

## ◆生态环境◆

## 基于 MaxEnt 模型的林芝市越冬赤麻鸭生境适宜性评价\*

陈进勋, 邬玖久, 沈邱筱潇, 申婉青, 邹成成, 王忠斌\*\*

(西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏林芝 860000)

**摘要:**掌握物种的生境需求及其适宜生境的空间分布格局对于物种的保护工作至关重要。本研究通过实地考察和网络检索相结合的方式,收集赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)在林芝市越冬的46个有效分布点,利用最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型预实验和ENMTools工具筛选12个主要环境变量后,运用MaxEnt模型对其适宜生境进行预测分析。结果表明:MaxEnt模型的受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线下面积(Area Under Curve, AUC)值高达0.950,说明该模型具有较高的精度,并且预测结果具有较高的可信度。影响林芝市越冬赤麻鸭选择生境的主要环境变量包括距道路距离(贡献率56.4%)、距水源距离(贡献率9.3%)、最干月份降水量(贡献率8.9%)、土地利用类型(贡献率8.6%)、坡度(贡献率6.2%)以及最冷月份最低温度(贡献率6.1%)。赤麻鸭的适宜生境通常位于距离道路较近、气候条件温和且河岸两侧植被覆盖度较高的水源附近。从适宜生境分布图来看,赤麻鸭的高适宜生境面积仅占总研究区域的1.25%,说明林芝市目前存在较大面积的生态保护空白区域,建议采取措施保护并改善赤麻鸭的生境质量。

**关键词:**赤麻鸭;最大熵模型;生境;适宜性评价

中图分类号:S862 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2025)02-0213-09

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20250722.007

生境是生物完成其生命活动所需的特定环境,适宜的生境对于物种种群的稳定增长和持续发展至关重要。生物的地理分布范围是其生态适应性和扩散能力的体现,因此,了解生物对生境的具体需求以及适宜生境的空间分布对于野生动植物的保护具有重要意义。随着3S[遥感技术(RS)、地理信息系统

(GIS)和全球定位系统(GPS)]技术的发展,对野生动物生境适宜性进行大尺度评价已成为生态学研究热点<sup>[1-3]</sup>。对物种进行生境适宜性评价,定性或定量分析各环境变量对生物生境的影响,是开展生物多样性保护与管理工作的前提<sup>[4]</sup>。物种分布模型(Species Distribution, SDMs)能够利用物种的分布数据

收稿时间:2024-10-05

修回时间:2024-11-08

\* 2023年中央财政林业草原生态保护恢复资金国家级自然保护区补助项目(S202310372050)和2023年全国越冬水鸟林芝地区同步监测项目(2023XZLZ406)资助。

## 【第一作者简介】

陈进勋(1995—),男,在读硕士研究生,主要从事野生动物资源保护与利用研究。

## 【\*\*通信作者简介】

王忠斌(1983—),男,副教授,主要从事野生动植物保护与自然保护地管理研究,E-mail:0823yuan1020@163.com。

## 【引用本文】

陈进勋,邬玖久,沈邱筱潇,等.基于MaxEnt模型的林芝市越冬赤麻鸭生境适宜性评价[J].广西科学院学报,2025,41(2):213-221.

CHEN J X, WU J J, SHEN Q X X, et al. Habitat Suitability Evaluation of Wintering *Tadorna ferruginea* in Nyingchi Based on MaxEnt Model [J].

Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2025, 41(2): 213-221.

和环境数据来预测其潜在的分布区域,并将预测结果以概率形式表达<sup>[5]</sup>。在现有的物种分布模型中,最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型是一种近年来发展迅速的物种分布预测模型,因其在建模过程中所需样本量较小,且预测精度较高,被认为在物种分布预测、生境适宜性评价、珍稀物种保护、外来物种入侵等领域表现出显著的应用优势,即使在样本量较少(如 5—10 个)的情况下,也能提供良好的预测效果。该模型现已多次用于珍稀濒危野生动物的生境适宜性评价,并取得了良好的预测效果<sup>[6-7]</sup>,这使其在生物多样性保护等研究中具有重要的实用价值<sup>[8-11]</sup>。杨丹等<sup>[12]</sup>运用 MaxEnt 模型,结合京津冀地区雁鸭类鸟类的出现位置数据与环境变量,推算出它们的潜在生境范围,并进一步利用等效连接面积(Equivalent Connected Area, ECA)指数评估了 1980—2015 年潜在生境连接性的变化。宗敏等<sup>[13]</sup>则借助 MaxEnt 模型和 GIS 的空间分析手段,深入分析了黄河三角洲滨海湿地中主要物种所依赖的关键环境变量,并估算了它们的生态位参数,从而模拟了该区域主要物种的潜在地理分布。刘伟等<sup>[14]</sup>同样采用了 MaxEnt 模型,筛选对东洞庭湖区 3 种优势鸻鹬类[黑腹滨鹬(*Calidris alpina*)、鹤鹬(*Tringa erythropus*)、反嘴鹬(*Recurvirostra avosetta*)]分布有显著影响的环境变量,构建了一个用于评估水禽生境适宜性的模型。白雪红等<sup>[15]</sup>则利用 GIS 平台和 MaxEnt 模型,对京津冀地区的 8 种濒危水鸟进行了潜在适宜分布区模拟,深入剖析了这些濒危水鸟的地理分布特征,通过保护空缺分析揭示了当前国家自然保护区在覆盖这些濒危水鸟适宜分布区方面的实际情况。

赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)隶属于雁形目(Anseriformes)鸭科(Anatidae)麻鸭属(*Tadorna*),被国家列为“三有”野生保护动物,是一种体型较大的黄褐色鸭类水禽,其体长为 51—68 cm,体质量约为 1.5 kg,体型略大于常见的家鸭。赤麻鸭通常栖息在草原、湖泊以及农田等区域,其食性广泛,包括农作物、水生植物与动物、昆虫等多种食物。赤麻鸭在 4—5 月进入繁殖期,会选择水域周边的洞穴筑巢,每巢可产下 6—10 枚卵,卵呈椭圆形、乳白色,雌鸟负责孵卵<sup>[16]</sup>。赤麻鸭广布于我国各地,繁殖于东北、内蒙古、青海、甘肃和西藏等地,越冬于华北、长江流域至西藏、广东等地<sup>[17]</sup>。在每年 10 月末至 11 月初,赤麻鸭会从繁殖地前往越冬地,在次年 3 月初至 3 月中旬,其会再次迁徙返回繁殖地繁衍后代<sup>[18-19]</sup>。对林芝

市越冬赤麻鸭生境适宜性的研究有助于更好地采取措施保护和改善赤麻鸭的生境,为生物多样性的保护提供相关参考。

本研究通过 MaxEnt 模型与 GIS 技术相结合的方法,对林芝市越冬赤麻鸭的生境适宜性进行预测,首先分析影响赤麻鸭分布的主要环境变量,然后将赤麻鸭的适宜性分布空间进行可视化,预测出赤麻鸭在林芝市的潜在高适宜生境,旨在为今后赤麻鸭的保护提供参考依据。

## 1 材料与方法

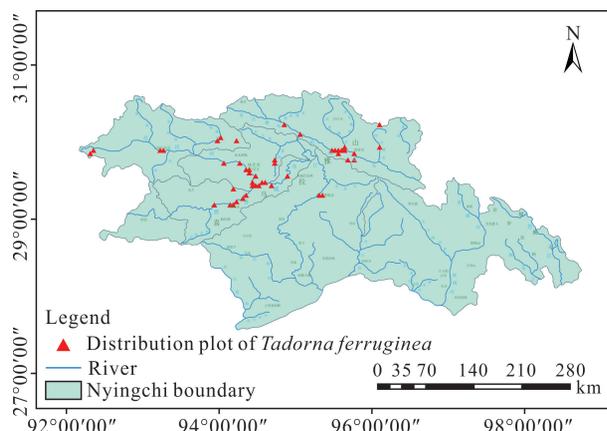
### 1.1 研究区概况

林芝市位于西藏的东南部,坐落于雅鲁藏布江的中下游地区。地理坐标 26°52′—30°40′N, 92°09′—98°47′E。东西方向延伸约 646.7 km,南北宽度约 353.2 km。林芝市下辖巴宜区、米林市、工布江达县、波密县、察隅县、墨脱县、朗县等 7 个县区。林芝市的森林覆盖率达到 46.09%,是中国第三大森林区域,拥有世界最大的陆地垂直地貌落差区域,气候类型极为丰富,从热带到寒带气候均有分布。林芝市还拥有雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区、西藏察隅慈巴沟国家级自然保护区、林芝巴结巨柏自然保护区和西藏工布自治区级自然保护区等总面积约为 30 763 km<sup>2</sup> 的自然保护区。除此之外,还拥有色季拉国家森林公园、巴松措风景区、西藏雅尼国家湿地公园、西藏朱拉河国家湿地公园和西藏嘎朗国家湿地公园等多个国家级公园景区<sup>[20]</sup>。这些自然保护区和国家公园景区的存在,不仅使林芝市成为全球生物多样性热点区域,而且极大改善了野生动植物的宜居环境。林芝市的越冬赤麻鸭主要栖息于河流、湖泊、冬水田及其附近的湿地、灌丛、农田等生境中,这些得天独厚的自然环境为赤麻鸭越冬提供有利条件。

### 1.2 物种分布数据

本研究中赤麻鸭的分布点位数据主要来源于:①全球生物多样性信息平台(<https://www.gbif.org/>)。②中国观鸟记录中心网站(<http://www.Birdreport.cn/>)。③2023 年 12 月 26 日至 2024 年 1 月 25 日设置样点对林芝市越冬水鸟进行同步监测,期间共设置调查样点 91 个,采用直接计数法和集团计数法共监测到越冬水鸟 18 种 4 945 只,其中赤麻鸭 1 614 只。各数据库累计共收集西藏的赤麻鸭分布点 533 个,为确保模型精度并减少空间偏差,使用 ENMTools 工具对具有空间自相关的分布点进行剔

除, 共计筛选出赤麻鸭分布点位 195 个, 使用 ArcGIS 10. 8. 1 软件“分析工具”菜单的裁剪功能共裁剪出林芝市赤麻鸭分布点 46 个(图 1), 并将分布点数据另存为 MaxEnt 模型运行所需要的 CSV 格式<sup>[21]</sup>。



Drawing review number of based map is “藏 S(2024)034 号”。

图 1 林芝市赤麻鸭分布点数据

Fig. 1 Distribution plots data of *Tadorna ferruginea* in Nyingchi

### 1.3 环境数据的收集与处理

地形、植被、气候等生态环境变量是影响野生动物生境适宜性的主要因素<sup>[22]</sup>, 水源距离和人类活动也会影响动物对生境的选择<sup>[23-24]</sup>。根据以往对雁鸭类生境适宜性研究的经验<sup>[25-26]</sup>, 本研究选取 19 个生物气候变量(bio1: 年平均气温; bio2: 平均气温日较差; bio3: 等温性; bio4: 温度季节变化; bio5: 最热月份最高温度; bio6: 最冷月份最低温度; bio7: 年温度变化范围; bio8: 最湿季度平均温度; bio9: 最干季度平均温度; bio10: 最暖季度平均温度; bio11: 最冷季度

表 1 各环境变量来源及贡献率

Table 1 Source and contribution rate of each environmental variables

代码 Code	环境变量 Environmental variable	单位 Unit	数据来源 Data source	贡献率/% Contribution rate/%
bio2	Mean diurnal range	℃	https://www.worldclim.org	0.8
bio3	Isothermality	%	https://www.worldclim.org	0.2
bio6	Minimum temperature of the coldest month	℃	https://www.worldclim.org	6.1
bio7	Temperature annual range	℃	https://www.worldclim.org	2.0
bio14	Precipitation of the driest month	mm	https://www.worldclim.org	8.9
bio15	Precipitation seasonality	mm	https://www.worldclim.org	0.6
slope	Slope	°	https://www.worldclim.org	6.2
aspect	Aspect	°	https://www.worldclim.org	0.4
luce	Land use type		http://www.nesdc.org.cn/	8.6
ndvi	Normalized difference vegetation index		http://www.nesdc.org.cn/	0.5
distowater	Distance to water	m	https://www.gscloud.cn/	9.3
distoroad	Distance to road	m	https://www.gscloud.cn/	56.4

平均温度; bio12: 年降水量; bio13: 最湿月份降水量; bio14: 最干月份降水量; bio15: 降水量季节性变化; bio16: 最湿季度降水量; bio17: 最干季度降水量; bio18: 最暖季度降水量; bio19: 最冷季度降水量)、3 个地形变量(海拔、坡向、坡度)、2 个植被变量(土地利用类型、归一化植被指数)、1 个水源变量(距水源距离)、1 个人为变量(距道路距离)作为环境变量评价其生境适宜性。地形和气候数据下载自全球气候数据中心(https://www.worldclim.org), 其中坡度和坡向等地形数据利用 ArcGIS 10. 8. 1 软件的“表面分析”工具提取。土地利用类型和归一化植被指数的数据来自国家科技资源共享服务平台(http://www.nesdc.org.cn/sdo/list)。距水源距离和距道路距离数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)的中国基础地理数据库, 通过 ArcGIS 10. 8. 1 软件的“欧氏距离”工具获得。为了避免各环境变量之间存在较高的空间共线性, 首先将 26 个环境变量代入 MaxEnt 模型进行预试验, 并且通过 EN-MTools 工具将各环境变量之间相关性  $|r| > 0.8$  的变量剔除, 选择贡献率较高、生态意义明确的变量, 最终保留 12 个环境变量参与 MaxEnt 模型构建(表 1)。将这 12 个环境变量的地理坐标统一更改为 2000 国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000), 并使用最邻近(Nearest)方法对所有环境变量进行重采样, 统一像元大小, 并通过 ArcGIS 10. 8. 1 软件的“SDMtoolbox”工具导出为 MaxEnt 模型支持的 ASCII 文件<sup>[27-28]</sup>。

#### 1.4 MaxEnt 模型运行与评估

将赤麻鸭的有效分布点位数据和经过筛选后的环境变量数据导入 MaxEnt 模型,其中分类环境因素(土地利用类型)被设置为“Categorical”类别,而其他连续环境因素则保留为“Continuous”类别,以确保模型正确处理不同类型的数据。选取 25% 的赤麻鸭分布点作为测试数据集,75% 的赤麻鸭分布点作为训练数据集,采用自举法(Bootstrap),并开启“Random seed”选项对 MaxEnt 模型进行 10 次重复运算<sup>[29]</sup>。在 MaxEnt 模型的高级设置中,迭代次数改为 10 000,启用“Write plot data”选项,以便进行后续的图形绘制和数据统计分析,模型预测结果以“logistic”格式输出<sup>[30]</sup>。选择响应曲线(Response curves)和刀切法(Jackknife)选项来综合评价环境变量对物种分布的影响,其他参数为默认设置。采用受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线下面积(Area Under Curve, AUC)值作为 MaxEnt 模型预测效果的评估指标, AUC 值的范围为 0—1,一般认为  $0.5 < AUC \leq 0.6$  为失败,  $0.6 < AUC \leq 0.7$  为较差,  $0.7 < AUC \leq 0.8$  为一般,  $0.8 < AUC \leq 0.9$  为较好,  $0.9 < AUC \leq 1$  为极好; AUC 值越接近 1,表示模型的预测效果越好,越能反映物种分布数据与环境变量之间高度的耦合性<sup>[31]</sup>。通过调用 R 4.3.0 软件的“Kuenm 包”对 MaxEnt 模型的特征组合(Feature Combination, FC)和正则化乘数(Regularization Multiplier, RM)进行优化。其中 FC 设置为 L、H、LQ、LQH、LQHP 和 LQHPT(L 表示线性要素、Q 表示二项式要素、P 表示乘积要素、T 表示阈值要素、H 表示铰链要素), RM 设置为 0.5—4.0,步长设置为 0.5,共生成 48 个组合。在候选模型中,赤池信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)最低的模型被确定为最优模型<sup>[32-33]</sup>。本次优化中, FC 和 RM 为 LQ+1 时模型的 AIC 最低,因此,使用以上 FC 和 RM 构建 MaxEnt 模型。最后,为确保赤麻鸭适宜生境分布图的可靠性,将在 MaxEnt 模型中重复计算 10 次得到的最大训练敏感性和特异性(Maximum Training Sensitivity Plus Specificity, MTSS)和平衡训练遗漏率、预测面积及阈值(Balance Training Omission, Predicted Area and Threshold Value, TPT)的平均值分别作为赤麻鸭适宜生境和不适宜生境的分类阈值。将 MaxEnt 模型输出文件导入 ArcGIS 10.8.1 软件重新划分高适宜生境、中适宜生境、低适宜生境和不适宜生境<sup>[34-35]</sup>,根据图层中的栅

格数计算这 4 个等级的适宜生境面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 MaxEnt 模型的预测精度

根据 AUC 值评估 MaxEnt 模型的预测效果。本研究中, AUC 值为 0.950(图 2),表明 MaxEnt 模型具有较高的预测准确性,该模型能够有效预测赤麻鸭的适宜生境分布,其预测结果具有较高的可信度。

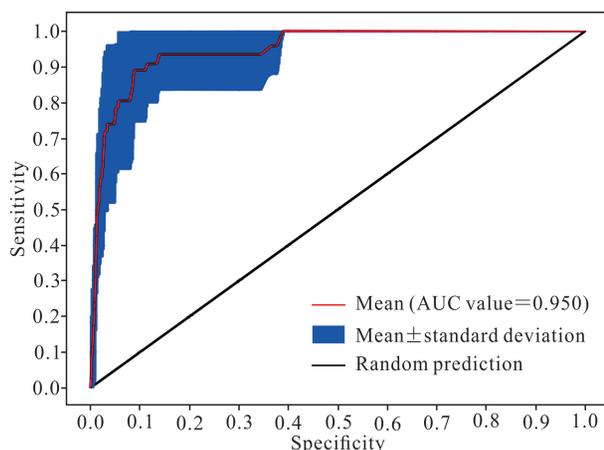


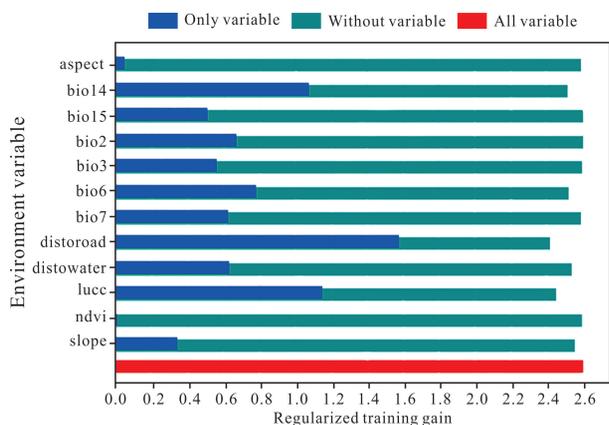
图 2 ROC 曲线验证结果

Fig. 2 ROC curve verified results

### 2.2 各环境变量的重要性

在参与 MaxEnt 模型构建的 12 个环境变量中,有 6 个变量的贡献率超过 6%,其累计贡献率达到 95.5%(表 1),在模型预测中起到了决定性作用。贡献率最高的环境变量是距道路距离,贡献率高达 56.4%,表明其对赤麻鸭的生境选择影响最为显著;距水源距离的贡献率为 9.3%;最干月份降水量(bio14)和土地利用类型的贡献率分别为 8.9% 和 8.6%;坡度和最冷月份最低温度(bio6)的贡献率分别为 6.2% 和 6.1%。对环境变量贡献率的分析有助于更好地理解赤麻鸭的生态需求,为制定有效的保护措施和生境管理策略提供科学依据。

采用刀切法对 12 个环境变量进行权重分析,以确定其对赤麻鸭越冬的影响程度。在图 3 中,深蓝色条带的长度代表各变量的权重得分,得分越高,表明该环境变量对赤麻鸭选择生境的影响越大<sup>[36]</sup>。结果显示距道路距离、距水源距离、土地利用类型单独用于建模时,对预测结果影响较大。相对而言,归一化植被指数和坡向对赤麻鸭生境预测结果影响较小。



Distoroad: distance to road; distowater: distance to water; lucc: land use type; ndvi: normalized difference vegetation index.

图3 刀切法分析环境变量对赤麻鸭生境的重要性

Fig. 3 Importance of environmental variables for *Tadorna ferruginea* habitat analyzed by Jackknife method

### 2.3 主要环境变量响应曲线

如图4所示,由MaxEnt模型模拟得到赤麻鸭分布与各主要环境变量响应曲线,存在概率越高说明此范围内越适合赤麻鸭生存<sup>[37-38]</sup>。在研究区内,距道路

距离是影响赤麻鸭选择生境的最重要因素,响应曲线显示,赤麻鸭的适宜生境离道路越近时,其存在概率数值越高;在距主要道路约15.6 km处,赤麻鸭的存在概率大于0.7[图4(a)]。距水源距离是影响赤麻鸭选择生境的另一个关键因素,从响应曲线中可以看出,越靠近水源,赤麻鸭的存在概率越高,说明赤麻鸭的生存对水源的依赖性较高[图4(b)]。在最干月份降水量的响应曲线中,当降水量在145—189 mm时最适宜赤麻鸭的生存,其存在概率均大于0.8;在降水量为152 mm时,赤麻鸭的存在概率达到最高值0.87[图4(c)]。从土地利用类型的响应曲线来看,赤麻鸭更热衷于在耕地中的水浇地、乡村居民点和其他农用地中活动,其存在概率均达到0.7以上[图4(d)]。坡度的响应曲线反映出赤麻鸭更喜欢处于下坡或坡度平缓处;在下坡时其存在概率最高,达0.98[图4(e)]。最冷月份最低温度的响应曲线呈现单峰型,当温度在-6.5至-5.2℃时,赤麻鸭的存在概率大于0.7;当温度为-5.8℃,其存在概率达到峰值0.75[图4(f)]。

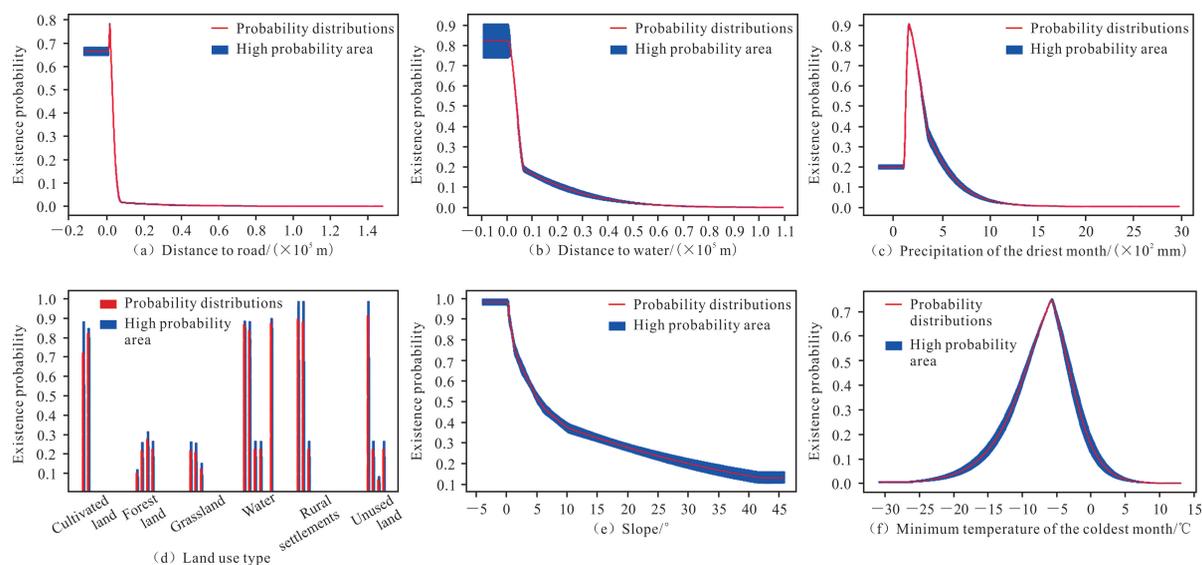


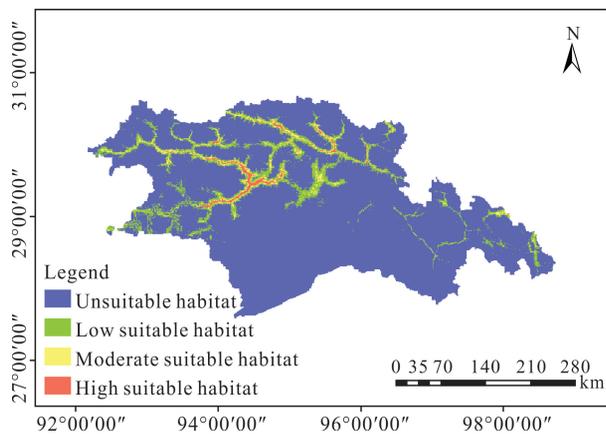
图4 主要环境变量的响应曲线

Fig. 4 Response curve of main environmental variables

### 2.4 赤麻鸭的适宜生境预测

通过MaxEnt模型计算后得到 $MTSS=0.215$ ,  $TPT=0.065$ ,因此赤麻鸭适宜生境和不适宜生境的分类阈值分别为0.215和0.065,即(0.500, 1.000]为高适宜生境, (0.215, 0.500]为中适宜生境, (0.065, 0.215]为低适宜生境, [0.000, 0.065]为不适宜生境,最终形成赤麻鸭在林芝市的适宜生境分布图

(图5)。从赤麻鸭的适宜生境分布图来看,高适宜生境主要分布在巴宜区、米林市、波密县和工布江达县的水源附近。研究区总面积为114 870 km<sup>2</sup>,其中高适宜生境的面积为1 433.34 km<sup>2</sup>,仅占研究区的1.25%;不适宜生境面积的占比最高,达91.58%(表2)。



Drawing review number of based map is “藏 S(2024)034 号”.

图 5 赤麻鸭适宜生境分布

Fig. 5 Distribution of suitable habitats for *Tadorna ferruginea*

表 2 各生境面积占比

Table 2 Proportion of each habitat area

适宜生境等级 Suitable habitat level	面积/km <sup>2</sup> Area/km <sup>2</sup>	占比/% Proportion/%
High suitable habitat	1 433.34	1.25
Moderate suitable habitat	2 193.78	1.91
Low suitable habitat	6 040.88	5.26
Unsuitable habitat	105 202.00	91.58

### 3 讨论

本研究采用的赤麻鸭分布点位数据是综合多个数据库和实地调查结果得到的,共筛选出 46 个有效分布点,这些分布点符合运行 MaxEnt 模型所需的条件。为了提高 MaxEnt 模型的预测精度,在预试验阶段结合 ENMTools 工具进行相关性分析,识别并去除相关性较高但对模型贡献率较低的环境变量,运用 R 4.3.0 软件的“Kuenm 包”对 MaxEnt 模型的 FC 和 RM 进行优化,确保预测结果的可靠性和有效性。研究结果显示,MaxEnt 模型的 AUC 值为 0.950,这一高值表明预测结果具有较高的准确性,该模型在预测赤麻鸭适宜生境方面具有可靠性,能够为赤麻鸭种群的保护工作提供科学依据和实际帮助。

在生态学研究中,物种的生境选择是一个复杂的过程,涉及对多种环境因素的综合评估。物种在进行生境选择时,会根据其生物学需求和生态偏好,对不同的环境组分进行评估和响应。它们倾向于选择能够提供最佳生存条件的微生境组合,以最大限度地满足其生存需求<sup>[15,39]</sup>。本研究揭示了影响越冬赤麻鸭生境选择的关键环境变量,分别为距道路距离、距水

源距离、最干月份降水量、土地利用类型、坡度和最冷月份最低温度 6 个环境变量,这些环境变量对赤麻鸭选择适宜越冬地具有显著的影响。根据各环境变量的响应曲线来判断适宜赤麻鸭生存的环境变量与存在概率的关系。距道路距离的响应曲线表明,赤麻鸭的存在概率与距道路距离成正比,在距离主要道路约 15.6 km 时,赤麻鸭的存在概率大于 0.7。气候和水文条件对物种的生境选择和分布具有显著影响,林芝市降水充沛,拥有丰富的地表水和地下水资源,这为赤麻鸭等水禽提供了充足的水源。在距水源距离的响应曲线中,距离水源越近赤麻鸭的存在概率越高,这表明赤麻鸭的生境选择在很大程度上也受到水源的影响。赤麻鸭作为水鸟主要栖息于江河、湖泊、河口、水塘及其附近的草原、荒地、沼泽、沙滩、农田和平原疏林等各类生境中,尤其喜欢平原上的湖泊地带<sup>[16]</sup>。但本研究发现距道路距离是影响赤麻鸭生境选择的最主要因素,究其原因主要是研究区的道路和水域具有高度相关性,且根据常家传等<sup>[19]</sup>的研究发现赤麻鸭比其他鸭类更喜在岸上活动。此外,冬天的低温可能导致河流结冰,这限制了赤麻鸭的食物来源并使其到岸上觅食,进而使它们的生存条件恶化。所以当距道路距离和距水源距离同为影响变量时,距道路距离的影响会更加显著。在土地利用类型上,赤麻鸭更热衷于在水浇地、牧草地和其他农用地中活动,其出现概率均在 0.7 以上,这一点与宋亚统等<sup>[40]</sup>在青海湖研究赤麻鸭的生境选择时得到的结论大致相同。坡度也是影响赤麻鸭分布的一个重要变量,赤麻鸭更喜欢选择下坡或坡度平缓的地点,处于下坡时其存在概率最高,为 0.98。温度和降水对鸟类的地理分布和物种多样性具有显著的影响,而不同种类的鸟类在适应这些气候要素方面表现出各自独特的反应模式。这也反映了它们在生态位、生理需求和行为策略上的多样性<sup>[41]</sup>。例如,遗鸥(*Ichthyaeetus relictus*)对温度变化的敏感度较高,而白琵鹭(*Platalea leucorodia*)则更倾向于选择在干旱季节降水量为 4 mm 的地区栖息<sup>[42]</sup>。对于赤麻鸭而言,其生境适宜性与气候条件密切相关,适宜的温度和充足的降水为赤麻鸭提供了良好的生存环境,从而提高了其生境的适宜性。其越冬区域的分布主要受气温和降水量的影响,低温可能导致河流结冰,而降水量的减少则可能导致河流流量降低,这些气候条件的变化会影响赤麻鸭的觅食行为,因为它们偏爱在一定流速的水流中觅食。如果河流结冰或流量减少,这可能无法形成赤麻鸭所

需的水流环境,从而限制了它们的食物来源和生存条件。本研究表明,当最干月份降水量在 145—189 mm,赤麻鸭的生境适宜性最佳,在 152 mm 左右时赤麻鸭的存在概率达到最高值 0.87,当最冷月份最低温度在 $-6.5$ 至 $-5.2$  °C时,赤麻鸭存在概率大于 0.7,当温度在 $-5.8$  °C时,其存在概率达到峰值 0.75。

本研究探明了影响林芝市越冬赤麻鸭生境分布的主要环境因素及适宜它们生存的环境条件范围。同时还预测了赤麻鸭在林芝市的高适宜生境区域,为进一步研究赤麻鸭越冬种群的分布情况提供了坚实的基础。这些发现对于指导赤麻鸭种群的保护工作至关重要,有助于相关部门制定更加科学和有效的保护措施。

由于数据获取的限制,本研究未能包含所有可能影响赤麻鸭越冬分布的环境变量,经过研究团队仔细筛选,最终选取了 12 个与赤麻鸭越冬分布密切相关的环境变量进行深入分析。然而,水质、流速、赤麻鸭的食物丰富度(如昆虫、谷物、蛙类、甲壳动物、虾和水生植物)等其他因素可能对赤麻鸭的分布有更细微的影响。此外,生物因素,如捕食者白尾海雕(*Haliaeetus albicilla*)、同域竞争者绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)和斑头雁(*Anser indicus*)等,也可能限制赤麻鸭的分布范围,进而压缩其适宜的生存空间。后续研究将考虑更广泛的环境变量,进一步深入调查赤麻鸭在林芝市不同适宜生境区域的分布规律和越冬行为,为赤麻鸭越冬种群的恢复、全面保护以及完善相关管理措施提供科学的理论支持。

#### 4 结论

本研究通过网络检索和实地考察相结合的方式,收集了赤麻鸭在林芝市越冬的 46 个有效分布点,筛选了影响赤麻鸭分布的 12 个主要环境变量,并运用 MaxEnt 模型对其适宜生境进行预测分析。MaxEnt 模型的 AUC 值为 0.950,表明该模型预测结果达到优秀水平。结果显示影响赤麻鸭在林芝市越冬分布的主要环境变量为距道路距离、距水源距离、最干月份降水量、土地利用类型、坡度以及最冷月份最低温度。采用刀切法对环境变量进行权重分析,结果表明,距道路距离、距水源距离、土地利用类型单独用于建模时,对预测结果影响较大;而归一化植被指数和坡向对赤麻鸭生境预测结果影响较小。研究区的总面积为 114 870 km<sup>2</sup>,其中赤麻鸭的高适宜生境的面积

为 1 433.34 km<sup>2</sup>,仅占研究区的 1.25%,而不适宜生境面积的占比高达 91.58%。从赤麻鸭的适生区分布图来看,高适宜生境主要分布在巴宜区、米林市、波密县和工布江达县的水源附近。但目前林芝市仍存在较大面积的生态保护空白区域,应该采取措施保护和改善赤麻鸭的生境质量。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] BELL J R, BOTHAM M S, HENRYS P A, et al. Spatial and habitat variation in aphid, butterfly, moth and bird phenologies over the last half century [J]. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1982-1994.
- [3] 陈俊达,姚志诚,石锐,等. 基于 MaxEnt 模型的贺兰山西坡啮齿动物生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4209-4216.
- [4] 肖焱,欧阳志云,朱春全,等. 岷山地区大熊猫生境评价与保护对策研究[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1373-1379.
- [5] 李国庆,刘长成,刘玉国,等. 物种分布模型理论研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [6] 牟超盛,齐旭明,谢林顺,等. 应用 MaxEnt 模型预测海南溪树蛙地理分布[J]. 野生动物学报, 2021, 42(3): 809-816.
- [7] 李宏群,牛常会,韩培士,等. 基于 MaxEnt 模型的褐马鸡西部种群适宜栖息地研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(4): 499-504.
- [8] 吴庆明,王磊,朱瑞萍,等. 基于 MaxEnt 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析:以扎龙保护区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [9] 郝雪娜,吴艳兰. 基于 MaxEnt 模型的越冬白头鹤适宜生境预测[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(4): 591-597.
- [10] 张丹华,胡远满,刘森. 基于 MaxEnt 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2329-2337.
- [11] KUMAR P. Assess men to impact: limitations and challenges [J]. Biodiversity and Conservation, 2012, 21(5): 1251-1266.
- [12] 杨丹,王文杰. 1980—2015 年京津冀地区雁鸭类潜在栖息地连接度变化及驱动因素[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 547-556.
- [13] 宗敏,韩广轩,栗云召,等. 基于 MaxEnt 模型的黄河三角洲滨海湿地优势植物群落潜在分布模拟[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1833-1842.
- [14] 刘伟,孙富云,高翔. 东洞庭湖湿地优势鹈类物种栖息地适宜性研究[J]. 野生动物学报, 2017, 38(4): 603-607.

- [15] 白雪红,王文杰,蒋卫国,等. 气候变化背景下京津冀地区濒危水鸟潜在适宜区模拟及保护空缺分析[J]. 环境科学研究,2019,32(6):1001-1011.
- [16] 董向阳. 包头南海子湿地鸟类多样性及常见种重金属暴露风险评估研究[D]. 包头:包头师范学院,2023.
- [17] 谢文冬,贾嘉,格桑旺杰,等. 青海祁连山国家公园赤麻鸭早春繁殖记述[J]. 动物学杂志,2022,57(5):695,706.
- [18] 余志伟,满亚伟. 赤麻鸭种群的繁殖生态研究[J]. 生态学报,1994,14(2):201-204.
- [19] 常家传,于达敏,刘英铎. 赤麻鸭越冬生态观察[J]. 动物学杂志,1997,32(6):32-35.
- [20] 李建川,米玛吉巴,廖秋,等. 西藏林芝市珍稀濒危野生动物资源与保护[J]. 高原农业,2019,3(6):632-641,688.
- [21] 李瑞,杨建欣,马长乐,等. 基于 MaxEnt 模型的昆明市国家重点保护鸟类栖息地适宜性评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2024,44(5):165-175.
- [22] 钟明,侍昊,安树青,等. 中国野生动物生境适宜性评价和生境破碎化研究[J]. 生态科学,2016,35(4):205-209.
- [23] 王征,张旭晖. 野生动物觅食地选择的研究进展[J]. 生态学杂志,2014,33(11):3150-3156.
- [24] 吴文,李月辉,胡远满,等. 不同营林面积情景下鹿科动物的潜在生境分布[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2705-2713.
- [25] 孙雪莹,张琦,吴庆明,等. 向海保护区青头潜鸭繁殖栖息地的适宜性[J]. 东北林业大学学报,2021,49(9):112-118.
- [26] 陈梦缘,汪生财,路琦,等. 环渤海海岸带水鸟栖息地适宜性评价及影响因素[J]. 生态学杂志,2024,43(4):1152-1160.
- [27] 冯国晨. 基于 3S 技术的栗斑腹鹑内蒙古东部种群适宜栖息地选择和景观格局研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
- [28] 颜尉珂,雷宇,王磊,等. 人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响[J]. 生态学报,2023,43(24):10387-10398.
- [29] 黄青东智,陈刘阳,李尚鹏,等. 道路对三江源国家公园黄河源园区藏野驴和藏原羚种群数量及其栖息地的影响[J]. 兽类学报,2022,42(1):34-48.
- [30] 刘伟,李旭琴,李忠伦,等. 四川贡嘎山中华斑羚和中华鬣羚的时空分布及重叠性[J]. 应用生态学报,2023,34(6):1630-1638.
- [31] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science,1988,240(4857):1285-1293.
- [32] 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[J]. 应用生态学报,2019,30(6):2116-2128.
- [33] 曾晓明,杨莹,巩匆然,等. 三江源地区藏野驴、藏原羚栖息地适宜性评价及动态趋势[J]. 四川动物,2023,42(4):371-380.
- [34] 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.
- [35] 油志远,王茗,鲁碧耕,等. 基 MaxEnt 模型预测蓝马鸡的潜在分布区[J]. 生态学杂志,2022,41(11):2271-2277.
- [36] 牛沛航,冯艳芬,王芳. 粤港澳大湾区珍稀濒危动物适宜分布区[J]. 生态学杂志,2021,40(8):2467-2477.
- [37] 文泽宇,邓睿,杨威,等. 基于 MaxEnt 模型预测斑尾榛鸡在中国的潜在适生区[J]. 三峡生态环境监测,2023,8(2):67-74.
- [38] ZHANG Z Q, QIN C J, FANG D A, et al. Genetic diversity of the endangered scaly-sided merganser (*Mergus squamatus*) in the wintering habitat of central-Southern China [J]. Genetics and Molecular Research, 2013,12(3):3103-3109.
- [39] 陆远鸿,翁晓东,卢萍,等. 江西鄱阳湖鲤鱼洲白鹤小镇鸟类多样性研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2021,45(2):172-179.
- [40] 宋亚统,罗泽,郑若冰. 青海湖地区赤麻鸭家域和栖息地选择的研究[J]. 科研信息化技术与应用,2016,7(4):38-45.
- [41] 邵明勤,曾宾宾,尚小龙,等. 江西鄱阳湖流域中华秋沙鸭越冬期间的集群特征[J]. 生态学报,2012,32(10):3170-3176.
- [42] 李敏,李秀明,徐家慧,等. 基于 MaxEnt 模型预测白琵鹭在中国东北地区的适宜分布区[J]. 生态学杂志,2020,39(8):2691-2703.

## Habitat Suitability Evaluation of Wintering *Tadorna ferruginea* in Nyingchi Based on MaxEnt Model

CHEN Jinxun, WU Jiujiu, SHEN Qiuxiaoxiao, SHEN Wanqing, ZOU Chengcheng,  
WANG Zhongbin<sup>\* \*</sup>

(Resource & Environment College, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang, 860000, China)

**Abstract:** Mastering the habitat needs of species and the spatial distribution pattern of suitable habitats is crucial for the protection of species. In this study, 46 effective distribution points of *Tadorna ferruginea* overwintering in Nyingchi were collected through field investigation and network retrieval. After using the Maximum Entropy (MaxEnt) model pre-experiment and ENMTools tool to screen 12 major environmental variables, the MaxEnt model was used to predict and analyze its suitable habitat. The results showed that the Area Under Curve (AUC) value of the Receiver Operating Characteristic (ROC) in the MaxEnt model was as high as 0.950, which indicated that the model had high accuracy and the prediction results had high credibility. The main environmental factors affecting the overwintering habitat selection of *T. ferruginea* in Nyingchi included distance from roads (contribution rate 56.4%), distance from water sources (contribution rate 9.3%), precipitation in the driest month (contribution rate 8.9%), land use type (contribution rate 8.6%), slope (contribution rate 6.2%), and minimum temperature in the coldest month (contribution rate 6.1%). The suitable habitats for *T. ferruginea* are usually located near the water source with close distance to the road, mild climatic conditions and high vegetation coverage on both sides of the river bank. From the distribution map of suitable habitats, the high suitable habitat area of *T. ferruginea* only accounts for 1.25% of the total study area, which indicates that there is a large area of ecological protection blank area in Nyingchi, and it is recommended to take measures to protect and improve the habitat quality of *T. ferruginea*.

**Key words:** *Tadorna ferruginea*; maximum entropy model; habitat; suitability evaluation

责任编辑:梁 晓,于子涵



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>