

DOI: 10.20103/j.stxb.202401100094

范佳旭, 连懿, 高晖春, 李海笑, 贺梦璇, 崔磊, 莫训强. 中国大陆鸟类物种多样性特征及影响因素. 生态学报, 2025, 45(2): 596-614.

Fan J X, Lian Y, Gao H C, Li H X, He M X, Cui L, Mo X Q. Characteristics of avian species diversity and influencing factors in mainland China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 596-614.

中国大陆鸟类物种多样性特征及影响因素

范佳旭¹, 连懿^{1,2}, 高晖春¹, 李海笑³, 贺梦璇¹, 崔磊^{1,4}, 莫训强^{1,*}

¹ 天津师范大学地理学部, 天津 300387

² 中国科学院国家天文台, 北京 100012

³ 湖北理工学院环境工程与科学学院, 黄石 435003

⁴ 集美大学航海学院, 厦门 361021

摘要: 中国鸟类物种多样性的研究存在空间尺度的局限性。以中国省级行政区划为地理统计单元, 采用 eBird 公民科学数据, 引入 G-F 指数来量化评价鸟类物种多样性特征。在此基础上, 利用空间自相关分析方法探究鸟类物种多样性的空间分布特征, 并建立地理加权回归模型分析鸟类物种多样性影响因子的空间异质性。研究结果表明: (1) 中国鸟类物种多样性总体呈现由东南沿海向西北内陆逐渐减少的空间分布趋势, 并呈现经度条带分异的空间规律; (2) 各影响因子对鸟类物种多样性的影响程度存在明显的空间差异: 气温因子呈现北高南低的空间分布特征, 降雪因子对鸟类物种多样性的影响主要局限于东北省份, 水文因子对鸟类物种多样性的影响程度呈现从南北两侧向中部省份逐级递减的空间分布特征, 植被因子对鸟类物种多样性的影响程度则呈现由西南省份向东北省份逐渐减弱的趋势, 人类活动因子对鸟类物种多样性影响表现出纬度方向集聚相连的空间分布特征。研究结果有助于丰富鸟类物种多样性的研究, 并为鸟类资源保护和生物多样性维持提供科学依据。

关键词: 鸟类多样性; 空间分布; G-F 指数; 地理加权回归 (GWR) 模型

Characteristics of avian species diversity and influencing factors in mainland China

FAN Jiayu¹, LIAN Yi^{1,2}, GAO Huichun¹, LI Haixiao³, HE Mengxuan¹, CUI Lei^{1,4}, MO Xunqiang^{1,*}

¹ Faculty of Geographical Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

² National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

³ School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China

⁴ Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: Research on the diversity of bird species in China has limitations in spatial scale. This study used provincial administrative divisions of China as geographic statistical units, employed eBird citizen science data, and introduced the G-F index to quantify and evaluate the characteristics of bird species diversity. Based on this, spatial autocorrelation analysis was used to explore the spatial distribution characteristics of bird species diversity, and a geographically weighted regression model was established to analyze the spatial heterogeneity of factors influencing bird species diversity. The results show that: (1) Overall, the spatial distribution trend of bird species diversity in China gradually decreases from the southeast coast to the northwest inland, exhibiting a spatial pattern of longitudinal band differentiation; (2) The degree of influence of each influencing factor on bird species diversity exhibits obvious spatial differences: temperature factors show a spatial

基金项目: 教育部春晖计划合作科研项目 (202200324); Key project of Hubei Province Education Department (D20224502); 天津市自然科学基金青年基金 (22JCQNJC01430); 天津师范大学博士资助项目 (52XB1902)

收稿日期: 2024-01-10; **网络出版日期:** 2024-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 421973@163.com

distribution characteristic of higher in the north and lower in the south, the influence of snowfall factors on bird species diversity is mainly limited to northeastern provinces, the degree of influence of hydrological factors on bird species diversity gradually decreases from both sides to central provinces, the influence of vegetation factors on bird species diversity shows a trend of gradually weakening from southwestern provinces to northeastern provinces, and the influence of human activities on bird species diversity exhibits a spatial distribution characteristic of latitude direction aggregation. These research results contribute to enriching the study of bird species diversity and providing scientific basis for bird resource protection and biodiversity conservation.

Key Words: avian diversity; spatial distribution; G-F index; Geographically Weighted Regression (GWR) model

生物多样性是人类赖以生存和持续发展的物质基础^[1]。鸟类是生态系统的重要组成部分,对气候等环境条件较为敏感,是生态环境的重要指示类群^[2],其多样性常被作为生态环境质量评价的一项客观生物指标^[3]。全球鸟类多样性呈现出显著的地理分布差异,南美洲鸟类多样性最为丰富;其次是亚洲、非洲、大洋洲、北美洲和欧洲;极地的鸟类种类则较为贫乏^[4]。我国地跨热带、亚热带和温带等热量带,拥有热带及亚热带季风、温带大陆和高山高寒等多种气候类型,是亚洲大陆鸟类多样性的热点区域之一,现有鸟类 1505 种,约占世界鸟类总数的 16.65%^[5]。全球有 9 条候鸟迁徙路线,其中有 4 条贯穿我国全境,这充分凸显了我国在鸟类栖息地与多样性保护中的关键角色。

物种的空间分布信息对于物种保护规划制定而言至关重要^[6]。前人已针对鸟类空间分布格局及其驱动机制开展过广泛的研究,包括鸟类栖息地生境质量评价^[7-8]、气候变化背景下鸟类适生区变化^[9-11]、不同生境和不同季节鸟类多样性的动态变化及驱动因子研究^[12-14]等。物种分布数据大多来源于规划文件、鸟类调查、文献记录,数据稳定性和完整性相对较好,但因受到调查资源的限制,研究区多集中于湿地、公园、保护区等小区域尺度场景,存在区域局限性。鸟类作为迁徙物种,生存繁衍需要更大的空间范围,因此小区域研究难以全面反映鸟类多样性的真实状况,其研究结果的代表性和可靠性也受到影响。当前在大尺度下开展鸟类空间分布格局研究面临诸多挑战,如进行大尺度的鸟类调查需要多地协同,人力资源成本相对较高。在此背景下,公民科学数据作为一种庞大而相对准确的信息来源逐渐被研究者所关注和应用^[15]。例如,王春晓等^[16]将鸟类记录数据与土地利用时空数据相结合,研究了鄂州市土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响。游巍斌等^[17]考虑了城市景观功能性特征,分析了城市鸟类多样性与景观因素的关系。此外,阳文锐等^[18]利用鸟类数据建立起城市保护生物多样性的生态网络,为城市景观格局规划提供了重要依据。因此,对公民科学数据进行标准化处理以提高数据的空间覆盖度,实现大范围的鸟类时空分布格局研究,是扩展鸟类研究尺度的有效途径。

鸟类的空间分布格局在全球范围内存在显著差异,它们的迁徙与时空分布变化也常常受到复杂的多源驱动因素影响。研究表明,鸟类的空间分布主要受到以下因素影响:(1)气温因素:如古巴^[19]、北美^[20]和中国^[21]等地区的鸟类正随着气温变暖而向极地或高海拔地区迁移;气温变暖还导致候鸟的迁徙距离缩短甚至转变为留鸟。如在我国黄河以北繁殖的部分东方白鹳(*Ciconia boyciana*)和普通鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)在冬季不再迁往东南沿海等低纬度地区越冬^[22-23]。(2)雪被因素:部分栖息于高寒山区的鸟类的分布会受到雪的影响,如我国青藏高原高海拔区域繁殖的雪鸡(*Tetraogallus*)等冬季活动范围会随雪线下降,而在夏季则上移,呈现出明显的季节性迁移特征^[24-25]。(3)水文因素:水位变化影响湖泊面积、水分盐度、水透明度以及初级生产力等,最终对鸟的群落造成影响^[26-27]。(4)植被因素:植被的类型、结构和覆盖度等因素对鸟类物种多样性具有显著影响,能够在一定程度上反映鸟类对食物的可获得性,植被所提供的隐蔽空间对鸟类躲避天敌与人类干扰至关重要^[28]。(5)人类活动因素:随着城市化的高速发展,人为因素对鸟类多样性的影响日益加剧,如海岸带围垦、森林砍伐、环境污染等人类活动造成鸟类适宜生境面积迅速减少,栖息地破碎化程度严重^[29];据世界自然保护联盟统计数据显示,近 48% 的鸟类种群处于减少趋势^[30-32],人类活动已成为鸟类物

种多样性维持的主要威胁。

本研究拟从鸟类的空间分布需求出发,对现有公民科学数据进行标准化处理。以我国的省级行政单位为统计单元,采用鸟类多样性指数表征鸟类的空间分布,尝试以更宏观的视角开展大尺度的鸟类时空分布格局及其驱动机制的定量研究,为我国鸟类多样性管理和保护提供针对性较强的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 鸟类数据

鸟类数据来源于全球最大的鸟类观测数据库 eBird (<https://ebird.org/home>),其数据主要来源于全球鸟类爱好者的观测共享,具有数据量大和时空覆盖高的优势。本研究选取了 2015—2019 年五年间中国大陆地区的鸟类记录开展研究。由于观测者能力和习惯的偏差可能会影响数据的质量,综合考虑地理单元分辨率与分析需求,研究中对原数据进行了数据滤波等处理,以期通过标准化的方式统一鸟类数据源的观测差异,具体流程包括:(1)删除鸟种名称错误的鸟类观察数据;(2)同一次观鸟活动,若有多名观鸟人员参加且提交了多份相同的鸟类观察数据,则仅保留其中一份鸟类观察数据;(3)所有鸟类观察记录中的鸟类名称及分类统一采用国际鸟类协会(International Ornithological Congress, IOC)发布的世界鸟类名录 12.2 版本(<https://www.worldbirdnames.org>);(4)按年份逐一统计中国大陆地区各个省份出现过的鸟类物种,5 年累计获得 38588 条鸟类物种记录,各省在相应年份所记录的鸟类物种数量详见附表 1 所示。

1.1.2 影响因子数据

鸟类活动主要受到气温、雪被、水文、植被和人类活动等方面影响,基于此本文选取涉及这五个方面的 20 个环境变量作为中国鸟类多样性的参考影响因子(表 1)。其中,NDVI 数据来源于 MODIS 植被指数产品;其他气温、雪被、水文、植被等自然因子数据来源于 Climate Data Store 数据库(<https://cds.climate.copernicus.eu>)中 ERA5-Land 数据集。该数据集是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)综合物理参数和高分辨率的地形、土地利用和植被信息,对全球陆地表面气象要素建立再分析模型,计算气候变量(如温度、降水、蒸发量等)的再分析估计值,空间分辨率约为 30 km。人类活动方面利用国内生产总值(GDP)、煤炭能源消耗、人口数量三个指标反映各省的经济、社会和人口状况。以上社会因子数据均来自于中国统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>)。

1.2 研究区域

本研究以中国大陆 31 个省级行政区作为研究区域。由于 eBird 数据具有时空分布不均衡的特性,部分地区或时段内鸟类分布数据较少,可能导致后续分析结果的偏差。本研究采用统计学中被广泛用于衡量数据稳定性的变量——变异系数(Coefficient of Variation, CV),其计算方法为标准差与平均值之比,根据比值大小可将数据变异程度分为三个等级:CV 值在 0—15% 为弱变异;16%—35% 为中等变异;大于 36% 为强变异(图 1)。根据上述变异系数,本研究剔除了鸟类数据强变异的 4 个省级行政区划,即:山西省、吉林省、山东省

表 1 鸟类多样性影响因子

Table 1 Factors affecting bird diversity	
影响因素 Impact factors	环境变量 Environment variables
气温 Temperature	2m 露点温度
	2m 温度
	地表接收热辐射量
雪被 Snow	雪反照率
	积雪百分比
	雪蒸发量
	雪密度
水文 Hydrology	总降水量
	水体冰厚
	径流总量
	地表径流
	地下径流
植被 Vegetation	植被冠层和土壤上层含水量
	冠层顶部蒸发量
	高植被型叶面积指数
	低植被型叶面积指数
人类活动 Human activities	归一化植被指数
	国内生产总值
	煤炭能源消耗
	人口数量

和宁夏回族自治区,选定剩余 27 个省份作为研究对象。

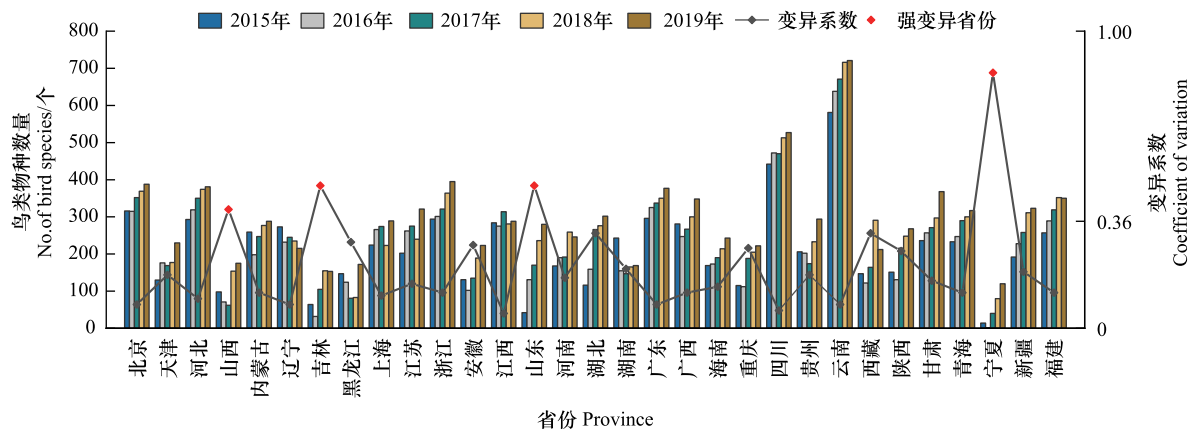


图 1 中国大陆各省份鸟类物种数量及变异系数(2015—2019 年)

Fig.1 Number of bird species and coefficient of variation in mainland China's provinces (2015—2019)

1.3 研究方法

1.3.1 G-F 指数

G-F 指数是基于 Shannon-Wiener 指数提出的评价物种多样性的指标^[33];不同于 Shannon-Wiener 在计算过程中对个体数量的依赖,G-F 指数是基于鸟类名录中的科、属信息,计算科间的多样性指数 DF 和属间多样性指数 DG ,并将两者的比值转化为标准化的指数。G-F 指数因其简洁有效和标准化的特点,被广泛应用于比较不同类型生态系统和不同尺度的空间内生物群落多样性研究。我们使用 Python 开源工具编写了程序,完成 G-F 指数的计算。G-F 指数的计算公式为:

$$D_{GF} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^p q_j \ln q_j}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i} \quad (1)$$

式中, m 为鸟类名录中的科数, n 为 k 科中的属数, $p_i = \frac{S_{k_i}}{S_k}$, S_k 为名录中 k 科中的物种数, S_{k_i} 为 k 科第 i 属中的物种数。

$q_j = \frac{S_j}{S}$, S 为名录中的物种数, S_j 为 j 属中的物种数, p 为总属数。如果所有的科都是单种科,即

$DF=0$ 时,那么该地区的 G-F 指数为零。

1.3.2 空间相关性分析

为解释鸟类多样性分布与空间位置的依赖性问题,探究数据在空间内的集聚情况,本研究使用 ArcGIS 中的空间相关性分析工具来揭示全国及各省鸟类多样性的空间分布特征。地理数据的空间相关性使用 Moran's I 指数度量,其通过计算地理区域之间的空间权重矩阵,及与其周围邻近区域值之间的相关性,以此判断该区域是否具有空间集聚或分散的特征^[34]。计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, I 为 Moran's I 指数; n 为空间单元的个数; W_{ij} 为空间权重矩阵; x_i 、 x_j 分别为空间 i 、 j 位置的 G-F 指数。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$;值越接近 1,表明数据的全局空间集聚性越强;反之值越接近 -1,表明数据的全局空间分散性越强;而接近 0 则表示数据在空间上呈随机分布。

1.3.3 主成分分析

考虑到鸟类多样性影响因子间可能存在多重共线关系,采用主成分分析(PCA)方法将特定类别下的影响因子转化为一组线性不相关的变量,以此排除它们的相互影响。PCA 基于数据的协方差矩阵或相关系数矩阵,计算各个主成分的方差(特征值)和主成分的权重(特征向量),并将各个主成分的方差按照大小排序,形成主成分的序列。本研究调用了 Python 程序中的 Numpy 与 scikit-learn 库完成分析过程。PCA 计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{ij} - \bar{x}_j) \quad (3)$$

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

式中, n 为样本数, x_{ij} 为第 i 个变量的第 j 次观测值, $\bar{x}_i$ 为第 i 个变量的均值, λ_i 为第 i 个主成分的方差(特征值), a_{ij} 为第 j 次观测值在第 i 个主成分上的权重(特征向量)。

1.3.4 地理加权回归分析

地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)是一种基于空间分析的回归分析方法^[35]。该方法通过在空间上引入权重来反映影响系数在地理位置上的差异性,即离某个目标更近的观测值将在回归模型中具有更高的权重,而离得更远的观测值则权重较低。相比传统的全局回归模型,GWR 模型更适用于探究空间异质性和空间非平稳性的问题。本研究使用了 ArcGIS 中的地理加权回归分析工具,解释中国大陆不同省份的鸟类多样性随影响因素变化的内在规律及关键影响因素的作用原因。各因子的地理空间回归系数计算公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \gamma_i \quad (5)$$

式中, Y_i 为位置 i 处的 G-F 指数; (u_i, v_i) 是位置 i 的坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距值; x_{ik} 是位置 i 处的第 k 个独立变量,对应气温、雪等影响因素; $\sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik}$ 表示位置 i 处的第 k 个自变量的回归系数; γ_i 为位置 i 处的随机误差。

2 结果与分析

2.1 鸟类种类统计

本研究所筛选的 2015—2019 年间 27 个省份共记录到 1273 种鸟类,隶属于 112 科 452 属,覆盖全国已记录鸟类种数的 84.58%^[5]。其中,雀形目(*Passeriformes*)、鸽形目(*Charadriiformes*)、鸡形目(*Galliformes*)、啄木鸟目(*Piciformes*)为优势目(图 2)。在 112 个鸟类科中,有 52 个科仅包含 1 个属;其中,25 个科仅包含 1 种鸟类;而鸛科共包含 23 个属 96 种鸟类,为最大科。自 2015 年到 2019 年,除辽宁及湖南省外,中国大陆各省的鸟种数均呈现上升趋势。鸟类多样性涨幅最大的为湖北省,科数由 2015 年的 44 科上涨至 2019 年的 63 科,属数由 2015 年的 86 属上涨至 2019 年的 171 属,种数由 2015 年的 116 种上涨至 2019 年的 301 种。2015—2019 年间,云南始终为中国大陆鸟类多样性最高的省份(附表 1)。

总体而言,我国东南沿海及云南、四川、甘肃在鸟类物种数量上较为丰富,云南省 5 年间所记录的鸟类物种数量达 815 种,是中国大陆鸟类多样性最高的省。此外,鸟类物种高丰富度地带在空间分布上平行于东部和中部候鸟迁徙路线,呈现出经度条带分异规律(图 3)。云南、四川、甘肃均为东亚-澳大利西亚迁徙路线上的重要鸟区,鸟类种类丰富^[36];而在俄罗斯、日本、朝鲜半岛以及中国华北东部(如北京、天津、河北)繁殖的鸟类,在春、秋两季通过东部沿海地区(如浙江、福建、广东、广西等)进行南北方向的迁徙,因此上述省份的鸟类多样性程度较高。

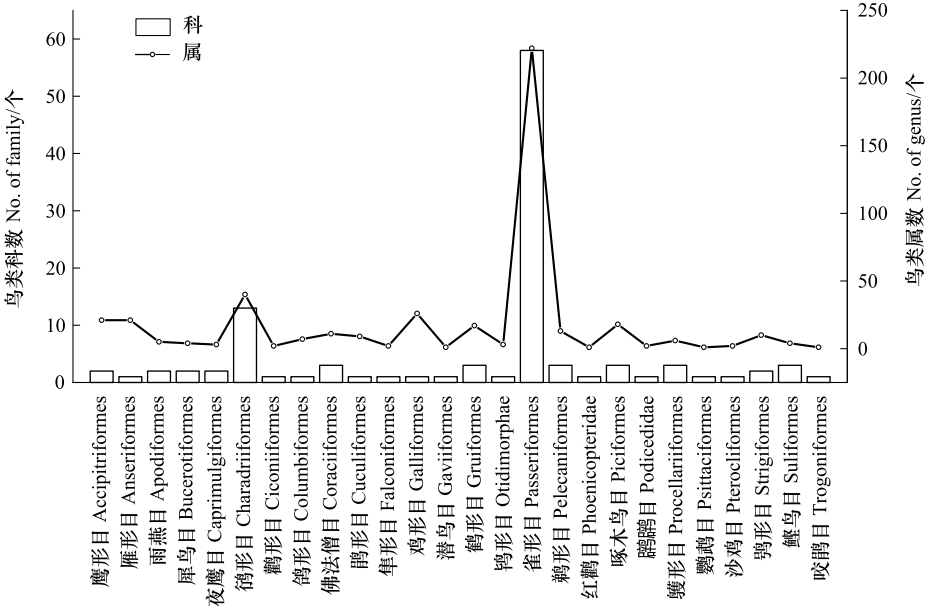


图 2 中国大陆鸟类多样性统计结果(2015—2019 年)

Fig.2 Statistical results of bird diversity in mainland China (2015—2019)

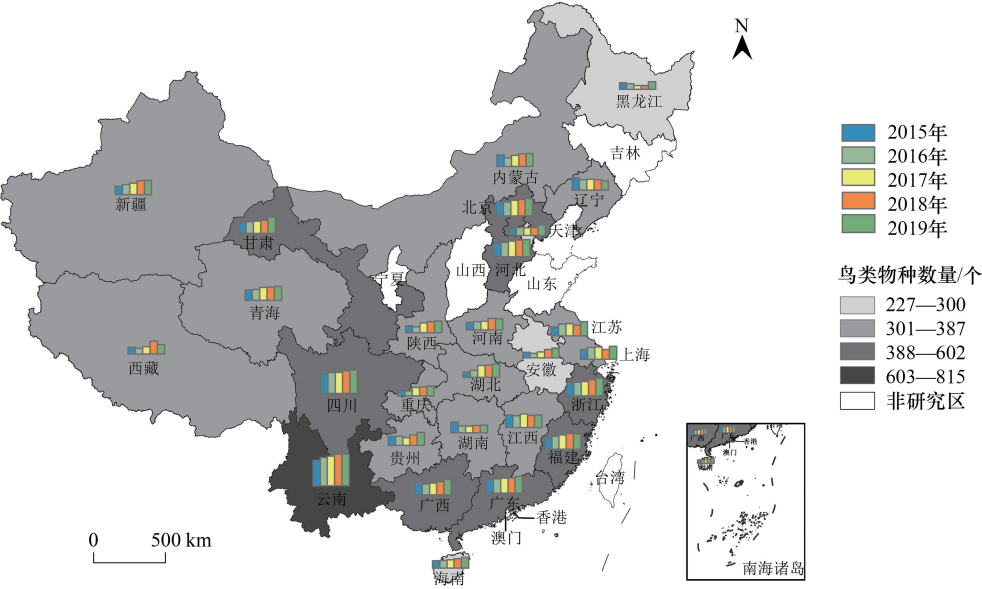


图 3 中国大陆鸟类物种数量分布图(2015—2019 年)

Fig.3 Distribution map of bird species in mainland China (2015—2019)

2.2 G-F 指数与变化率

根据鸟类的科、属信息计算出 2015—2019 年间中国大陆各省的 G-F 指数及平均值,结果如图 4 所示。中国鸟类物种丰富度存在随纬度增高递减的总体趋势,同时也存在因地区自然差异等因素而形成低纬度低丰富度,高纬度高丰富度的特殊地带。具体来讲,鸟类物种多样性在靠近赤道的热带地区最大,并向北逐渐递减。纬度对鸟类物种丰富度的影响是由于在纬度变化情境下,气候条件及水文模式等因素随之变化并相互作用,最终表现出纬度梯度规律的同时由于地形差异而在某些地区保留了特殊性。

G-F 指数(genus-family index)通过比较一个地区不同鸟类科属数量,评估该地区鸟类科属数量的分布是否均匀,反映了该地区鸟类物种多样性状况。

考虑到鸟类多样性变化具有一定偶然性,研究将时间变化分析的重点集中于 G-F 指数变化率大于 5% 的省份。由图 5 可知,2015—2017 年内我国鸟类多样性变化曲线波动频繁且具有多个起伏峰谷,相比 2015 年,2016 年 G-F 指数呈下降趋势的省份多达 16 个,其中安徽、湖南和陕西尤为明显;而 2017 年 20 个省份 G-F 指数均有所增加,如安徽、湖北、重庆和陕西等地出现明显增长峰值,据此可知 2016 年我国鸟类多样性整体状况处于低谷。2017—2019 年的变化总体相对平缓,仅有个别省份波动较大,其他地区鸟类多样性均表现稳定。例如,2017—2018 年间,西藏地区 G-F 指数增加了 10.7%,2018—2019 年间,黑龙江省 G-F 指数变化率为 18.9%。两个地区均为相应期间增长率最高的省份,这表明鸟类多样性明显增强。

2.3 鸟类多样性影响因素的识别

2.3.1 基于相关性分析的因子筛选

研究利用皮尔逊相关分析法,将选取的 20 个影响因子和 G-F 指数进行相关系数计算,直观量化影响因子与鸟类多样性的相关程度。结果显示(图 6),冠层顶部蒸发量与 G-F 指数相关度最高,且相关系数为负,为主要抑制性因子。植被冠层顶部的高蒸发量通常与高温有关,反映了土壤面临的水分流失和干旱的威胁,从而导致植被退化和栖息地质量的下降,最终影响鸟类多样性的降低。同时,雪密度、积雪百分比和水体冰厚等指标的提升均会影响鸟类食物资源的可利用性,抑制鸟类多样性发展。而相关系数为正的 16 个影响因子均为

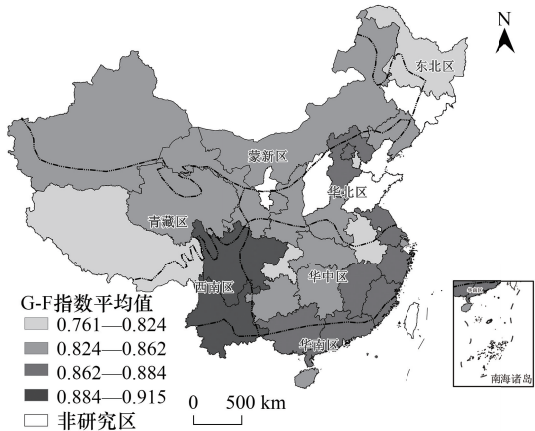


图 4 中国大陆鸟类地理区及各省份 G-F 指数平均值(2015—2019 年)

Fig.4 Geographic division of bird regions and average G-F index for provinces in China (2015—2019)

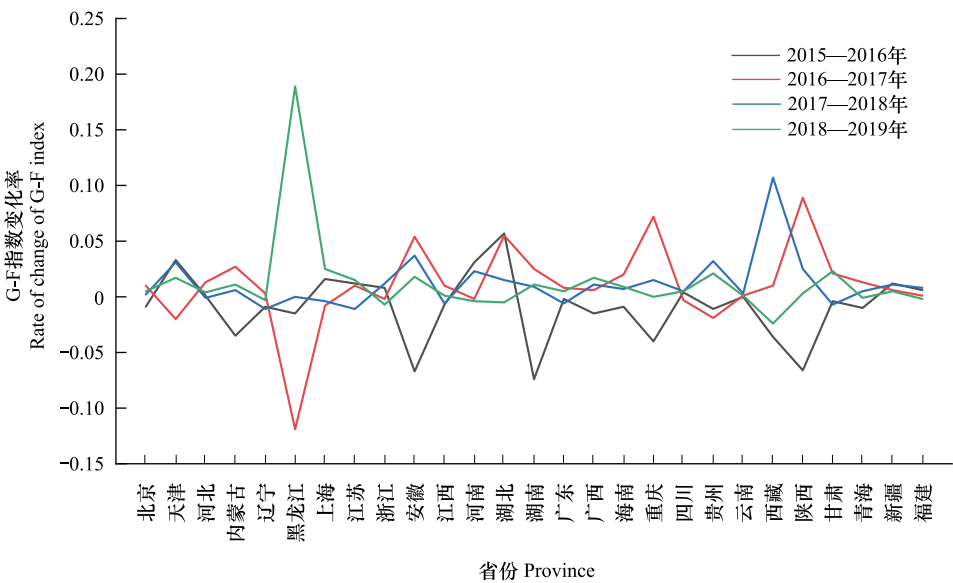


图 5 中国大陆各省份 G-F 指数变化率(2015—2019 年)

Fig.5 Rate of change in G-F index for provinces in mainland China (2015—2019)

促进性因子中,雪反照率和高植被型叶面积指数对 G-F 指数的正向影响最大;对生活在雪被覆盖地区的鸟类,如雪鸡(*Tetraogallus*)而言,较高的雪反照率意味着融雪较慢,地表温度相对较低^[37],更适宜高寒地区的鸟类生存。高植被型叶面积指数则能够反映植被的密度和层次结构,该指标的增加意味着植被覆盖较为茂密,鸟类栖息地复杂性增加,食物来源更加丰富,有利于支持更多鸟类物种生存和繁殖。

虽然 20 项影响因子均与鸟类多样性相关,但为避免微弱性影响因子($|$ 相关系数 $| < 0.3$)对模型结果的干扰,研究剔除了 2m 温度,归一化植被指数,雪密度,国内生产总值和煤炭能源消耗 5 种因子,选择剩余 15 个影响因子进行地理加权回归模型构建。

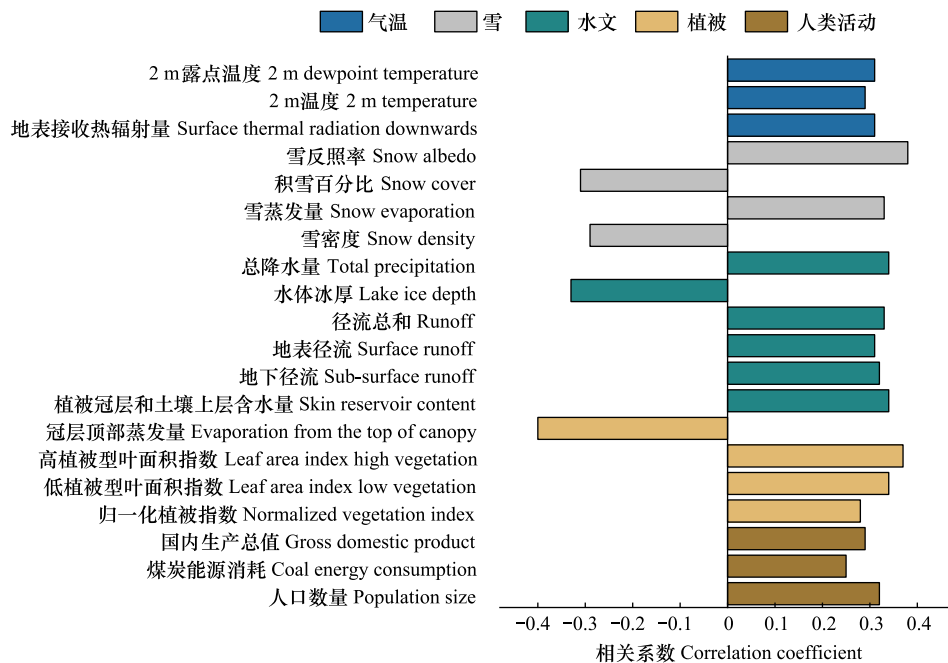


图 6 影响因子与 G-F 指数的 Pearson 相关系数值

Fig.6 Pearson correlation coefficients between impact factors and G-F index

2.3.2 基于主成分分析的多因子融合

在建模过程中,经相关性筛选后的部分影响因子之间还存在多重共线性问题,这可能会影响模型参数的估计,从而降低模型的可靠性。研究需将相关性筛选后的 15 个影响因子按照气温、雪被、水文、植被和人类活动等方面进行聚类,并在此基础上利用特征融合的方式对标准化后的数据进行降维,通过主成分分析方式融合同一类型的变量,最终聚合不同类型特征形成综合解释变量。

雪被、水文和植被的输入变量中存在较多因子数,满足常规的主成分分析的特征融合的参数要求。基于此,对以上影响因素进行主成分分析,提取出水文、植被、雪被三个综合指标,结果如表 2 所示。其中降水量、低植被型叶面积指数、雪蒸发量分别为其各自第一主成分的主要贡献因子。而相对于前三个要素来说,气温要素仅包含露点温度和地表热辐射因子,不适合采用主成分分析的方式,因此将通过线性回归拟合计算二者的比例关系。经计算,露点温度和地表热辐射在综合气温指标中的权重分别为 0.56 和 0.44。由于人类活动因素中的国内生产总值、煤炭能源消耗两变量是鸟类多样性的微弱性影响因子($|$ 相关系数 $| < 0.3$),在模型构建中被剔除,则使用人口数量作为人类活动要素的评价指标。

2.4 鸟类多样性的时空关联模型构建

2.4.1 鸟类多样性的空间分布模式

各省份 G-F 指数的全局空间自相关分析结果揭示了中国大陆鸟类多样性的整体空间分布模式。如表 3 所示,2015 至 2017 年,鸟类多样性整体分布在空间上无明显集聚或分散特征,具有较高概率的随机性;而在

2018、2019 年,鸟类多样性分布整体表现为空间集聚模式,Moran's I 指数值由 0.115 增长至 0.162,表明集聚趋势逐渐加强。

表 2 影响因子的主成分聚类结果(2015—2019 年)

Table 2 The PCA clustering results of the impact factor (2015—2019)

影响因素 Impact factors	环境因子 Environment variables	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
水文 Hydrology	总降水量	82.571	82.403	79.665	78.484	77.794
	径流总量	10.227	9.67	13.744	15.181	15.973
	地下径流	4.058	4.689	2.823	3.617	3.294
	植被冠层和土壤上层含水量	2.942	3.024	2.382	1.779	1.691
	地表径流	0.201	0.214	1.338	0.904	1.189
	水体冰厚	0	0	0.048	0.036	0.059
植被 Vegetation	低植被型叶面积指数	88.637	88.175	86.343	86.959	87.197
	冠层顶部蒸发量	7.024	7.377	8.871	8.311	7.490
	高植被型叶面积指数	4.339	4.448	4.786	4.730	5.313
雪被 Snow	雪蒸发量	90.59	88.60	90.51	87.03	90.08
	积雪百分比	8.03	9.94	8.73	11.91	9.28
	雪反照率	1.38	1.46	0.76	1.06	0.65

PCA: 主成分分析 Principal component analysis

表 3 中国各省 G-F 指数的 Moran's I 值(2015—2019 年)

Table 3 Moran's I values of G-F index for provinces in China (2015—2019)

年份 Year	Moran's 指数 Moran's I	P	Z	分布模式 Distribution pattern
2015	0.017	0.578	0.558	随机
2016	-0.065	0.790	-0.266	随机
2017	-0.002	0.681	0.411	随机
2018	0.114	0.038	2.076	集聚
2019	0.157	0.047	1.988	集聚

针对 2019 年 G-F 指数集聚现象最为显著的省区开展局部空间自相关分析,以直观反映各省及其邻域范围内鸟类多样性的集聚或异常状态。我国鸟类多样性分布格局共包含高-高集聚(广西)、低-高集聚(贵州、湖南、重庆)、低-低集聚(辽宁)3 种集聚类型(图 7):

(1)低-高集聚区:该类型省区的鸟类多样性水平较低,且被多样性水平较高的省份包围。重庆、贵州和湖南受所处的地理位置和气候条件影响,季节性和迁徙鸟类数量相对较少,鸟类多样性水平较低;而其相邻的西部省份云南和四川则是中国鸟类多样性最为丰富的地区;其东部毗邻的沿海地区位于亚洲和太平洋地区的交界处,气候温和湿润,是许多候鸟和季节性鸟类迁徙的必经之路,且自然保护区建设和管理水平较高,为鸟类的多样性保护提供了有力保障。

(2)低-低集聚区:该类型省区及其周边省区的鸟类多样性水平都较低,典型区域为辽宁。辽宁及其南北相邻省份位于中国东北部,气候寒冷,是季风气候区的边缘地带,季节性和迁徙性鸟类数量相对较少;西部紧邻的内蒙古地处中国的北部边境地带,气候干燥,荒漠化程度较高,导致该地区的生态环境相对单一,缺少适宜鸟类栖息的多样化生态环境,限制了鸟类多样性发展。

(3)高-高集聚区:该类型省区及其周边省区的鸟类多样性指数较高,空间差异程度较小,存在较强的空间正相关。如广西壮族自治区位于云南省和广东省之间,拥有丰富的自然资源和多样化的生态系统,共同构成了中国南部生态环境的重要组成部分,相互关联并相互影响,呈现出较为显著的高-高集聚特征。

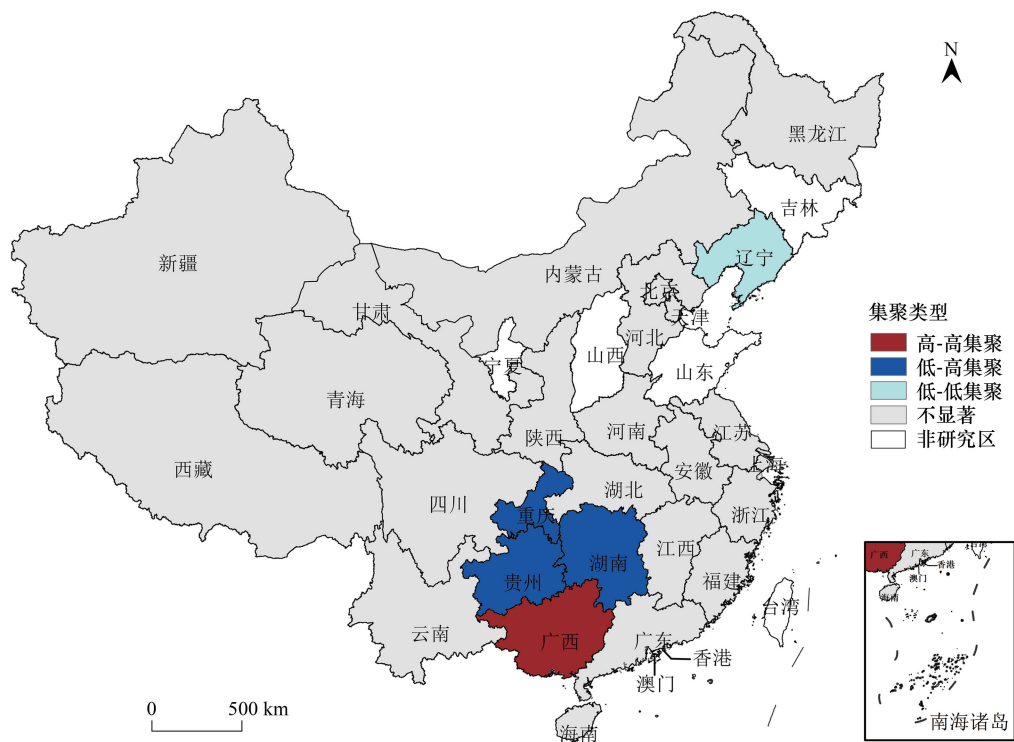


图7 G-F 指数局部空间自相关聚类图(2019 年)
Fig.7 Cluster map of local spatial autocorrelation for G-F index (2019)

2.4.2 基于地理加权回归的时空特征量化

基于 GWR 模型实现中国大陆鸟类多样性和气温、雪被、水文、植被及人类活动等驱动因素的量化空间分析。同时,对 GWR 标准化残差(Residual Squares)进行空间自相关分析,若得到的 P 值均大于 0.1,表明标准化残差处于随机分布,模型结果可靠,能够应用于综合评估分析。由表 4 可知,2018 年的 GWR 模型 R^2 为 0.76,拟合效果最佳。因此,后续研究将基于 2018 年的模型结果,深入探讨解释变量与鸟类多样性之间的内在联系。

表 4 GWR 模型结果(2015—2019 年)
Table 4 Results of GWR model (2015—2019)

年份 Year	标准化残差 Residual squares	R^2	赤池信息量准则 Akaike information criterion	P
2015	0.014335	0.517844	-92.436676	0.227600
2016	0.019715	0.499485	-83.398425	0.146585
2017	0.015049	0.683729	-91.705576	0.361218
2018	0.009279	0.764187	-104.909494	0.945764
2019	0.005786	0.514079	-117.424358	0.673064

GWR: 地理加权回归 Geographically weighted regression

GWR 模型回归系数的累计之和能够表征不同省份的鸟类多样性对解释变量的综合响应程度(图 8),整体响应格局呈现出北部及东西两侧地区高于中部的特点,其中内蒙古、黑龙江明显优于其他省份,表明气温、雪被、水文、植被及人类活动等影响因素能够较好解释该地区鸟类多样性状况,而中部地区省份如河南、湖北、江西、福建等地则受以上因素影响程度较小。统计气温、雪被、水文、植被及人类活动对鸟类多样性的影响程度,如图 8 中柱状图所示,不同类型的变量对鸟类多样性的影响程度存在差异,且同一类型变量对不同省份的

鸟类多样性影响呈现一定规律的空间特征。

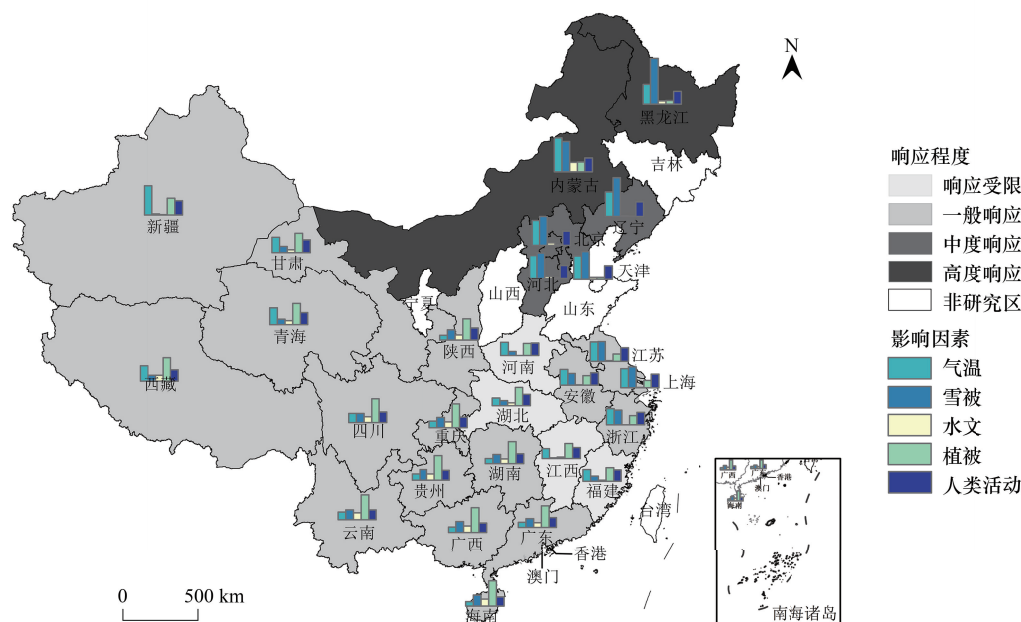


图 8 鸟类多样性对解释变量的响应程度分级

Fig.8 Classification of the response of bird diversity to explanatory variables

按照解释变量的 GWR 模型回归系数大小,将其对鸟类多样性的影响程度分级(图 9):

(1) 气温驱动程度呈现出明显的“北高南低”的空间分布特征,其中,我国西北部的内蒙古、新疆受气温影响最为显著。这些地区位于我国地形的第一阶梯,具有海拔高、日照时间长、温差大的气候特征。例如,内蒙古锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗和新疆吐鲁番地区的平均日照时数在 2800 小时以上,夏季温差为 15 °C 左右,季温差则达到 30 °C 左右^[38]。这种大幅度的气温波动对鸟类的生存和繁殖构成了挑战。昆虫是许多鸟类的主要食物来源,然而昆虫的活动受气温的影响较大。在低温状况下,昆虫活动减弱进而降低了鸟类的食物获得性^[39];另一方面,温度过高会对成年鸟类产生负面影响,为了保障个体的生存,繁殖双亲会采取负荷减轻行为,这将降低幼鸟的成活率^[40];由于当前全球气候变暖,部分鸟类越冬地产生北移趋势,鸟类的迁徙模式受到了影响^[41]。例如近年来,华北地区陆续观察到东方白鹳(*Ciconia boyciana*)等大型水鸟越冬,但其传统越冬地一般在长江中下游。这为理解和应对全球气候变化带来的挑战提供了关键的视角,即在气温极端波动时,提供人工巢穴、额外的食物和水源,将有助于鸟类寻找相对稳定的栖息点,从而增强其生存和繁衍的能力。

(2) 雪被对鸟类多样性的限制主要集中于东北部地区,如黑龙江、辽宁等,这些地区雪季更长且降雪量大。在雪季,由于植被难以生长,食物供应不稳定,且大雪覆盖树木、灌木等会使鸟类栖息地遭到破坏^[42-43]。此外,迁徙是鸟类生命周期中的重要阶段,雪季过长或降雪量过大会影响候鸟迁徙时间和路线,这也会影响鸟类的分布与种群结构,从而导致鸟类多样性的变化^[44]。

(3) 水文因子对鸟类的驱动作用呈现出从南北两侧向中部省份逐级递减的横向排列特点,降水和径流量等水文因子对北部和南部地区鸟类多样性的影响作用明显高于中部地区。水文特征包含了水深、水量及流速等多种属性,其中水量和水深直接影响着湿地生态系统的形成和演变,从而对不同生态类群的鸟在栖息地选择、觅食条件及繁殖成功率方面有着显著的影响^[45-47]。例如,潜鸟多栖息在沿海、湖泊、江河等开阔水域,以水生生物为食。水深的增加使潜鸟具有更多诸如鱼类、甲壳类及水生昆虫等捕食目标,从而增加了他们的觅食成功率^[48];而滨鸟对不同栖息地和食物来源具有更强适应性,可以同时在水域和陆地觅食,其在水深较浅的滩涂、河岸及湖滩筑巢可以增加繁殖成功率,因此浅水区域是滨鸟的生境适宜区^[49-50]。为了减轻水文因素

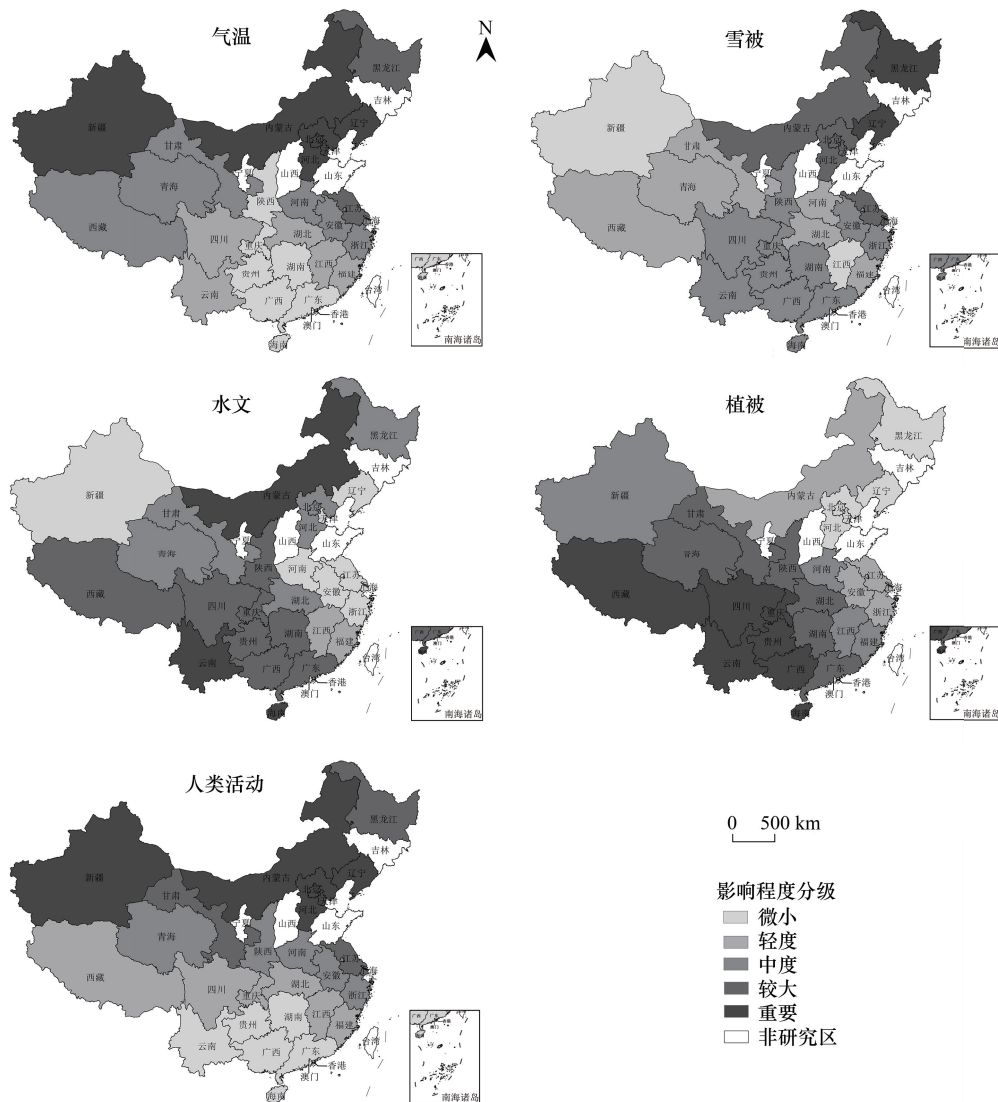


图9 解释变量对鸟类多样性的影响程度分级

Fig.9 Classification of the impact of explanatory variables on bird diversity

对鸟类分布影响,我国北方地区可以对湿地采取水位管理、创建半水域栖息地及加强监测和管理水量变化的措施,从而改善鸟类物种的栖息地生境质量^[51]。

(4) 植被因素对鸟类多样性的驱动布局表现出由西南地区向东北方倾斜减弱的趋势。有研究表明,植被因素如增强植被指数(EVI)与森林覆盖高度(FCH)对鸟类多样性影响的合计贡献率高达34%左右,植被种类和结构复杂多样将为鸟类提供多样化的栖息地和食物资源^[52]。西南地区如云南、贵州、四川一带,具有亚热带和热带雨林、针叶林、草原和河流湖泊等多种生境^[53],而我国东北部地区如黑龙江、辽宁等地形相对平坦,气候寒冷干燥,植被类型相对单一,主要分布为落叶林和针叶林,为鸟类提供的栖息地和食物资源相对较少,因此植被对鸟类多样性的影响较小。

(5) 人类活动因子对鸟类多样性影响显示出纬度方向集聚相连的横向分布特点,如新疆、内蒙古、辽宁、北京、天津、河北等地相连接,且人口驱动作用明显高于其他地区。这些地区是我国重要的工业基地和农业产区,人口密度较大,伴随着基础设施建设、开垦等人类活动^[54],人口对自然环境的压力也随之增加,因此对鸟类多样性影响较大。人为干扰已成为全球受胁鸟类面临的主要威胁之一,人类活动已经导致鸟类出现生物同

质化现象^[55],即不同群落和物种的鸟类在体型和饮食等方面变得越来越相似。因此,加强区域生态规划和修复,是保障生态环境和鸟类生存空间的关键。

3 讨论

3.1 生态变化对 G-F 指数波动的响应

从 G-F 指数的年际变化来看,其仅在 2015—2016 年间总体表现为负增长,2017—2019 年各省 G-F 指数呈明显的增长趋势。有研究表明气候异常可能是鸟类多样性较低的主要驱动因素^[56]。受超强厄尔尼诺影响,2016 年我国降水量达历史最多,极端天气事件频发,暴雨洪涝、台风、强对流等气象灾害屡见不鲜^[57],动植物群落遭受连锁效应,从而导致该年鸟类多样性大幅降低。

2015—2019 年的 G-F 指数变化曲线波动较为频繁,并在此时间序列内出现多个变化峰谷值,其中 5 年内变化最剧烈的省份为黑龙江。2015—2017 年黑龙江 G-F 指数连续呈下降态势,且 2017 年降幅达到 11.9%,农业开垦和水利工程等人类活动是森林、湿地等鸟类栖息空间被压缩的主要威胁^[23, 58–59]。此后,黑龙江省加大生态保护修复力度,启动了一系列湿地保护与恢复项目,2019 年全省完成“退耕还湿”约 4600 hm²^[23],湿地生态状况得到持续改善,为鸟类提供了良好的繁殖栖息场所,G-F 指数出现 18.9% 的大幅上升。

3.2 地理因素对鸟类多样性的制约作用

郑光美^[5]将中国鸟类地理区划分为东北区、华北区、蒙新区、青藏区、西南区、华中区及华南区七个区域。结合不同区域间存在的地理差异,我们可以对鸟类物种丰富度格局所形成的复杂模式进行更深一步的了解:

(1) 西南区主要涵盖了云南与四川两省,2019 年两省分别记录了 714、523 种鸟类(附表 1),占中国已记录鸟种的 47.4%、34.8%,G-F 指数均位于中国大陆最高水平。从地理位置来看,云南省跨越了西南区及华南区,其海拔最高点位于西南区内的梅里雪山,高度为 6740m,海拔最低点位于华南地区内红河与南溪河的交界处,高度仅为 76.4m。该省仅横跨 8° 纬度,拥有从中国最南部的海南岛三亚至中国最北方黑龙江漠河的 35° 纬度范围内的所有气候带和陆地生态系统类型,形成了热带雨林、亚高山地区、高原草甸等广泛的生境类型^[60]。云南栖息地生境类型的多样化使鸟类从耐寒物种到热带物种均有分布^[61]。例如,横断山脉内的香格里拉地形崎岖,山脉高耸,气候相对寒冷,但独特的生态系统是适应高海拔环境的鸟类物种栖息地,包括黑颈鹤(*Grus nigricollis*)和中华白眉朱雀(*Carpodacus dubius*)等物种^[62]。低海拔地区主要以热带雨林为主,汇集了来自东亚、东南亚和东喜马拉雅山脉的各种植物,分布了犀鸟(*Antracoceros albirostris*)这一热带雨林的标志性物种^[63]。四川省与云南省相似,其跨越了多个鸟类地理区划,气候类型多样且垂直气候分异显著,为鸟类提供了丰富的生态位,从而促进了鸟类多样性的形成^[64]。此外,四川省在混农林地改造后,生境由单一的荒地变为多种小生境复合的环境。空间异质性增加,为鸟类的栖息、繁衍、觅食创造了更多的条件^[65]。

(2) 华北区、华中区、华南区涵盖了中国东部沿海地区。此范围内,安徽及重庆是内陆省份鸟类物种多样性的低值地区,而北京、河北及沿海省份的鸟类物种丰富度明显高于其他省份。这一范围的多样性高值是由于东亚-澳大利亚迁徙路线途径于此,这条线路上包含了俄罗斯、日本、朝鲜半岛以及我国东北与华北东部(如北京、天津、河北)繁殖的湿地水鸟,春、秋季节会通过我国东部沿海地区(如浙江、福建、广东、广西)进行南北方向的迁徙,这突出了我国中部和南部地区在鸟类迁徙中所发挥着关键的作用。例如,我国华中地区整体地势较为平坦,位于长江中下游,洞庭湖、鄱阳湖等淡水湖是水鸟的生境适宜区,对东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、勺嘴鹬(*Eurynorhynchus pygmeus*)、黑脸琵鹭(*Platalea minor*)等珍稀鸟类的越冬具有特殊意义^[66]。华南区属于亚热带气候类型,此区域内四季温度均匀,日照充足,气候相对稳定,使鸟类避免了因季节性变化而产生的强烈影响^[67]。而重庆由于山地众多,鸟类以适应山地森林等生境的广域种分布居多,且重庆境内河流多为上游河段,河道狭窄,水流湍急,水鸟分布较少^[68],因此该省的鸟类物种丰富较低。

(3) 东北区和青藏区鸟类多样性水平较低,可能与高海拔地形导致的地理屏障有关;例如,东北区地处为我国大陆最北端,囊括大、小兴安岭和长白山地带,受气候的抑制作用较明显,冬季气候寒冷,最低气温可达

-36℃左右^[69],严寒的气候条件对不能适应寒冷环境的鸟类生存造成困扰。此外,山地地形为鸟类建立了地理隔离,自然屏障阻止了某些鸟种的迁徙和分布,从而影响了基因的流动^[70]。最后,东北区森林类型以寒温带针叶林为主,这种生境一致性使许多鸟类面临挑战^[71-72]。而青藏区东起横断山北端,南抵喜马拉雅山,北由昆仑山、阿尔金山、祁连山围绕,平均海拔约 4500m,植被以高山草原和高寒荒漠为主^[5],高海拔地形所导致的严酷气候限制了鸟类的栖息地和食物来源,从而影响鸟类多样性的发展^[73]。

(4) 蒙新区主要包括了新疆、甘肃、西藏的大部分范围,鸟类多样性较为丰富。新疆地处鸟类繁殖地西伯利亚和鸟类越冬地南亚印度次大陆之间,是候鸟迁徙的重要通道。新疆幅员辽阔,拥有“三山夹两盆”的独特地形地貌,为生物提供了丰富的生存空间^[74]。其中盆地地区气候干燥,分布有云雀(*Alauda arvensis*)、黄胸鹀(*Emberiza aureola*)等适应干旱环境的鸟类,山区气候相对湿润,分布有高山兀鹫(*Gyps himalayensis*)、藏雀(*Carpodacus roborowskii*)等对海拔高度具有特定适宜性的物种^[75]。西藏由于受到喜马拉雅山脉的阻隔,鸟类分布形成了两个明显不同的区域^[76],高原北部区域辽阔,分布有黑颈鹤(*Grus nigricollis*)等喜爱在开阔环境生存的鸟类^[77],而高原的南部和东南部边缘多为生活在森林中的啄木鸟属鸟种^[78]。甘肃省具有陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地、北山山地六大特色地形^[79],是西部迁徙路线上鸟类的重要的停歇点。这些独特的地貌类型为各种鸟类提供了丰富的生存环境,分布有黑鹳(*Ciconia nigra*)、彩鹳(*Plegadis falcinellus*)、遗鸥(*Larus relictus*)等国家重点保护鸟类^[80-81]。

总体来讲,中国大陆鸟类多样性的分布格局由复杂的地理环境、气候条件和生态特征共同塑造。在这些因素的综合作用下,使鸟类多样性分布格局呈现出纬度梯度特征的同时,也存在着逆纬度梯度特征。因此,我们还应该使用更全面的数据,进行更深入的研究分析来更好的理解和保护鸟类这一珍贵的生命资源。

4 结论

(1) 鸟类多样性空间分布特征方面:中国鸟类多样性空间格局总体呈现出从东南沿海向内陆逐渐减少的空间分布趋势。云南、四川、甘肃是内陆鸟类物种多样性的热点区域,且云南为中国大陆鸟类物种多样性最高值;鸟类多样性分布平行于东部和中部候鸟迁徙路线,呈现出经度条带分异规律。

(2) 鸟类多样性时空特征变化方面:受超强厄尔尼诺影响,2016 年我国气候年景差,该年鸟类多样性整体状况异常且处于低谷,因此 2015—2017 年鸟类多样性变化曲线波动频繁且具有多个起伏峰谷;此后,2017—2019 年鸟类多样性整体表现稳定,空间集聚趋势逐年增强,其中黑龙江省得益于生态保护力度的加强,鸟类多样性于 2019 年大幅上升。

(3) 影响因子的空间异质性方面:气温、雪被、水文、植被及人类活动对鸟类多样性的驱动作用具有明显的空间异质性,整体上呈现出北部及东西两侧地区高于中部的分布态势,其中内蒙古、黑龙江的驱动效应显著,表明以上影响因素能够较好解释该地区鸟类多样性状况,而中部地区省份如河南、湖北、江西、福建等地则受以上因素影响程度较小。

由于数据的局限性,研究仅能反映相对宏观的鸟类多样性,未来可加强数据收集与处理方法,更详实地探究物种密度等信息,以便更准确、客观地揭示出环境与鸟类之间的交互机理,为各区域制定不同的鸟类保护政策提供依据。

参考文献(References):

- [1] 王耕,关晓曦,孙康,王小平.老铁山自然保护区鸟类多样性调查和特征研究.绿色科技,2019(8):7-12.
- [2] 孙争争,熊晴帆,杨光大.淇澳岛鸟类多样性的季节变化.热带林业,2023,51(3):55-60.
- [3] 张海波,孙喜娇,李光容,吴忠荣,匡中帆,粟海军,夏奉梅,谈洪英.贵阳阿哈湖国家湿地公园鸟类群落多样性分析.野生动物学报,2020,41(3):626-640.
- [4] 郑光美.鸟类学(第2版).北京:北京师范大学出版社,2012.
- [5] 郑光美.中国鸟类分类与分布名录(第四版).北京:科学出版社,2023.

- [6] 曾欣怡, 宋钰红. 基于关键物种与生境质量评估的昆明市中心城区绿色空间生物多样性分布格局研究. 中国园林, 2023, 39(9): 126-132.
- [7] 徐雨, 张凯, 窦亮, 杨楠, 王彬, 冉江洪. 繁殖期黄喉雉鹑在景观尺度上的生境选择. 生态学报, 2021, 41(8): 3248-3254.
- [8] 赵雪琴, 吴岚, 王玉玉, 曹静瑄, 杨丽娟, 刘咏华, 张雨婷. 北京温榆河公园不同建成时间城市绿地鸟类群落组成的空间变化与栖息地质量评价. 生态学杂志, 2023, 42(12): 3008-3018.
- [9] 颜尉珂, 雷宇, 王磊, 张新宇, 刘强. 人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响. 生态学报, 2023, 43(24): 10387-10398.
- [10] Leal Filho W, Matandirotya N R, Mahendiran M. The influence of climate factors in the distribution of birds. Climate Change Management. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 151-164.
- [11] Lemoine N, Schaefer H C, Böhning-Gaese K. Species richness of migratory birds is influenced by global climate change. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(1): 55-64.
- [12] 刘正惟, 何兴成, 冯凯泽, 成宇文, 王浩森, 王宇, 吴永杰. 贡嘎山东坡繁殖季与非繁殖季鸟类多样性变化. 动物学杂志, 2022, 57(6): 810-820.
- [13] 王凯旋. 沉湖湿地自然保护区 6 种典型水鸟种群动态及其关键生境驱动因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [14] 李家兴, Christos Mammides, 周丽萍, 孙家杰, 谭筱彩, 蒋爱伍. 广西山地农业化背景下鸟类多样性比较. 生物多样性, 2022, 30(5): 45-54.
- [15] Deomurari A, Sharma A, Ghose D, Singh R. Potential range map dataset of Indian birds. Data, 2023, 8(9): 144.
- [16] 王春晓, 何建华, 刘殿锋, 于秀波, 石青青. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例. 生态学报, 2022, 42(10): 4197-4208.
- [17] 游巍斌, 蔡新瑜, 王英姿, 王瑞, 张锦琳, 陈莹, 邱晓月, 方冰, 汤绍圣, 坚文倩. 基于不同网格尺度福州主城区鸟类多样性与景观特征的关系研究. 生态学报, 2023, 43(18): 7670-7681.
- [18] 阳文锐, 李婧, 闻丞, 黄越, 顾臻芸, 朱洁, 唐燕. 基于物种分布的北京平原生态网络构建. 生态学报, 2022, 42(20): 8213-8222.
- [19] Aguilar S, Mugica L, Aguilar K, Acosta M, Manica L T. Potential effects of climate change on the distribution of American flamingo (*Phoenicopterus ruber*) in Cuba. Waterbirds, 2023, 45(3): 287-299.
- [20] Huang Q Y, Bateman B L, Michel N L, Pidgeon A M, Radeloff V C, Heglund P, Allstadt A J, Nowakowski A J, Wong J, Sauer J R. Modeled distribution shifts of North American birds over four decades based on suitable climate alone do not predict observed shifts. The Science of the Total Environment, 2023, 857(Pt 3): 159603.
- [21] 韦雪蕾, 张国钢, 贾茹, 姬云瑞, 徐红英, 杨泽玉, 刘化金, 刘宇霖, 杨培宇. 黑龙江兴凯湖水鸟多样性变化及其影响因素. 林业科学, 2023, 59(6): 118-129.
- [22] Allcock J A, Bonebrake T C, Sung Y H, Dingle C. Shifts in phenology of autumn migration and wing length among reedbed passerines along the East Asian-Australasian Flyway. Avian Research, 2022, 13: 100052.
- [23] Liang W E, Lei J L, Ren B S, Cao R X, Yang Z X, Wu N R, Jia Y F. The impacts of a large water transfer project on a waterbird community in the receiving dam; a case study of Miyun Reservoir, China. Remote Sensing, 2022, 14(2): 417.
- [24] 马铭赛, 李静, 杨行, 阿依帕夏·热合曼, 王玉涛. 濒危物种雪鸡(*Tetraogallus*)保护生物学研究综述. 中国农学通报, 2019, 35(8): 23-28.
- [25] Fu A H, Gao E H, Tang X P, Liu Z L, Hu F X, Zhan Z J, Wang J D, Luan X F. MaxEnt modeling for predicting the potential wintering distribution of Eurasian spoonbill (*Platalea leucorodia leucorodia*) under climate change in China. Animals: an Open Access Journal from MDPI, 2023, 13(5): 856.
- [26] Azizoglu E, Kara R, Celik E. A statistical approach on distribution and seasonal habitat use of waterfowl and shorebirds in Çıldır Lake (Ardahan, Türkiye). Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(31): 77371-77384.
- [27] van der Schriek T, Giannakopoulos C, Koutseri I, Malakou, M. Climate change resilient lake-wetland management: lessons from the Prespa Waterbirds project. EGU General Assembly Conference Abstracts. 2022: EGU22-7322.
- [28] 陈梦缘, 汪生财, 路琦, 刘昌, 袁秀, 邢韶华. 环渤海海岸带水鸟栖息地适宜性评价及影响因素. 生态学杂志, 2024, 43(4): 1152-1160.
- [29] 赵伊琳, 白梓彤, 王成, 殷鲁秦, 孙振凯, 张昶, 孙睿霖, 徐诗, 边琦, 孙宝强. 城市公园春季声景观与植被结构的关系. 生态学报, 2021, 41(20): 8040-8051.
- [30] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 人类活动效应对物种多样性影响的动力模拟——以洪湖湿地生境破坏对水鸟物种多样性的影响为例. 生态学报, 2006, 26(2): 432-438.
- [31] Lees A C, Haskell L, Allinson T, Bezeng S B, Burfield I J, Renjifo L M, Rosenberg K V, Viswanathan A, Butchart S H M. State of the world's birds. Annual Review of Environment and Resources, 2022, 47: 231-260.
- [32] Zwarts L, Bijlsma R G, van der Kamp J, Sikkema M. Distribution and numbers of ground-foraging birds between the hyper-arid Sahara and the

- hyper-humid Guinea forests. *Ardea*, 2023, 111(1): 57-66.
- [33] 蒋志刚, 纪力强. 鸟兽物种多样性测度的 G-F 指数方法. *生物多样性*, 1999, 7(3): 220-225.
- [34] 朱磊, 李燕楠, 陶云. 中国省域森林公园旅游效率时空格局演化及影响因素研究. *吉林师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 41(4): 124-131.
- [35] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 郑江华. 地理加权回归分析技术综述. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2020, 45(9): 1356-1366.
- [36] 李婵. 云南哀牢山夜间迁徙鸟类的汞暴露风险及迁徙来源研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [37] 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 李弘毅, 黄晓东, 肖林. 青藏高原积雪变化及其影响. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1247-1253.
- [38] Hu, Li. Meteorological risk assessment of rooftop solar resource development in inner Mongolia. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2020, 9(4): 177.
- [39] Yu Y L, Zhang C, Xu X. Deep time diversity and the early radiations of birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(10): e2019865118.
- [40] Wiley E M, Ridley A R. The effects of temperature on offspring provisioning in a cooperative breeder. *Animal Behaviour*, 2016, 117: 187-195.
- [41] 伍一宁, 钟海秀, 王继丰, 朱宝光, 李冰, 倪红伟. 气候变化对野生鸟类的影响研究进展. *安徽农业科学*, 2014, 42(35): 12549-12551.
- [42] 王晨, 阙佳良, 张宗军, 霍达, 侯建华. 白洋淀冬季鸟类物种多样性. *河北大学学报: 自然科学版*, 2023, 43(3): 298-302.
- [43] Tilghman N G. Characteristics of urban woodlands affecting winter bird diversity and abundance. *Forest Ecology and Management*, 1987, 21(3/4): 163-175.
- [44] Toussaint A, Pärtel M, Carmona C P. Contrasting impacts of non-native and threatened species on morphological, life history, and phylogenetic diversity in bird assemblages. *Ecology Letters*, 2024, 27(2): e14373.
- [45] Bartholomew G A, Cade T J. The water economy of land birds. *The Auk*, 1963, 80(4): 504-539.
- [46] Green A J, Elmberg J. Ecosystem services provided by waterbirds. *Biological Reviews*, 2014, 89(1): 105-122.
- [47] Kaminski M R, Baldassarre G A, Pearse A T. Waterbird responses to hydrological management of wetlands reserve program habitats in New York. *Wildlife Society Bulletin*, 2006, 34(4): 921-926.
- [48] 郑作新. 中国鸟类区系纲要. 北京: 科学出版社, 1987.
- [49] Schmidt S M, Fournier A M V, Osborn J M, Benson T J. Water depth influences survival and predator-specific patterns of nest loss in three secretive marsh bird species. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(12): e10823.
- [50] Hoover J P. Water depth influences nest predation for a wetland-dependent bird in fragmented bottomland forests. *Biological Conservation*, 2006, 127(1): 37-45.
- [51] 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.
- [52] 赵伊琳, 王成, 白梓彤, 郝泽周. 城市化鸟类群落变化及其与城市植被的关系. *生态学报*, 2021, 41(2): 479-489.
- [53] 陈文华, 徐娟. 中国西南鸟类物种丰富度及其维持因素研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2023, 59(4): 629-638.
- [54] Hedh L, Hedenström A. Consequences of migratory distance, habitat distribution and season on the migratory process in a short distance migratory shorebird population. *Movement Ecology*, 2023, 11(1): 40.
- [55] Pagani-Núñez E, Xu Y, Yan M X, He J K, Jiang Z F, Jiang H S. Trade-offs between economic development and biodiversity conservation on a tropical island. *Conservation Biology*, 2022, 36(5): e139121.
- [56] Wang N, Mao L F, Yang X T, Si X F, Wang Y P, Eiserhardt W L, Feng G. High plant species richness and stable climate lead to richer but phylogenetically and functionally clustered avifaunas. *Journal of Biogeography*, 2020, 47(9): 1945-1954.
- [57] Lee Y C, Wenig M O, Chan K L. Oceanic and atmospheric anomalies associated with extreme precipitation events in China 1983—2020. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2023, 16(5): 881-895.
- [58] Maleki S, Rahdari V, Baghdadi N. Humans in the upstream can exacerbate climate change impacts on water birds' habitat in the downstream. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20203.
- [59] Patil S, Choudaj K. The importance of artificial wetlands in the conservation of wetland birds and the impact of land use attributes around the wetlands: a study from the ajara conservation reserve, western ghats, India. *zooiversity*, 2023, 57(1): 41-50.
- [60] Yang Y M, Tian K, Hao J M, Pei S J, Yang Y X. Biodiversity and biodiversity conservation in Yunnan, China. *Biodiversity & Conservation*, 2004, 13(4): 813-826.
- [61] Alsoufi M, Ge C R. Genetic diversity and evolution of Yunnan chicken breeds of China. *Population Genetics*. IntechOpen, 2022
- [62] Wang F, Yang Y B, Song G, Shi X J, Pu B, Yang L. Mangcuo lake in Hengduan Mountains: an important alpine breeding and stopover site along central Asian flyway. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2023, 13(7): 1139.
- [63] Supriya K, Price T D, Moreau C S. Competition with insectivorous ants as a contributor to low songbird diversity at low elevations in the eastern Himalaya. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(10): 4280-4290.

- [64] Su J Y. Research on Sichuan Tourism Economic Development based on Geographic Information Big Data. *Highlights in Business, Economics and Management*, 2023, 3: 288-293.
- [65] 温平, 岳春红, 徐万苏, 张文, 青菁, 戴强. 混农林业对鸟类多样性的影响——以四川理县甘家堡为例. *四川林业科技*, 2017, 38(5): 136-140.
- [66] Liu X Y, Zhang Z X, Zhang J M, Zhu B, Tian J X. Projection of the potential distribution of suitable habitats for Siberian crane (*Grus leucogeranus*) in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1193677.
- [67] Li Y N, Deng Y, Cheung H N, Zhou W, Yang S, Zhang H N. Amplifying subtropical hydrological transition over China in early summer tied to weakened mid-latitude synoptic disturbances. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2022, 5: 40.
- [68] Li L Y, Qi Z X, Xian S, Yao D. Agricultural land use change in Chongqing and the policy rationale behind it: a multiscale perspective. *Land*, 2021, 10(3): 275.
- [69] Gao Q J, Wang L, Li Y, Wang Y F. Intra-seasonal features of winter extreme cold events in northeast-north China and synergistic effects of circulation systems in mid-high latitude. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1425.
- [70] Wang P C, Liu S M, Hu J H, Zhang J, Wang Z, Xu J L, Yao H Y, Wang B, Chen D, Zhang Z W, Liu Y. Disentangling the relative roles of geographical and ecological factors in driving genomic variations of a widely distributed bird across a longitudinal gradient. *Journal of Avian Biology*, 2022, 2022(7): e02979.
- [71] 高玮, 相桂权. 大兴安岭北部夏季森林鸟类群落结构的研究. *野生动物学报*, 1988, 9(6): 16-19.
- [72] 冷文芳, 贺红士, 布仁仓, 胡远满. 气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布. *生态学报*, 2006, 26(12): 4257-4266.
- [73] de Gabriel Hernando M, Roa I, Fernández-Gil J, Juan J, Fuertes B, Reguera B, Revilla E. Trends in weather conditions favor generalist over specialist species in rear-edge alpine bird communities. *Ecosphere*, 2022, 13(4): e3953.
- [74] Zhou G X, Chen Y N, Yao J Q. Variations in precipitation and temperature in Xinjiang (Northwest China) and their connection to atmospheric circulation. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1082713.
- [75] 宋伯航. 寻踪觅境世界自然遗产——新疆天山. *新疆林业*, 2019(2): 31-36.
- [76] White A E. Geographical barriers and dispersal propensity interact to limit range expansions of Himalayan birds. *The American Naturalist*, 2016, 188(1): 99-112.
- [77] Gou X, Zhu Y, Sun X J, Hu C S, Zhang M M, Khattak R H, Su H J. Roosting-site selection by overwintering black-necked cranes in the Caohai wetland, Guizhou Province, China: implications for conservation management. *Zoological Studies*, 2022, 61: e36.
- [78] Jia J, Fang Y, Li X H, Song K, Xie W D, Bu C L, Sun Y H. Temporal activity patterns of sympatric species in the temperate coniferous forests of the eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2023, 13(7): 1129.
- [79] 张彦林, 朱彦虎. 甘肃省地貌分区研究. *甘肃地质*, 2020, 29(Z1): 7-11.
- [80] Li D Y, Liu H, Ma R. Evaluation on ecological sustainability in Gansu Province based on a three-dimensional ecological footprint model. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press, 2022
- [81] 张汉军, 张立勋, 李玉英. 彩鹇在甘肃省的新分布记录. *四川动物*, 2022, 41(2): 153.

附表 1 2015—2019 年中国大陆各省鸟类目、科、属、种数量

Appendix 1 Number of orders, families, genera and species of birds in Chinese mainland (2015—2019)

	年份 Year	北京	天津	河北	福建	辽宁	黑龙江	上海	江苏	浙江
目 Order	2015	22	17	19	19	19	17	18	18	20
	2016	20	17	20	19	18	19	18	19	20
	2017	21	18	20	18	21	14	19	20	21
	2018	21	20	21	19	18	16	18	17	21
	2019	21	21	21	21	20	18	19	20	21
科 Family	2015	67	39	59	63	60	47	51	53	65
	2016	64	45	57	65	53	44	55	58	66
	2017	66	45	61	69	61	36	56	57	70
	2018	66	47	65	70	54	34	53	56	73
	2019	71	57	66	73	57	52	57	64	75
属 Genus	2015	177	84	159	168	148	99	126	130	179
	2016	173	101	161	179	133	89	141	152	184
	2017	186	100	177	189	148	61	139	162	186
	2018	190	106	184	206	137	61	128	148	214
	2019	197	130	188	207	132	114	153	179	214
种 Species	2015	313	130	290	257	271	146	223	202	293
	2016	313	175	316	289	231	123	260	261	301
	2017	348	169	346	318	244	80	265	274	320
	2018	362	175	365	349	233	82	217	238	362
	2019	378	228	371	347	215	171	281	314	387
	年份 Year	内蒙古	江西	河南	湖北	湖南	广东	广西	海南	重庆
目 Order	2015	20	20	17	18	16	20	18	17	14
	2016	20	18	18	15	14	19	19	18	16
	2017	19	19	17	17	16	19	20	17	15
	2018	21	19	20	18	18	21	18	18	18
	2019	20	19	18	18	17	19	18	18	18
科 Family	2015	53	66	51	44	59	65	59	59	45
	2016	49	67	52	50	50	66	63	57	41
	2017	50	68	52	60	50	66	68	56	49
	2018	54	66	56	60	53	72	64	62	55
	2019	53	62	55	63	55	71	68	62	50
属 Genus	2015	149	176	109	86	162	184	170	122	89
	2016	125	169	130	105	107	186	158	124	84
	2017	140	181	125	152	108	194	175	135	116
	2018	151	174	154	160	121	197	181	145	125
	2019	164	169	153	171	123	205	202	156	129
种 Species	2015	255	281	168	116	243	296	281	169	115
	2016	198	273	189	158	155	323	247	173	112
	2017	244	311	191	266	147	331	267	189	188
	2018	276	280	257	275	165	347	296	211	205
	2019	288	285	245	301	169	368	344	241	220

续表

	年份 Year	四川	广东	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	新疆	安徽
目 Order	2015	20	17	21	14	16	18	17	19	14
	2016	19	17	21	17	17	17	18	20	16
	2017	19	17	21	15	18	18	20	21	16
	2018	20	18	21	17	18	17	19	21	18
	2019	20	18	21	16	18	18	19	21	18
科 Family	2015	65	52	81	38	50	53	49	52	46
	2016	67	54	86	40	49	54	51	53	39
	2017	69	48	86	40	58	57	56	57	47
	2018	74	57	93	58	58	59	56	62	54
	2019	71	63	91	50	64	65	58	63	58
属 Genus	2015	217	132	282	91	108	132	135	128	93
	2016	229	131	293	80	90	143	136	138	75
	2017	230	115	302	91	132	157	156	146	96
	2018	248	148	318	158	151	159	156	168	125
	2019	256	171	321	125	160	192	162	176	145
种 Species	2015	440	206	574	147	151	236	233	192	131
	2016	472	202	630	122	131	257	246	227	102
	2017	469	174	667	164	216	270	288	255	135
	2018	512	233	707	291	245	297	300	307	188
	2019	523	292	714	212	266	367	313	320	221