

DOI: 10.20103/j.stxb.202211163316

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.

Yan W K, Lei Y, Wang L, Zhang X Y, Liu Q. Effects of artificial introduction and climate change on the future distribution of *Cyanopica cyanus*. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10387-10398.

人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响

颜尉珂^{1,2}, 雷宇^{1,2}, 王磊^{1,2}, 张新宇^{1,2}, 刘强^{1,2,*}

1 西南林业大学云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 昆明 650224

2 西南林业大学国家高原湿地研究中心/湿地学院, 昆明 650224

摘要: 气候变化和人为引种正在改变世界物种的分布格局, 对生态系统中的关键物种构建分布模型, 有助于理解全球气候变化背景下物种的分布变化规律, 并预测其对生态系统的潜在影响。灰喜鹊 (*Cyanopica cyanus*) 是重要的食虫鸟类, 对控制虫害、维持森林生态系统的稳定性具有重要意义, 由于人为引种等原因, 目前灰喜鹊已在其自然分布地外建立了多处可自我维持的种群。基于气候生态位理论, 使用最大熵模型构建了自然分布地模型、引入地模型及综合分布模型等 3 种模型, 模拟灰喜鹊在当前时期、2050s 时期及 2070s 时期的潜在适生区, 并以此分析灰喜鹊的分布格局与变化趋势。结果表明: (1) 当前时期, 自然分布地种群的适生区主要分布于华北、华中和华东地区, 而引入地种群的适生区则主要分布于华南和西南地区; (2) 在未来气候变化的背景下, 各模型结果均表明灰喜鹊有显著的扩张趋势, 自然分布地种群主要表现为向高纬度、高海拔地区扩散, 截至 2070s 时期, 适生区的质心向北偏东 25° 方向移动了 229.16 km, 而引入地种群扩张趋势较缓, 截至 2070s 时期, 质心仅向北偏东 46° 方向移动了 67.69 km; (3) 从适宜值方面来看, 自然分布地模型中的高适生区在河北、山东、河南、安徽、江苏和湖北等地大面积增加, 表明自然分布地种群不仅在适生区的边界有明显扩张的现象, 由于适宜值的升高, 该种群的密度可能也会随之增加, 而引入地种群很可能在广西、广东、海南和台湾等沿海地区扩张和定殖; (4) 综合来看, 对灰喜鹊分布影响较大的环境变量为年均降雨量、最冷季度均温和温度季节性变化, 表明灰喜鹊更偏好暖湿的东部季风区。综上所述, 人为引入导致了灰喜鹊在华南和西南地区的定殖, 而气候的暖湿化趋势则将促进该物种进一步向高纬度和高海拔地区扩张。灰喜鹊种群的扩张对控制松毛虫 (*Dendrolimus*) 等森林害虫具有积极意义, 但其较强的适应力和竞争力也可能会对部分食虫鸟类造成影响。

关键词: 气候变化; *Cyanopica cyanus*; 引种; MaxEnt; 潜在适生区

Effects of artificial introduction and climate change on the future distribution of *Cyanopica cyanus*

YAN Weike^{1,2}, LEI Yu^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, ZHANG Xinyu^{1,2}, LIU Qiang^{1,2,*}

1 Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 National Plateau Wetlands Research Center, College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Climate change and artificial introduction are changing the distribution pattern of species in the world. Building a distribution model for key species in the ecosystem is helpful to understand the distribution and change rules of species in the context of global climate change and predict their potential impacts on the ecosystem. *Cyanopica cyanus* (Azure-winged Magpie) is an important insectivorous bird, which is of great significance in controlling insect pests and maintaining the stability of the forest ecosystem. Due to artificial introduction and other reasons, *Cyanopica cyanus* has established several self-sustaining populations outside its natural distribution. Based on the theory of climate niche, this study uses the maximum entropy model to build three models, including natural distribution model, introduction model, and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060120); 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室开放基金 (202105AG070002)

收稿日期: 2022-11-16; **网络出版日期:** 2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuq03@mail.kiz.ac.cn

comprehensive distribution model, to simulate the potential suitable areas of *Cyanopica cyanus* in the current period, 2050s and 2070s, and to analyze the distribution pattern and change trend of *Cyanopica cyanus*. The results showed that: (1) at present, the suitable areas of natural distribution population were mainly distributed in North China, Central China and East China, while the suitable areas of the introduced population were mainly distributed in South China and Southwest China. (2) Under the background of future climate change, the results of each model show that *Cyanopica cyanus* has a significant expansion trend. The natural distribution population mainly spreads to high latitude and high altitude areas. Up to 2070s, the centroid of suitable areas moves 229.16 km to 25° north by east, while the introduced population expands slowly. Up to 2070s, the centroid only moves 67.69 km to 46° north by east. (3) From the perspective of fitness value, the high fitness areas in the natural distribution model have increased largely in Hebei, Shandong, Henan, Anhui, Jiangsu, and Hubei, which indicates that the natural distribution population not only has obvious expansion at the boundary of the suitable areas, but also the population density may increase due to the increase of fitness value, while the introduced population is likely to expand and colonize in coastal areas such as Guangxi, Guangdong, Hainan, and Taiwan. (4) In a word, the environmental variables that have a greater impact on the distribution of *Cyanopica cyanus* are annual precipitation, mean temperature of the coldest quarter, and temperature seasonality, indicating that *Cyanopica cyanus* prefers warm and wet eastern monsoon region. To sum up, artificial introduction has led to the colonization of *Cyanopica cyanus* in South China and Southwest China, and the warming and humidifying trend of climate will promote the species to further expand to high latitude and high altitude areas. The expansion of *Cyanopica cyanus* population is of positive significance for controlling forest pests such as *Dendrolimus*, but its strong adaptability and competitiveness may also affect some insectivorous birds.

Key Words: climate change; *Cyanopica cyanus*; introduction; MaxEnt; potential suitable area

气候是影响物种分布的重要驱动因素^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,在当前的温室气体排放情景下,到2100年全球温升可达到2.2—3.5℃^[2]。由于全球气候变化的区域变异性以及物种本身的生态位特征,不同的物种会表现出不同的响应模式。目前,已有许多物种表现出向高纬度、高海拔地区扩散或转移的现象^[3—5]。但某些物种也会呈现出不同的变化趋势,如我国新疆地区的鸟类向东扩张^[6],以及部分物种的分布区萎缩^[5, 7—8]。此外,由于宠物贸易、园林建设等人为引入的原因,也导致了外来物种的定殖和扩张^[9—10]。

灰喜鹊(*Cyanopica cyanus*)隶属于雀形目(PASSERIFORMES)鸦科(Corvidae)灰喜鹊属,主要分布于东亚,其中我国北方是其主要分布区^[11]。主要以鳞翅目(LEPIDOPTERA)幼虫和直翅目(ORTHOPTERA)昆虫为食,是重要的食虫鸟类,在国内常被人为引种用以防治松毛虫(*Dendrolimus*)等森林害虫^[9, 12—14],对保持森林生态系统的稳定性具有重要作用。由于人为引种、笼养逃逸及放生等原因,已有一定数量的灰喜鹊在其自然分布地以外的地方建立种群。1975年,灰喜鹊作为逃逸物种在香港被记录^[15];广东广州、广西桂林和福建光泽分别在1985年、1986年和1992年引进灰喜鹊以防治森林虫害^[12—13, 16];1988年,昆明动物园从北京引进灰喜鹊以供游客观赏,后于1991年释放野外^[17];2011年,王龙舞等人在海南海口发现本地笼养逃逸的灰喜鹊种群^[15]。目前,灰喜鹊已在甘肃^[18]、云南^[17]、广西^[16]、广东^[13]、福建^[12]、海南^[15]、香港^[15]及台湾^[19]等省份定殖并呈现出扩散的趋势。

物种分布模型(Species Distribution Model, SDM)也常称为生态位模型(Ecological Niche Model, ENM),是一种结合了物种分布数据和相关环境变量数据的数学模型^[20—21],此类模型基于一定的算法,在给定的环境变量构成的生态空间内,根据分布数据及其所关联的环境变量参数来计算物种对生态位的需求,并将此结果投射到给定的时间和空间范围内,最后以概率的方式呈现物种对不同时空生境的喜好程度^[21—23]。近年来,物种分布模型被广泛地应用于保护生物学、入侵生物学及气候变化对物种分布影响的研究中^[21—22, 24]。最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型是目前应用最为广泛、性能可靠的物种分布模型之一^[24—27]。

本研究基于气候生态位理论,结合灰喜鹊在我国境内的分布数据及气候变量,通过构建 MaxEnt 模型,旨在探讨以下科学问题:(1)灰喜鹊自然分布地种群和引入地种群对气候因子的响应情况;(2)在人为引入与气候变化背景下,当前和未来时期灰喜鹊种群在我国境内的分布格局与变化趋势。这将有助于理解全球气候变化背景下物种的分布及变化规律,并预测灰喜鹊对生态系统的潜在影响。

1 数据来源与研究方法

1.1 分布数据获取及处理

分布数据的来源包括全球生物多样性信息数据库 (<https://www.gbif.org/>)、中国观鸟记录中心 (<http://www.birdreport.cn/>) 以及文献记录^[12-13, 15]。共获取到 61026 条分布数据,分布数据收集时间截止 2022 年 7 月。

首先删除信息错误、缺失、模糊及重复的分布数据,然后将剩余数据在 ArcMap 10.6 中与使用的环境变量叠加,删除在环境变量范围外的分布数据。为了降低空间自相关对模型构建的干扰作用,使用 R 4.1.3 中的 Wallace 包对分布数据进行筛选,每个 2.5 min×2.5 min 的栅格里仅保留 1 个分布点^[28-29]。最终保留有效分布点 2458 个。

以《中国动物图谱》^[30]中灰喜鹊分布界线为参照,将位于该区域内的分布点定义为自然分布点,共计 2203 条。将位于自然分布地外且有明确的证据表明灰喜鹊为引入物种的地点定义为引入地,最终确定新疆乌鲁木齐、云南昆明、贵州贵阳、广西桂林、广东广州、福建光泽、海南、香港和台湾等 9 个省市为引入地^[12-13, 15-17, 19],筛选出有效分布点 129 个(图 1)。

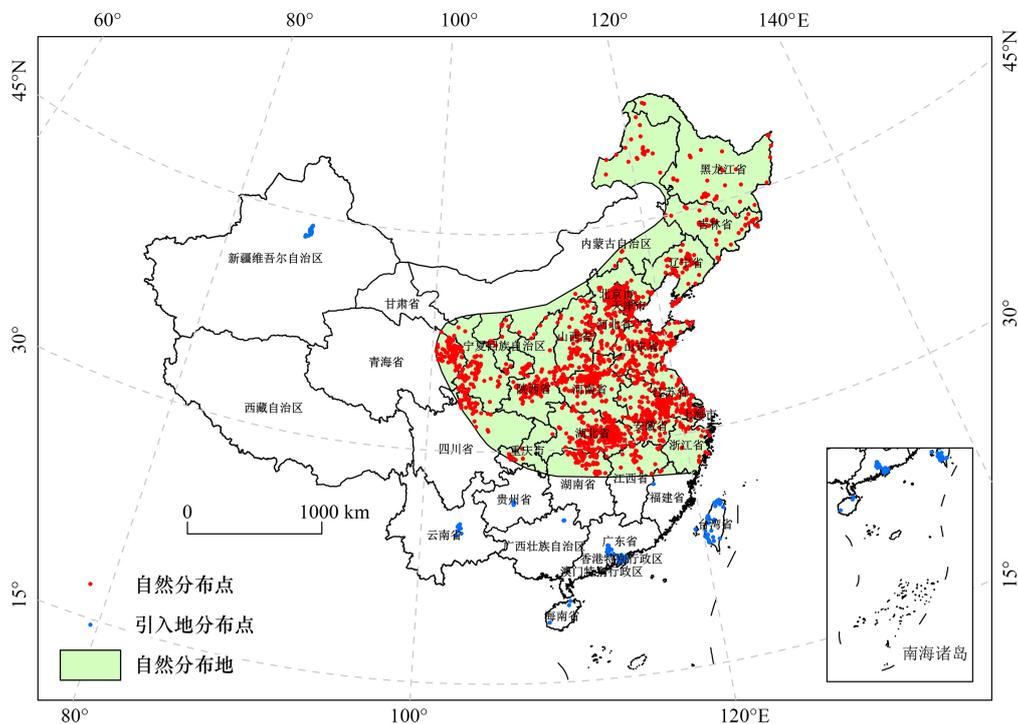


图 1 灰喜鹊分布区和分布点

Fig.1 Distribution area and points of Azure-winged Magpie in China

1.2 环境变量获取及筛选

1.2.1 环境变量获取

本研究共选取世界气候数据库 (<https://www.worldclim.org/>) 中的 19 种气候变量用于模型分析(表 1),分

辨率为 2.5 minutes。未来时期的环境变量选择 2041—2060 年(2050s 时期)和 2061—2080 年(2070s 时期)两个阶段,气候模式选择北京气候中心发布的 BCC-CSM2-MR 气候系统模式,该模式对于中国的气候变化趋势具有较好的模拟效果^[31],情景模式选择 ssp245,即中等辐射强迫与中等社会脆弱性的组合情景^[32]。

表 1 环境变量列表

Table 1 List of environment variables

环境变量 Environment variables	描述 Description	单位 Unit
bio 1	年平均气温 Annual Mean Temperature	°C
bio 2	昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range	°C
bio 3	等温性 Isothermality	—
bio 4	温度季节性变化 Temperature Seasonality	—
bio 5	最热月份最高温 Max Temperature of Warmest Month	°C
bio 6	最冷月份最低温 Min Temperature of Coldest Month	°C
bio 7	温度全年波动范围 Temperature Annual Range	°C
bio 8	最湿季度均温 Mean Temperature of Wettest Quarter	°C
bio 9	最干季度均温 Mean Temperature of Driest Quarter	°C
bio 10	最热季度均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	°C
bio 11	最冷季度均温 Mean Temperature of Coldest Quarter	°C
bio 12	年均降雨量 Annual Precipitation	mm
bio 13	最湿月降雨量 Precipitation of Wettest Month	mm
bio 14	最干月降雨量 Precipitation of Driest Month	mm
bio 15	降雨量季节性变化 Precipitation Seasonality	—
bio 16	最湿季降雨量 Precipitation of Wettest Quarter	mm
bio 17	最干季降雨量 Precipitation of Driest Quarter	mm
bio 18	最热季降雨量 Precipitation of Warmest Quarter	mm
bio 19	最冷季降雨量 Precipitation of Coldest Quarter	mm

1.2.2 环境变量筛选

环境变量在物种分布模型中的过度拟合问题受到了广泛的关注,为了避免模型的过度拟合,剔除部分环境变量可以使模型的预测性能得到一定的提升^[33–34]。学者们普遍采用 Pearson 相关系数分析法对模型使用的环境变量进行多重线性相关性分析,以环境变量间的相关性系数结合环境变量的贡献率作为筛选的依据^[22, 35]。使用 ArcMap 10.6 中的“Band Collection Statistics”工具对使用的 19 种环境变量进行相关性分析,相关性系数 r 表示两两变量之间线性关系的密切程度,本研究选择 $|r| > 0.8$ 作为环境变量间有强相关性的标准^[35–36];然后将 19 种环境变量导入到 MaxEnt 模型中试运行,使用模型结果中环境变量的贡献值作为筛选的依据^[27, 33, 37],环境变量的贡献率表示环境变量的重要程度,贡献率越高的环境变量对预测结果的贡献越大^[38];最后结合以上两种方法的结果来筛选环境变量,当两个环境变量之间的相关性系数 $r > 0.8$ 时,则保留贡献率更高的环境变量。最终优选出 bio3、bio4、bio10、bio11、bio12 和 bio15 等 6 种环境变量用于综合分布模型与自然分布地模型,bio2、bio3、bio6、bio7、bio8、bio13、bio14 和 bio15 等 8 种环境变量用于引入地模型。

1.3 MaxEnt 模型构建

1.3.1 模型参数优化

使用 R 4.1.3 中的 Wallace 包分别对自然分布地模型、引入地模型及综合分布模型进行计算,优选出每个模型最佳的调控倍频 (Regularization multiplier, RM) 和特征组合 (Feature combination, FC)。在 Wallace 中设置调控倍频的范围为 0.5—4.0,间隔为 0.5;特征组合项选择:H、L、LQ、LQH、LQHP (H, hinge, 片段化;L, linear, 线性;Q, quadratic, 二次型;P, product, 乘积型)^[29, 39–41]。delta.AICc 是一种模型评估指标,在候选模型中 delta.AICc 值最低的模型被确定为最优模型^[42],根据 Wallace 计算结果中最低的 delta.AICc 值选择 3 个模型最优的

RM 和 FC:自然分布地模型使用 $RM = 0.5$, $FC = H$;引入地模型使用 $RM = 3$, $FC = LQHP$;综合分布模型使用 $RM = 0.5$, $FC = LQHP$ 。

MaxEnt 模型的其他参数设置如下:选择 25% 的分布数据作为测试集,75% 的分布数据作为训练集;设置最大背景点数为 10000;模型重复次数为 10 次;重复运行模式选择 Crossvalidate,即交叉验证法;最大迭代次数为 1000 次;选择 10 percentile training presence 阈值规则作为适生区与非适生区的划分依据;其余模型参数为默认参数。

1.3.2 适生区划分

采用 10 percentile training presence 阈值作为划分适生区与非适生区的界限,适宜值低于该阈值的地方为非适生区,高于或等于该阈值的地方为适生区^[35, 43],其中自然分布地模型的阈值为 0.2629,引入地模型的阈值为 0.1170,综合分布模型的阈值为 0.2579。然后将适生区按照适宜值由低到高三等分为低适生区、中适生区和高适生区^[38]。

1.3.3 模型预测精度评估

以 AUC 值作为模型预测精度评估的标准,值越大表示模型预测结果越有规律,环境变量与物种地理分布之间的相关性越大,模型预测效果越好^[26, 38, 44]。当 AUC 值为 0.5—0.6 时,代表模型预测失败;当 AUC 值为 0.6—0.7 时,代表模型预测效果较差;当 AUC 值为 0.7—0.8 时,代表模型预测效果一般;当 AUC 值为 0.8—0.9 时,代表模型预测效果良好;当 AUC 值为 0.9—1.0 时,代表模型预测效果优秀^[45—46]。

2 结果与分析

2.1 模型评估结果

自然分布地模型、引入地模型和综合分布模型的 AUC 值分别为 0.851、0.962 和 0.826,为良好或优秀水平,表明模型预测结果较好。

2.2 环境变量对灰喜鹊分布的影响

对自然分布地种群分布影响较大的环境变量为 bio12(年均降雨量)、bio4(温度季节性变化)和 bio11(最冷季度均温)(图 2)。自然分布地种群较适宜(存在概率>0.5)的年均降雨量的范围为 507.45—760.84 mm 和 868.06—1345.63 mm,较适宜的温度季节性变化标准差的范围为 853.59—1138.49,较适宜的最冷季度均温的范围为-3.80—6.29℃,自然分布地种群对于 3 种环境变量的响应曲线均呈现出先增加后减少的“单峰”曲线(图 3)。

对引入地种群分布影响较大的环境变量为 bio6(最冷月份最低温)和 bio14(最干月降雨量)(图 2)。引入地种群较适宜的最冷月份最低温的范围为 7.99—17.30℃,较适宜的最干月降雨量的范围为 16.65—202.32 mm,引入地种群的存在概率均随着最冷月份最低温和最干月降雨量的增加而升高(图 4)。

对灰喜鹊种群分布影响较大的环境变量为 bio12(年均降雨量)、bio11(最冷季度均温)和 bio4(温度季节性变化)(图 2),表明灰喜鹊更偏好温暖潮湿的东部季风区。灰喜鹊种群较适宜的年均降雨量的范围为 509.30—1347.55 mm 和 2310.55—4176.65 mm,较适宜的最冷季度均温的范围为-4.00—6.41℃和 15.34—19.62℃,较适宜的温度季节性变化标准差的范围为 849.26—1142.89,由于综合分布模型的分布数据主要来自自然分布地,所以贡献率较高的环境变量与自然分布地模型一致,但也由于引入地分布数据的影响,灰喜鹊种群对这 3 种环境变量的响应曲线均呈现出了先增加后减少、再增加再减少的“双峰”曲线(图 5)。

2.3 潜在适生区的分布与变化趋势

2.3.1 自然分布地模型

通过对比当前和未来时期的适生区面积和分布发现:自然分布地种群适生区的面积和适宜值都将随着气候的变化而大幅增加,扩张的区域主要位于高纬度的东北地区和高海拔的青藏高原(图 6,图 7)。当前时期的适生区面积共 175.46 万 km^2 ,占中国国土总面积的 18.24%,主要分布于自然分布地内的华北、华中和华东

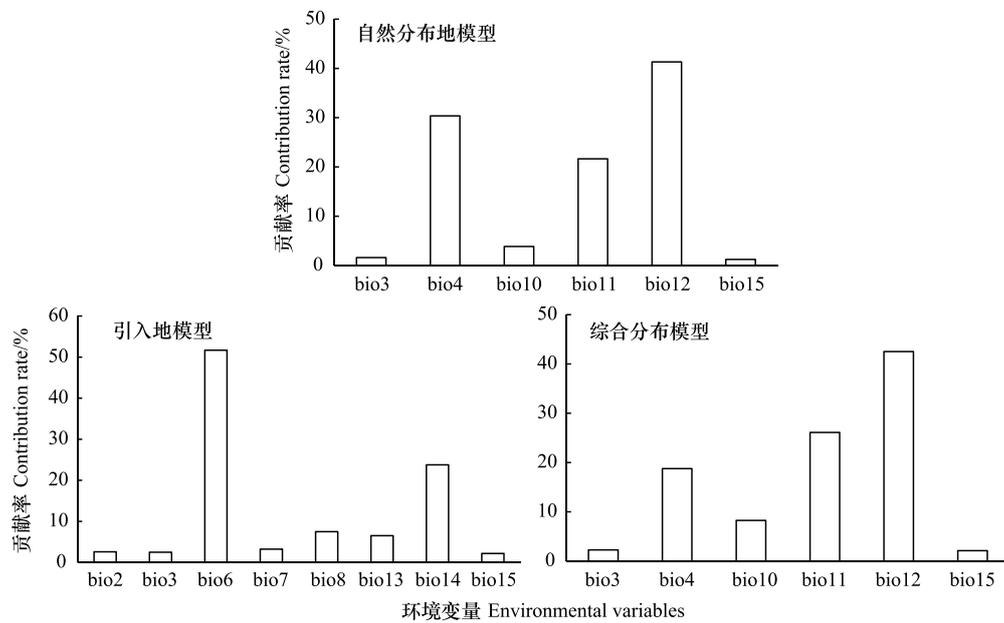


图2 环境变量的贡献率

Fig.2 Contribution rate of environmental variables

bio2:昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range; bio3:等温性 Isothermality; bio4:温度季节性变化 Temperature Seasonality; bio6:最冷月份最低温 Min Temperature of Coldest Month; bio7:温度全年波动范围 Temperature Annual Range; bio8:最湿季度均温 Mean Temperature of Wettest Quarter; bio10:最热季度均温 Mean Temperature of Warmest Quarter; bio11:最冷季度均温 Mean Temperature of Coldest Quarter; bio12:年均降雨量 Annual Precipitation; bio13:最湿月降雨量 Precipitation of Wettest Month; bio14:最干月降雨量 Precipitation of Driest Month; bio15:降雨量季节性变化 Precipitation Seasonality

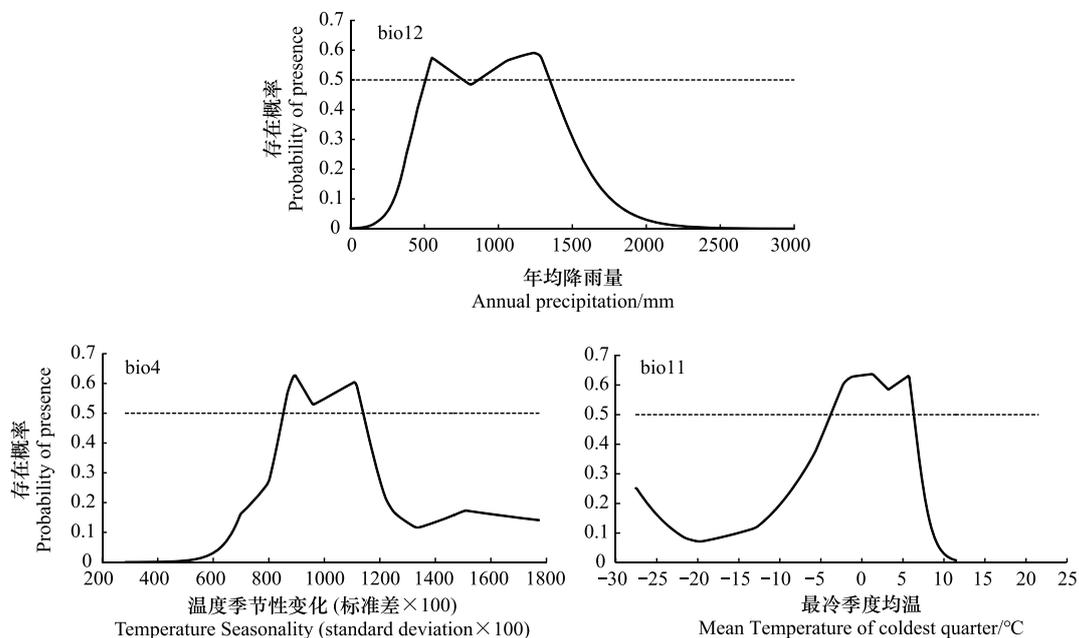


图3 自然分布地模型中重要环境变量的响应曲线

Fig.3 Response curve of important environmental variables in natural distribution model

地区,其中多数为中适生区,高适生区主要分布于湖北、安徽、江苏及渤海周围的陆地区域,自然分布地外,仅青藏高原存在较多的适生区,西藏的札达县还出现了小面积的高适生区;2050s 时期的适生区面积共

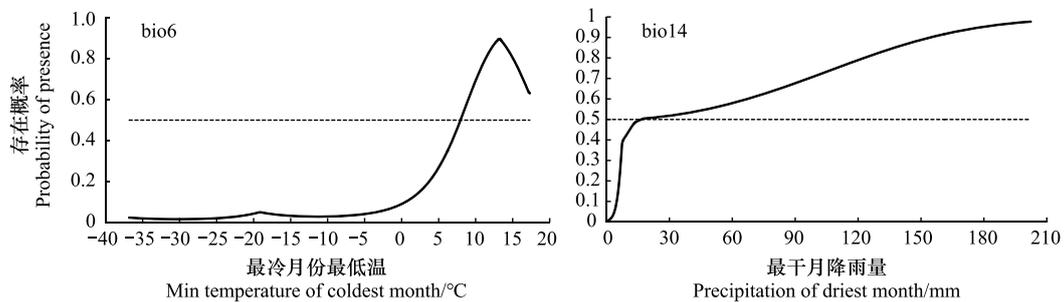


图 4 引入地模型中重要环境变量的响应曲线

Fig.4 Response curve of important environmental variables in introduction model

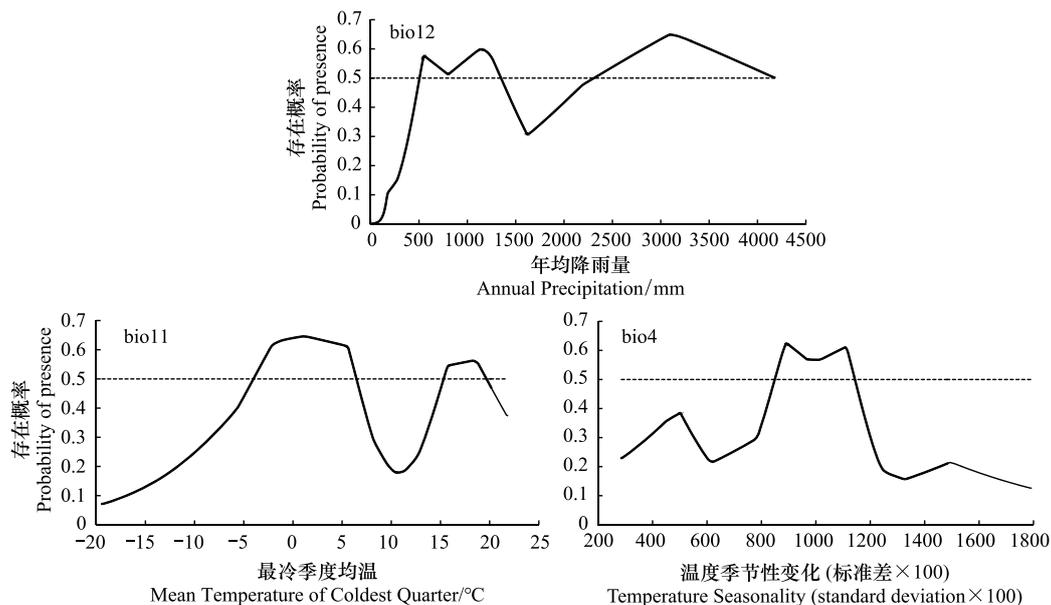


图 5 综合分布模型中重要环境变量的响应曲线

Fig.5 Response curve of important environmental variables in comprehensive distribution model

252.24 万 km^2 , 占中国国土总面积的 26.23%, 相比当前时期增加了 43.76%, 新增的适生区主要位于东北地区 and 青藏高原。其中高适生区在河北、山东、河南、安徽、江苏和湖北等地大幅增加, 表明灰喜鹊不仅有明显扩张的现象, 自然分布地种群的密度可能也会随适宜值的升高而增加; 2070s 时期的适生区面积共 283.66 万 km^2 , 占中国国土总面积的 29.49%, 相比 2050s 时期增加了 12.46%, 适生区面积小幅增加, 分布上的变化较小, 仅新增了湖南和川东地区, 表现出了轻微的南扩现象。质心分析表明灰喜鹊适生区总体向高纬度方向转移, 相比当前时期, 2050s 时期的质心朝北偏东 23° 方向转移了 253.38 km, 2070s 时期的质心朝北偏东 25° 方向转移了 229.16 km (图 7)。

2.3.2 引入地模型

通过对比当前和未来时期的适生区面积和分布发现: 引入地种群适生区的面积和适宜值均随着气候的变化而小幅增加, 分布上的变化较小 (图 6, 图 8)。当前时期的适生区面积共 103.34 万 km^2 , 占中国国土总面积的 10.74%, 主要分布于自然分布地外的新疆北部、四川东部、云南、广西、广东、福建东南部、海南和台湾, 此外在自然分布地内的重庆、湖北、江苏和上海也存在少量的适生区, 其中中、高适生区主要分布于广西、广东、海南和台湾等地, 这表明引入地种群很可能在这些沿海地区扩张和定殖; 2050s 时期的适生区面积共 125.82 万 km^2 , 占中国国土总面积的 13.08%, 相比当前时期增加了 21.75%; 2070s 时期灰喜鹊的适生区面积共

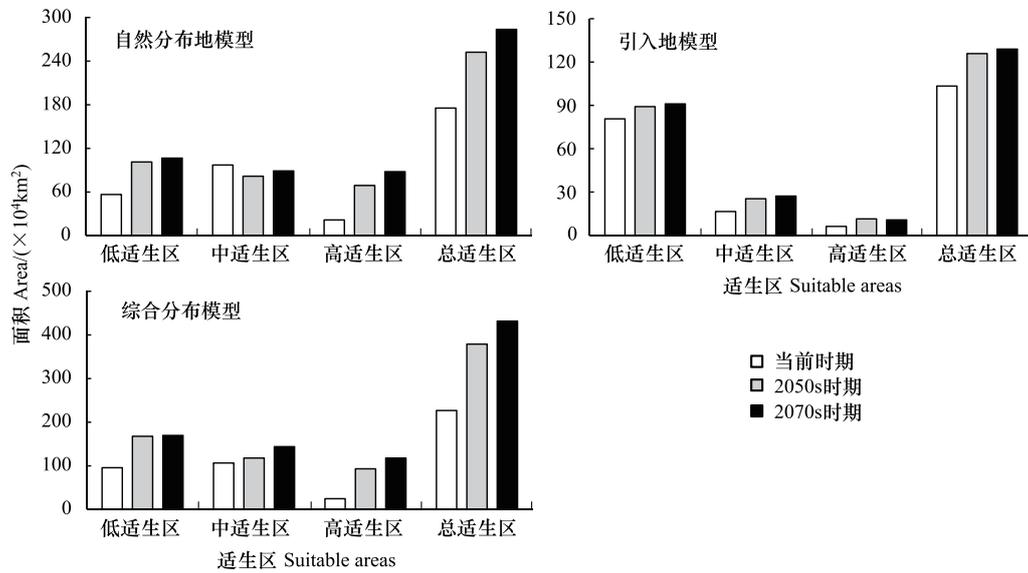


图 6 不同时期灰喜鹊适生区面积

Fig.6 Suitable areas of Azure-winged Magpie in different periods

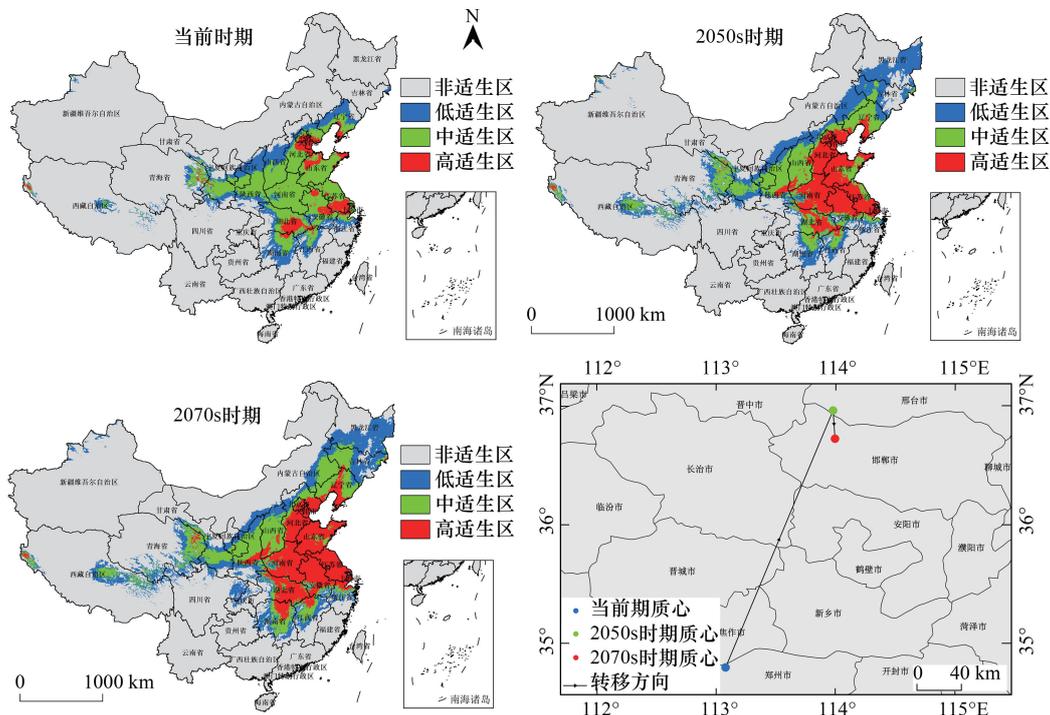


图 7 自然分布地模型中不同时期灰喜鹊的适生区分布及质心转移

Fig.7 Distribution of suitable areas and centroid transfer of Azure-winged Magpie in different periods in natural distribution model

128.98 万 km², 占中国国土总面积的 13.41%, 相比 2050s 时期增加了 2.5%。质心分析表明灰喜鹊适生区总体向高纬度方向转移, 相比当前时期, 2050s 时期的质心朝北偏东 37° 方向转移了 88.85 km, 2070s 时期的质心朝北偏东 46° 方向转移了 67.69 km (图 8)。

2.3.3 综合分布模型

通过对比当前和未来时期的适生区面积和分布发现: 灰喜鹊种群适生区的面积和适宜值都将随着气候的

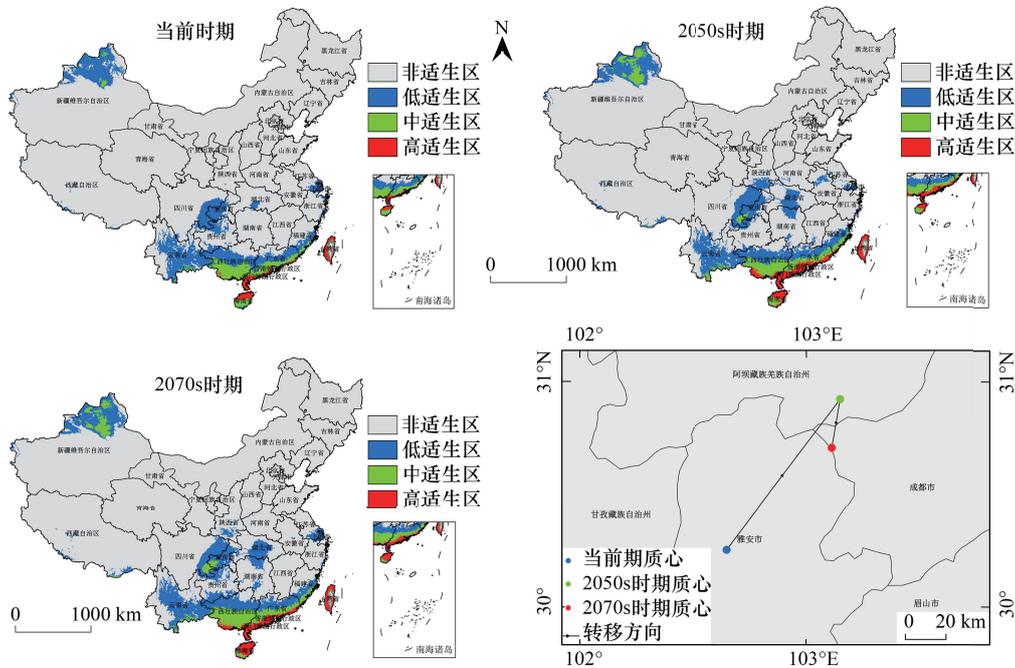


图 8 引入地模型中不同时期灰喜鹊的适生区分布及质心转移

Fig.8 Distribution of suitable areas and centroid transfer of Azure-winged Magpie in different periods in introduction model

变化而大量增加,扩张的区域主要位于高纬度的东北地区 and 新疆北部、高海拔的青藏高原以及南部的四川东部和两广地区(图 6,图 9)。当前时期的适生区面积共 226.82 万 km^2 ,占中国国土总面积的 23.58%,主要分布于自然分布地内的华北、华中和华东地区,与自然分布地模型类似,自然分布地内的低、中、高适生区的分布格局也与自然分布地模型基本一致,此外在自然分布地外的新疆北部、青藏高原、广西南部、广东南部、海南和台湾也存在一定面积的适生区,但适宜程度普遍较低;2050s 时期的适生区面积共 378.97 万 km^2 ,占中国国土总面积的 39.4%,相比当前时期增加了 67.08%,适生区面积大幅增加,新增的适生区主要位于东北地区、新疆北部、青藏高原、四川东部和两广地区,新增的适生区中主要为中、低适生区,当前时期的中适生区大部分转变为高适生区;2070s 时期的适生区面积共 431.53 万 km^2 ,占中国国土总面积的 44.87%,相比 2050s 时期增加了 13.87%,适生区面积和适宜值进一步增加,但分布上的变化较小。质心分析表明灰喜鹊适生区总体向高纬度方向转移,相比当前时期,2050s 时期的质心朝北偏西 19° 方向转移了 164.07 km,2070s 时期的质心朝北偏西 34° 方向转移了 153.44 km(图 9)。

3 讨论

3.1 影响灰喜鹊分布的主要环境变量

气候因子对物种分布的影响与物种的适应性以及食物的可利用性有关^[8, 47—48]。在自然分布地模型与综合分布模型中,贡献率最高的环境变量均为年均降雨量。降水主要通过影响植被和食物,从而间接影响鸟类的分布^[48—50]。在降水量充沛的地区,鸟类的栖息地和昆虫等食物资源也相对充足^[50]。此外松毛虫作为灰喜鹊的重要食物来源^[12],松毛虫的卵、幼虫和蛹需要较湿的环境来保证其正常的生长发育,在干旱的环境中松毛虫的密度会明显下降^[51]。所以在年均降雨量的响应曲线中,灰喜鹊的存在概率在较低的年均降雨量范围内会随着年均降雨量的升高而迅速增加。有研究表明降雨量与鸟类丰度呈正相关^[50, 52],本文结果与之一致。在引入地模型中,年均降雨量因贡献率较低而被最干月降雨量替代,其原因可能是引入地大多为降雨量充足的南方地区,在降雨量有保障的前提下,年均降雨量就不再是影响灰喜鹊分布的主要环境变量,而最干月降雨

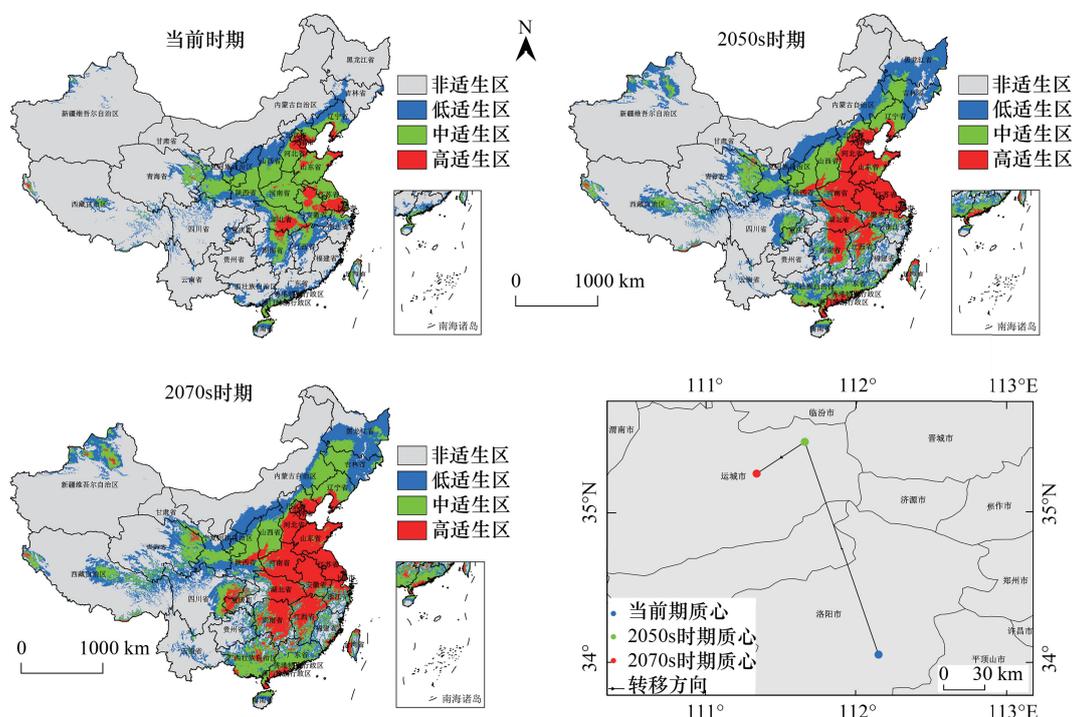


图9 综合分布模型中不同时期灰喜鹊的适生区分布及质心转移

Fig.9 Distribution of suitable areas and centroid transfer of Azure-winged Magpie in different periods in comprehensive distribution model

量则依然是影响引入地种群分布的主要环境变量。除年均降雨量外,最冷季度均温(或最冷月份最低温)在3种模型中也表现出了较高的贡献率。最冷季度均温过低会影响鸟类的身体机能^[47],此外在最冷季度均温较高的地区,鸟类可利用的食物资源也相对较充足^[47, 50]。所以在环境变量响应曲线中,最冷季度均温(或最冷月份最低温)较高的地方,灰喜鹊的存在概率也较高。

比较3种模型的环境变量响应曲线的差异,发现引入地种群适宜的最冷季度均温(或最冷月份最低温)和年均降雨量比自然分布地种群更高,这和引入地多为温暖湿润的南方地区有关。表明灰喜鹊从自然分布地引入到引入地后,气候生态位产生了重要的变化,证明灰喜鹊具有较强的适应能力,这在胡箭关于灰喜鹊在昆明城区的生态适应的研究中也得以验证^[17]。

3.2 灰喜鹊的分布格局与变化趋势

本研究结果表明,当前时期灰喜鹊在我国境内的适生区主要分布于其自然分布地内的华北、华中和华东地区。在未来气候变化的背景下,3种模型的结果均显示灰喜鹊有显著的扩张趋势,主要表现为向高纬度的东北地区和高海拔的青藏高原地区扩散。许多国内外研究也表明,在全球气候变化条件下,物种有向高纬度、高海拔地区迁移的趋势^[8],该现象在鸟类中也普遍存在^[5];Hitch 和 Leberg 研究了北美地区 56 种鸟类的扩散趋势,发现分布在低纬度地区的鸟类平均每年向北移动 2.35 km^[53];Parmesan 在对鸟类等物种的研究中发现,这些物种都表现出了向高海拔地区转移的现象^[54];国内的一些研究也证明了我国的鸟类有同样的扩散趋势:杜寅等分析了我国鸟类 20 年间的分布数据,发现共有 120 种鸟类的分布范围已向北扩张^[48];原分布于印度及东南亚地区的钳嘴鹳 (*Anastomus oscitans*),近年来已向北扩散至我国^[55];李东明等在青海西宁发现了约 60 只白头鹮 (*Pycnonotus sinensis*),表明白头鹮不仅存在向北扩散的现象,还存在向高海拔地区扩散的趋势^[56];鲜莉莉在青藏高原东北部对灰喜鹊开展的繁殖研究中表示,灰喜鹊是近年来通过殖民的方式扩散至青藏高原东北部的^[18],这也从另一方面验证了本研究结果的正确性。此外,部分鸟类也会呈现出不同的变化趋势:马鸣研究发现由于人为因素、生境的可入侵性、全球气候变化及生物地理上的空缺等原因,在我国新疆有至少

42 种鸟类存在向东扩散的现象^[6];多数鸟类的分布范围在逐渐缩小,特别是分布在高纬度、高海拔地区的鸟类,几乎没有可供其拓展的生存空间^[5, 8]。

我国气候的变化趋势与全球气候变化总体趋势基本一致^[48]。我国大部分地区的气温将呈现出增长的趋势,且高纬度地区的气温增幅较大^[8, 48-49]。我国的降水量总体上同样处于增加的趋势^[8],有研究发现青藏高原的降水量正在变得越来越多^[57-58],北半球中高纬度的降雨量也处于增长的趋势^[5]。本研究结果发现灰喜鹊更偏好温暖潮湿的气候,我国气候总体上呈暖湿化趋势,且高纬度、高海拔地区的温度和降水增加较快,这恰好与本研究结果中灰喜鹊种群的扩散方向一致。所以本研究认为,我国气候的暖湿化趋势将导致灰喜鹊向高纬度和高海拔地区扩散以及其种群数量的增加。

由于人为引种、笼养逃逸及放生等原因,目前灰喜鹊已在其自然分布地外建立了多处可自我维持的种群,在自然分布地外的西南地区和华南地区也存在较大面积、较高适宜值的适生区。灰喜鹊之所以能在其自然分布地外的南方地区定殖,很大的原因在于灰喜鹊偏好暖湿的气候,而南方地区相比其自然分布地更加温暖潮湿。其次灰喜鹊较强的适应能力^[17],也使其能在气候条件完全不同的地方存活,引入地种群的气候生态位可能已产生了重要变化。虽然引入灰喜鹊对控制松毛虫等森林害虫具有积极的意义,但其较强的适应力^[17]和竞争力^[18]也可能对部分食虫鸟类,尤其是同样以松毛虫为食的松鸦(*Garrulus glandarius*)、喜鹊(*Pica pica*)、大杜鹃(*Cuculus canorus*)及四声杜鹃(*Cuculus micropterus*)等鸟类造成影响^[11, 51]。

参考文献(References):

- [1] O'Connor B, Bojinski S, Rösli C, Schaepman M E. Monitoring global changes in biodiversity and climate essential as ecological crisis intensifies. *Ecological Informatics*, 2020, 55(C): 101033.
- [2] 王卓妮, 袁佳双, 庞博, 黄磊. IPCC AR6 WG III 报告减缓主要结论、亮点和启示. *气候变化研究进展*, 2022, 18(5): 531-537.
- [3] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [4] 唐中海, 罗华林, 王建华, 刘家林, 游章强. 基于 GIS 和 Maxent 模型的白唇鹿(*Cervus albirostris*)潜在适宜生境及保护 GAP 分析. *生态学报*, 2022, 42(22): 9394-9403.
- [5] 吴伟伟, 徐海根, 吴军, 曹铭昌. 气候变化对鸟类影响的研究进展. *生物多样性*, 2012, 20(1): 108-115.
- [6] 马鸣. 鸟类“东扩”现象与地理分布格局变迁——以入侵种欧金翅和家八哥为例. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 540-546.
- [7] 武占云, 王茜, 单菁菁. 我国生态安全面临的气候变化风险及应对策略. *中南林业科技大学学报: 社会科学版*, 2022, 16(4): 25-33.
- [8] 吕佳佳. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2009.
- [9] 胡箭. 灰喜鹊生态学研究进展. *林业调查规划*, 2006, 31(5): 57-60.
- [10] Elton C. The ecology of invasions by animals and plants. *Journal of Wildlife Management*, 1960, 24: 231.
- [11] 赵正阶. 中国鸟类志-下册-雀形目. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
- [12] 伍志刚. 灰喜鹊的引种研究. *福建林学院学报*, 1992, 12(1): 57-62.
- [13] 祁慧芳, 卢柏威, 陈万成, 廖维平. 灰喜鹊南移驯养灭虫试验. *生态科学*, 1989, 8(2): 71-78.
- [14] 刘益康, 王冰, 徐伟. 灰喜鹊的人工饲养. *动物学杂志*, 1988, 23(3): 22-24.
- [15] 王龙舞, 梁伟. 海南岛发现外来鸟种红嘴相思鸟和灰喜鹊. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 26(3): 291-293.
- [16] 徐永林, 杨世均. 灰喜鹊在兴安落户. *广西林业*, 1986(1): 35.
- [17] 胡箭. 灰喜鹊在昆明城区的扩散及其生态适应[D]. 昆明: 西南林业大学, 2007.
- [18] 鲜莉莉. 灰喜鹊向高原殖民过程中的合作繁殖研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [19] 刘小如, 丁宗苏, 方伟宏, 林文宏, 蔡牧起, 颜重威. 台湾鸟类志(上). 台北: 行政院农业委员会林务局, 2010.
- [20] Elith J, Leathwick J. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2009, 40(1): 677-697.
- [21] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [22] 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.
- [23] Anderson R P. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2013, 1297(1): 8-28.
- [24] 杨雯, 胡文佳, 陈彬, 谭红建, 董鹏, 俞炜炜, 杜建国. 基于 MaxEnt 模型的中国近海主要石首鱼科鱼类潜在适生区. *生态学杂志*, 2022, 41(9): 1825-1834.
- [25] Engler J O, Stielis D, Schidelko K, Strubbe D, Quillfeldt P, Brambilla M. Avian SDMs: current state, challenges, and opportunities. *Journal of*

- Avian Biology, 2017, 48(12): 1483-1504.
- [26] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1420-1428.
- [27] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Twenty-first international conference on Machine learning-ICML '04. July 4-8, 2004. Banff, Alberta, Canada. New York: ACM Press, 2004: (21): 655-662.
- [28] Betts M G, Ganio L M, Huso M M P, Som N A, Huettmann F, Bowman J, Wintle B A. Comment on "Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review". Ecography, 2009, 32(3): 374-378.
- [29] Kass J M, Vilela B, Aiello-Lammens M E, Muscarella R, Merow C, Anderson R P. Wallace: a flexible platform for reproducible modeling of species niches and distributions built for community expansion. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(4): 1151-1156.
- [30] 郑作新. 中国动物图谱-鸟类. 3 版. 北京: 科学出版社, 1987.
- [31] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 张芳, 李伟平, 张艳武, 路屹雄, 房永杰, 顾卫华, 张莉, 董敏, 史学丽, 李江龙, 储敏, 刘茜霞, 颜京辉. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539.
- [32] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.
- [33] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [34] Pearson R, Raxworthy C, Nakamura M, Peterson A T. ORIGINAL ARTICLE: predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [35] 雷宇. 钳嘴鹳在中国的种群现状及扩散趋势模拟[D]. 昆明: 西南林业大学, 2017.
- [36] Lei Y, Liu Q. Tolerance niche expansion and potential distribution prediction during Asian openbill bird range expansion. Ecology and Evolution, 2021, 11(10): 5562-5574.
- [37] Bosso L, Di Febbraro M, Cristinzio G, Zoina A, Russo D. Shedding light on the effects of climate change on the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in the Mediterranean Basin. Biological Invasions, 2016, 18(6): 1759-1768.
- [38] 陈禹光, 乐新贵, 陈宇涵, 程武学, 杜金贵, 钟全林, 程栋梁. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1207-1214.
- [39] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [40] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [41] Radosavljevic A, Anderson R P. Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. Journal of Biogeography, 2014, 41(4): 629-643.
- [42] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [43] West A M, Kumar S, Wakie T, Brown C S, Stohlgren T J, Laituri M, Bromberg J. Using high-resolution future climate scenarios to forecast *Bromus tectorum* invasion in Rocky Mountain National Park. PLoS One, 2015, 10(2): e0117893.
- [44] 施雯, 朱恩骄, 王宇宸, 马方舟, 和秋菊, 易传辉. 基于 MaxEnt 模型预测戴褐臂金龟在中国的潜在适生区. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2936-2944.
- [45] Stockwell D R B, Peterson A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. Ecological Modelling, 2002, 148(1): 1-13.
- [46] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, Albert D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. Ecography, 2006, 29(5): 773-785.
- [47] 杨雪婷. 历史气候变化与人类活动对中国濒危鸟类分布的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [48] 杜寅, 周放, 舒晓莲, 李一琳. 全球气候变暖对中国鸟类区系的影响. 动物分类学报, 2009, 34(3): 664-674.
- [49] 赵国强. 我国北方典型生态区气候变化对农田、森林和草地生态的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [50] 徐志风. 气候变暖对武夷山脉鸟类群落结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [51] 李建华. 森林松毛虫综合防治技术. 乡村科技, 2022, 13(3): 88-90.
- [52] He J X, Yan C, Holyoak M, Wan X R, Ren G Y, Hou Y F, Xie Y, Zhang Z B. Quantifying the effects of climate and anthropogenic change on regional species loss in China. PLoS One, 2018, 13(7): e0199735.
- [53] Hitch A T, Leberg P L. Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change. Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology, 2007, 21(2): 534-539.
- [54] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2006, 37: 637-669.
- [55] 韩联宪, 韩奔, 梁丹, 高歌. 亚洲钳嘴鹳在中国西南地区的扩散. 四川动物, 2016, 35(1): 149-153.
- [56] 李东明, 王爱真, 雷富民. 青海省鸟类新纪录——白头鹇. 动物学杂志, 2006, 41(4): 70.
- [57] 李林, 李红梅, 申红艳, 刘彩红, 马玉才, 赵玉成. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1079-1089.
- [58] 王玉琦. 21 世纪青藏高原植被变化的预测[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.