

DOI: 10.20103/j.stxb.202305291139

张博鑫, 李崇林, 左小康, 那晓东. 气候变化对丹顶鹤秋季迁徙路线潜在生境适宜性的影响. 生态学报, 2024, 44(12): 5194-5205.

Zhang B X, Li C L, Zuo X K, Na X D. Impacts of climate change on potential habitat suitability of red-crowned cranes in the autumn migration. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5194-5205.

气候变化对丹顶鹤秋季迁徙路线潜在生境适宜性的影响

张博鑫, 李崇林, 左小康, 那晓东*

哈尔滨师范大学 地理科学学院, 哈尔滨 150025

摘要: 目前全球变暖趋势的加剧对丹顶鹤等大型濒危水禽的栖息地造成了严重的威胁。由于监测方法和技术手段的限制, 丹顶鹤在迁徙路线上潜在生境的分布范围尚不清楚, 气候变化对丹顶鹤迁徙路线生境适宜性的影响机理有待进一步研究。基于 138 个丹顶鹤样本分布信息和 19 种环境变量数据, 利用 BIOMOD2 软件包构建了丹顶鹤潜在生境评价的组合模型, 对丹顶鹤在亚洲东部秋季迁徙路线上的生境适宜性进行数值模拟, 并预测 SSP1.2-6 气候背景下 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年四个不同阶段的丹顶鹤潜在生境范围的变化趋势。研究结果表明: 与单模型的模拟结果相比, 集成 9 种单模型的 BIOMOD2 组合模型预测精度更高。集成模型的重要性分析表明, 气温日较差是丹顶鹤生境适宜性变化的最重要的影响因子。受气候变化的影响 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年丹顶鹤潜在生境的面积将分别减少到 $2.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $2.58 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $2.75 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $2.56 \times 10^5 \text{ km}^2$, 迁徙路线上胶东半岛和环渤海地区适栖生境面积减少的最为显著。本研究对于迁徙路线上珍稀水禽潜在适宜生境的模拟及全球变化背景下珍稀水禽栖息地的保育和修复具有重要意义。

关键词: 丹顶鹤; 迁徙路径; 集成物种分布模型; 适宜生境; 气候变化

Impacts of climate change on potential habitat suitability of red-crowned cranes in the autumn migration

ZHANG Boxin, LI Chonglin, ZUO Xiaokang, NA Xiaodong*

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: As a result of global climate warming, the habitat of endangered waterfowl has been threatened such as the red-crowned cranes. Due to the limitation of the monitoring methods and techniques, the spatial distribution extent of potential habitat in the migration routes of red-crowned crane is unclear, and the impact mechanism of climate change on habitat suitability of red-crowned cranes in migration routes needs to be further studied. On the basis of 138 red-crowned crane samples and 19 environmental variables, an ensemble model was constructed to assess the habitat suitability of the red-crowned cranes in the autumn migration routine of East Asia based on the BIOMOD2 software package. Under the future climate trends of SSP1.2-6, the suitable red-crowned cranes habitats in four different periods (2021—2040, 2041—2060, 2061—2080, 2081—2100) were predicted. The results showed that: (1) The ensemble BIOMOD2 model produced more accurate simulated results compared with the single species distribution model. The most important environmental factors which affected the habitat suitability of red-crowned cranes were elevation above sea level and diurnal temperature range. (2) The simulated area of suitable habitat in the migration route of red-crowned crane is $5.23 \times 10^5 \text{ km}^2$ at present. Under the impacts of climate changes, the potential suitable habitat area will reduce to $2.60 \times 10^5 \text{ km}^2$,

基金项目: 黑龙江省优秀青年科学基金项目资助(YQ2020D005); 黑龙江省大学生创新创业项目资助(S202210231033)

收稿日期: 2023-05-29; **网络出版日期:** 2024-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: naxiaodong_8341@163.com

$2.58 \times 10^5 \text{ km}^2$, $2.75 \times 10^5 \text{ km}^2$, $2.56 \times 10^5 \text{ km}^2$ in 2021—2040, 2041—2060, 2081—2080, and 2081—2100, respectively. The area of potential suitable habitats in the migration route will decrease with a range of 8.94% and 14.39% in the future. (3) The predicted suitable habitats in the migration route were mainly distributed in the Zhalong wetland reserve in Heilongjiang Province, the coastal areas along the lower reaches of Liaoning Province, the Bohai Rim, the Yellow River Delta nature reserve in Shandong Province, the Yancheng wetland reserve in Jiangsu Province, the Yellow River and Danjiang wetland reserves in Henan Province, and Shengjin Lake wetland reserve in Anhui Province. The future distribution pattern of suitable habitats is similar to the current distribution pattern of red-crowned crane, and the habitats connectivity between the northeast and the middle of the migration route will decrease significantly. Different kinds of suitable habitats tended to shrink in a large extent, and the decreased habitats was much more than that of the increased habitats. This study is important for the simulation of potential suitable habitats in the migration routes of the endangered waterfowl, and it will be benefit for the conservation and restoration of the endangered waterfowls' habitats under the background of global climate change.

Key Words: red-crowned crane; migration route; ensemble species distribution model; suitable habitat; climate change

丹顶鹤(*Grus japonensis*)为鹤科(Gruidae)、鹤属(*Grus*)中的一类大型涉禽,随季节不同周期性进行迁徙,主要分布在中国东北、蒙古东部、俄罗斯乌苏里江东岸、朝鲜、韩国以及日本北海道^[1-3]。丹顶鹤对生存环境要求极为苛刻,不仅是湿地生物多样性保护的旗舰物种,更是湿地生态环境是否洁净、安全的最敏感和最明显的指示者^[4-6]。近年来,随着人类活动加剧,全球气候变暖,湿地生态环境不断遭到破坏,造成了丹顶鹤迁徙生境的丧失和破碎化,严重影响到丹顶鹤栖息地的选择与分布^[7-8]。气候变化如何影响野生动物迁徙生境的分布范围已经成为当前保护生物学界关注的热点问题^[9]。

物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)是研究丹顶鹤潜在生境分布的有效方法,主要通过利用物种的样本信息和对应的环境变量信息进行关联得出物种的分布与环境变量之间的关系,并将其应用于所研究区内对目标物种的分布进行估计^[10]。随着生态位理论的完善和统计学模型的不断发展,SDMs经历了由浅入深逐渐完善的发展过程^[11]。目前,主要使用的物种分布模型有广义线性模型(GLM)、推进式回归树模型(GBM)、分类与回归树模型(CTA)、人工神经网络(ANN)、表面分布区分室模型(SRE)、柔性判别分析(FDA)、随机森林(RF)、最大熵值模型(MaxEnt)等^[12]。然而仅使用单一模型对物种潜在分布区进行预测时往往稳定性不强、偏差较大,而基于多模型构建的组合模型在准确度上的表现则相对更佳^[13]。W. Thuiller 提出 BIOMOD 计算框架^[14],能够集成 10 种物种分布模型(SRE、GLM、GAM、CTA、ANN、GBM、RF、FDA、MARS、MaxEnt),在物种分布的模拟和预测领域发挥了重要作用^[15-17]。物种分布受到多种因素的影响,如环境、地理和生态因素等,仅使用单一模型对珍稀水禽迁徙路径上物种潜在分布区进行模拟和预测时往往稳定性不强、偏差较大。本文使用的组合模型可以降低因为对环境变量与生境之间相互关系判断错误的误差,综合多种生境因子的组合情况以提高预测结果的鲁棒性,使整体预测结果更加可靠。

目前丹顶鹤的生境模拟研究多采用数据驱动的 MaxEnt 模型,研究范围往往围绕丹顶鹤的繁殖地和越冬地等重要保护区开展生境的适宜性评价^[18-21],很少通过多模型的集成来模拟迁徙路径上潜在生境的分布范围及其生境质量^[20],气候变化对于亚洲东部丹顶鹤迁徙路线生境质量的影响有待深入的研究。使用组合模型框架来对不同的模型进行评估并且基于评价指标和专家知识选择最优的模型要比使用单一模型进行物种分布更加可靠^[14]。本文基于气候变化背景下的 138 个丹顶鹤样本数据,进行模型筛选后,利用 BIOMOD2 建模平台中的 9 种模型算法构建组合模型模拟丹顶鹤在当前气候条件下的分布并进一步预测其在未来气候中的潜在分布情况,分析丹顶鹤在中国适宜性分布与环境变量之间的联系及潜在适宜区的整体变化趋势,为开展丹顶鹤栖息地合理保护管理提供了科学依据,对保护生态资源和促进丹顶鹤野生种群健康,维护区域生物多样性具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

丹顶鹤分布范围包括黑龙江、内蒙古、辽宁、河北、山东、江苏分布区。为尽可能全面分析丹顶鹤南迁时节的潜在分布区,并精确预测丹顶鹤停歇地,本文研究区涵盖丹顶鹤样本分布区的相邻省份,包括吉林、山西、陕西、北京、天津、河南、安徽省份($27^{\circ}78'7''-54^{\circ}78'7''N, 97^{\circ}17'9''-136^{\circ}6'79''E$)。该区域海拔自东向西逐渐升高($-57-3654m$),东部平原地带主要为亚热带大陆性季风气候区和温带大陆性季风气候区,季风性显著,夏季高温多雨,随纬度升高最冷月平均温度变化显著。西部地区平均海拔较东部高,为温带大陆性气候区,干燥少雨。全区域海拔由低向高土地覆被变化明显,中部广阔平原遍布耕作和管理的农业用地,由南向北从常绿阔叶林向落叶针叶林过渡,由东向西植被覆盖度逐渐减少。

1.2 数据来源及预处理

准确的物种分布数据是构建物种分布模型的基础,丹顶鹤的存在点位数据获取自中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn/>)、全球生物多样性信息服务网络平台(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)(<http://www.gbif.org/>)及公开发表的文献^[22-26],为保证数据的精确性和模型构建的科学性,本研究筛选掉重复、地点有误的点位数据,仅保留南迁时节(10—11月)有精确位置信息的数据,最终保留138个丹顶鹤分布样点(图1)。

完备且准确的环境因子是物种分布模型构建的基本要求^[27],本文选择应用最为广泛的五种环境变量即气候变量(Bioclimatic variables 系列数据包括19个具有生态学意义的气候变量^[28])、地形变量、植被变量、水文变量、人为干扰变量构建物种分布模型(表1)。地形变量(海拔、坡度、坡向)由地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)提供的数字高程模型(DEM)获得。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)通过GEE(Google Earth Engine, GEE)云平台提取所得。水文、人为干扰变量通过对河流、道路矢量数据(来源于中国国家基础地理信息数据平台)进行距离制图获得。

同时本文设定的地形、植被、水文、人为等因子在未来SSP1.2-6气候情境下不发生改变,仅研究气候变化对丹顶鹤未来分布格局的影响。本文当前(1970—2000年)和未来(2021—2100年)气候变量均来源于WorldClim数据库(<http://www.worldclim.org/>)。未来环境变量采用2021—2040年(2030s)、2041—2060(2050s)、2061—2080(2070s)、2081—2100(2090s)四个阶段的SSP1.2-6气候情景数据。为避免环境变量间的相关性过高导致模型过拟合^[29],采用R软件包进行相关系数(Person)分析,对相关系数 >0.8 的多组环境变量进行筛选,每组仅选取一个与丹顶鹤生境特征关系关联紧密的变量参与建模,并检查筛选所得的环境变量的相关系数($r < 0.8$)^[30]。最终筛选得到Bio 1年平均气温、Bio 2平均气温日较差、Bio 3等温性、Bio 4气温季节性变动系数、Bio 13最湿月降水量、Bio 14最干月降水量、ASL海拔、FVC植被覆盖度、Disriver离河流距离、Disroad离道路距离共10个环境变量参与丹顶鹤物种分布模型建模(表1)。

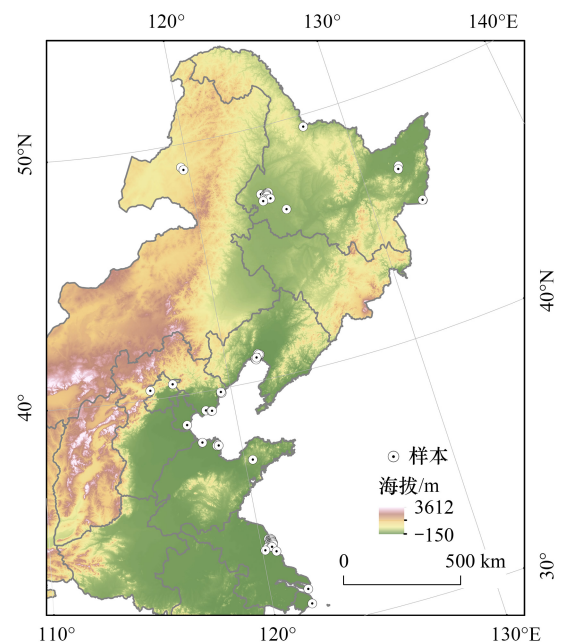


图1 研究区及丹顶鹤种群分布点的地理位置

Fig.1 Geographical location of population distribution of red-crowned crane in the study area

表 1 丹顶鹤潜在分布评价所需的地理环境变量

Table 1 Geographical environment variables required for evaluation of potential distribution of red-crowned cranes

地理环境变量 Geographical environments variables	变量名称 Variable name	参与建模的变量 Variables involved in modeling	地理环境变量 Geographical environments variables	变量名称 Variable name	参与建模的变量 Variables involved in modeling
气候变量 Climate variables	年平均气温	✓		降水量季节性变化	
	平均气温日较差	✓		最干季降水量	
	等温性	✓		最湿季降水量	
	气温季节性变动系数	✓		最暖季降水量	
	最热月最高温			最冷季降水量	
	最冷月最低温		地形变量 Topographic variables	海拔	✓
	气温年较差			坡度	
	最湿季平均温			坡向	
	最干季平均温		隐蔽条件 Covert condition	归一化植被指数	✓
	最暖季平均温		食物来源	离河流距离	✓
	最冷季平均温		Food source	离湖泊距离	
	年降水量			离海岸距离	
	最湿月降水量	✓	人为干扰	离城镇距离	
	最干月降水量	✓	Human interference	离道路距离	✓

1.3 基于 BIOMOD 2 的物种分布单模型构建

本研究依据物种的存在点位数据,采用 BIOMOD 2 算法中可成功运行的 9 个单模型进行建模。由于缺乏缺失样本,因此在建模过程中随机生成 5 组伪缺失样本,每组各包含 500 个伪缺失点位数据。并将参与建模的样本随机分为 80% 的训练样本和 20% 的验证样本,前者作为训练集,后者用于精度评估,将每个单模型运算算法重复 10 次。最后使用接受者操作特征曲线的曲线下面积(area under ROC curve,AUC)、真实技巧统计值(true skill statistics,TSS)及 Kappa 系数对 9 个模型进行拟合精度的评价。

表 2 BIOMOD 2 的 9 种物种分布模型

Table 2 The 9 species distribution models based on BIOMOD 2

序号 Serial number	算法 Algorithm	算法全称 Algorithm name	序号 Serial number	算法 Algorithm	算法全称 Algorithm name
1	GLM	线性可加模型	6	CTA	分类树分析模型
2	GAM	广义相加模型	7	GBM	推进式回归树模型
3	SRE	表面分布区分室模型	8	RF	随机森林模型
4	MARS	多元适应回归样条函数	9	MAXENT	最大熵模型
5	FDA	柔性判别分析模型			

GLM: 线性可加模型 Generalized linear model; GAM: 广义相加模型 Generalized additive model; SRE: 表面分布区分室模型 surface range envelope; MARS: 多元适应回归样条函数 Multivariate adaptive regression splines; FDA: 柔性判别分析模型 Flexible discriminant analysis; CTA: 分类树分析模型 Classification tree analysis; GBM: 推进式回归树模型 Generalized boosted models; RF: 随机森林模型 Random forest; MAXENT: 最大熵模型 Maximum entropy

1.4 基于 BIOMOD 2 的物种分布组合模型的构建

本研究采用组合物种分布模型来预测丹顶鹤适宜生境的空间分布格局,以此来减少物种分布模型运算过程及伪样本点生成过程中的不确定性^[31]。综合考虑 BIOMOD 2 所包括的 9 种物种分布模型的所有 450 个单模型运算结果(仅保留 AUC>0.85 的单模型运算结果),采用各模型的 AUC 值作为权重进行加权平均,构建组合物种分布模型。具体构建过程:①将 9 种单模型运算结果进行归一化处理,即将每个模型的运算结果除以其最大值。②利用每种单模型的归一化 AUC 均值与所有 9 种模型的归一化 AUC 均值之和的比值作为各模

型的权重(式1)。^③将9种单模型的归一化 AUC 均值乘以相应的权重,并求和,以此构建组合物种分布模型(式2)。

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^h r_j} \quad (1)$$

式中, w_j 是第 j 个模型的权重; r_j 是第 j 个单模型的归一化 AUC 均值; h 表示 AUC>0.7 的单模型运算结果的个数。

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_j \times x_{ij} \quad (2)$$

式中, y_i 是第 i 个栅格的丹顶鹤适宜生境指数; w_j 是第 j 个模型的权重; x_{ij} 是第 j 个模型中的第 i 个栅格的数值。 y_i 的取值范围[0,1], y_i 越接近 1,表明该栅格单元的环境条件越适宜丹顶鹤停歇^[27]。

最终利用 ArcGIS 10.8 对输出的组合模型结果进行适宜性分级,划分为 5 个适宜性等级:0—0.2 为不适宜分布区、0.2—0.4 为低适宜分布区、0.4—0.6 为中适宜分布区、0.6—0.8 为高适宜分布区、0.8—1 为最适宜分布区^[32]。

1.5 模型准确性评价

本文采用 AUC、TSS 及 Kappa 系数等 3 种评估指标来评估模型的准确性^[33]。AUC 为接受者操作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)的曲线下面积,不受分布点发生率(prevalence)和判断阈值的影响^[34]。TSS 表示预测结果区分“是”和“否”的能力,不依赖于分布点发生率,但是受到阈值的影响^[29],其计算公式如下:

$$\text{TSS} = \text{TPR} - \text{FPR} \quad (3)$$

式中,TPR 为真阳性率(true positive rate),FPR 为假阳性率(false positive rate),TSS 值 $\in (-1, 1)$,值越接近 1 表明准确性越高^[35]。

Kappa 系数指预测相对于随机发生的准确率,受分布点发生率和阈值的影响^[29],其计算公式如下:

$$\text{Kappa} = \frac{TP + TN - (\text{expectedcorrect})_{\text{ram}}}{\text{Total} - (\text{expectedcorrect})_{\text{ram}}} \quad (4)$$

式中, $(\text{expectedcorrect})_{\text{ram}} = 1/N[(TP + FN)(TP + FP) + (TN + FN)(TN + FP)]$, TP 、 TN 、 FP 、 FN 分别为真阳性、真阴性、假阳性、假阴性计数值^[29]。

2 结果与分析

2.1 丹顶鹤物种分布模型精度评估

基于 138 个正样本数据模拟丹顶鹤的潜在适宜生境,并依据 AUC 值、TSS 值和 Kappa 系数评估单模型和组合模型的模拟精度(图 2)。研究表明:9 种单模型的模拟精度均较好(AUC>0.7、TSS>0.5、Kappa>0.5),其中 RF 随机森林算法在当下条件模拟精度最高(AUC>0.95、TSS>0.9、Kappa>0.85),且 GBM、MARS、MAXENT、FDA 及 GLM 均具有较高模拟精度(AUC>0.9、TSS>0.8、Kappa>0.8),说明单模型组合构建的模型能较好地预测丹顶鹤的潜在适宜生境。集成 9 种单模型所形成的组合模型 AUC 值、TSS 值及 Kappa 系数分别为 0.99、0.95、0.96,较单模型预测精度更高,说明组合模型能更精确地模拟丹顶鹤的潜在适宜生境。

2.2 物种分布模型的环境变量重要性评估

不同模型中环境变量的贡献率如表 3 所示,依据各个环境变量的贡献率获取影响丹顶鹤分布的主要变量,相对贡献率由高到低依次是海拔、平均气温日较差、年平均气温、最干月降水量、等温性、气温季节性变动系数、最湿月降水量、植被覆盖度、离道路距离和离河流距离。其中平均气温日较差和海拔是影响丹顶鹤分布的主导因子。

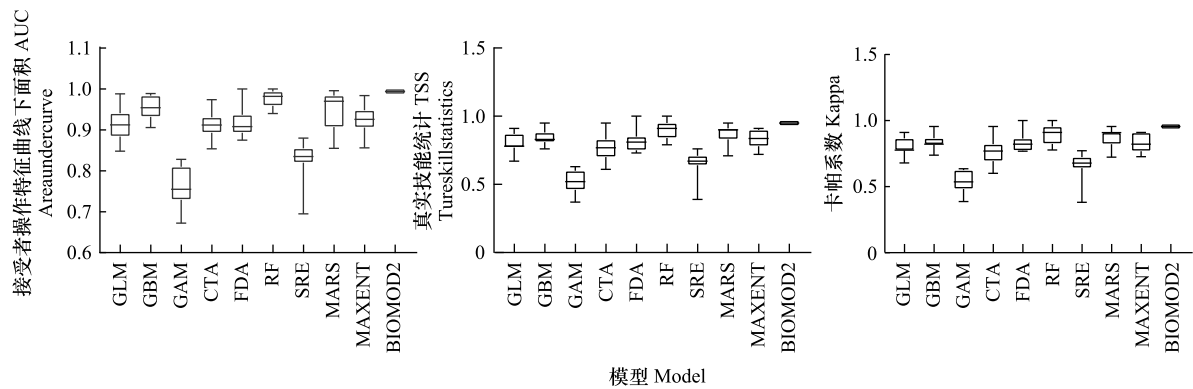


图2 9种模型算法的 AUC、TSS 和 Kappa 评估比较

Fig.2 Comparison of AUC, TSS and Kappa evaluation of 9 model algorithms

AUC: 接受者操作特征曲线下面积 Area under curve; TSS: 真实技能统计 Ture skill statistics; GLM: 线性可加模型 Generalized linear model; GBM: 推进式回归树模型 Generalized boosted models; GAM: 广义相加模型 Generalized additive model; CTA: 分类树分析模型 Classification tree analysis; FDA: 柔性判别分析模型 Flexible discriminant analysis; RF: 随机森林模型 Random forest; SRE: 表面分布区分室模型 surface range envelope; MARS: 多元适应回归样条函数 Multivariate adaptive regression splines; MAXENT: 最大熵模型 Maximum entropy; BIOMOD2: BIOMOD2 组合模型 BIOMOD2 combined models

表3 不同物种分布模型中环境变量的贡献率/%

Table 3 Importance of bioclimatic variables in different models

模型 Model	年平均气温 Annual mean temperature	平均气温 日较差 Mean diurnal range	等温性 Isothermality	气温季节性 变动系数 Temperature seasonality	最湿月 降水量 Precipitation of wettest month	最干月 降水量 Precipitation of driest month	海拔 Elevation	植被覆盖度 Normalized difference vegetation index	离河流 距离 Distance from river	离道路 距离 Distance from road
线性可加模型 GLM	35.5	92	0	30	0	32.5	47.5	0	0	9.5
推进式回归树 模型 GBM	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0
广义相加模型 GAM	90	99	50	40	20	35	11	50	10	9
分类树分析 模型 CTA	5	0	15	0	0	4.8	85	0	0	0
柔性判别分析 模型 FDA	19.8	44.5	19.5	30	5	25.3	57.5	10	0	0
随机森林模型 RF	1	6	5	1	1	1	20	0	0	2
表面分布区分室 模型 SRE	1	35	21	11	21	1	20	1	10	10
多元适应回归样条函 数 MARS	25	58.5	20	0	15	35	44.5	0	0	0
最大熵模型 MAXENT	5	51	0	8	0	30	60	0	35	9
BIOMOD2 组合模型 BIOMOD2	4.9	34.5	3	2.5	1	5	47.5	1	2	3
相对贡献率 Relative contribution	18.72	42.05	13.35	12.25	6.3	16.96	45.8	6.2	5.7	4.25

GLM: 线性可加模型 Generalized linear model; GBM: 推进式回归树模型 Generalized boosted models; GAM: 广义相加模型 Generalized additive model; CTA: 分类树分析模型 Classification tree analysis; FDA: 柔性判别分析模型 Flexible discriminant analysis; RF: 随机森林模型 Random forest; SRE: 表面分布区分室模型 surface range envelope; MARS: 多元适应回归样条函数 Multivariate adaptive regression splines; MAXENT: 最大熵模型 Maximum entropy; BIOMOD2: BIOMOD2 组合模型 BIOMOD2 combined model

2.3 丹顶鹤当前潜在生境分布格局模拟

结合 BIOMOD 2 组合模型按相等间隔分类的预测结果(图 3)和丹顶鹤潜在适宜生境的面积统计图(图 4)分析可知,当前丹顶鹤潜在适宜生境即可作为丹顶鹤迁徙停歇地的面积为 $3.02 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。主要分布在黑龙江省扎龙湿地保护区、黑龙江下游沿岸地区、环渤海地区、山东省黄河三角洲自然保护区、江苏省盐城湿地保护区及河南、安徽等地。其中,最适宜生境面积为 $0.29 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总适宜生境面积的 9.41%, 主要分布在山东省西北部、环渤海沿海地区及江苏省盐城湿地保护区。高适宜生境面积为 $0.25 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总适宜生境面积的 8.11%, 主要分布在黑龙江省扎龙湿地保护区、吉林省向海湿地保护区、环渤海内陆地区及江苏、安徽等地。中适宜生境面积为 $1.30 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总适宜生境面积的 42.2%, 主要分布在黑龙江下游沿岸地区及辽宁、河北、山东、河南、安徽、江苏等内陆地区。丹顶鹤的潜在适宜生境在吉林和辽宁之间出现了明显的不连续现象,但在其余地区连通性较好。

2.4 气候变化对未来丹顶鹤潜在生境适宜性的影响

本研究采用相同气候背景(SPP1-2.6)下的环境指标(本文设定的地形、植被、水文、人为等因子在未来 SSP1.2-6 气候情境下不发生改变),通过构建组合模型预测未来 4 个不同时期的丹顶鹤潜在适宜生境(图 5),分别将未来预测结果和当前预测结果根据适宜和不适宜进行二值化,由此得到不同时期丹顶鹤潜在适宜生境的面积变化(图 6、图 7、表 4)分析丹顶鹤未来分布格局。组合模型预测结果表明,丹顶鹤未来的潜在适宜生境分布格局和当前分布格局相近,但潜在适宜生境面积缩减幅度较大,相对当前分布格局的范围变化为 $-8.94\% \sim -14.39\%$ 。在 2021—2040 阶段,潜在适宜生境总面积为 $2.60 \times 10^5 \text{ km}^2$,较当前潜在适宜生境总面积缩减了 $0.65 \times 10^5 \text{ km}^2$,缩减率达 21.67%,缩减面积显著。主要原因可能是该时期全球变暖趋势加剧,导致丹顶鹤适宜生境面积急剧减少。在 2041—2060 阶段,潜在适宜生境

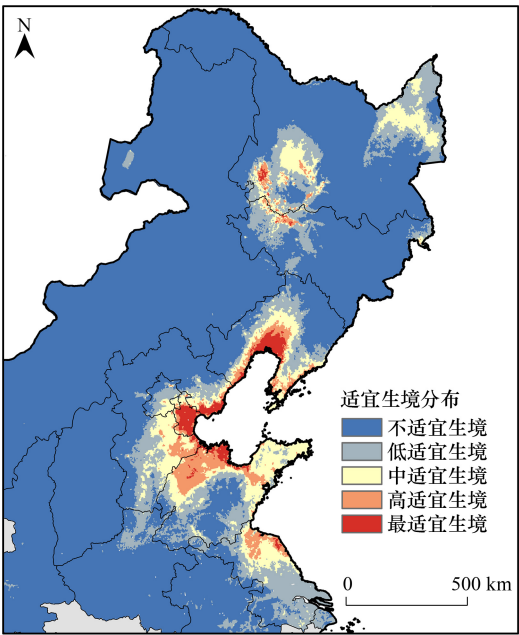


图 3 丹顶鹤当前潜在适宜生境的分布格局
Fig.3 Current distribution patterns of potential suitable habitats for red-crowned cranes

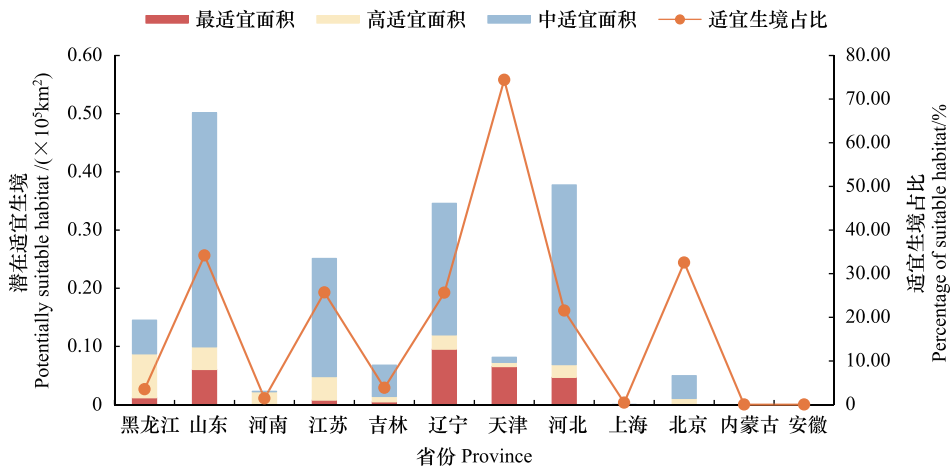


图 4 丹顶鹤潜在适宜生境的面积统计图
Fig.4 Area statistical map of potential suitable habitats for red-crowned cranes

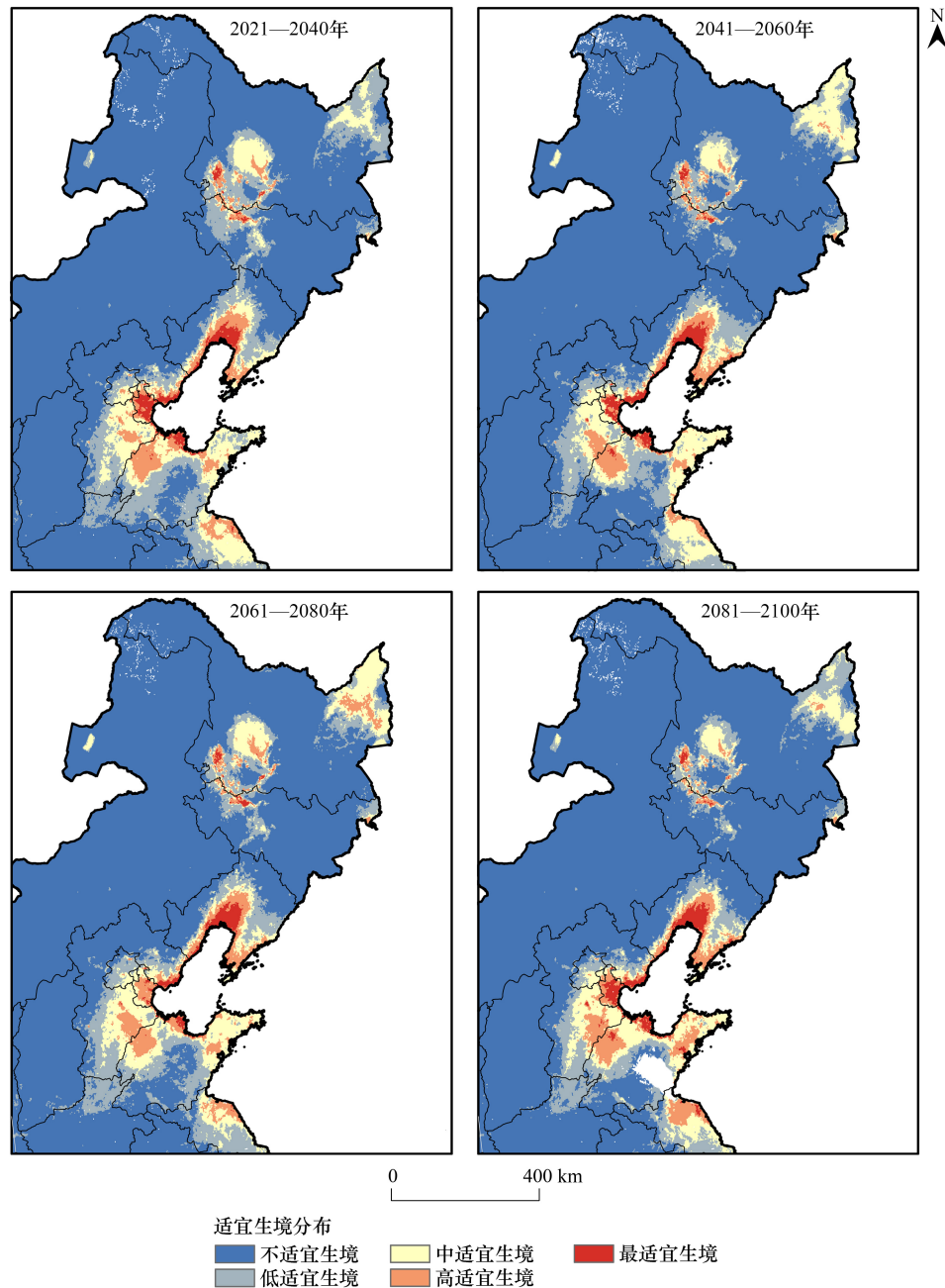


图5 丹顶鹤潜在适宜生境的未来分布格局

Fig.5 Future distribution patterns of potential suitable habitats for red-crowned cranes

总面积为 $2.58 \times 10^5 \text{ km}^2$, 较当前生境总面积缩减了 $0.69 \times 10^5 \text{ km}^2$, 扩增了 $0.25 \times 10^5 \text{ km}^2$, 面积缩减趋势仍较为明显。在 2061—2080 阶段, 潜在适宜生境总面积为 $2.75 \times 10^5 \text{ km}^2$, 较当前生境总面积缩减了 $0.51 \times 10^5 \text{ km}^2$, 扩增了 $0.24 \times 10^5 \text{ km}^2$, 扩增率为 7.98%, 缩减率为 16.93%。该阶段丹顶鹤适宜生境面积缩减率最小, 可能与人类为保护环境所作的相关举措息息相关, 为丹顶鹤营造了适宜的生存环境。在 2081—2100 阶段, 潜在适宜生境总面积为 $2.60 \times 10^5 \text{ km}^2$, 较当前生境总面积缩减了 $0.59 \times 10^5 \text{ km}^2$, 扩增了 $0.17 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。缩减和扩增面积相较之变化幅度较为稳定。

总体上, 丹顶鹤未来分布格局与当前分布格局相似, 未来潜在适宜生境面积明显缩小的区域主要分布在胶东半岛和环渤海区域, 最、高、中适宜性栖息地面积均呈减少的趋势, 缩减幅度大于扩增幅度。

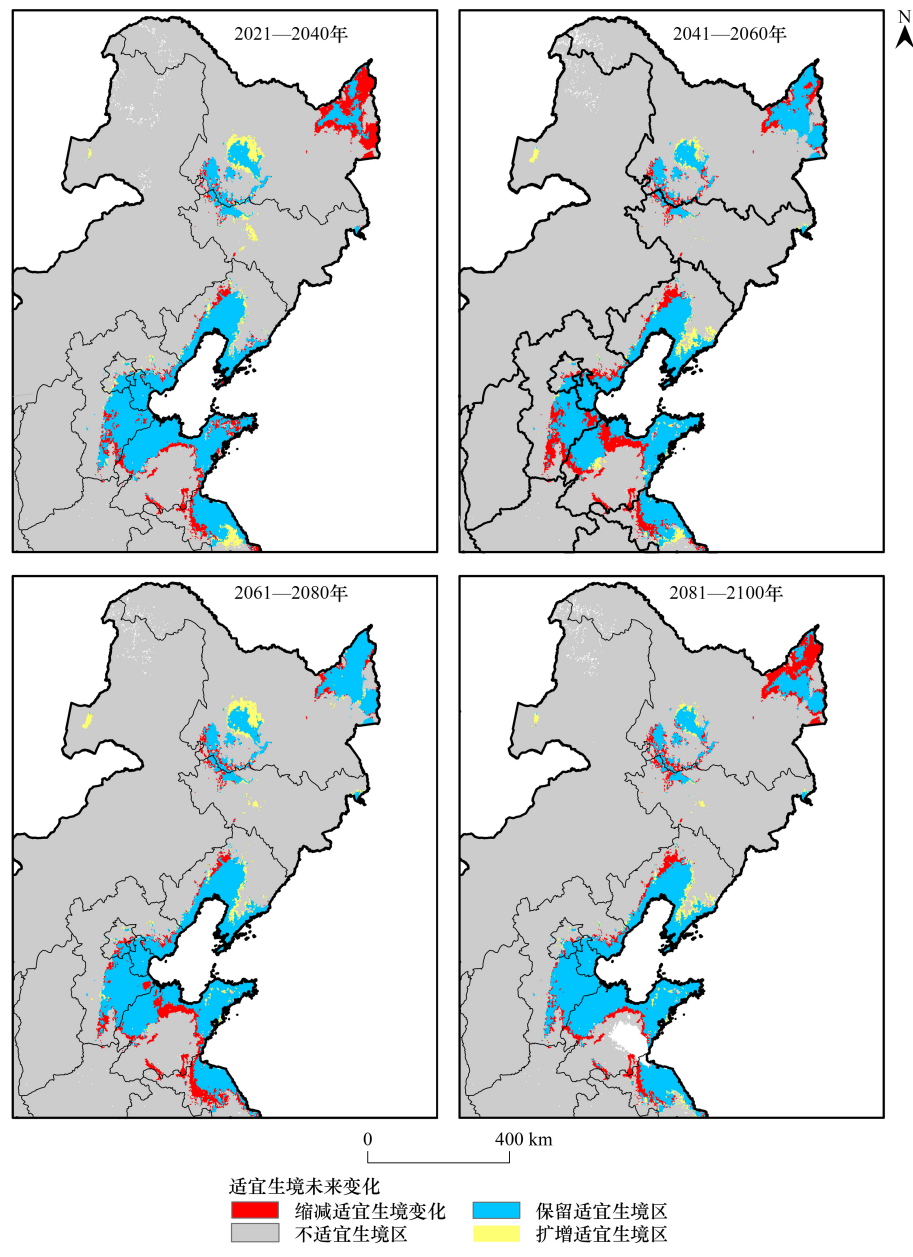


图 6 丹顶鹤潜在适宜生境的未来变化

Fig.6 Futuret distribution changes of potential suitable habitats for red-crowned cranes

表 4 不同时期丹顶鹤潜在适宜生境的面积变化

Table 4 Changes of potential suitable habitats for red-crowned cranes in different periods

时期 Period	总面积 Total area/ ($\times 10^5 \text{ km}^2$)	缩减面积 Reduce the area/ ($\times 10^5 \text{ km}^2$)	保留面积 Reserved area/ ($\times 10^5 \text{ km}^2$)	扩增面积 Amplify the area/ ($\times 10^5 \text{ km}^2$)	范围变化 Range changes/%	缩减率 Reduction rate/%	扩增率 Amplification rate/%
当前 Current	3.02						
2021—2040	2.60	0.65	2.36	0.24	−13.75	21.67	7.92
2041—2060	2.58	0.69	2.32	0.25	−14.39	22.80	8.40
2061—2080	2.75	0.51	2.50	0.24	−8.94	16.93	7.98
2081—2100	2.56	0.59	2.39	0.17	−13.85	19.62	5.77

气候背景默认为 SPP126, 缩减率(%)为缩减面积与潜在适宜生境面积的比值, 扩增率(%)为扩增面积与潜在适宜生境面积的比值

3 讨论

气候变化正在加速影响大型涉禽类候鸟的迁徙与分布格局,其中最明显的表现形式即繁殖地与迁徙停歇地分布范围的缩减^[36]。有研究表明气候变化会导致东亚地区丹顶鹤到 2050 年丧失约 30% 的繁殖地适生区^[19]。本研究发现气温日较差和海拔是影响丹顶鹤迁徙停歇地生境适宜性的主导因子。受全球变暖的影响,研究区的平均气温日较差逐年增加。日平均最高气温的增加导致地表潜在蒸发量增大,湿地水资源蓄积量减少,适栖生境面积进一步萎缩。日平均最低气温的下降和极端低温的出现,会使得部分丹顶鹤的食物种类在寒冷的天气期间变得不那么容易获得,造成丹顶鹤取食困难,给迁徙期物种生存带来严峻的挑战^[37]。在高海拔地形的阻挡作用下,丹顶鹤的迁徙廊道也受到了严重的影响。受山东丘陵和长白山脉的地形影响,丹顶鹤迁徙地的适宜生境在山东省中部和南部、吉林省南部与辽宁省北部之间出现了明显的不连续现象。总体来看,丹顶鹤的分布格局未来不会发生较大变化,环渤海地区和黄河三角洲地区仍然是丹顶鹤主要的南迁的停歇地,山东省中部和南部、吉林省与辽宁省之间栖息地的间断未来不会消失。但潜在适宜生境面积缩减幅度较大,相对当前分布格局的范围变化为-14.39%—-8.94%,高度适宜栖息地和中度适宜栖息地的面积会持续减少,维持现有适宜栖息地和恢复原来的栖息地比较困难,栖息地对气候的变化抵抗力较弱。在 SSP1.2-6 情境下全球的 CO₂ 按照严格的标准削减,在 2050 年达到了零排放,但在如此理想的条件下丹顶鹤的栖息地适宜面积仍然有缩减,因此未来丹顶鹤适宜栖息地的变化不容乐观,未来的气候变化对丹顶鹤的生存构成一定的威胁。

丹顶鹤迁徙生境对温度极为敏感,受气候变化的影响较大,极端天气频发将会影响正常的生物迁徙节律。本研究发现在 SSP1.2-6 的气候情境下,丹顶鹤秋季迁徙路线上适宜栖息地的面积整体呈收缩趋势,但空间上的变化趋势表现出明显差异。受气候变暖影响,齐齐哈尔的扎龙湿地北部、辽宁省胶东丘陵东缘、长白山脉南缘等部分地区的优质栖息地的面积将会少量增加。而部分湿地分布区的丹顶鹤适栖生境面积将会缩减,如盐城市生物圈保护区南缘,丹顶鹤的种群可能会迁出目前为其设计的保护区,从而影响保护区的生境适宜性^[38]。由于丹顶鹤大陆种群的繁殖范围分布在中国、俄罗斯和蒙古的边界,气候变化也可能导致一些种群北上俄罗斯和蒙古,从而改变每个国家保护这一濒危物种的作用^[7]。因此,如何协调好边境丹顶鹤跨境迁徙,成为中国丹顶鹤保护的主要问题之一^[39]。

预测气候变化对野生动物分布格局潜在影响的关键技术之一即构建物种分布模型。与单一模型相比本文使用的组合模型可以降低因为对环境变量与生境之间相互关系判断错误的误差。如表 3 所示,GBW 和 GTA 模型并未检测出气温日较差对于丹顶鹤生境适宜性的贡献率,RF 和 GTA 模型过低的预测了海拔对于丹顶鹤迁徙生境的影响。而 BIOMOD 组合模型同其它单一模型均指示气温日较差和海拔是影响丹顶鹤迁徙生境适宜性的最重要的因子。这说明 BIOMOD 组合模型为多模型结果的整合的综合,可有效避免单一模型不足,提高预测结果的准确率,减少由单一建模方法引起的偏差。当使用的物种分布数据和模拟重复次数较多时,组合模型精度更高、更稳定^[33]。候鸟迁徙时期其适宜栖息地变化随温度、初级生产力等变化较快。未来将针对秋季迁徙期的不同阶段,进一步获取较高时间分辨率的环境因子,以提高生境适宜性评价及模拟结果的可靠性。除本研究重点考虑的气候、地形因素外,还包括隐蔽条件、食物来源和人为干扰程度等。因此,在利用物种分布模型预测野生丹顶鹤潜在分布时,应全面考虑上述因素。丹顶鹤主要以鱼、虾等水生动物以及水生植物为食,对湿地空间的依赖导致其空间分布受气候和食物资源变化的双重影响^[40-41]。湿地多生长对

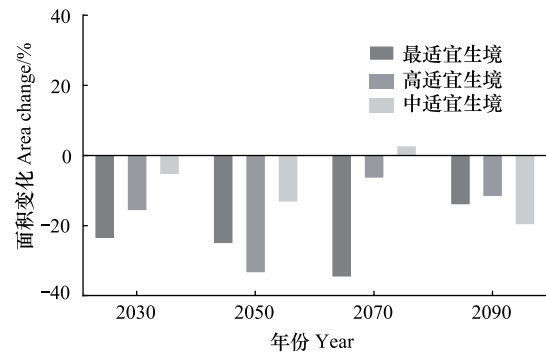


图 7 不同时期丹顶鹤潜在适宜生境的面积变化

Fig.7 Changes of potential suitable habitats for red-crowned cranes in different periods

环境变化敏感的湿生植物,温度降水的剧烈变化会导致大量敏感型植被退化消失,湿生植被逐步被演替,进而改变湿地的生态功能^[42]。因此,预测该物种在未来气候中的潜在分布情况,对其生境的保护管理政策的制定与未来优先保护区的划定具有重要的参考意义。

4 结论

基于本文通过对多变量的遴选,系统地模拟了在 SSP1.2-6 气候情境下丹顶鹤当下及未来的迁徙和栖息地分布情况,并对丹顶鹤分布的区域及变化成因进行了分析,得出主要结论如下:

(1) 不同物种分布模型中的气候变量的贡献率不同,相对贡献率由高到低依次是海拔、平均气温日较差、年平均气温、最干月降水量、等温性、气温季节性变动系数、最湿月降水量、植被覆盖度、离道路距离和离河流距离,其中平均气温日较差和海拔是影响丹顶鹤分布的主导因子。

(2) 当前丹顶鹤潜在适宜生境即可作为丹顶鹤迁徙停歇地的面积为 $3.02 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。主要分布在黑龙江省扎龙湿地保护区、黑龙江下游沿岸地区、环渤海地区、山东省黄河三角洲自然保护区、江苏省盐城湿地保护区及河南、安徽等地。丹顶鹤的潜在适宜生境在吉林和辽宁之间出现了明显的不连续现象,但在其余地区连通性较好。

(3) SSP1.2-6 气候背景下,相对当前分布格局的范围变化为 $-8.94\% \sim -14.39\%$ 。丹顶鹤未来分布格局与当前分布格局相似,未来潜在适宜生境总面积较当前明显缩减且缩减幅度较大,最、高、中适宜生境面积变化均呈缩减趋势,缩减幅度远大于扩增幅度。

参考文献 (References):

- [1] Cheng C Y, Dou H S, Liu S T, Guo Y M. Rectification of abnormal migration recorded in hand-reared red-crowned cranes (*Grus japonensis*). *Waterbirds*, 2020, 42(4): 425.
- [2] Higuchi H, Shibaev Y, Minton J, Ozaki K, Surmach S, Fujita G, Momose K, Momose Y, Ueta M, Andronov V, Mita N, Kanai Y. Satellite tracking of the migration of the red-crowned crane *Grus japonensis*. *Ecological Research*, 1998, 13(3): 273-282.
- [3] 冯晓东. 基于丹顶鹤保护的扎龙自然保护区保护成效研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [4] 张婷婷, 彭昭杰, 张昊楠, 鲁长虎, 周大庆. 2000—2015 年丹顶鹤重要繁殖地景观格局变化研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3770-3776.
- [5] 李明阳, 张称意, 吴军等. 扎龙湿地丹顶鹤繁殖生境变化驱动因素分析. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(06): 76-80.
- [6] Wang G, Wang C, Guo Z R, Dai L J, Wu Y Q, Liu H Y, Li Y F, Chen H, Zhang Y A, Zhao Y X, Cheng H, Ma T W, Xue F. A multiscale approach to identifying spatiotemporal pattern of habitat selection for red-crowned cranes. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139980.
- [7] Liu L W, Liao J S, Wu Y B, Zhang Y L. Breeding range shift of the red-crowned crane (*Grus japonensis*) under climate change. *PLoS One*, 2020, 15(3): e0229984.
- [8] SU L Y, ZOU H F. Status, threats and conservation needs for the continental population of the Red-crowned Crane. *Avian Research*, 2012, 3(3): 147-164.
- [9] Higuchi H. Bird migration and the conservation of the global environment. *Journal of Ornithology*, 2012, 153(Suppl 1): 3-14.
- [10] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- [11] 赵泽芳. 气候变化下物种分布模型建构与模型比较[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [12] Li X H, Wang Y. Applying various algorithms for species distribution modelling. *Integrative Zoology*, 2013, 8(2): 124-135.
- [13] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 栾文飞, 赵泽斌. 气候变化下的孑遗植物裸木(*Gymnocarpus przewalskii*) 适宜生境分布. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 125-133.
- [14] Thuiller W. BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1353-1362.
- [15] 黄勇杰. 朱鹮(*Nipponia nippon*) 野生种群时空尺度栖息地选择及适宜再引入地预测[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [16] Fink D, Auer T, Johnston A, Ruiz-Gutierrez V, Hochachka W M, Kelling S. Modeling avian full annual cycle distribution and population trends with citizen science data. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2020, 30(3): e02056.
- [17] Ansari A. Prediction of climate change effects on Siberian crane (*Grus leucogeranus*) habitat suitability by using ensemble modeling in Asia wetlands. *Wetlands*, 2022, 43(1): 4.

- [18] 吴伟伟, 顾莎莎, 吴军, 曹铭昌, 雷军成, 徐海根. 气候变化对我国丹顶鹤繁殖地分布的影响. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 243-248.
- [19] 徐婷. 气候变化对东北丹顶鹤繁殖生境影响评价研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [20] 缪鸿志. 丹顶鹤繁殖地分布影响因素及其分布预测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [21] Sun X P, Shen J M, Xiao Y, Li S, Cao M C. Habitat suitability and potential biological corridors for waterbirds in Yancheng coastal wetland of China. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110090.
- [22] 李文洋, 孙海军. GIS 与 GPS 结合在珍稀候鸟迁徙保护中的研究——以丹顶鹤为例. 硅谷, 2014, 7(13): 90, 86.
- [23] 曹铭昌, 刘高焕, 单凯, 侯银蓄, 王明春, 李东来, 申文明. 基于多尺度的丹顶鹤生境适宜性评价——以黄河三角洲自然保护区为例. 生物多样性, 2010, 18(3): 283-291.
- [24] 刘学昌, 吴庆明, 邹红菲, 李晓民. 丹顶鹤 (*Grus japonensis*) 东、西种群巢址选择的分异. 生态学报, 2009, 29(8): 4483-4491.
- [25] 周海涛, 那晓东, 臧淑英. 近 30 年松嫩平原西部地区丹顶鹤栖息地适宜性动态变化. 生态学杂志, 2016, 35(4): 1009-1018.
- [26] 曹铭昌, 孙孝平, 乐志芳, 崔鹏, 龚溪, 徐海根. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤越冬生境变化分析: 以盐城保护区为例. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 964-970.
- [27] 朱妮. 基于组合物种分布模型 (Ensemble Model) 的厚朴适宜生境分布模拟. 四川农业大学学报, 2019, 37(4): 481-489.
- [28] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, Jones P G, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [29] 刘涛, 刘玉萍, 吕婷, 梁瑞芳, 刘峰, 马子兰, 周勇辉, 陈志, 苏旭. 基于 Biomod2 组合模型预测青藏高原特有属扇穗茅属物种的潜在分布. 草地学报, 2020, 28(6): 1650-1656.
- [30] 罗玫, 王昊, 吕植. 使用大熊猫数据评估 Biomod2 和 MaxEnt 分布预测模型的表现. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4001-4006.
- [31] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3607-3615.
- [32] Qin A L, Liu B, Guo Q S, Bussmann R W, Ma F Q, Jian Z J, Xu G X, Pei S X. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 10: 139-146.
- [33] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [34] Shen X J, An R, Feng L, Ye N, Zhu L J, Li M H. Vegetation changes in the Three-River Headwaters Region of the Tibetan Plateau of China. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 804-812.
- [35] 毕雅琼, 张明旭, 陈元, 王爱祥, 李旻辉. 基于 Biomod2 组合模型的中国野生芍药 *Paeonia lactiflora* 适宜生境分布. 中国中药杂志, 2022, 47(2): 376-384.
- [36] Na X D, Zhou H T, Zang S Y, Wu C S, Li W L, Li M. Maximum Entropy modeling for habitat suitability assessment of Red-crowned crane. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 439-446.
- [37] Li D L, Zhang J, Chen L Y, Lloyd H, Zhang Z W. Burrow ambient temperature influences *Helice* crab activity and availability for migratory Red-crowned cranes *Grus japonensis*. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(20): 11523-11534.
- [38] Araújo M B, Alagador D, Cabeza M, Nogués-Bravo D, Thuiller W. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters*, 2011, 14(5): 484-492.
- [39] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 韩雷, 李美玲, 徐文轩, 杨维康. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3127-3135.
- [40] 林远锋, 鲁长虎, 许鹏等. 1976 年以来丹顶鹤在我国的分布变迁及就地保护状况. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(06): 200-208.
- [41] Wei Z, Zhou L. The impact of earlier flood recession on metacommunity diversity of wintering waterbirds at shallow lakes in the middle and lower Yangtze River floodplain. *Avian Research*, 2023, 14: 100102.
- [42] 邵非凡, 陈禹含, 崔圆, 刘华兵, 杨梨萍, 陈炫铮, 黄文军, 罗芳丽. 北方典型沼泽湿地高低土壤水分下植物群落特征. 生态学报, 2023, 43(21): 8692-8703.