掌握生物多样性的空间分布格局不仅为预测全球变化对生物多样性的影响提供基础,更有助于确定优先保护区域,从而利用有限资源去实现最佳保护效果。

生物多样性的空间分布是各物种空间分布的综合结果。然而,传统的物种分布大都是以行政区划为基础的简单描述,依赖于专家主观判断,并且忽视环境异质性,因而利用该类数据得到的结果其精确性往往受到诟病<sup>[5]</sup>。为此,生态学家提出利用物种生态位模型(Ecological Niche Models, ENMs),即利用物种分布点及其所关联的环境变量去推算物种的生态需求从而模拟物种的分布<sup>[6]</sup>。其中,最大熵模型(Maximum Entropy model, Maxent)由于仅需物种的出现点位信息,规避了回归模型对物种“非出现点”数据的要求<sup>[7]</sup>,使模拟物种潜在分布更加便捷容易,同时对小样本、非规则取样等数据偏差问题耐受性更高<sup>[8]</sup>,预测表现优异,因而被广泛用于珍稀濒危物种的分布预测<sup>[9]</sup>、入侵物种的管理<sup>[10]</sup>、全球气候变化对物种分布的影响<sup>[11]</sup>、生物多样性保护评估<sup>[12]</sup>、自然保护区的选择和设计<sup>[13]</sup>等方面,已经成为大尺度研究中不可或缺的重要工具。

水鸟作为湿地特有的高等生物类群,是湿地生态系统中的重要组成部分,对于维持湿地生物多样性具有重要的作用<sup>[12]</sup>。粤港澳大湾区河网密集广布,水道纵横交错,拥有丰富的滨海湿地和河流湿地,水鸟资源丰富。此外,粤港澳大湾区处于东亚—澳大利亚路线候鸟重要迁徙路线的中端位置,是南北迁飞水鸟尤其是许多珍稀濒危水鸟的重要停歇地和越冬地。但近几十年来,随着城市化与工业化的快速发展、人口和产业活动集聚,区内湿地开发程度加深,大量的围垦填海活动等使湿地退化严重,近海与海岸湿地大面积减少,湿地泥沙淤积、水质污染、生物多样性丧失等生态环境问题突出<sup>[14-15]</sup>。掌握水鸟多样性的空间分布特点,从而利用有限的资源对最急需保护的区域进行优先保护,已成为粤港澳大湾区生态文明建设中亟待解决的核心问题。为此,本研究以实地调查及文献检索的物种点位为基础,利用 Maxent 模型对水鸟的潜在分布区进行预测,在此基础上,分析粤港澳大湾区的水鸟多样性的分布格局及热点地区,以期对粤港澳大湾区水鸟多样性保护规划提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究范围

粤港澳大湾区地处广东省中南部(112°45'E, 21°31'N—113°50'E, 23°10'N)。本文的研究范围涵盖粤港澳大湾区广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 个地级市(图 1),总面积约 54600 km<sup>2</sup>。通过 ArcGIS 将其转化为 597228 个 300 m×300 m 的网格,本研究所有分析将在此网格体系上进行。

### 1.2 水鸟分布数据

水鸟的分布数据主要来自于(1)广东省科学院动物研究所动物调查监测与恢复中心在珠三角各市开展的本底调查,调查于每年的越冬季和繁殖季开展,从中筛选出涉及水鸟的相关记录,共 2598 条;(2)中国观鸟

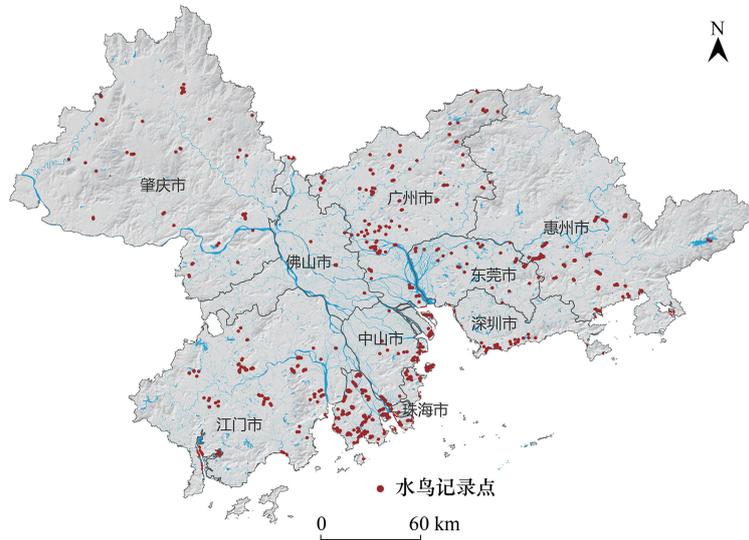


图 1 研究区域与水鸟分布记录

Fig.1 Study area and occurrence points of waterbirds

记录中心网站 (<http://www.birdreport.cn/>) 上的观鸟记录, 筛选出与水鸟相关并有明确经纬度信息的记录, 共 2995 条; (3) 公开发表的期刊论文中的水鸟分布记录<sup>[16-22]</sup>, 共 235 条, 所有记录均来自于 2016—2019 年, 合计 5828 条。为确保模型精度以及消除空间自相关所导致的模型偏差, 本研究仅选择了具有 10 个以上分布数据的水鸟作为研究的对象, 且每个 300 m × 300 m 的网格内一个物种仅保留一个分布点记录<sup>[23-24]</sup>。最终, 55 种水鸟, 5204 个分布位点被用于本研究中(图 1)。

### 1.3 环境数据

在综合前人的研究的基础上<sup>[25-27]</sup>, 结合水鸟栖息地的环境特征, 从气候、生境和干扰三方面考虑, 选择了年平均气温、气温季节变化、土地利用类型、水源距离、干扰距离等 15 个影响水鸟分布的环境因子来构建模型(表 1, 图 2, 图 3)。

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
气候因子 Climate factor		
年平均气温 Annual mean temperature	AMT	°C
气温季变化 Temperature seasonality	TS	°C
最暖月的最高气温 Maximum temperature of the warmest month	MTWM	°C
最冷月的最低气温 Minimum temperature of the coldest month	MTCM	°C
气温年变化 Temperature annual range	TAR	°C
年均降雨量 Annual precipitation	AP	mm
最湿月的降雨量 Precipitation of the wettest month	PWM	mm
最干月的降雨量 Precipitation of the driest month	PDM	mm
降雨量季节变化 Precipitation seasonality	PS	mm
生境因子 Habitat factor		
土地利用类型 Land cover	LC	—
水源距离 Distance to the nearest surface water	DW	m
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	—
红树林及滩涂面积 Area of mangroves and tidal flats	MT	m <sup>2</sup>
干扰因子 Disturbance factor		
干扰距离 Distance to the anthropogenic disturbance	DD	m
人口密度 Population density	PD	—

气候数据来自全球气候数据中心 (<https://www.worldclim.org/>) 的当代气候数据 (1970—2000 年)。2015 年土地覆盖数据由广东省环境科学研究院提供, 水源距离基于提取土地利用类型中的水体, 通过计算各个网格到最近水源 (河流、湖泊、水库等) 的欧式距离获得; 干扰距离基于提取土地利用类型中的建设用地, 通过计算各网格到最近的干扰源 (道路、建筑等) 的欧式距离获得。归一化植被指数 (NDVI), 以 Landsat-8 遥感卫星影像作为数据源, 通过 ArcGIS10.2 软件中计算得到。红树林数据来自广东省林业局 2017 年全省红树林本底调查, 滩涂数据和人口密度数据由广东省城乡规划设计研究院提供。所有的环境变量在 ArcGIS 中进行重采样, 统一到相同坐标系相同范围的 300 m×300 m 分辨率下。

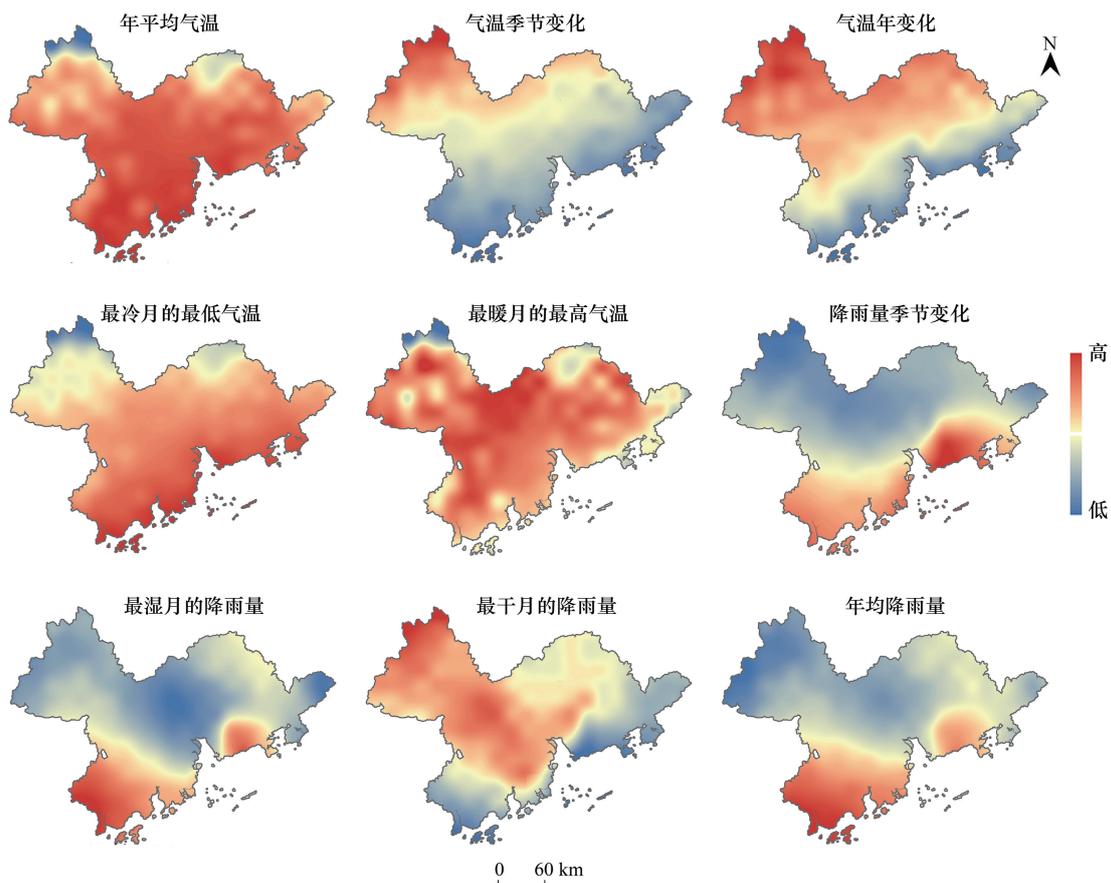


图2 气候因子

Fig.2 Climate factors

#### 1.4 Maxent 模型

考虑到环境变量间存在着一定的相关性, 变量间相关性过高会使模型分析结果产生过度拟合。因此, 为保证模型预测结果, 本研究对环境变量进行筛选和相关性分析<sup>[28]</sup>。首先, 选择所有环境变量进入 Maxent 模型进行初步模拟, 通过模型中的刀切法 (Jackknife) 判断各环境因子对模型预测结果的贡献度。随后, 参照 Yang 等的研究方法<sup>[29-30]</sup>, 对各环境变量进行多重共线性分析, 若两变量之间的 Pearson 相关性系数  $|r| \geq 0.8$ , 则取模型最初运行结果中贡献大的变量。

本研究选取 75% 的分布点记录作为训练集用于模型建立, 剩下 25% 的分布点记录作为测试集用于模型验证, 最大迭代次数为 5000 次, 模型重复运行 10 次, 结果输出类型选择 Logistic 模式, 其余参数则均使用默认值<sup>[31]</sup>。对于预测结果, 采用 ROC 曲线 (receiver operating characteristic curve) 下面积, 即 AUC 值 (Area Under Curve) 进行精度评价。AUC 值的范围为  $[0, 1]$ , 通常认为值越大, 表示模型预测结果的精度越高。评价标准

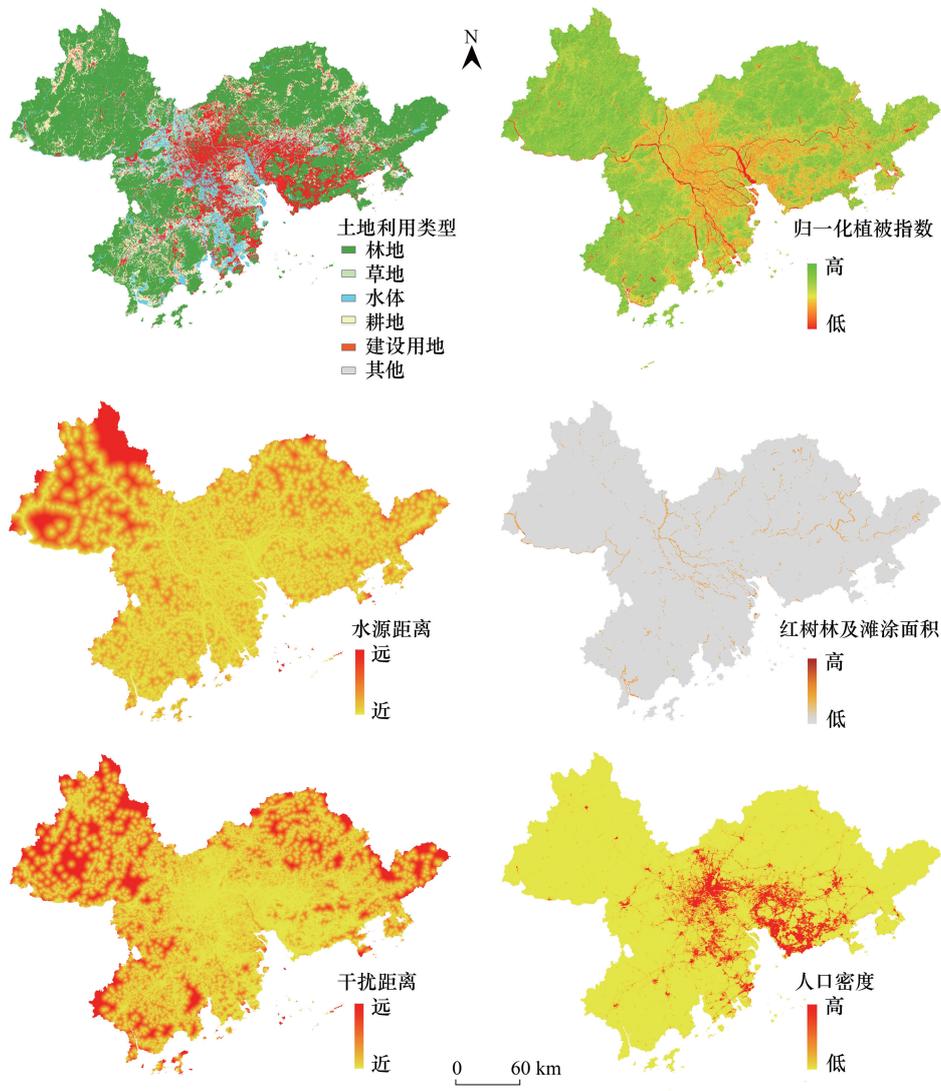


图3 生境与干扰因子

Fig.3 Habitat and disturbance factors

为:AUC 值在 0.5—0.6,模型预测失败;0.6—0.7,较差;0.7—0.8,一般;0.8—0.9,良好;0.9—1.0,优秀<sup>[32]</sup>。

选择均等测试敏感性和特异性阈值(Equal training sensitivity and specificity Logistic threshold)的方法,将模型预测结果从 Logistic 分布概率值转化为 0—1 的二项取值。如果物种在某一栅格的分布概率大于此阈值,则认为物种在这一栅格内有分布(1),反之则是无分布(0)。

### 1.5 模型整合与热点区分析

根据 Maxent 模型预测结果,利用 ArcGIS 中的栅格计算器工具对 55 种水鸟的分布预测进行叠加分析,得到粤港澳大湾区水鸟丰富度空间分布格局。依据物种丰富度从多到少,采取自然间断点分级法划分为热点地区、次热点地区、中等地区、次冷点地区和冷点地区 5 个等级<sup>[33-34]</sup>。最后应用 ArcGIS 的分区统计工具,统计各个等级分区的面积。

## 2 结果

结果显示,55 种水鸟模型 AUC 值均高于 0.8,平均 AUC 值为 0.946±0.022,表明所有模型均具有优秀的预测精度,可用于水鸟多样性格局预测。就全部水鸟而言,对模型预测贡献度排列前 3 的环境因子依次是降雨

量季节变化(30.07%)、土地利用类型(28.86%)和距离水源的距离(9.73%);分居留型来看,对候鸟的潜在分布预测贡献度较高的环境因子有降雨量季节变化(35.46%)、土地利用类型(31.51%)和距离水源的距离(6.87%),对留鸟的潜在分布预测贡献度较高的环境因子有土地利用类型(21.09%)、距离水源的距离(18.11%)、最冷月的最低气温(14.46%)和降雨量季节变化(14.26%)(图4)。

从55种水鸟对环境因子的响应曲线上看,在降雨量的季节变化方面,水鸟出现的概率随降雨量季节变化的增大而增加,最高峰值出现在78 mm;最冷月水鸟出现概率的最高峰值出现在气温12—13℃时,水鸟出现的概率随气温的降低而下降;在气温的年变化上,气温的年变化越大水鸟的出现概率越低,大部分水鸟出现概率的峰值在17—20℃之间。土地利用类型是除气候因子之外对水鸟分布影响最大的环境因素,水鸟多聚集在河流、滩涂、湖泊等湿地类型。距水源越近,水鸟出现概率越高,对水源有较高依赖性。

根据Maxent的预测结果,水鸟的潜在分布区集中在珠江口区域。按照水鸟居留型划分,冬候鸟如绿翅鸭*Anas crecca*、赤颈鸭*Anas Penelope*、红嘴鸥*Larus ridibundu*等的分布特性较为显著,仅分布于东南部沿海区域,集中在深圳、珠海、江门、中山;白鹭*Egretta garzetta*、牛背鹭*Bubulcus ibis*、黑水鸡*Gallinula chloropus*等留鸟沿水系分布的特征较为明显,分布范围较冬候鸟广(图5)。

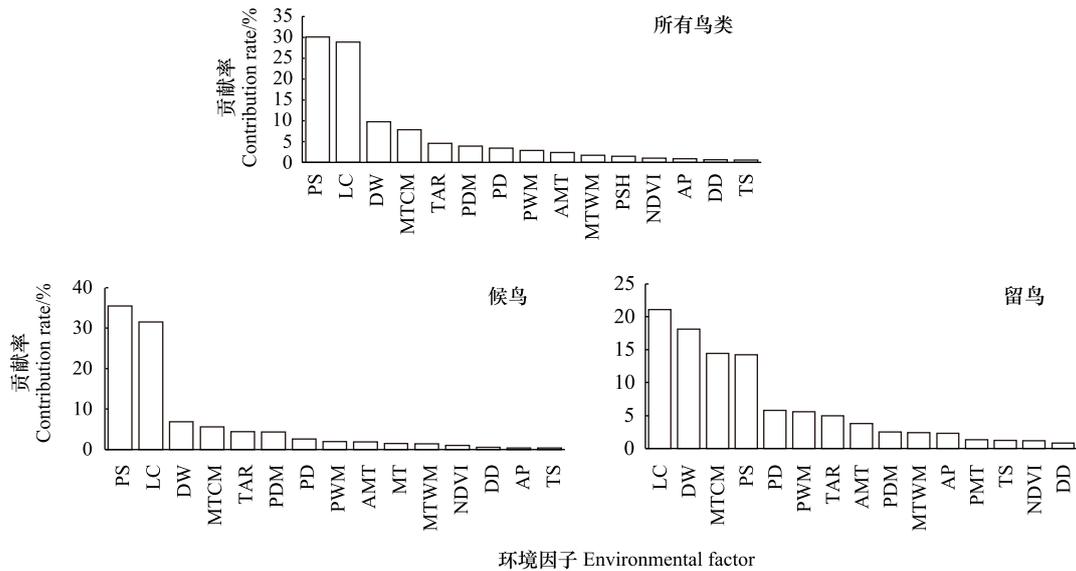


图4 各环境因子对粤港澳大湾区水鸟潜在分布的贡献度

Fig.4 Contribution of each environmental factors to the potential distribution of waterbirds in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

AMT(Annual mean temperature):年平均气温;AP((Annual precipitation):年均降雨量;MTCM(Minimum temperature of the coldest month):最冷月的最低气温;MTWM(Maximum temperature of the warmest month):最暖月的最高气温;PS(Precipitation seasonality):降雨量季节变化;PWM(Precipitation of the wettest month):最湿月的降雨量;PDM(Precipitation of the driest month):最干月的降雨量;TAR(Temperature annual range):气温年变化;TS(Temperature seasonality):气温季变化;DD(Distance to the anthropogenic disturbance):干扰距离;DW(Distance to the nearest surface water):水源距离;MT(Area of mangroves and tidal flats):红树林及滩涂的面积;LC(Land cover):土地利用类型;NDVI(Normalized Difference Vegetation Index):归一化植被指数;PD(Population density):人口密度

根据热点地区分析结果显示,水鸟多样性热点地区主要分布在大湾区的东南部沿海地带,分布面积较大的有珠海、江门、深圳、中山、广州;次热点地区分布在热点地区的外延,沿着水系从东南部沿海地区向北部内陆方向延伸,分布面积较大的是江门、深圳、珠海、中山、惠州(图6,图7)。热点地区内有自然栖息地(包括林地、草地、湿地、滩涂等)有1064.25 km<sup>2</sup>,人工栖息地(包括建筑用地、耕地等)有405.63 km<sup>2</sup>;次热点地区内有自然栖息地998.91 km<sup>2</sup>,人工栖息地878.31 km<sup>2</sup>。

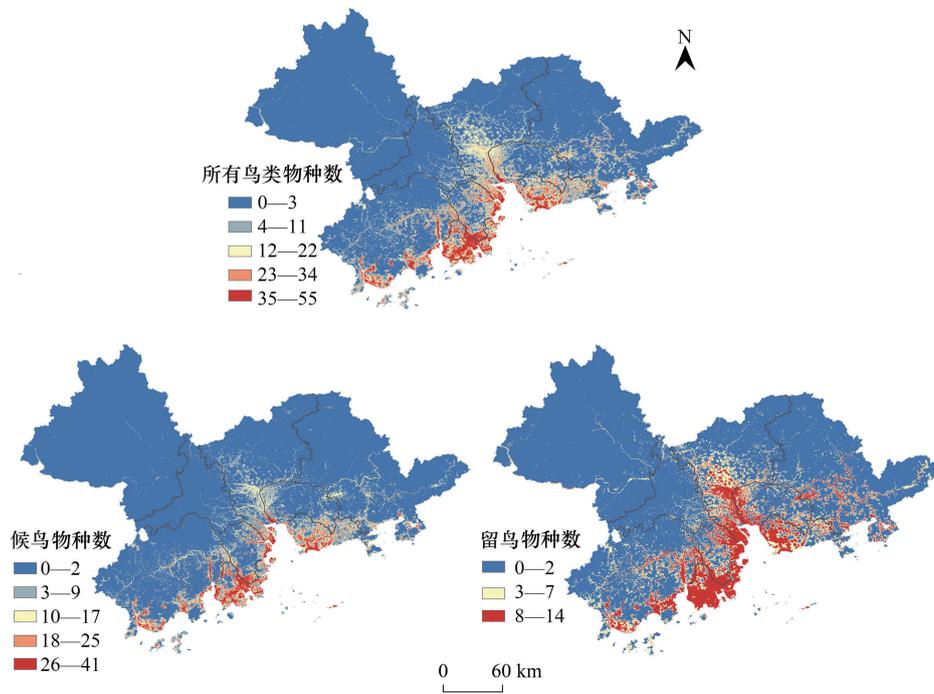


图 5 粤港澳大湾区水鸟潜在分布

Fig.5 Potential distribution of waterbirds in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

### 3 讨论

水鸟多样性热点地区主要分布在珠江口地带,集中在珠海、江门、深圳、中山等市。珠江口是中国水鸟迁徙的主要途径地之一,在水鸟聚集的广州南沙、深圳后海湾、珠海淇澳岛、磨刀门、江门崖门、镇海湾等地,咸淡水交汇,海岸类型多样,且拥有一定面积的滩涂和红树林,是水鸟栖息和觅食的主要场所,水鸟多样性丰富,以滨海湿地水鸟为主。其中,斑背潜鸭 *Aythya marila*、铁嘴沙鸨 *Charadrius leschenaultii*、蒙古沙鸨 *Charadrius mongolus*、斑脸海番鸭 *Melanitta fusca* 仅分布于滨海湿地,且分布面积最少。珠江三角洲径流通过八大口门注入珠江口,水鸟丰富度从珠江口门区域沿着水系往内陆逐渐减少,水鸟多样性降低,以内陆湿地水鸟为主,小鸕鶿 *Tachybaptus ruficollis*、池鹭 *Ardeola bacchus*、普通翠鸟 *Alcedo atthis* 和白胸苦恶鸟 *Amaurornis phoenicurus* 的分布最为广泛。在水鸟多样性热点地区中,自然栖息地与人工栖息地约为 2.5:1,其中自然栖息地的比重较高,对于有较多水鸟聚集热点地区,可以结合当地发展状况在适当的范围内扩大自然保护区或湿地公园的面积,或建立一些自然保护区或湿地公园,就近保护。如在江门市东南部的银湖湾湿地公园、镇海湾湿地公园、小鸟天堂等水鸟聚集较多的区域,在原有保护地的基础上,根据热点地区的分布现状及水鸟活动规律,选择湿地集中分布的区域,新建或扩充保护地,开展区域性水鸟保护行动,建设水鸟生态廊道,连通水鸟栖息生境,形成保护网络。

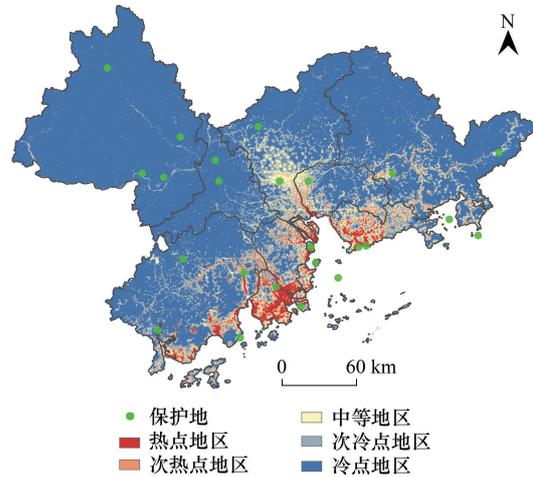


图 6 粤港澳大湾区水鸟多样性热点地区及保护地分布

Fig.6 Waterbird hotspots and distribution of protected areas in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

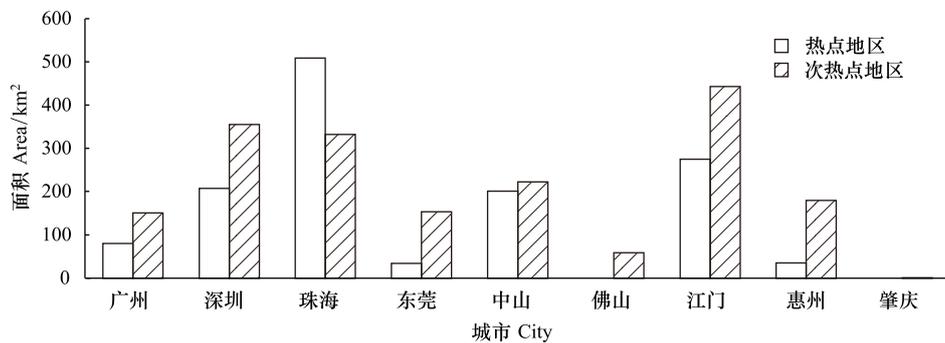


图7 粤港澳大湾区不同城市水鸟多样性热点区面积

Fig.7 Area of hotspots of waterbirds for different cities in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area

水鸟分布主要受气候及土地利用影响。其中,降雨量季节变化和年最低气温是决定水鸟分布的最重要气候因子。降雨量的季节变化导致湿地水位发生改变,大量研究表明<sup>[35-37]</sup>,湿地的水位变化是影响水鸟觅食地和休息地选择的关键因素。最冷月的最低气温上升是气候变暖的主要体现之一,近100年来全球平均气温上升了0.85℃,气候变暖趋势明显<sup>[38]</sup>。有研究表明,全球气候变暖对水鸟的影响比对陆生鸟类的影响更为明显<sup>[39]</sup>。最低气温的上升改变了迁徙水鸟的越冬范围和迁徙路线<sup>[40-41]</sup>。粤港澳大湾区在水鸟迁徙路线中处于重要的地理位置,每年秋冬季节都有大量的越冬水鸟在此栖息,更需要关注气候变化对水鸟的影响,为水鸟适应气候变化提供良好的栖息环境。

河流、湖泊、近海湿地是水鸟赖以生存的土地覆盖类型。然而,大湾区作为我国南部经济发展最为迅速的区域之一,各种开发活动对当地湿地资源带来巨大威胁。特别是在大湾区沿海经济发达城市,如广州、深圳、珠海等,近年来随着开发建设的快速推进,围海养殖、填海造地和机场码头的建设,导致土地利用类型产生了剧烈的转变,天然湿地萎缩,湿地生态功能退化尤其是水质污染严重,自然岸线消失,与之对应的是人工岸线逐年增加<sup>[42]</sup>。而如前所述,这些城市恰恰是水鸟多样性最为丰富的区域。这些过度的围填海活动导致湿地生境锐减及破碎化,改变了水鸟栖息地适宜性,由此而引起的水鸟分布变迁将严重改变其空间分布格局,对水鸟丰富度和多样性产生巨大的负面影响。

截止到2019年底,粤港澳大湾区已建成省级及省级以上自然保护区8个,湿地公园16个,其中以水鸟为主要保护对象的保护地共8个。通过保护地和水鸟多样性热点地区对比(图6),可以看出,覆盖到水鸟多样性热点地区的保护地数量较少,还存在较多的保护空缺区域。其中,江门、中山、珠海、深圳等地的保护空缺区域较大。此外,保护地多呈孤立分布,缺乏连通性。在下一步规划中,应加强对这些保护空缺区域的研究和保护。在目前保护地体系下仍为保护空白区域的水鸟多样性热点区,需要对自然保护地整合优化,在适当的范围内扩大自然保护区或湿地公园的面积,将空缺区域纳入保护范围,或选择保护较良好的湿地集中分布区,新建保护地,以填补保护空缺。对于大湾区水鸟栖息地保护较分散,缺乏有效的连接,孤岛化、破碎化严重的现象,将考虑构建水鸟生态廊道,以水系串联各个保护地,优化水鸟保护网络,有助于应对气候变化对水鸟迁徙的影响,提升和拓展迁徙水鸟的生存空间,提高湿地生态系统的稳定性。

对物种多样性格局及热点区域进行评估与识别,进而确定出优先保护区域,是生物多样性保护的重要手段<sup>[43]</sup>。然而,在当前多样性格局研究大多依赖于以行政区划作为记录单位的分布信息<sup>[44-45]</sup>,其结果主观性强,且忽视了物种在空间上是异质性分布的。因此,本研究基于野外调查及文献检索的物种分布点位信息,结合多个被认为对鸟类分布起决定作用的环境因子,通过Maxent模型对粤港澳大湾区水鸟多样性格局及热点分布状况进行分析,其结果较行政区划分布数据的简单叠加更为精确详实,能为区域生物多样性的保护规划提供更为科学的依据。

本文基于网络收集和实地调查两个方面获得水鸟“出现点”数据。然而受观测记录者个人主观认知的影

响,网络开源数据存在一定局限性,可能会导致数据出现分布不均匀的问题,从而导致模型结果偏差。此外,受公布的观测数据和实际调查有限性的影响,本文研究对象未能涵盖到粤港澳大湾区所有水鸟,且可能存在某一区域水鸟记录缺乏,会在一定程度上对小区域水鸟物种的丰富度造成误差。但相对地,纳入本研究中的水鸟大都是本区域的常见种及优势种,对群落特性与功能起决定作用,其整体分布格局受局部误差影响不明显。此外,环境数据与水鸟分布数据的时间差异亦可能导致研究结果偏差,如本文中由于实时气候数据获取相对困难,因此使用 WorldClim 数据库的当代气候数据(时间为 1970—2000 年)作为替代,因而与水鸟分布数据时间(2016—2019)未能同步。尽管气候因子在短时间内相对稳定,对研究结果不会造成太大偏差,但这种偏差在未来研究中亦应予以克服。尽管因受制于物种分布点位的可获得性和环境数据的时间性,但本研究直观地反映粤港澳大湾区水鸟整体的栖息特征和丰富度空间分布状况,对于保护粤港澳大湾区生物多样性,维持区域生态系统安全和稳定具有重要意义。

**致谢:**感谢广东省野生动物调查监测与生态修复工程技术研究中心对本研究的支持,感谢广东省城乡规划设计研究院对本文环境数据获取的协助。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P. Spatial Conservation Prioritization: Quantitative Methods and Computational. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [ 2 ] Navarro J, Coll M, Cardador L, Fernández Á M, Bellido J M. The relative roles of the environment, human activities and spatial factors in the spatial distribution of marine biodiversity in the Western Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 2015, 131: 126-137.
- [ 3 ] Rands M R W, Adams W M, Bennun L, Butchart S H M, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann J P W, Sutherland W J, Vira B. Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science*, 2010, 329(5997): 1298-1303.
- [ 4 ] Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, Wogan G O U, Swartz B, Quental T B, Marshall C, McGuire J L, Lindsey E L, Maguire K C, Mersey B, Ferrer E A. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [ 5 ] Underwood E C, Klinger R, Moore P E. Predicting patterns of non - native plant invasions in Yosemite National Park, California, USA. *Diversity and Distributions*, 2004, 10(5/6): 447-459.
- [ 6 ] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90-98.
- [ 7 ] 白雪红, 王文杰, 蒋卫国, 师华定, 陈坤, 陈民. 气候变化背景下京津冀地区濒危水鸟潜在适宜区模拟及保护空缺分析. *环境科学研究*, 2019, 32(6): 1001-1011.
- [ 8 ] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 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*, 2012, 48(1): 53-59.
- [ 9 ] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- [ 10 ] Fernandes R F, Honrado J P, Guisan A, Roxo A, Alves P, Martins J, Vicente J R. Species distribution models support the need of international cooperation towards successful management of plant invasions. *Journal for Nature Conservation*, 2019, 49: 85-94.
- [ 11 ] Anderson R P, Raza A. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(7): 1378-1393.
- [ 12 ] Franklin J. Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 2010, 16(3): 321-330.
- [ 13 ] Xu Z L, Zhao C Y, Feng Z D. Species distribution models to estimate the deforested area of *Picea crassifolia* in arid region recently protected: Qilian Mts. National Natural Reserve (China). *Polish Journal of Ecology*, 2012, 60(3): 515-524.
- [ 14 ] 于凌云, 林绅辉, 焦学尧, 沈小雪, 李瑞利. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(4): 782-790.
- [ 15 ] 李婧贤, 王钧, 杜依杭, 蔡爱玲. 快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征. *湿地科学*, 2019, 17(3): 267-276.
- [ 16 ] 季芳, 孙红梅, 袁倩敏, 杨锡涛, 邹洁建, 胡慧建. 中山市风水林生态条件对鸟类多样性的生态影响及保护作用. *生态环境学报*, 2016, 25(11): 1871-1878.
- [ 17 ] 蒋谦才, 廖浩斌, 胡慧建, 丁志锋. 中山市长江库区水源林自然保护区鸟类分布及鸟类与植物群落的关系. *林业与环境科学*, 2017, 33(5): 39-44.
- [ 18 ] 林石狮, 郑小兰, 刘军, 陈钰婷, 孙延军. 城区小型平地公园如何吸引鸟类——以深圳荔枝公园为例. *广东园林*, 2017, 39(4): 68-73.
- [ 19 ] 林石狮, 田穗兴, 王英永, 咎启杰. 2007—2011 年深圳湾鸟类多样性组成和结构变化. *湿地科学*, 2017, 15(2): 163-172.
- [ 20 ] 唐虹, 冯永军, 刘金成, 梁健超, 毕肖峰, 范存祥, 胡慧建, 杨锡涛. 广州海珠湿地生态修复过程中的鸟类多样性研究. *野生动物学报*,

- 2018, 39(1): 86-91.
- [21] 孙莉莉, 刘云珠, 贾亦飞, 雷光春, 尹玉柱, 徐华林, 田穗兴, 文贤继. 广东内伶仃岛-福田国家级自然保护区鱼塘生态恢复前、后水鸟群落多样性对比. 湿地科学, 2019, 17(6): 631-636.
- [22] 陆恒, 冯永军, 陈泽雄, 李涛, 黎明, 吕浩荣, 邹洁建. 佛山新城登瀛沙岛及邻近区域鸟类分布特点. 林业与环境科学, 2019, 35(5): 49-57.
- [23] Hu J H, Hu H J, Jiang Z G. The impacts of climate change on the wintering distribution of an endangered migratory bird. *Oecologia*, 2010, 164(2): 555-565.
- [24] Luo Z H, Jiang Z G, Tang S H. Impacts of climate change on distributions and diversity of ungulates on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 2015, 25(1): 24-38.
- [25] 董张玉, 刘殿伟, 王宗明, 任春颖, 张冷, 汤旭光, 贾明明, 丁智. 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价. 生态学报, 2014, 34(6): 1503-1511.
- [26] Na X D, Zang S Y, Zhang Y H, Li W L. Assessing breeding habitat suitability for the endangered red-crowned crane (*Grus japonensis*) based on multi-source remote sensing data. *Wetlands*, 2015, 35(5): 955-967.
- [27] 满卫东, 刘明月, 王宗明, 毛德华, 田艳林, 贾明明, 李想, 任春颖, 欧阳玲. 1990—2015 年三江平原生态功能区水禽栖息地适宜性动态. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4083-4091.
- [28] Sillero N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1343-1346.
- [29] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [30] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [31] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [32] Araújo M B, New M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(1): 42-47.
- [33] Fajardo J, Lessmann J, Bonaccorso E, Devenish C, Muñoz J. Combined use of systematic conservation planning, species distribution modelling, and connectivity analysis reveals severe conservation gaps in a megadiverse country (Peru). *PLoS One*, 2014, 9(12): e114367.
- [34] Ayram C A C, Mendoza M E, Etter A, Salicrup D R P. Anthropogenic impact on habitat connectivity: a multidimensional human footprint index evaluated in a highly biodiverse landscape of Mexico. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 895-909.
- [35] Ma Z J, Cai Y T, Li B, Chen J K. Managing wetland habitats for Waterbirds: an international perspective. *Wetlands*, 2010, 30(1): 15-27.
- [36] Faragó S, Hangya K. Effects of water level on waterbird abundance and diversity along the middle section of the Danube River. *Hydrobiologia*, 2012, 697(1): 15-21.
- [37] Zhang C, Yuan Y J, Zeng G M, Liang J, Guo S L, Huang L, Hua S S, Wu H P, Zhu Y, An H X, Zhang L H. Influence of hydrological regime and climatic factor on waterbird abundance in Dongting Lake Wetland, China: implications for biological conservation. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 473-481.
- [38] IPCC. Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [39] Žalakevičius M, Švažas S. Global climate change and its impact on wetlands and waterbird populations. *Acta Zoologica Lituanica*, 2005, 15(3): 211-217.
- [40] Lehtikoinen A, Jaatinen K, Vähätalo A V, Clausen P, Crowe O, Deceuninck B, Hearn R, Holt C A, Hornman M, Keller V, Nilsson L, Langendoen T, Tománková I, Wahl J, Fox A D. Rapid climate driven shifts in wintering distributions of three common waterbird species. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2071-2081.
- [41] Haig S M, Murphy S P, Matthews J H, Arismendi I, Safeeq M. Climate-altered wetlands challenge waterbird use and migratory connectivity in arid landscapes. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4666.
- [42] 赵玉灵. 近 40 年来伶仃洋海岸线与红树林遥感调查与演变分析. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 136-142.
- [43] 梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25(3): 294-303.
- [44] 张有瑜, 周立志, 王岐山, 王新建, 邢雅俊. 安徽省繁殖鸟类分布格局和热点区分析. 生物多样性, 2008, 16(3): 305-312.
- [45] 张殷波, 郭柳琳, 王伟, 田瑜, 李俊生. 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区. 生态学报, 2014, 34(8): 2109-2117.