

DOI: 10.5846/stxb202009052308

李雨, 卢柳妍, 田秀华, 段玉宝. 东方白鹳在山东省适宜栖息地的分布预测. 生态学报, 2023, 43(6): 2194-2201.

Li Y, Lu L Y, Tian X H, Duan Y B. Prediction of the suitable habitat distribution of Oriental White Stork in Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2194-2201.

东方白鹳在山东省适宜栖息地的分布预测

李 雨^{1,3}, 卢柳妍³, 田秀华², 段玉宝^{1,3,*}

1 西南林业大学云南省高校极小种群野生动物保育重点实验室, 昆明 650224

2 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040

3 西南林业大学生物多样性保护学院, 昆明 650224

摘要: 东方白鹳 (*Ciconia boyciana*) 隶属鹳形目 (Ciconiiformes) 鹳科 (Ciconiidae) 鹳属 (*Ciconia*), 被 IUCN 濒危物种红色名录列为濒危 (EN), 主要繁殖于俄罗斯远东地区与中国东北三江平原, 在长江中下游鄱阳湖等沿海内陆湖泊越冬。山东省从 2003 年开始有东方白鹳繁殖记录, 黄河三角洲为该物种在山东省的主要繁殖地。以在黄河三角洲自然保护区收集到的位点数据、物种分布数据库 (GBIF) 提取的位点数据和山东省环境气候因子为基础数据, 基于最大熵 (Maxent) 模型和地理信息系统 (ArcGIS) 技术平台, 预测东方白鹳在山东省的潜在适生区。结果表明在该物种在黄河三角洲及附近地区存在较集中的高适宜区, 庙岛群岛和微山湖地区存在少量高适宜区, 高适宜区总面积为 1359.27 km²; 北至河北边界, 南至微山县, 沿黄河支流至西到达聊城市、菏泽市, 存在 1893.82 km² 较适宜区和 3955.63 km² 低适宜区。潜在适宜生境总和为 7208.72 km², 占比为研究区域的 0.89%。新出现的较为集中的较适宜区在微山湖周围地区, 此地目前并无该物种出现的记录。通过对环境因子分析得知, 东方白鹳选择适宜栖息地时更倾向于选择的植被类型是灌丛和草甸, 土地利用类型是沼泽地、滩涂与河渠, 远离道路, 显著影响东方白鹳选择适宜区的气候因子是最暖季度降雨量和最干月份降雨量。研究旨在探究何种环境因子影响东方白鹳对适宜栖息地的选择, 为该物种的栖息地管理和保护区建立提供科学依据, 进而促进该物种种群和栖息地保护。

关键词: 东方白鹳; 最大熵 (Maxent) 模型; 适宜栖息地; 环境因子

Prediction of the suitable habitat distribution of Oriental White Stork in Shandong Province

LI Yu^{1,3}, LU Liuyan³, TIAN Xiuhua², DUAN Yubao^{1,3,*}

1 Key Laboratory for Conserving Wildlife with Small Populations in Yunnan, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 College of Wildlife Resource, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3 Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: The Oriental White Stork (*Ciconia boyciana*) belongs to the Ciconiiformes Stork family (Ciconiidae) and the Stork genus (*Ciconia*). It is an endangered (EN) species on the International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List and is the national first-level protected wildlife. They mainly breed in the Far East of Russia and the Sanjiang Plain in Northeast China and overwinter in coastal inland lakes such as Poyang Lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Shandong Province has recorded the reproduction of the Oriental White Stork since 2003. The Yellow River Delta is the main breeding ground for this species in Shandong Province. The purpose of this study is to explore what environmental factors affect the selection of suitable habitats for the Oriental White Stork. This article uses the site data collected in the Yellow River Delta Nature Reserve, the site data extracted from the Species Distribution Database (GBIF)

基金项目: 云南省基础研究计划项目 (20210AT070040, 2019FD0070)

收稿日期: 2020-09-05; 网络出版日期: 2022-11-03

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

and the environmental and climate factors of Shandong Province as the basic data, based on the Maximum Entropy (Maxent) model and geographic information system (ArcGIS), and predicts the potential suitable area of the Oriental White Stork in Shandong Province. The results show that the most suitable habitat for the species is concentrated in the Yellow River Delta and nearby areas. From the border of Hebei in the north of Shandong Province to Weishan County in the south, along the tributaries of the Yellow River to the west to Liaocheng City and Heze City, there are 3955.63 km² low suitable areas and 1893.82 km² more suitable area. The total potential suitable habitat is 7208.72 km², of which the most suitable area is 1359.27 km², accounting for 0.89% of the study area. The newly emerged more concentrated and more suitable patches are in the area around Weishan Lake, where there is currently no record of this species. Through the analysis of environmental factors, it is known that the vegetation types that the Oriental White Stork prefers to choose when choosing suitable habitats are shrubs and meadows, and the land use types are swamps, tidal flats and canals far away from roads. The climatic factors that significantly affect the Oriental White Stork's selection of suitable areas are the warmest quarter rainfall and the driest month rainfall. The results provide basic scientific evidence for the habitat management and establishment of the protected areas for this species, and promote the protection of the species' population and habitat.

Key Words: Oriental White Stork; Maxent model; suitable habitat; environmental factors

物种分布模型是一种利用物种分布与环境因子之间的关系分析和估计该目标物种在研究区域分布情况的模型^[1],近年来被普遍应用于野生动物潜在适生区的预测中^[2-3]。其中最大熵模型(Maximum Entropy, 以下称 Maxent)是一种较为经典的基于最大熵理论建立的生态位模型,应用较为广泛^[3-4]。相比提升回归树算法(Boosted Regression Tree, BRT)、生态位因子分析模型(Ecological Niche Factor Analysis, ENFA)、广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)等物种分布模型,Maxent 模型运算具有操作相对简单,运算时间短的优点,且在样本量较少的条件下也具有较好的表现^[5-6],运行结果较为稳定、准确^[1],在对濒危野生动物的适宜栖息地预测与适宜生境评估方面有较大优势。

东方白鹳(*Ciconia boyciana*)隶属鹳形目(Ciconiiformes)鹳科(Ciconiidae)鹳属(*Ciconia*),被 IUCN 濒危物种红色名录列为濒危(EN)^[7],是国家一级重点保护野生动物,全球范围内现存数量约为 2500 只^[8],该物种主要在我国东北及俄罗斯远东地区进行繁殖^[9],在长江中下游鄱阳湖等沿海内陆湖泊越冬^[10,11]。自 2003 年山东黄河三角洲国家级自然保护区首次有东方白鹳繁殖记录以来,近二十年来该保护区东方白鹳的保育工作效果显著,已成为中国最大的东方白鹳繁殖地之一^[12],在保护区内繁殖的东方白鹳数量也逐年上升^[13]。东方白鹳作为濒危物种,国内外学者对其人工繁殖与饲养^[14-15]、行为学^[16-17]、分子遗传^[18,11]、迁徙^[19]等方面开展了较为详细的研究。针对生境选择与景观生态方面,许多学者进行研究^[20-22],但在较大地理尺度下基于环境数据使用物种分布模型预测其适生区方面仍缺乏研究与报道。为此,本文将利用 Maxent 模型,基于物种分布数据及植被,土地利用、气候数据等环境数据,来预测东方白鹳在山东省内的适宜栖息地分布,分析是何种环境因子影响该物种对栖息地的选择,为未来高效地开展东方白鹳及其适宜栖息地的保护工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

1.1.1 东方白鹳分布数据

本次研究通过两种途径获得东方白鹳的分布数据:①2008—2009 年,通过实地调查获得东方白鹳在黄河三角洲繁殖利用的巢址位点。②查询物种分布数据库,在全球生物多样性信息网络(GBIF)中国科学院节点(<http://www.gbifchina.org/>)中国动物主题数据库下的中国鸟类数据库里,获得在中国分布的东方白鹳 12 个经纬度分布数据,来源均为“人类调查”。

将收集到的 29 个分布点坐标保存为 *.CSV 格式,包括物种拉丁文名称和小数格式经纬度。

1.1.2 环境数据的收集与预处理

模型所需的植被类型、距道路距离、土地利用类型、距河流距离,以及生物气候因子(19个变量),共23个环境变量分别来自。①植被类型在中国科学院环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122>)下载1km分辨率的2018中国100万植被类型空间分布数据的栅格数据集。②距道路距离数据需要对山东省主要道路数据进行缓冲区分析,山东省主要道路数据来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/about>)中2015年山东省路网矢量数据,道路类型有高速公路、铁路和其他主要道路(国道、省道、环路等)。③土地利用数据来源于中国科学院环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122>,下同),所需数据为2018年1km中国土地利用遥感监测数据中山东省部分,以此图层作为山东省边界处理其他数据。其中包括6个一级类型和25个二级类型。④距河流距离数据需要山东省水系河网数据为基础进行缓冲区分析,山东省水系河网数据来源于中国科学院环境科学数据中心下载基于DEM数据提取的2015年中国流域、河网数据集,该数据集包括了全国河网及其子流域。⑤生物气候数据来自世界气候数据库WorldClim(<http://worldclim.org/version2>),包括年均温(bio1)、昼夜温差日均值(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变化的标准差(bio4)等分辨率为30 seconds的全球19个气候因子的栅格数据。

裁剪过后,按照研究区域内具有的植被与土地类型将植被类型与土地利用类型数据重新编号,再将道路数据和河流数据在ArcGIS 10.2中进行缓冲区处理,然后将所有环境变量的空间分辨率统一重采样为 30×30 arc-sec(约1km),最后将得到的所有环境因子栅格数据以山东省土壤数据为准进行掩膜处理和投影,坐标系转换成wgs1984,统一像素大小,将栅格数据转换成Maxent中模拟所需要的*.asc格式。

1.1.3 环境变量的筛选

由于在物种分布模型中,环境变量的多重共线性将会使模型过度拟合,导致模型精确性降低,应对环境变量间的相关性分析后才可应用于生态位模型中^[23-24]。为排除多重共线性,对23个环境变量进行共线性分析和斯皮尔曼(Spearman)秩相关分析来检验环境变量间的共线性。若两个环境变量间的相关性 $>\pm 0.8$ 或斯皮尔曼系数 <0.75 ,那么将其中生物学意义比较重要的变量选入模型^[25-26]。根据Maxent全部变量试运行结果排除对模型贡献率低的环境变量,最终获得12个气候变量(bio1、bio2、bio5、bio6、bio7、bio8、bio9、bio10、bio11、bio13、bio14、bio18),土地利用(land use),植被类型(vegetation),距道路距离(road distance),距河流距离(water distance)共16个变量(表1)。

1.2 模型运行方法与参数

将分布数据和环境变量都导入Maxent v3.3.3软件。在所有环境变量中,土地利用类型与植被类型数据为分类数据,在导入Maxent软件后将数据形式从连续(Continuous)改为非连续(Categorical)。测试集(Testing Data)为分布数据中随机的75%,训练集(Training Data)为剩下的25%,勾选刀切法检验(Jackknife),正则化乘数值(Regularization Multiplier)为1,重复运营次数(Replicates)为10,重复运行类型(Replicated Run Type)为Bootstrap,最大迭代次数(Maximum Iteration)设置为1000次,应用阈值规则(Apply threshold rule)选择10%的培训。

本次模型模拟选择使用刀切法判断主导物种分布的环境变量及其重要性贡献率。使用刀切法在模型中进行预测时需要一次减少一个环境变量,在没有该变量时使用其余变量建模然后只使用该变量进行建模最后再次使用全部变量进行建模,按此方式迭代多次后得出最终结论^[27]。

本模型采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,以下称ROC曲线)确定模型的精准度。ROC曲线分析是目前公认的关于适生区分析的最佳评价方法,该曲线与x轴围成面积的值为AUC(Area Under the Curve)值,其均值往往为0.5—1之间的小数^[21]。通常,根据AUC评价指标,AUC值大于0.8即视为模型有较高精准度,有参考价值,若AUC值大于0.9则视该模型有非常高的精准度,极有参考价值^[28]。

1.3 适生区分级

模型模拟出的结果是根据栖息地适宜度指数(habitat suitability index, HSI)数值划分的*.asc文件,数值

范围为 0—1,适宜度随着数值增大而增大。根据 IPCC^[29] 选择一种适合的对可能性进行评估的划分方法即自然断点分级法 (Natural Breaks), 将模型预测出的适生区分为四级: $0.001 < \text{HSI} \leq 0.105$ 为非适宜区; $0.105 < \text{HSI} \leq 0.316$ 为低适宜区; $0.316 < \text{HSI} \leq 0.625$ 为较适宜区; $0.625 < \text{HSI} \leq 0.997$ 为高适宜区。

2 结果与分析

2.1 模型可信度分析

ROC 曲线评价曲线如图 1, 模型预测 AUC 值为 0.998, 表明本次模型预测结果精准且具备极高的可信度, 达到优秀水平。

2.2 影响东方白鹳适生区分布的环境变量分析

通过刀切法检验得出模型中环境变量的贡献率、重要性和训练 AUC 值(表 1, 图 2), 检验结果表明, 植被类型、土地利用类型和距道路距离变量为贡献率排在前三的变量, 累计贡献率为 90.12%。在各变量基于训练 AUC 值的刀切法检验结果(图 3)中, 植被类型在“除此变量”时训练得分大幅度降低, 说明若缺少该环境因子, 模型精准度将会下降, 对该物种分布产生影响较大。

生物气候因子中, 从贡献率看, 最干月份降雨量 (bio14) 对模型的贡献率最高, 昼夜温差月均值 (bio2) 次之, 从重要性看, 最湿季度平均温度 (bio8) 对模型的重要性最高, 最暖季度降雨量 (bio18) 次之, 在各变量基于训练 AUC 值的刀切法检验结果(图 2)中, 昼夜温差月均值 (bio2) 和最暖季度降雨量 (bio18) 在“只此变量”时训练得分较高, 表明变量对该物种分布产生影响较大。

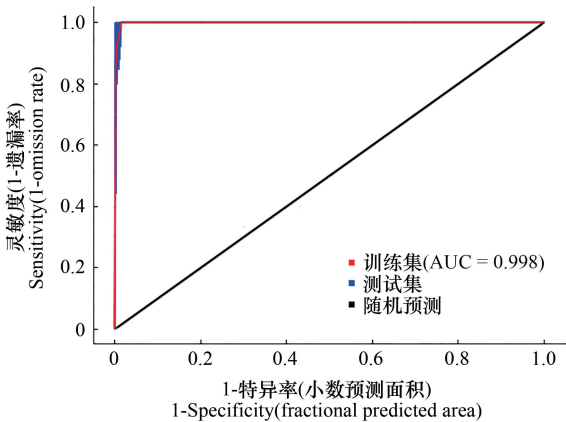


图 1 东方白鹳适宜分布区预测的受试者工作特征曲线
Fig.1 ROC curve of MaxEnt model for *Ciconia boyciana* in the study area

表 1 环境变量贡献率和重要性统计

Table 1 Statistics of contribution rate and permutation importance of environmental variables		
变量 Variable	贡献率/% Percent contribution	重要性 Permutation importance
Bio1 年均温 Annual mean temperature/℃	0.2344	0.9738
Bio2 昼夜温差月均值 Mean diurnal range/℃	1.5958	1.3539
Bio5 最暖月份最高温度 Max temperature of warmest month/℃	0.0147	0.701
Bio6 最冷月份最低温度 Min temperature of coldest month/℃	0.0237	0.354
Bio7 年温变化范围 Temperature annual range (bio5—bio6)/℃	0.0272	0
Bio8 最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter/℃	1.2534	7.9711
Bio9 最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter/℃	0.3957	0.3142
Bio10 最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter/℃	0.5281	0
Bio11 最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter/℃	0.1808	0.0188
Bio13 最湿月份降雨量 Precipitation of wettest month/mm	1.4773	1.4352
Bio14 最干月份降雨量 Precipitation of driest month/mm	2.5831	2.4349
Bio18 最暖季度降雨量 Precipitation of warmest quarter/mm	0.3934	6.7476
距道路距离 Road distance/m	3.0834	0.0553
距河流距离 Water distance/m	1.1304	0.2176
植被类型 Vegetation	61.7477	75.2423
土地利用类型 Land use	25.3310	2.1804

综合贡献率、重要性及训练 AUC 值, 植被类型、土地利用类型、距道路距离、最干月份降雨量 (bio14) 与最暖季度降雨量 (bio18) 这 5 个变量对模型的影响较大, 说明东方白鹳对栖息地的选择与这 5 个环境变量有重

要关系,即东方白鹳适宜栖息地选择可以通过这 5 个环境变量进行较为精准的预测。

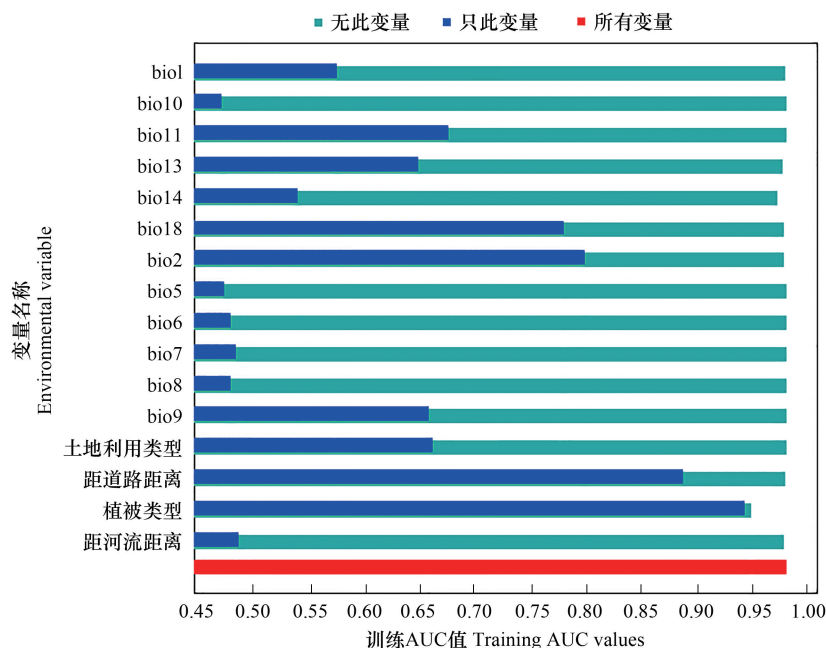


图2 各变量基于训练 AUC 值的刀切法检验结果

Fig.2 Jackknife test results for each variable based on training AUC values

非连续变量植被类型的响应柱状图中(图3)灌丛和草甸的存在概率较高,这表明在所有植被类型当中,灌丛和草甸对东方白鹳选择栖息地的影响最大。土地利用类型的响应图(图4)中编号沼泽地、河渠、滩涂和水库坑塘的存在概率较高,表明沼泽地、河渠、滩涂和水库坑塘这四种土地利用类型对东方白鹳分布地选择影响较大。在连续变量距道路距离的响应曲线(图5)中,距道路距离越大存在概率越高,表明距离道路越远的区域对东方白鹳越适宜。生物气候因子中两个变量的响应曲线中(图5),最干月份与最暖季度降雨量越高存在概率越低,表明栖息地降雨量越高对东方白鹳越不适宜。

2.3 适生区分布预测结果及面积

经过自然断点法重分类后(图6),东方白鹳在山东省的适宜栖息地面积共 7208.72km², 占山东省总面积的 4.72%, 其中高适宜区 1359.27km², 占总面积的 0.89%, 主要分布在以黄河三角洲为中心向南北两个方向沿海地区, 营口与沾化沿海向内陆部分, 威海市昆崙山国家森林公园, 与江苏省交界处的微山湖湿地以及庙岛群岛部分岛屿, 零散分布在东营市、滨州黄河干流附近的水库及湿地公园。较适宜区共 1893.82km², 占总面积的 1.24%, 集中分布于山东与河北交界处至莱州市区域, 零散分布于沿渤海地区的胶州市沿海地渤海湾沿岸向内陆方向, 沿黄河干流向内陆至滨州市、聊城市、龙口市、威海市、菏泽市东明黄河森林公园、微山县沿微山湖岸。低适宜区 3955.63km², 占总面积的 2.59%, 主要分布在潍坊市、烟台市和威海市沿海向内陆地区, 东平湖、南阳湖、独山湖、邵阳湖沿岸湖边湿地, 零散分布于淄博市和济南市的黄河内陆干流沿岸。以山东省土地利用类型数据提供的边界为标准, 与山东省标准行政

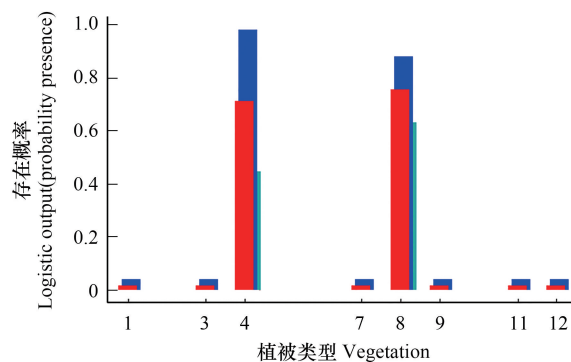


图3 植被类型响应柱状图

Fig.3 Response of *Ciconia boyciana* to vegetation

植被类型编号: 1 针叶林; 2 针阔混交林; 3 阔叶林; 4 灌丛; 5 荒漠; 6 草原; 7 草甸; 8 草甸; 9 沼泽; 10 高山植被; 11 栽培植被; 12 其他

边界存在大约 2.7% 的误差,其中包括各类岛屿面积与软件计算过程导致的误差。

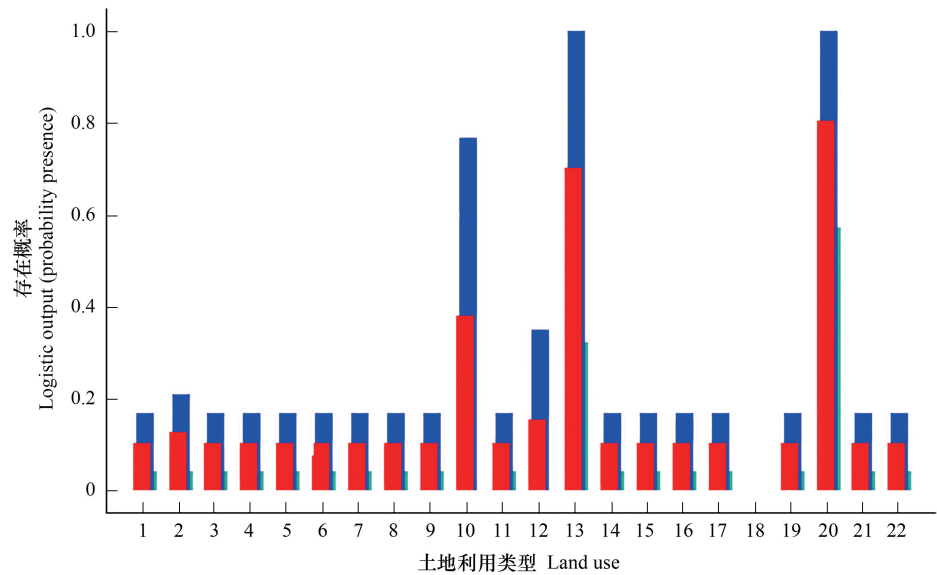


图 4 土地利用类型响应柱状图

Fig.4 Response of *Ciconia boyciana* to land use

土地利用类型编号:1 水田;2 旱地;3 有林地;4 灌木林;5 疏林地;6 其他林地;7 高覆盖草地;8 中覆盖草地;9 低覆盖草地;10 河渠;11 湖泊;12 水库坑塘;13 滩涂;14 滩地;15 城镇用地;16 农村居民点;17 其他建设用地;18 沙地;19 盐碱地;20 沼泽地;21 裸土地;22 裸岩石质地

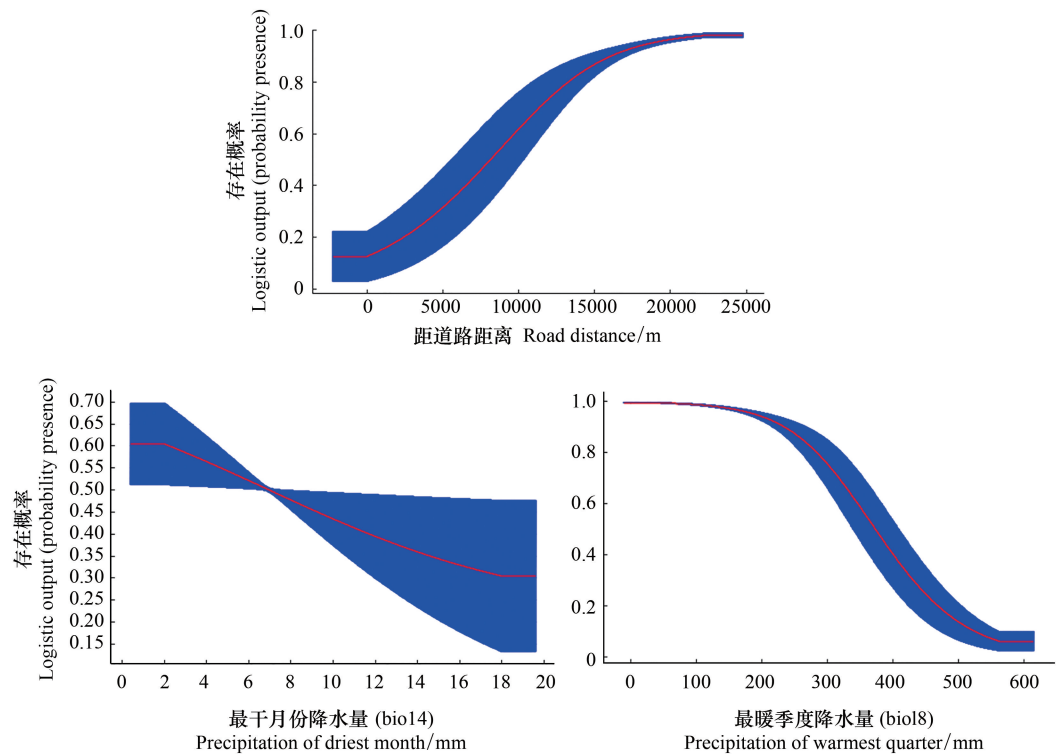


图 5 三个连续变量的响应曲线图

Fig.5 The response curve of the three contributing continuous variables

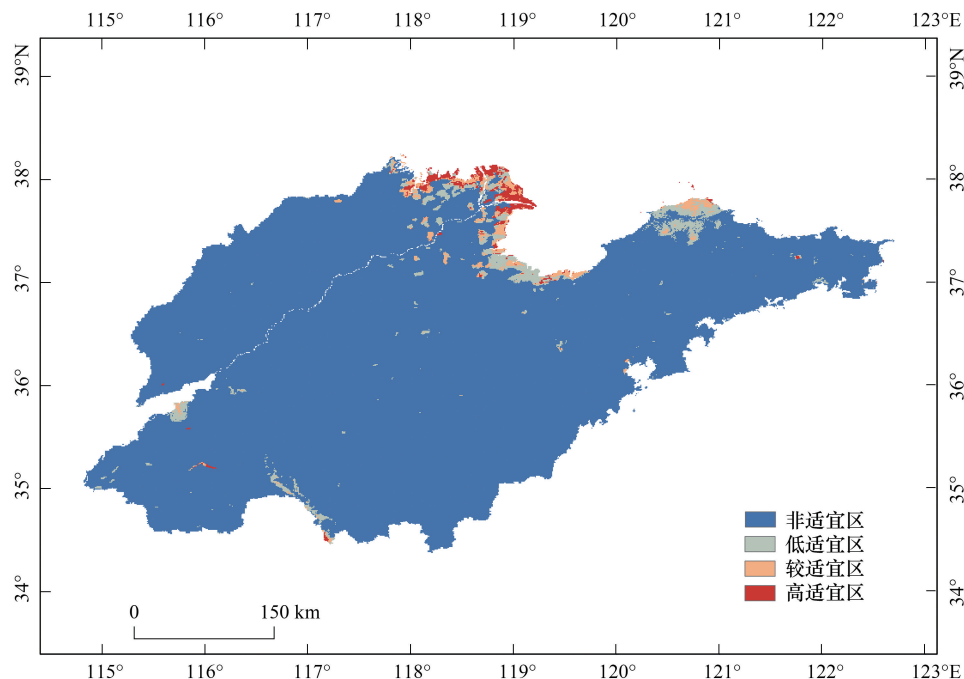


图6 山东省东方白鹳适生区预测结果

Fig.6 Prediction of Potential Suitable Areas of *Ciconia boyciana* in Shandong Province

3 讨论

土地利用类型变化被认为是物种生物多样性、栖息地和种群减少的主要原因^[30],而植被类型又对东方白鹳的觅食栖息地选择有较大影响^[22]。本次研究得出结果显示,植被类型中灌丛、草甸为主要影响因素,土地利用类型中沼泽地、河渠、滩涂和水库坑塘都是山东省东方白鹳偏好选择的栖息地。综合前人研究结果,沼泽、低洼草甸与明水面被证实是影响东方白鹳选择适宜生境的影响因子^[31-32],这与本次研究得出的结果较为一致,说明模型可信度较高,得出的结果具有参考价值。

人为干扰已成为许多动物栖息地中的一种主要干扰类型。研究表明,东方白鹳对外界干扰比较敏感,通常喜欢在干扰较小的生境中繁殖,远离道路周边生存^[21-22,31]。模型中可视为人为干扰因子的距道路距离对模型的预测结果贡献率较大(表1),且响应曲线(图5)显示其距道路越远,适宜度越高,说明东方白鹳偏好远离人为干扰的环境。

研究地最暖季度降雨量影响当地水位高低,而水位是影响东方白鹳迁徙与栖息地选择的一个重要影响因子。东方白鹳的觅食与停歇地的选择除了对人为干扰与沼泽草甸的湿地类型的要求外,对水体的选择是大面积浅明的、静止或流动性小、水深 30cm 的明水面^[31]。东方白鹳在黄河三角洲的繁殖时间是每年 2 月至 7 月,离巢原因在于保护区向内引入黄河水导致水位上升,东方白鹳因水位不适而迁徙^[33],最暖季度降雨量升高则很可能导致水位上升,所以东方白鹳对最暖季度和最干季度降雨量的要求是在一个比较低的范围内,即响应曲线显示的 bio18 和 bio14 数值越高增益值越小,这与模型得出的结果一致。

本文所选择的物种分布模型为最大熵模型,该模型在样本量较少的条件下也具有较好的表现^[6]。而本次获取的分布点较少,适合使用 Maxent 模型进行预测。同时该模型得出的结果显示,东方白鹳在山东省的主要分布区在黄河三角洲,少量低适宜分布区斑块围绕渤海湾集中在青岛市,符合现有文献资料中东方白鹳曾出现的地区和偏好的生境^[16-20,21]。新出现的大量较适宜斑块在微山湖周围地区,此地目前并无该物种出现的记录。微山湖作为山东省最大的淡水湖,湖区水生动物种类繁多,湿地植被和植物资源丰富,分布着大片芦苇、草甸及灌丛,湖区内河网密布,水渠纵横^[34]。这与本文模型得出的东方白鹳偏好选择的生境,即草甸、滩

涂、河渠与灌丛较为吻合, 综上, 可以视微山湖及周围湿地为东方白鹳新的可能分布地。

本次模型预测结果显示: 东方白鹳在山东省的高适宜区较为集中, 较适宜和低适宜区十分分散。参照本文使用的土地利用数据, 大面积的城镇用地对东方白鹳的适宜栖息地进行包围, 高适宜栖息地在远离城镇且人为干扰较低的沿海地区、岛屿及保护区内, 主要道路将较适宜栖息地分割, 使其零散分布于森林或湿地公园内, 并与一部分水库坑塘重合。这表明山东省的东方白鹳潜在适生区较为破碎化, 人类的开发活动影响了东方白鹳适宜栖息地的分布。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 侯柏华, 张润杰. 基于 CLIMEX 的桔小实蝇在中国适生区的预测. 生态学报, 2005, 25(7): 1569-1574.
- [3] Thapa A, Wu R D, Hu Y B, Nie Y G, Singh P B, Khatriwada J R, Yan L, Gu X D, Wei F W. Predicting the potential distribution of the endangered red panda across its entire range using MaxEnt modeling. Ecology and Evolution, 2018, 8(21): 10542-10554.
- [4] Alfaya P, Casanovas J G, Lobón-Rovira J, Matallanas B, Cruz A, Arana P, Alonso G. Using MaxEnt algorithm to assess habitat suitability of a potential Iberian lynx population in central Iberian Peninsula. Community Ecology, 2019, 20(3): 266-276.
- [5] Costa G C, Nogueira C, Machado R B, Colli G R. Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot. Biodiversity and Conservation, 2010, 19(3): 883-899.
- [6] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- [7] IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. <https://www.iucnredlist.org>. Accessed on [day month year], 2021.
- [8] Collar N J, Andreev A V, Chan S, Crosby M J, Subramanya S, Tobias J A. Threatened birds of Asia: the BirdLife International Red Data Book. Cambridge: Bird Life International, 2001: 194-222.
- [9] 李天芳, 谢鹏, 李国富, 李晓民. 浅述东方白鹳的研究现状. 防护林科技, 2018, (9): 65-66, 68-68.
- [10] 王禹石, 阮祿章, 黄鹏, 罗华星, 陈绍萍. 鄱阳湖越冬季节东方白鹳栖息地选择及保护现状研究. 安徽农业科学, 2010, 38(14): 7376-7378.
- [11] Murata K, Satou M, Matsushima K, Satake S, Yamamoto Y. Retrospective estimation of genetic diversity of an extinct Oriental White Stork (*Ciconia boyciana*) population in Japan using mounted specimens and implications for reintroduction programs. Conservation Genetics, 2004, 5(4): 553-560.
- [12] 何芬奇, 田秀华, 于海玲, 朱书玉, 郑忠杰, 林剑声. 略论东方白鹳的繁殖分布区域的扩展. 动物学杂志, 2008, 43(6): 154-157.
- [13] 薛委委, 周立志, 朱书玉, 单凯, 王立东, 许仁鑫. 迁徙停歇地东方白鹳繁殖生态研究. 应用与环境生物学报, 2010, 16(6): 828-832.
- [14] 林宝庆, 赵俊, 乔艾楠. 采用人工孵化及育雏等技术救助东方白鹳的初步探讨. 动物学杂志, 2004, 39(1): 45-47.
- [15] King C E. Reproductive management of the Oriental white stork: *Ciconia boyciana* in captivity. International Zoo Yearbook, 1990, 29(1): 85-90.
- [16] 田秀华, 王建荣, 张佰莲. 人工饲养东方白鹳繁殖期行为的时间分配. 动物学杂志, 2005, 40(3): 35-40.
- [17] Yang C, Hou Y X, Zhou L Z. Behaviors of the oriental white stork (*Ciconia boyciana*) in a semi-natural enclosure. Chinese Birds, 2013, 4(2): 161-169.
- [18] Huang Y, Zhou L Z. Screening and application of microsatellite markers for genetic diversity analysis of Oriental white stork (*Ciconia boyciana*). Chinese Birds, 2011, 2(1): 33-38.
- [19] Shimazaki H, Tamura M, Darman Y, Andronov V, Parilov M P, Nagendran M, Higuchi H. Network analysis of potential migration routes for Oriental White Storks (*Ciconia boyciana*). Ecological Research, 2004, 19(6): 683-698.
- [20] 刘红玉, 李兆富, 白云芳. 挠河流域东方白鹳生境质量变化景观模拟. 生态学报, 2006, 26(12): 4007-4013.
- [21] 段玉宝, 田秀华, 朱书玉, 丁鹏, 单凯, 卢小琴. 黄河三角洲自然保护区东方白鹳的巢址利用. 生态学报, 2011, 31(3): 666-672.
- [22] 段玉宝, 田秀华, 马建章, 朱书玉, 单凯. 黄河三角洲东方白鹳繁殖期觅食栖息地的利用. 生态学报, 2015, 35(8): 2628-2634.
- [23] Sillero N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. Ecological Modelling, 2011, 222(8): 1343-1346.
- [24] Mota J F, Pérez-García F J, Jiménez M L, Amate J J, Peñas J. Phytogeographical relationships among high mountain areas in the Baetic Ranges (South Spain). Global Ecology and Biogeography, 2001, 11(6): 497-504.
- [25] Lemke D, Hulme P E, Brown J A, Tadesse W. Distribution modelling of Japanese honeysuckle (*Lonicera japonica*) invasion in the Cumberland Plateau and Mountain Region, USA. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 139-149.
- [26] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda*, L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [27] 黄勇杰, 卢佳斌, 王锋堂, 林英华, 刘磊, 米红旭, 莫方群, 方精, 李佳灵. 基于 MaxEnt 模型预测海南岛海南臭蛙的潜在地理分布. 动物学杂志, 2017, 52(1): 30-41.
- [28] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [29] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2007: 104-104.
- [30] Zheng H F, Shen G Q, Shang L Y, Lv X G, Wang Q, McLaughlin N, He X Y. Efficacy of conservation strategies for endangered oriental white storks (*Ciconia boyciana*) under climate change in Northeast China. Biological Conservation, 2016, 204: 367-377.
- [31] 王洵, 林宝庆, 李连山. 向海保护区东方白鹳种群数量及栖息生境选择. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 57-58, 62-62.
- [32] 刘红玉, 李兆富, 李晓民. 湿地景观破碎化对东方白鹳栖息地的影响——以三江平原东北部区域为例. 自然资源学报, 2007, 22(5): 817-823.
- [33] 刘海防. 山东黄河三角洲水鸟动态监测及其规律分析. 山东林业科技, 2015, 45(5): 81-85, 32-32.
- [34] 牛明香, 赵庚星, 李尊英. 南四湖湿地遥感信息分区提取研究. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 45-48, 52-52.
- [35] 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2970-2976.