



基于MaxEnt模型预测中华秋沙鸭在中国东北地区的潜在分布区

秦明东¹, 张文文², 孙冰洁³, 万名弢¹, 许青^{1*}

(1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨, 150040;

2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京, 210042;

3. 黑龙江省水文水资源中心, 哈尔滨, 150001)

稿件运行过程

收稿日期: 2023-12-12

修回日期: 2024-01-13



关键词: 中华秋沙鸭;
东北地区;
MaxEnt模型;
适宜分布区

Keywords: Scaly-sided merganser
(*Mergus squamatus*);
Northeast China;
MaxEnt model;
Suitable distribution area

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2024)-04-0789-11

DOI: 10.12375/ysdwxb.20240412

摘要

了解物种适宜生境的空间分布格局并准确地评估物种栖息地的适宜性对物种保护具有重要意义。通过野外调查、文献检索以及全球生物多样性信息平台(GBIF)获取东北地区中华秋沙鸭(*Mergus squamatus*)的87个分布点,利用ENMTools最终筛选79个有效分布点和10个重要环境变量,使用优化后的最大熵模型(MaxEnt)对中华秋沙鸭的潜在分布区进行预测。结果表明:东北地区中华秋沙鸭高适宜区主要位于长白山山脉和小兴安岭东部地区,较适宜区主要位于松嫩平原与辽河平原东部、长白山山脉西部地区,低适宜区主要位于三江平原、辽河平原与辽东丘陵地区。影响模型预测的主导环境特征变量是年降水量(61.2%)、降水量变异系数(14.9%)和等温性(10.8%)。此外,在地形因子中,距水源距离(5.9%)和海拔(1.7%)对中华秋沙鸭适宜生境选择同样有重要影响。其中AUC为(0.908 ± 0.041),表明该模型可预测我国东北地区中华秋沙鸭的潜在分布区,可为制定中华秋沙鸭的保护政策提供理论依据。

Predicting the Potential Distribution Area of the Scaly-sided Merganser in Northeast China Based on the MaxEnt Model

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32070519)

第一作者简介: 秦明东(1998—),男,硕士研究生;主要从事鸟类生态学研究。E-mail: 1677415865@qq.com

*通信作者: 许青, E-mail: xuqing-hrb@163.com

QIN Mingdong¹, ZHANG Wenwen², SUN Bingjie³, WAN Mingtao¹, XU Qing^{1*}

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China;

2. Nanjing Institute of Environmental Science, MEE, Nanjing, 210042, China;

3. Heilongjiang Provincial Hydrology and Water Resources Center, Harbin, 150001, China)

Abstract: It is important for species conservation to understand the spatial distribution pattern of suitable habitats and accurately evaluate the suitability of species habitats. We obtained 87 distribution sites of the scaly-sided merganser (*Mergus squamatus*) in northeast China through field surveys, literature searches, and the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) data, and used the ENMTools to screen 79 effective distribution sites, and 10 important environmental variables. The optimized maximum entropy model (MaxEnt) was used to predict the potential distribution areas of scaly-sided merganser. The results showed that: the highly suitable areas for the scaly-sided merganser in northeast China were mainly located in the eastern part of the Changbaishan Mountain and the eastern part of the Xiaoxinganling Mountain, and the more suitable areas were located in the eastern part of the Songnen Plain and Liaohe Plain and the western part of the Changbaishan Mountain, low-suitable areas were mainly located in the Sanjiang Plain, Liaohe Plain and Liaodong Hills. The dominant environmental characteristic variables affecting the model prediction were annual precipitation (61.2%), precipitation coefficient of variation (14.9%), and isothermality (10.8%). In addition, among the topographic factors, the distance from water source (5.9%) and elevation (1.7%) also had the significant effects on the selection of suitable habitats for the scaly-sided merganser. The AUC value was (0.908 ± 0.041), which indicated that the model could predict the potential distribution area of the scaly-sided merganser in the northeast of China and provide a theoretical basis for the development of a conservation policy for the scaly-sided merganser.

栖息地是指物种或群体赖以生存的生活环境,适宜的栖息地有利于物种的生存和繁衍^[1]。然而,全球气候的不断变化和人类活动恶化了生态环境,导致生物多样性严重丧失^[2]。动物栖息地选择的研究是物种多样性保护的基础^[3]。因此,准确地预测出物种栖息地的潜在分布,对物种的保护及栖息地规划有重要意义。

物种分布模型(species distribution model, SDM)在生态学的多个领域中应用极其广泛^[4-5]。相关研究表明,MaxEnt模型预测精度较高,操作简单、快速,具有较强的区分变量间交互作用和抽样偏差的能力,且仅通过物种分布的经纬度坐标和与其相关的环境因子即可预测物种的潜在分布区^[6-8]。MaxEnt模型在模拟病虫害传播^[9]、评估濒危物种潜在生境适宜性^[10]、评估外来入侵物种风险^[11]、预测农作物适宜生境^[12]和气候变化适应响应等多方面均有应用^[13]。但是,MaxEnt模型仍存在2个主要问题:第一,平衡模型的可转移性和准确率^[14]。在生态位模型中,建立简单模型可转移性高但准确性较差;而模

型复杂可使准确性提高但可转移性差。第二,默认参数下模型模拟物种潜在分布能力较差。MaxEnt模型开发者通过模拟266个物种(主要是植物、爬行类、鸟类及哺乳类动物)的分布情况来调试得到模型默认参数,并被研究者广泛用于模拟目标物种的现实分布^[15],当MaxEnt模型模拟物种现实分布时,其预测结果较为稳定,而当模拟物种潜在分布时,MaxEnt模型预测能力较差,且难以解释预测结果^[16-17],阻碍了其在生物学与生态学等研究中的应用。评估模型复杂度和拟合度的一种标准是赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)量,通过设置MaxEnt模型的正则化乘数和要素类型调整AIC量,从而平衡模型拟合度和复杂度,优化MaxEnt模型的性能,当一个模型 $\Delta AICc$ 为0时,模型最佳^[18-21]。

中华秋沙鸭(*Mergus squamatus*)属雁形目(Anseriformes)鸭科(Anatidae)^[22],现为国家一级重点保护野生动物,也是国际性的珍稀濒危物种,自2002年起IUCN将其列为濒危(EN)物种^[23]。中国东北地区、俄罗斯东南部及朝鲜北部是中华秋沙鸭的主要

繁殖地,越冬地主要位于中国长江流域以南的部分地区^[24]。目前中华秋沙鸭的野外种群数量正在减少^[25-27],如何保护好中华秋沙鸭的繁殖生境,维持或增加其种群数量,是保护生物学研究的基本问题之一。

本研究在对中华秋沙鸭分布数据和环境数据全面收集和整理的基础上,利用R语言中的kuenm包优化MaxEnt模型,解析出MaxEnt模型中最优的参数组合,从而预测中华秋沙鸭潜在分布区,了解中华秋沙鸭栖息地在东北的分布状态和影响其栖息的关键因子,为制定中华秋沙鸭的保护政策提供理论依据。

1 研究区概况

中国东北地区(38°42′—53°33′ N, 115°10′—135°5′ E)面积为 $1.5149 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[28]。东北地区地形辽阔复杂,气候类型以寒温带季风气候和温带季风气候为主,水系丰富,气温变化较大^[29]。东北地区的地貌包括三江平原、松嫩平原、松辽平原、大小兴

安岭和长白山。尽管大小兴安岭与长白山地区森林与湿地适宜鸟类生存,但目前东北地区大部分的可耕地由于人类活动加剧已经转化为农田^[30]。

2 研究方法

2.1 数据获取

2.1.1 分布数据获取

通过查询GBIF(<http://www.gbif.org>)、中国观鸟记录中心(<http://birdreport.cn/>)开源数据库、野外调查、检索相关文献及新闻报道获得本研究所用的2013—2023年中华秋沙鸭的物种分布点数据,利用中国卫星地图(<https://map.bmcx.com/>)系统获取分布点的经纬度信息。野外调查的主要研究方法为样线法、样点法。设备为双筒望远镜、单筒高倍望远镜以及长焦相机。本研究共得到87个分布点,用EN-MTools工具剔除距离相近分布点,最终筛选得到79个分布点(图1)。

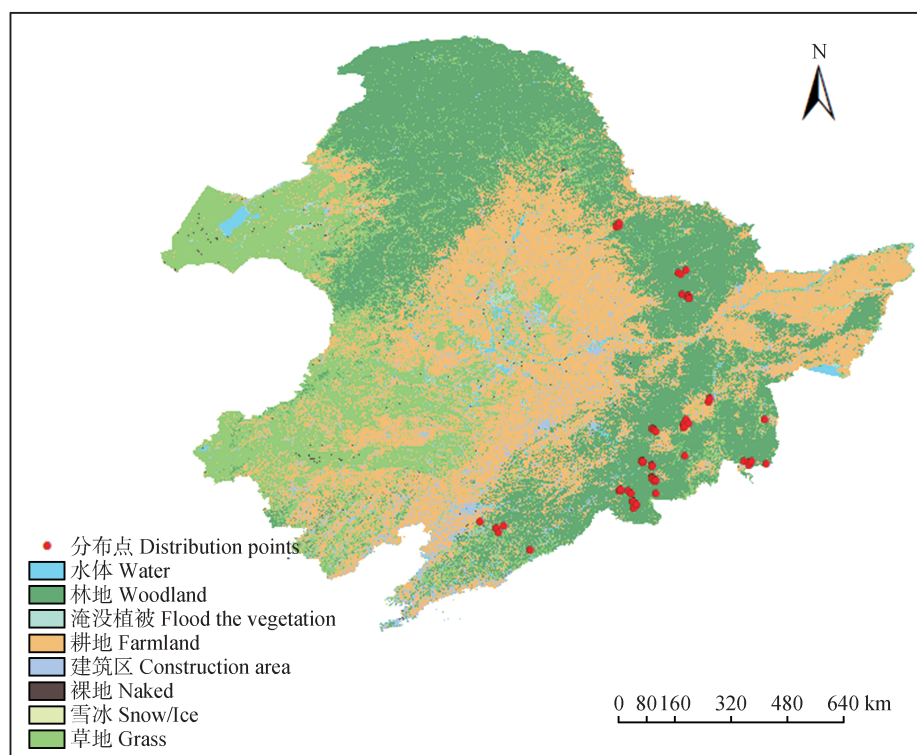


图1 东北地区中华秋沙鸭分布点

Fig. 1 The distribution points of the scaly-sided merganser in the northeast China

2.1.2 环境因子选择

综合考虑中华秋沙鸭的生活习性以及东北地区特有的地形与气候,初步选取参与构建模型的25个环境因子,包括生物气候因子(bio1~bio19)、海拔

(Alt)、坡度(Slope)、坡向(Aspect)、距水源距离(DW)、植被覆盖度(NDVI)和土地利用类型(Lucc),其中19个生物气候因子在WorldClim 2.0(1970—2000)(<http://www.worldclim.org/>)下载;海拔数据在

地理空间数据云平台 (<http://www.Gscloud.cn>) 下载; 坡度、坡向及距水源距离运用 ArcGIS 10.8 提取; NDVI 数据在中国科学院资源环境科学与数据平台 (<https://www.resdc.cn/>) 下载; 土地利用类型数据在 WorldCover (<https://esa-worldcover.org/en>) 下载 (表1)。

表1 用于建模的环境因子来源

Tab. 1 The source of the environmental factors used for modeling

因子类型 Factor type	环境因子 Environmental factors	因子描述 Factor description	数据来源 Data sources
气候 Climate	bio1	年均温 Annual mean temperature	WorldClim
	bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean diurnal temperature range	
	bio3	等温性 Isothermality	
	bio4	温度季节性变化的标准差 Standard deviation of temperature seasonal change	
	bio5	最热月最高温 Max temperature of the warmest month	
	bio6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	
	bio7	年均温变化范围 Range of annual temperature	
	bio8	最湿季平均气温 Mean temperature of the wettest quarter	
	bio9	最干季平均气温 Mean temperature of the driest quarter	
	bio10	最暖季平均气温 Mean temperature of the warmest quarter	
	bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of the coldest quarter	
	bio12	年降水量 Annual average precipitation	
	bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	
	bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	
	bio15	降水量变异系数 CV of precipitation	
	bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	
	bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter	
	bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter	
	bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	
地形 Topographical	Alt	海拔 Altitude	Geospatial Data Cloud
	Slope	坡度 Slope	
	Aspect	坡向 Aspect	
	DW	距水源距离 Distance to water	
植被覆盖 Vegetation cover	NDVI	植被覆盖度 Vegetation coverage	
土地利用 Land use	Lucc	土地利用类型 Land use type	https://esa-worldcover.org/en

2.2 数据处理和模型优化

使用 ArcGIS 10.8 软件将环境因子地理坐标系统一为 WGS1984 坐标系, 用最邻近法统一重采样, 并以东北行政地图为底图按掩膜提取, 最后转化为 ASCII 格式。环境变量之间高度相关会造成环境变量对模型的贡献率相似, 对预测结果影响较

大。为了降低环境变量之间的空间自相关性, 使用所有环境因子进行预试验, 得出所有环境因子对预测结果贡献率大小, 并在 R 语言中进行 Pearson 相关分析 (图 2)。剔除 $|r| \geq 0.8$ 的变量, 以及贡献率小的变量, 最终参与 MaxEnt 模型构建的环境因子为 10 个。

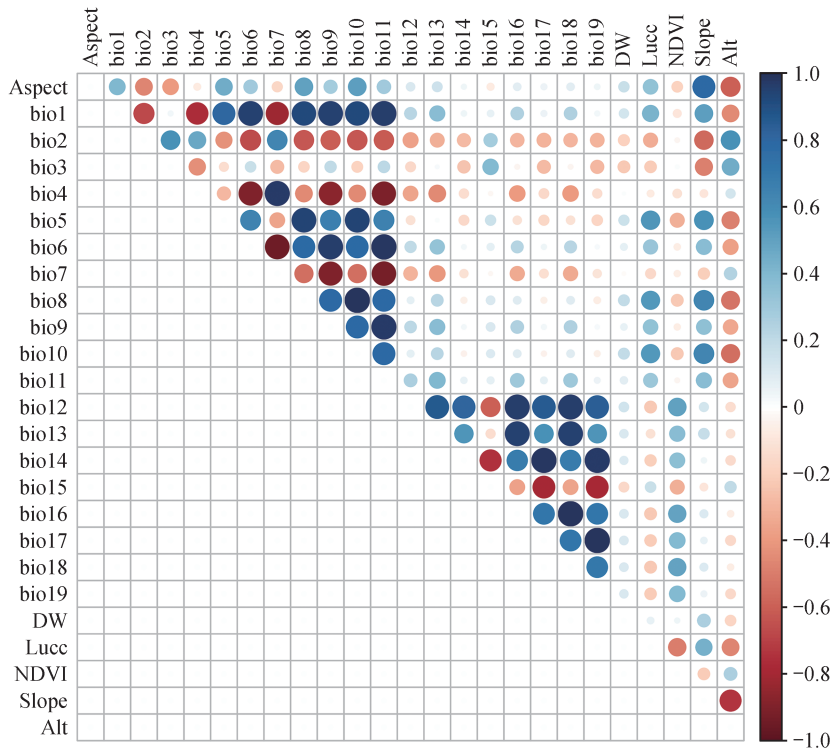


图2 25个环境因子的相关性分析结果

Fig. 2 Correlation analysis of 25 environmental factors

用 ENMTools 将中华秋沙鸭的 79 个分布点按 75% 训练集和 25% 测试集拆分。当使用 R 中的 kuenm 包分析出 $\Delta AICc$ 为 0 时,正则化乘数为 1.4、要素类型为 T(表 2)。将中华秋沙鸭的分布位点和 10 个环境因子导入 MaxEnt 3.4.4 模型小程序中,训练集设置 75%,测试集设置 25%,正则化乘数为 1.4,要素类型为 T,其余均为默认设置。为了减小随机误差对模型预测的结果,建模取 10 次重复运行的平均值作为最终结果,运用刀切法确定环境因子的贡献率和重要性。通过 ROC 曲线(receiver operating characteristic, ROC)与横轴围成的面积(area under curve, AUC)评价模型精度^[31]。AUC 取值 0 ~ 1,越接近 1 的物种存在的概率越大。当取值为 0 ~ <0.2 时模拟效果判定为不适用,0.2 ~ <0.4 时模拟效果判定为低适用性,0.4 ~ <0.6 时模拟效果判定为中适用性,0.6 ~ <1.0 时模拟效果判定为高度适用^[32]。

3 结果

3.1 MaxEnt 模型预测结果

AUC 值为 (0.908 ± 0.041)(图 3),该结果大于 0.9,说明模型的预测精度准确,因此该模型可预测我国东北地区中华秋沙鸭的潜在分布区。

表 2 默认和优化设置下的模型性能

Tab. 2 Model performance under default and optimized settings

参数 Parameter	默认 Default	优化 Optimisation
正则化乘数 RM	1.0	1.4
要素类型 FC	LQHP	T
AUC 平均值 Mean AUC	0.907	0.908
遗漏率 $\Delta AICc$	1288.2	0
高适宜区 High-suitable area	4.50%	7.41%
较适宜区 More-suitable area	7.91%	13.41%
低适宜区 Low-suitable area	12.75%	9.74%
非适宜区 Non-suitable area	74.84%	69.44%

3.2 各环境因子对中华秋沙鸭分布的贡献率

用 Jackknife 刀切法分析影响中华秋沙鸭分布的 10 个环境变量的重要性(图 4),由预测结果环境变量贡献率可知:生物气候因子中年降水量(61.2%)、降水量变异系数(14.9%)和等温性(10.8%)的累计贡献率达到 86.9%,此外,在地形因子中,距水源距离(5.9%)和海拔(1.7%)对中华秋沙鸭的适宜生境选择有重要影响(表 3)。

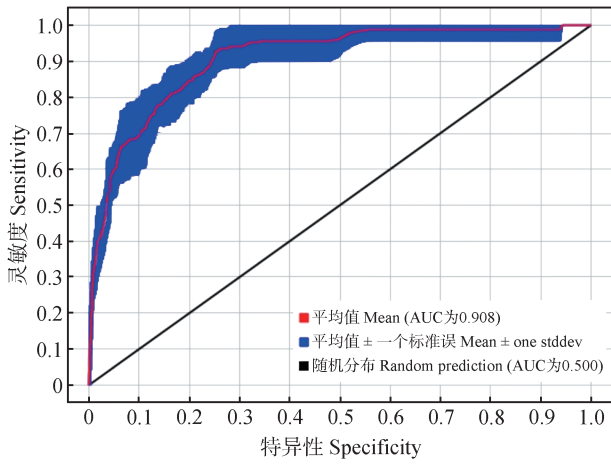


图3 MaxEnt模型的ROC曲线
Fig. 3 ROC curve of MaxEnt model

3.3 主导环境变量响应曲线

通过响应曲线可知,当年降水量在600~770 mm时,中华秋沙鸭出现概率最大(0.8),降水量变异系数在90~100时中华秋沙鸭的出现概率最大(>0.6),等温性在23~27℃时中华秋沙鸭的出现概

表3 重要环境因子的贡献率和累计贡献率

Tab. 3 The contribution and cumulative contribution of the important environmental factors

环境变量 Environment variables	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
bio12	61.2	61.2
bio15	14.9	76.1
bio3	10.8	86.9
DW	5.9	92.8
bio1	3.4	96.2
Alt	1.7	97.9
bio4	1.1	99.0
Lucc	0.9	99.9
NDVI	0	99.9
Slope	0	99.9

率最大(0.7),海拔大约200 m以上中华秋沙鸭的出现概率最大(>0.55),距水源距离越近中华秋沙鸭的出现概率越大(>0.68)(图5)。

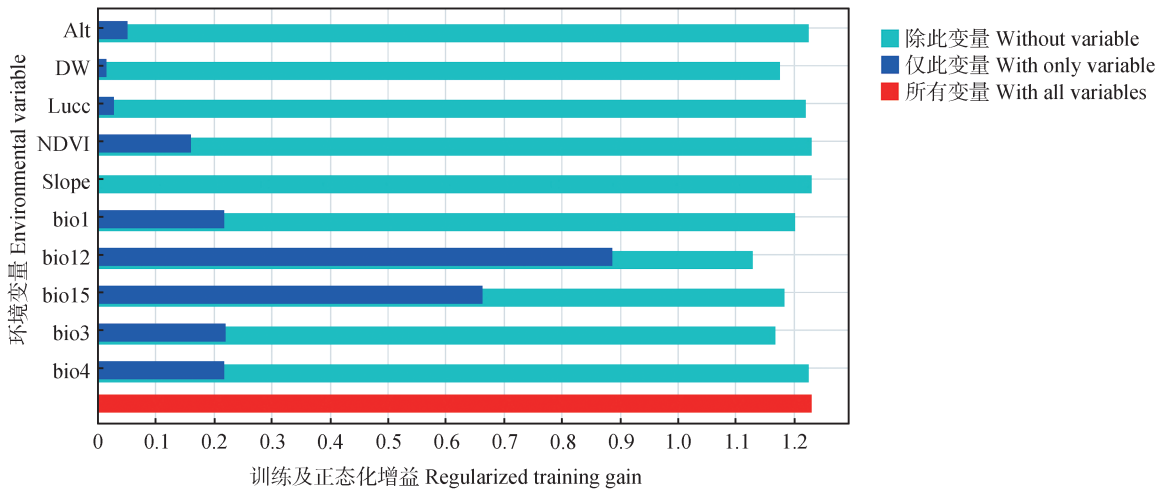


图4 刀切法对环境因子重要性的分析

Fig. 4 Using the Jackknife method to analyze the importance of environmental factors

3.4 栖息地适宜性评价

通过ArcGIS的转换工具ASCII to Raster将Max-Ent模型分析生成的ASCII文件转化成栅格数据,并使用重分类、自然断点法得到东北中华秋沙鸭的生境适宜性分布图。利用ArcGIS计算中华秋沙鸭各适宜区等级的生境面积,结果显示:中华秋沙鸭高适宜区主要位于长白山山脉和小兴安岭东部地区,栖息地面积为1.122 × 10⁵ km²,占整个地区的7.41%;较适宜区主要位于松嫩平原与辽河平原东部、长白

山山脉西部地区,栖息地面积是2.032 × 10⁵ km²,占整个地区的13.41%;低适宜区主要位于三江平原、辽河平原与辽东丘陵地区,栖息地面积为1.476 × 10⁵ km²,占整个地区的9.74%;非适宜区主要位于东北地区西部、大兴安岭地区,栖息地面积1.052 × 10⁶ km²,占整个地区的69.44%(图6A)。由图6B可见,中华秋沙鸭高适宜区是森林植被覆盖度高、河流为细小支流且密集的区域。

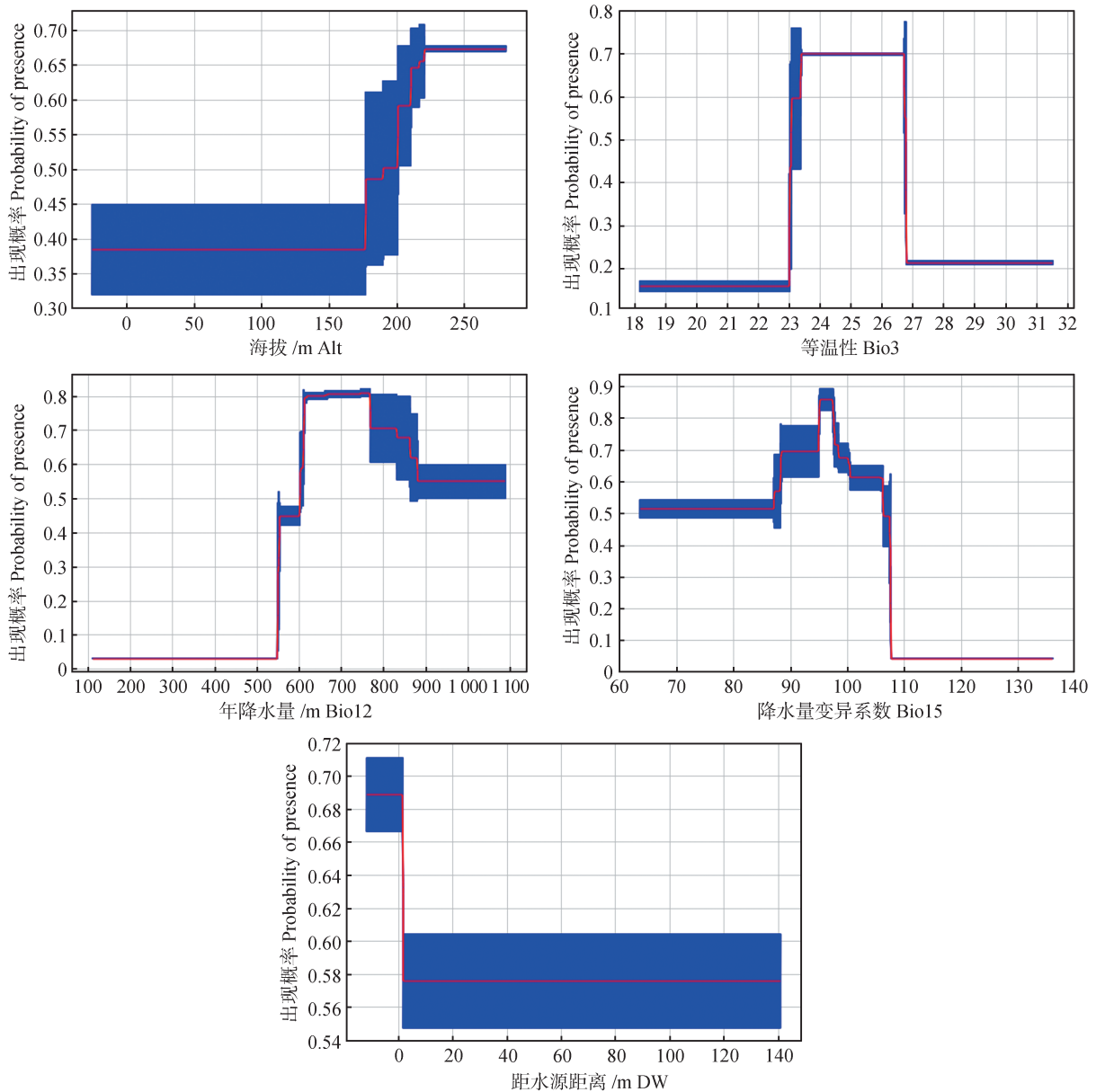


图5 5种主导环境变量响应曲线

Fig. 5 The response curves for the five dominant environmental variables

3.5 模型优化前后比较

根据模型优化前后的结果显示,经过优化后的模型在性能上有不同程度的提升,其中 Mean AUC 优化前为 0.907,优化后为 0.908;遗漏率($\Delta AICc$)优化前为 1288.2,优化后为 0(表 2)。优化参数下高适宜区面积与较适宜区面积之和比默认参数下大 $1.274 \times 10^5 \text{ km}^2$,占整个东北地区的 8.41%。

4 讨论与结论

4.1 模型的建立、优化和评价

为了模拟物种的适宜分布区及预测其生态需

求,利用物种的分布位点以及相关的环境变量建立生态位模型在生态学研究是比较常见的方法。本研究结果显示,优化后 MaxEnt 模型相较默认参数更加简单,预测结果和各种参数都有不同程度的提升,尤其是遗漏率的降低,提高了模型预测的准确性,能更好地反映实际情况。此外,本研究发现默认参数下建立的模型所预测的适宜区面积明显小于优化后的适宜区面积,使用默认参数构建出的模型仅仅是过度拟合了现实分布。相关研究发现,MaxEnt 模型所模拟的物种分布介于潜在分布和现实分布之间,即可以根据研究者的目的不同来模拟物种的现实分

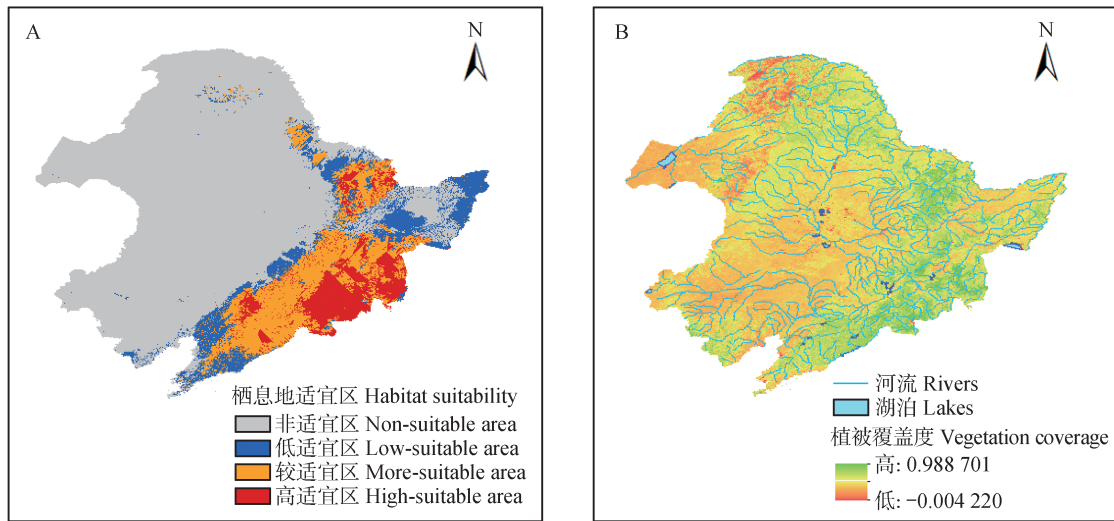


图6 东北地区中华秋沙鸭的潜在适生区

Fig. 6 The potential habitat areas of the scaly-sided merganser in northeast China

布和潜在分布^[33],如本研究在预测物种的潜在分布区时,使用默认参数构建模型可能就不再适用。由于默认参数复杂度较高,而构建模型后对物种分布数据具有较高拟合度、较低的转移力,在将构建好的模型转移到其他地理空间后,其预测能力会大幅度下降^[34]。这与本研究的结果一致。因此在预测物种分布区时,选择默认参数构建模型还是优化参数构建模型,取决于研究者的目的。本研究主要是确定研究中华秋沙鸭的潜在分布区,因此采用优化参数构建模型。

4.2 主导环境变量对中华秋沙鸭分布的影响

环境可影响物种的种群数量和分布格局^[35]。根据 MaxEnt 模型中响应曲线最后的预测结果分析出对中华秋沙鸭分布贡献率较大的5个环境因子为年降水量、降水量变异系数、等温性、海拔和距水源距离。气候对鸟类选择栖息地具有重要影响^[36]。本研究结果主导环境变量响应曲线显示,生物气候因子中年降水量在 600 ~ 770 mm、降水量变异系数在 90 ~ 100 时中华秋沙鸭的出现概率最大。足够的年降水量和稳定的降水量变异系数意味着该地区拥有丰富的水体和长期稳定的水位,适宜水鸟栖息。相关研究表明,中华秋沙鸭喜欢栖息在有一定水速的河流中,这是由于有一定水速并且水流有回转的区域通常鱼类资源丰富,降低其捕食的能量消耗,可以增加其捕食效率^[37]。适宜且稳定的水位有利于中华秋沙鸭日常的节律活动,并且为其觅食与栖息创造

生态水位条件。等温性在 23 ~ 27 °C 时,中华秋沙鸭的出现概率最大,中华秋沙鸭在东北地区繁殖时期为 4—6 月,该时期东北地区的气温基本与研究结果一致,说明该温度下更适合其栖息与繁殖。本研究结果显示,中华秋沙鸭在海拔 200 m 以上的生境最适宜,此海拔长白山植被以红松阔叶林为主,隐蔽性好,草本和灌丛更为茂密^[38-39],有利于其繁殖和日常的节律活动。预测结果显示,距水源距离越近中华秋沙鸭出现概率越大。根据相关研究表明,中华秋沙鸭喜好的栖息地都是植被茂密、水源丰富的地方,距水源距离更近有利于其捕食与筑巢繁殖^[37]。中华秋沙鸭的筑巢选址与其他鸭类不同,对水源因素的需求较高,会选择在靠近河流的树洞营巢;另一方面雏鸟破壳后的两三天亲鸟先飞出巢洞,随后雏鸟陆续跳出,并在亲鸟的带领下经过一段“跋涉”才能到达最近河流,因此离水源距离近有利于将雏鸟的能量消耗降到最低^[40-41]。

4.3 适宜分布区分析及保护建议

目前已发现的中华秋沙鸭繁殖地有吉林长白山地区的头道白河、二道白河、漫江、珠尔多河、富尔河、大浦柴河、园池保护区、红石林区以及黑龙江省的碧水保护区、小兴安岭地区的伊春和凉水等地^[42-45],从 MaxEnt 模型预测的分布区结果看,其潜在适宜分布区还可能在张广才岭、镜泊湖、松花湖、小兴安岭东部及辽东丘陵以北部分地区。因此,这些潜在的适宜栖息地也可能成为中华秋沙鸭的繁殖

地。为尽可能增加中华秋沙鸭野生种群数量,应加大中华秋沙鸭高适宜区的保护力度,全面开展东北地区中华秋沙鸭高适宜区的种群数量调查。

根据本研究的预测结果,为保护中华秋沙鸭提出建议:(1)由于中华秋沙鸭喜爱生境为植被类型多、水域丰富地区,且其繁殖所需的树洞条件较为苛刻,只有原始林与30~40年生以上次生林的树洞才有可能选择作为繁殖地点^[40],因此尽量保持两岸原生植被类型;(2)在野外合适的树上多放置人工巢箱吸引中华秋沙鸭来此地繁殖;(3)制定中华秋沙鸭相关保护管理条例,高适生河段较多的地区可考虑在每年4—6月实行禁捕,保证其在繁殖的期食物资源充足;(4)全面开展东北地区高适生区的中华秋沙鸭种群数量调查,逐渐将调查区域拓展至中低适生河段,同时开展中华秋沙鸭致危因素的科学研究;(5)加大保护区附近居民对中华秋沙鸭保护的宣传教育,确保该物种得到政府及当地居民的重视,以减少对中华秋沙鸭野生种群的破坏。

参考文献:

- [1] 杨维康, 钟文勤, 高行宜. 鸟类栖息地选择研究进展[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3): 71-78.
YANG W K, ZHONG W Q, GAO X Y. A review of studies on avian habitat selection[J]. Arid Zone Research, 2000, 17(3): 71-78.
- [2] KEINATH D A, DOAK D F, HODGES K E, et al. A global analysis of traits predicting species sensitivity to habitat fragmentation [J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26 (1) : 115-127.
- [3] 杨勇, 温俊宝, 胡德夫. 鸟类栖息地研究进展[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 172-180.
YANG Y, WEN J B, HU D F. A review on avian habitat research [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 172-180.
- [4] 吴艳, 王洪峰, 穆立蕃. 物种分布模型的研究进展与展望[J]. 高师理科学刊, 2022, 42(5): 66-70.
WU Y, WANG H F, MU L Q. Research progress and prospect of species distribution models [J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2022, 42(5): 66-70.
- [5] WARD D F. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand [J]. Biological Invasions, 2007, 9(6): 723-735.
- [6] YI Y J, CHENG X, YANG Z F, et al. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: a review of aquatic habitat suitability models [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 748-762.
- [7] SAATCHI S, BUERMANN W, TER STEEGE H, et al. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2000-2017.
- [8] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [9] ZAIDI F, FATIMA S H, KHISROON M, et al. Distribution modeling of three screwworm species in the ecologically diverse landscape of north west Pakistan [J]. Acta Tropica, 2016, 162: 56-65.
- [10] PRAMANIK M, DIWAKAR A K, DASH P, et al. Conservation planning of cash crops species (*Garcinia gummi-gutta*) under current and future climate in the Western Ghats, India [J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(4): 5345-5370.
- [11] RODRÍGUEZ-MERINO A, GARCÍA-MURILLO P, CIRUJANO S, et al. Predicting the risk of aquatic plant invasions in Europe: How climatic factors and anthropogenic activity influence potential species distributions [J]. Journal for Nature Conservation, 2018, 45: 58-71.
- [12] SHARMA S, ARUNACHALAM K, BHAVSAR D, et al. Modeling habitat suitability of *Perilla frutescens* with MaxEnt in Uttarakhand: a conservation approach [J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2018, 10: 99-105.
- [13] ZHANG K L, YAO L J, MENG J S, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1326-1334.
- [14] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [15] PETERSON A T, PAPEŞ M, SOBERÓN J. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling [J]. Ecological Modelling, 2008, 213(1): 63-72.
- [16] WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria [J]. Ecological Applications, 2011, 21(2): 335-342.
- [17] WARREN D L, WRIGHT A N, SEIFERT S N, et al. Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern [J]. Diversity and Distributions, 2014, 20(3): 334-343.
- [18] AKAIKE H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle [M]//PARZEN E, TANABE K, KITAGAWA G. Selected papers of Hirotugu Akaike. New York: Springer, 1998: 199-213.
- [19] TARABON S, BERGÈS L, DUTOIT T, et al. Environmental impact assessment of development projects improved by merging

- species distribution and habitat connectivity modelling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 241: 439-449.
- [20] MUSCARELLA R, GALANTE P J, SOLEY-GUARDIA M, *et al.* ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MaxEnt ecological niche models [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(11): 1198-1205.
- [21] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, *et al.* Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [22] 方第安, 章志琴, 罗朝晖, 等. 2001~2008年中华秋沙鸭越冬越冬种群数量的变化[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(10): 2513-2515.
- FANG D A, ZHANG Z Q, LUO C H, *et al.* Study on population quantity of *Mergus squamatus* in Yiyang wintering habitat from 2001 to 2008[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(10): 2513-2515.
- [23] BirdLife International. *Mergus squamatus* (amended version of 2017 assessment) [J/OL]. The IUCN Red List of Threatened Species, 2017; e. T22680488A118860238[2023-12-12]. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22680488A118860238.en>.
- [24] 王剑颖, 丁红秀, 邵明勤, 等. 基于MaxEnt模型预测中华秋沙鸭在江西省的潜在分布区[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 117-124.
- WANG J Y, DING H X, SHAO M Q, *et al.* Prediction of potential distribution areas of scaly-sided mergansers, based on MaxEnt modeling, in Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(1): 117-124.
- [25] 何芬奇, 林剑声, 杨斌, 等. 中华秋沙鸭在中国的近期越冬分布与数量[J]. *动物学杂志*, 2006, 41(5): 52-56.
- HE F Q, LIN J S, YANG B, *et al.* Current distribution and status of the wintering scaly-sided merganser *Mergus squamatus* in China[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, 41(5): 52-56.
- [26] 黄斌, 熊林春, 裴晓军, 等. 河南信阳国家一级保护鸟类分布新记录: 鲇鱼山水库中华秋沙鸭越冬种群及其行为观察[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2016, 29(3): 394-397.
- HUANG B, XIONG L C, PEI X J, *et al.* The new distribution record of the first nationally protected animals in Xinyang Henan Province: the wintering population and behavior observation of *Mergus squamatus* in Nianyushan Reservoir [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 29(3): 394-397.
- [27] 易国栋, 房健, 尹君龙, 等. 中华秋沙鸭越冬微生境选择与空间利用格局[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(11): 91-95.
- YI G D, FANG J, YIN J L, *et al.* Micro-habitat selection and spatial utilization patterns of wintering *Mergus squamatus* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(11): 91-95.
- [28] 杨蕾, 杨立, 李婧昕, 等. 东北地区5个物种潜在栖息地变化与优化保护规划[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 1082-1094.
- YANG L, YANG L, LI J X, *et al.* Potential distribution and conservation priority areas of five species in northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 1082-1094.
- [29] 满卫东, 王宗明, 刘明月, 等. 1990—2013年东北地区耕地时空变化遥感分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 1-10.
- MAN W D, WANG Z M, LIU M Y, *et al.* Spatio-temporal dynamics analysis of cropland in northeast China during 1990-2013 based on remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(7): 1-10.
- [30] 孙凤华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 751-755;762.
- SUN F H, YANG S Y, CHEN P S. Climatic warming-drying trend in northeastern China during the last 44 years and its effects [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 751-755;762.
- [31] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. *Radiology*, 1982, 143(1): 29-36.
- [32] XU D P, ZHUO Z H, WANG R L, *et al.* Modeling the distribution of *Zanthoxylum armatum* in China with MaxEnt modeling [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 19: e00691.
- [33] JIMÉNEZ-VALVERDE A, PETERSON A T, SOBERÓN J, *et al.* Use of niche models in invasive species risk assessments [J]. *Biological Invasions*, 2011, 13(12): 2785-2797.
- [34] 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[J]. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- ZHU G P, QIAO H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [35] YI Y J, ZHOU Y, CAI Y P, *et al.* The influence of climate change on an endangered riparian plant species: the root of riparian Homonoia [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 40-50.
- [36] 吴伟伟, 徐海根, 吴军, 等. 气候变化对鸟类影响的研究进展[J]. *生物多样性*, 2012, 20(1): 108-115.
- WU W W, XU H G, WU J, *et al.* The impact of climate change on birds: a review [J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 108-115.
- [37] 罗玉梅, 王卓聪, 史国强, 等. 长白山三条河流鱼类生物量与中华秋沙鸭数量关系[J]. *野生动物学报*, 2023, 44(1): 198-202.
- LUO Y M, WANG Z C, SHI G Q, *et al.* Study on fish biomass and its relationship with *Mergus squamatus* population abundance in three rivers of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2023, 44(1): 198-202.
- [38] 郝占庆, 于德永, 杨晓明, 等. 长白山北坡植物群落 α 多样性及其随海拔梯度的变化[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7):

- 785-789.
- HAO Z Q, YU D Y, YANG X M, *et al.* α diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 785-789.
- [39] 付俊卿, 陈刚. 中华秋沙鸭巢址选择及孵化期活动节律[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(5): 100-101.
- FU J Q, CHEN G. Nest-site selection and activity rhythm of scaly-sided merganser during hatching period [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(5): 100-101.
- [40] 米红旭. 长白山中华秋沙鸭繁殖期巢址选择[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- MI H X. Nest-site selection of scaly-sided merganser in Changbai Mountain range[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [41] 易国栋, 杨志杰, 陈刚, 等. 中华秋沙鸭繁殖习性初报[J]. 动物学杂志, 2008, 43(6): 57-61.
- YI G D, YANG Z J, CHEN G, *et al.* Preliminary observation on breeding behavior of *Mergus squamatus* [J]. Chinese Journal of Zoology, 2008, 43(6): 57-61.
- [42] 赵正阶, 张兴录, 朴正吉, 等. 中华秋沙鸭的生态学研究[J]. 吉林林业科技, 1979, 8(2): 123-128.
- ZHAO Z J, ZHANG X L, PIAO Z J, *et al.* Ecological study of scaly-sided merganser [J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 1979, 8(2): 123-128.
- [43] ZHAO Z J, PAO Z J. The foraging behaviour of the scaly-sided merganser *Mergus squamatus* in the Changbai Mountains and Xiao Xingangling Mountains of China [J]. Forktail, 1998, 14: 76-77.
- [44] SOLOVYEVA D, HOBSON K A, KHARITONOVA N, *et al.* Combining stable hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotopes and geolocation to assign scaly-sided mergansers to moult river catchments [J]. Journal of Ornithology, 2016, 157(3): 663-669.
- [45] XU W Y, GONG Y, WANG H T. Alert time reflects the negative impacts of human disturbance on an endangered bird species in Changbai Mountain, China [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01709.