

基于 MaxEnt 模型的秦岭南部朱鹮栖息地适宜性评价*

陈枫楠¹⁾ 陈红宇²⁾ 洪倩¹⁾ 刘超¹⁾ 李熙³⁾ 江世雄³⁾ 陈禹彤²⁾ 赵彦伟^{2)†}

(1) 国网经济技术研究院有限公司, 北京; (2) 北京师范大学环境学院, 北京;
(3) 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建福州)

摘要 朱鹮是国家一级重点保护动物, 是“秦岭四宝”之首. 曾因生境恶化而濒临灭绝, 后有所恢复, 但栖息地分布范围依旧有限, 开展栖息地适宜性评价对其保护与管理意义重大. 利用 2018—2023 年秦岭南部朱鹮分布和环境变量数据, 基于 MaxEnt 构建朱鹮栖息地模拟模型, 对影响朱鹮分布的环境因子进行了重要性和相关性分析. 结果表明: 适宜朱鹮栖息的生境占研究区面积的 39.17%, 主要分布在洋县、城固县、汉台区、西乡县、留坝县、佛坪县和宁陕县; 季节性降水量变化对朱鹮分布的相对贡献率与重要性均比较高, 是最重要的环境因子; 栖息地适宜性与降水、温度、海拔和土地利用因子的相关性较高, 最适宜栖息的季节性降水量变率为 72%~77%, 海拔高度为 400~700 m, 较适宜的土地利用类型为水田、湿地和林地, 应加强较低海拔地区类似生境的保护和修复.

关键词 朱鹮; 栖息地; MaxEnt 模型; 适宜性; 秦岭

中图分类号 Q958

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2024029

0 引言

栖息地是野生动物赖以生存和繁衍的重要环境因素, 为动物提供了生存、繁衍及种群发展所需的资源, 是生态系统的重要组成部分^[1]. 栖息地适宜性是指栖息地能支持一个特定物种的潜在能力^[2], 是衡量野生动物生存和发展的重要指征. 朱鹮(*Nipponia nippon*)属于鹳形目(Ciconiiformes)鹳科(Threskiornithidae), 是国家一级重点保护野生动物, 曾分布在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜和韩国等地^[3], 我国秦岭是其重要分布区. 20 世纪中叶, 因栖息地被破坏, 野生朱鹮的种群数量锐减, 几近灭绝^[4]. 后经多年保护和拯救工作, 朱鹮受危等级由极危降为濒危^[5]. 但目前朱鹮栖息地保护仍然面临着人为干扰及破碎化等问题, 对朱鹮进行栖息地模拟, 有助于明确人为干扰下适宜栖息地分布的空间格局, 是实施朱鹮有效保护的重要前提与基础.

目前已有学者针对朱鹮的主要栖息地开展了较为深入的研究. 秦岭地区是世界上朱鹮数量最多的区域, 其中陕西省洋县及周边区域也是野生朱鹮种群的唯一分布区^[6], 相关研究最多. 翟天庆等^[7]基于组

合模型综合比较的方法, 分析气候变化对秦岭朱鹮潜在栖息地的影响, 结果表明朱鹮潜在栖息地具有向北移动的趋势; 赵洪峰等^[8]应用层次分析法, 评估了秦岭地区城固县和宁陕县的朱鹮栖息地质量; Sun 等^[9]对汉中分布区朱鹮的潜在繁殖环境进行了预测和评价; Zheng 等^[10]基于 3S 技术, 对河南董寨地区朱鹮生境适宜性进行评价, 发现生境适宜性随坡度、距道路距离的增加而下降; 邵方泽^[11]研究了道路对朱鹮繁殖生境的影响, 结果表明道路对朱鹮繁殖生境产生了负面影响. 总体上, 目前对朱鹮的相关研究主要围绕小尺度的分布格局特征开展, 但实际上在秦岭地区, 朱鹮栖息地由最初发现时的陕西洋县姚家沟逐步向东亚历史分布地恢复, 呈现出以秦岭为中心向四周扩散的趋势^[5]. 从更大尺度上开展秦岭朱鹮空间分布模式、适宜栖息地及主导环境因子的研究, 可以为朱鹮保护提供更加充分的科学依据.

本文以秦岭南部为研究区, 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件平台, 对朱鹮适宜栖息地进行了模拟, 开展了适宜性分区, 进一步探讨了适生区主导环境因子对于朱鹮适宜栖息地分布的重要性与相关性, 以全面评估秦岭南部朱鹮生境适宜性现状, 为秦岭地区的朱

* 国家电网公司总部科技资助项目(52130423001W)

† 通信作者: 赵彦伟(1974—), 博士, 教授. 研究方向: 流域生态健康评价与修复. E-mail: awei1974@bnu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-05

鸚保护和栖息地管理提供合理化建议.

1 研究模型与方法

1.1 研究区概况 研究区覆盖秦岭地区南部,地理坐标为 $31^{\circ}42' \sim 33^{\circ}52'N$, $105^{\circ}29' \sim 110^{\circ}12'E$, 总面积为 $50\,597\text{ km}^2$, 行政区划上隶属于陕西省汉中市和安康市. 研究区海拔为 $170 \sim 3\,071\text{ m}$, 地貌类型多样, 以山地为主, 占土地总面积的 85% , 丘陵和平坝占比较少. 属亚热带大陆性季风气候, 年平均气温为 $14 \sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 $900 \sim 1\,000\text{ mm}$, 四季分明, 光照充足,

雨量充沛, 气候温和湿润. 研究区植被垂直地带分布明显, 以落叶阔叶和常绿混交林为基带, 由低到高为常绿阔叶林、落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔叶混交林等植被. 研究区内河流密布, 有大小河流约 600 条, 水稻田、河滩、池塘、溪流和沼泽等湿地环境广泛发育, 森林植被茂密, 湿地周边高大乔木分布较多, 为朱鸚提供了丰富的生境. 但受区域开发影响, 适合朱鸚觅食的水田大面积改造为旱田, 再加上道路与村镇建设等其他人为干扰的影响, 朱鸚的适宜栖息地面临不同程度的威胁. 研究区地理位置见图 1.

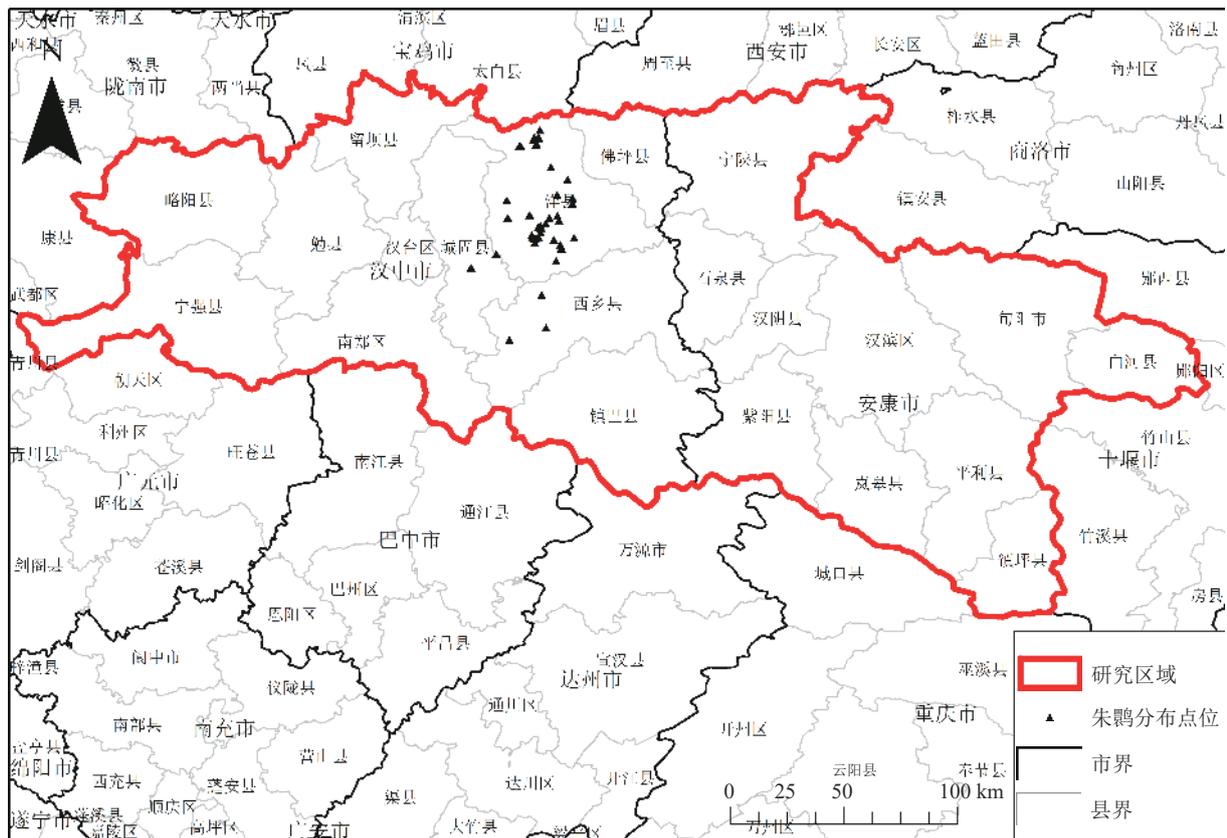


图 1 研究区地理位置和朱鸚分布点

1.2 栖息地模拟模型构建 生态位模型是栖息地适宜性评价的常用模型^[12], 最大熵模型(maximum entropy models, MaxEnt)是目前使用频率最高的生态位模型之一^[13-15], 在物种栖息地评估、潜在分布空间预测以及气候变化对物种分布的影响等多个领域, 得到了广泛应用^[16-22]. 其基本原理是利用已知的物种实际地理分布信息, 与对应的环境因子(如降水、温度、地形等)相结合, 在一定生态位限制条件下, 模拟物种分布规律的最理想状态, 以此来评估与预测目标物种在研究地区的栖息地分布^[23]. 与其他生态位模型相比, MaxEnt 模型对数据精度和样本数量的需求相对较小, 模型运行时间短, 操作简单, 适用于大尺度范围内出现次数

较少的濒危物种栖息地的预测. 本文利用 MaxEnt 模型开展研究.

1.2.1 数据来源与处理 模型构建主要利用朱鸚实际分布点位数据和秦岭南部的环境变量数据. 研究区内野生朱鸚实际分布点位数据从世界生物多样性信息机构(global biodiversity information facility, GBIF, www.gbif.org)下载获取, 并通过野外实地调查校核, 共获取 115 个(图 1). 为降低空间自相关性, 确保样本点分布合理, 利用 ArcGIS 和 R 软件进行筛选, 剔除间隔不到 500 m 的样本点, 最终得到 75 个有效点位数据. 环境变量数据共覆盖 23 个环境因子, 其中包括了 19 个生物气候因子、3 个地形因子和土地利用因

子^[24-26], 19个生物气候因子数据分别是年平均温度(Bio1)、昼夜温差月均值(Bio2)、等温性(Bio3)、温度季节性变化(Bio4)、最暖月份最高气温(Bio5)、最暖月份最低气温(Bio6)、平均年温差(Bio7)、最湿季度平均温度(Bio8)、最干季度平均温度(Bio9)、最暖季度平均温度(Bio10)、最冷季度平均温度(Bio11)、年降水量(Bio12)、最湿月份降水量(Bio13)、最干月份降水量(Bio14)、季节性降水量(Bio15)、最湿季度降水量(Bio16)、最干季度降水量(Bio17)、最暖季度降水量(Bio18)和最冷季度降水量(Bio19), 均来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>), 数据格式是栅格格式, 数据精度30"(即1 000 m×1 000 m)。地形因子数据主要包括海拔、坡度和坡向。海拔数据来源于中国科学院科学数据库30 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据, 坡度与坡向由DEM数据提取。土地利用数据来源为中国科学院空天信息创新研究院2020年30 m精细地表覆盖产品(GLC_FCS30—2020), 包括旱作农田、草本植被、灌溉耕地、稀疏常绿阔叶林、郁闭常绿阔叶林、稀疏落叶阔叶林、郁闭落叶阔叶林、稀疏常绿针叶林、郁闭落叶针叶林、草原植被、湿地、建筑物、裸地及水体共14种类型。

针对23个环境因子数据进行包括2个步骤的筛选, 确定用于构建模型的环境因子。1)使用ArcGIS软件对23个环境变量因子进行相关性分析, 得出23个环境变量因子与朱鹮分布的相关系数 r , 当 $|r| \geq 0.6$ 时, 表示2个因子之间有很强的共线性^[27], 因此需要筛选掉 $|r| \geq 0.6$ 的环境变量, 完成初步筛选。2)对初步筛选后的环境因子进行模型运算, 明确每一个因子对模型建立所产生的贡献率, 保留贡献率排名前7的因子作为对朱鹮分布影响较大的环境因子, 得到用于建模的环境因子。最后筛选出的生物气候因子为昼夜温差月均值、平均年温差、季节性降水量、最干季度降水量、最暖季度降水量, 环境因子为海拔和土地利用。

1.2.2 模型运行与校验 将朱鹮分布数据和筛选出的环境变量数据导入MaxEnt软件中, 将75%的分布点位数据作为训练集来建立模型, 25%的分布点位数据作为测试集来检验模型。模型通过刀切法(jackknife)对模拟预测结果进行自检验, 输出的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线可以评价MaxEnt模拟结果的准确性^[28], ROC曲线与横坐标围成的面积(area under the curve, AUC)值的大小是评估模型预测是否准确的度量。AUC值为0~1, 数值越接近1越达理想状态, 表明模型的精准性越

高。基于AUC值的模型精确度评价标准为: 当 $AUC \leq 0.7$ 时, 表明模型预测精度较差; $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时, 表明精度一般; $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时, 表明精度较好; $AUC > 0.9$ 时表明, 精度很好^[16]。因此, $AUC > 0.9$ 时的输出结果可作为物种栖息地适宜性评价的基础。

1.3 适宜生境等级划分 MaxEnt模型运行输出结果为数值在0~1之间的朱鹮生境适宜指数(habitat suitability index, HSI)分布图, 利用此结果进行适宜生境等级划分。目前关于适宜栖息地等级划分标准不统一, 并无绝对的标准, 本文参考已有研究成果^[29-30], 结合可实现分组相似性最大化、适宜性与灵活性好、避免抹平效应和处理模糊分级数据等优势, 采用ArcGIS软件中的自然间断点法, 按照适宜程度将栖息地划分为最适宜区、高适宜区、适宜区、一般适宜区、低适宜区和不适宜区6个级别。

1.4 主导环境因子分析 利用MaxEnt模型输出的环境因子相对贡献率(percent contribution)排名、重要性(permutation importance)排名和响应曲线(response curves)进行主导环境因子分析。其中: 利用环境因子相对贡献率和重要性排名, 分析影响朱鹮分布的环境因子的重要性; 利用响应曲线, 分析朱鹮出现概率与单个环境因子变化情况下的相关性。响应曲线以环境因子大小作为自变量, 以朱鹮出现概率作为因变量, 通过线性回归等方法拟合得到, 用来表示各环境因子变化对朱鹮出现概率的影响。

2 结果与讨论

2.1 MaxEnt模型预测结果评估 将模型设置5 000次循环, 重复运行20次。为保证模型精度, 避免过多拟合, 将“Regularization multiplier”设置为1.0、1.5、2.0、2.5、5.0, 使用“Crossvalidate”和“Bootstrap”2种不同的算法, 经运行与结果对比, 最终选择5.0的调控倍频和“Bootstrap”算法。对模型模拟结果进行了评估, 结果见图2的ROC曲线。由图2可见, AUC为0.934, 表明模型结果较理想。

利用MaxEnt模型输出的朱鹮HSI分布如图3所示, 基于ArcGIS将其转换为浮点型栅格图, 采用前述的自然间断点法划分的最适宜区、高适宜区、适宜区、一般适宜区、低适宜区和不适宜区的面积占比分别为5.89%、7.72%、10.54%、15.02%、22.80%和38.03%, 适宜区(包括最适宜区、高适宜区、适宜区、一般适宜区)面积占研究区总面积的39.17%。

由图3可知: 朱鹮最适宜区主要集中在洋县、城固县和汉台区, 部分区域分布于西乡县、留坝县、佛

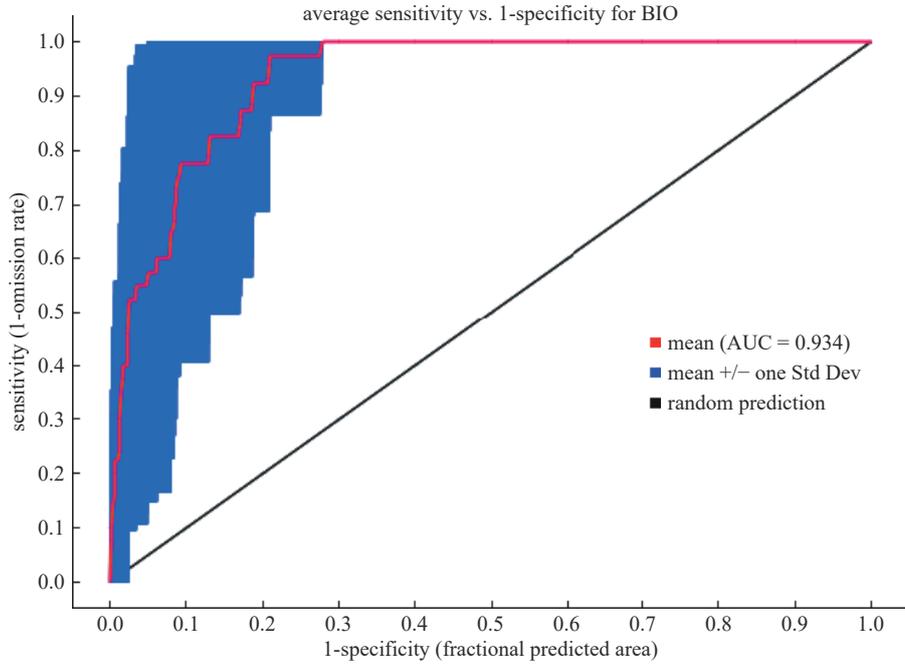


图 2 朱鹮栖息地分布预测结果的 ROC 曲线

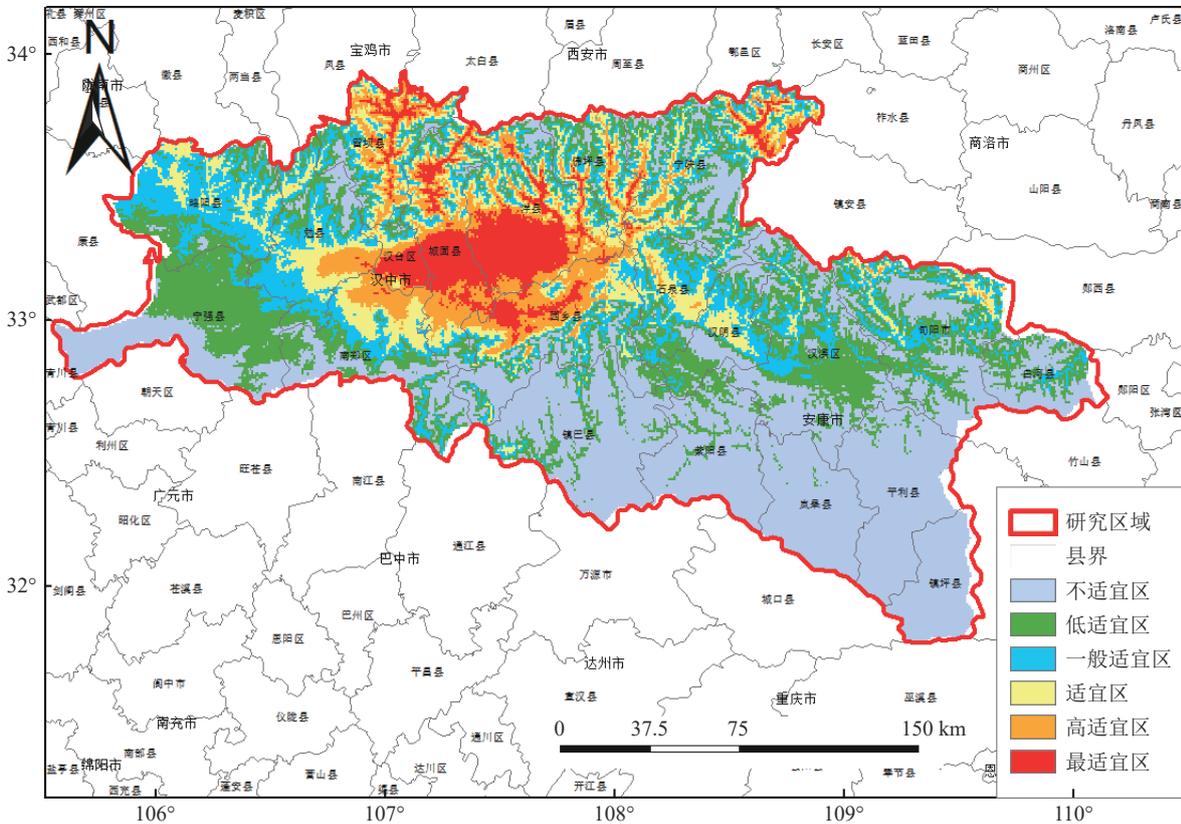


图 3 朱鹮适宜栖息地分级结果

坪县和宁陕县;高适宜区、适宜区和一般适宜区主要集中在西乡县、勉县和南郑区,周边的佛坪县、留坝县和宁陕县也有小面积分布.汉中朱鹮国家级自然保护区主体位于陕西省洋县境内,跨洋县与城固县,属于最适宜区和高适宜区,本文的生境分级结果与自然保护区的分布一致.同时,朱鹮实际分布点位均位

于最适宜区,说明分级结果与实际情况符合.王超等^[31]对野生朱鹮的分布区和潜在分布区的调查和研究也发现,洋县是朱鹮的主要分布地,城固县、西乡县、汉台区、宁陕县等地也有朱鹮的活动记录,结果与本文的生境分级结果相符,说明分级结果准确合理,可作为朱鹮潜在栖息地保护的参考.

2.2 适生区分布主导环境因子分析

2.2.1 环境因子重要性分析 MaxEnt 模型模拟输出了每个环境因子的相对贡献率和重要性排名, 如表 1 所示。

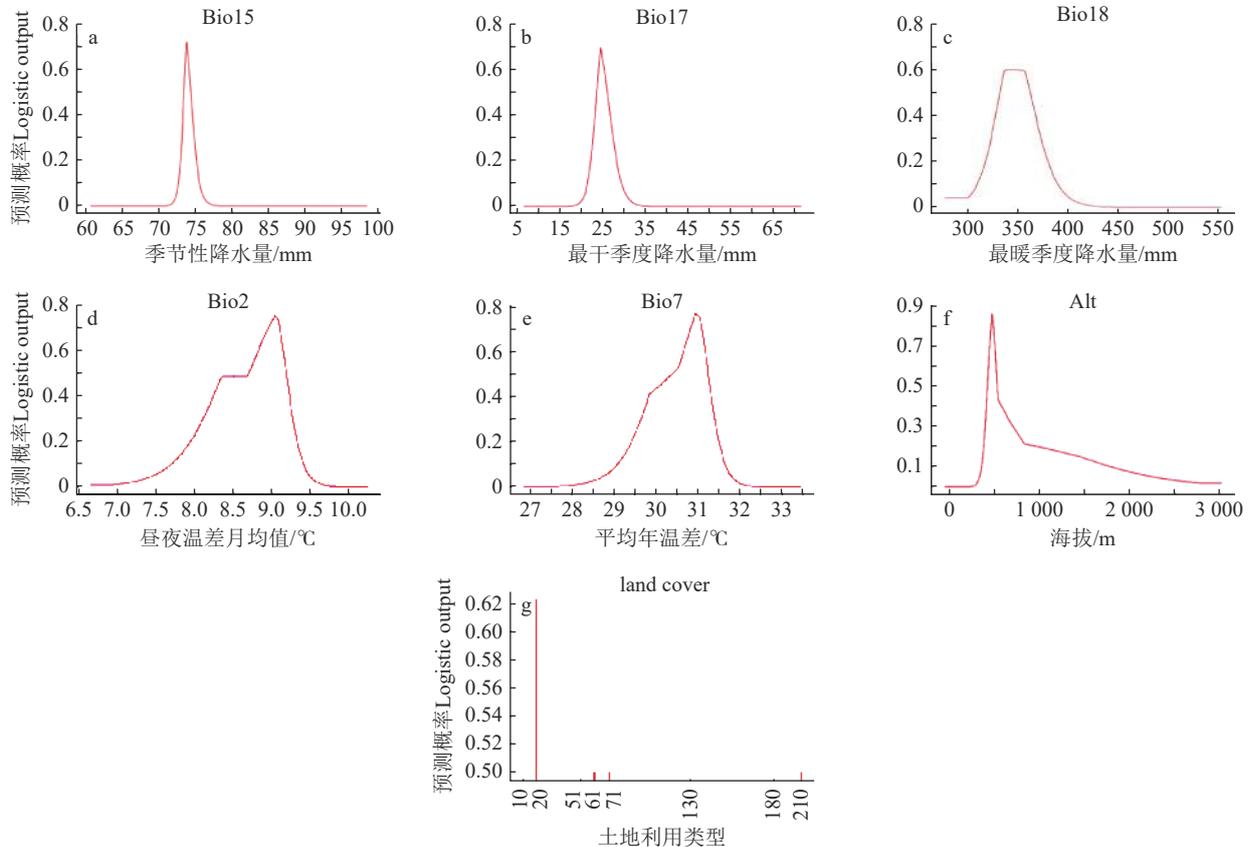
表 1 环境因子相对贡献率和重要性排名

环境因子	相对贡献率/%	重要性/%
季节性降水量	49.6	74.0
最暖季度降水量	12.4	13.3
土地利用	11.8	4.8
平均年温差	9.7	0.2
最干季度降水量	6.7	6.4
海拔	5.6	0.3
昼夜温差月均值	4.2	0.9

观察表 1 中数据可知: 季节性降水量变化相对贡献率最大, 占比为 49.6%; 其他环境因子相对贡献率由大到小依次为最暖季度降水量、土地利用、平均年

温差、最干季度降水量、海拔、昼夜温差月均值。同时, 可以观察到季节性降水量的重要性排名第一, 占比为 74.0%, 是对朱鹮栖息地适宜度最具影响力的环境因子, 最暖季度降水量和最干季度降水量的重要性分列第二和第三, 这可能是因为朱鹮需要周边具有高大乔木的水稻田、河滩、池塘、溪流和沼泽等浅水型湿地生境栖息与觅食^[32], 而降水量是形成湿地的最重要基础条件。降水量大的区域, 坑塘湿地相对丰富, 鱼、虾等朱鹮的主要食物能够得到保障, 成为朱鹮觅食栖息的优先选择。因此季节性降水量变化是最重要的环境因子。而海拔因子重要性小, 仅有 0.3%, 这可能是由于朱鹮繁殖、夜宿于高大乔木, 觅食比较依赖水田, 高大乔木与水田主要分布于低海拔区, 所以朱鹮垂直分布不明显。

2.2.2 对环境因子的响应分析 利用前述模型, 绘制出栖息地适宜度(以朱鹮出现概率表征)对不同环境因子变化的响应曲线, 见图 4-a~g。



注: 土地利用类型 10 为农田; 20 为灌溉耕地; 51 为稀疏常绿阔叶林; 61 为稀疏落叶阔叶林; 71 为稀疏常绿针叶林; 130 为草原植被; 180 为湿地; 210 为水体。

图 4 朱鹮出现概率对环境因子的响应曲线

1)对气候因子的响应分析。由图 4-a~c 可见: 最适宜朱鹮栖息的季节性降水量变化率为 74%~75%; 最干季度降水量为 23~30 mm 时, 最暖季度降水量为 330~

380 mm 时, 栖息地均有较高的适宜性。当季节性降水量变化率为 72%~74%, 最干季度降水量为 20~25 mm, 最暖季度降水量为 300~330 mm 时, 朱鹮出现概率, 即

栖息地适宜性与各因子呈现显著的正相关关系;当季节性降水量变化率为 74%~77%,最干季度降水量为 25~33 mm,最暖季度降水量为 360~400 mm 时,呈显著的负相关关系;当降水量或降水量变化率不在上述范围中时,朱鹮出现概率均趋近于 0,说明朱鹮栖息地分布对降水情况的响应较为敏感,相关性较高.季节性降水量变化是适宜栖息地分布的主导因子,根据相关统计,秦岭南部季节性降水量变化率为 50%~100%.但由于全球气候变暖导致的极端气候及 ENSO 现象,季节性降水量变化在四季均表现出一定增加趋势^[33],这可能导致研究区降水量的变化率增大,也可能是未来影响朱鹮栖息地的一个关键限制因子.

由朱鹮出现概率对昼夜温差月均值和平均年温差的响应曲线(图 4-d、e)可见:当昼夜温差月均值 >7.0 °C 时,朱鹮栖息地适宜性随温差增大而升高,呈正相关关系,在 9.0 °C 左右达到最高值,随后急剧下降,呈显著负相关关系,在 9.5 °C 左右趋近于 0;当平均年温差 >29.0 °C 时,朱鹮栖息地适宜性随平均年温差增大而升高,呈正相关关系,在 31.0 °C 左右达到最高值,随后急剧下降,呈显著负相关关系,在 32.0 °C 左右趋近于 0.可以看出朱鹮偏爱温度适中的栖息地,说明朱鹮栖息地适宜性与气温变化的相关性较高.朱鹮的孵化育幼与其他鸟类不同,有特定的温度要求,恶劣的气温条件会大大降低朱鹮幼鸟的孵化率和存活率,不利于朱鹮的生存.乔木等高大树木适宜在一定温差的环境内生存,如果温度过高或过低,将导致干枯或冻害.朱鹮常在高大乔木上营巢,因此一定范围内的温差将有利于朱鹮的生存和繁殖.

2)对地形因子的响应分析.从朱鹮出现概率对海拔的响应曲线(图 4-f)来看,海拔 <350 m 时,朱鹮栖息地适宜性较低,350~500 m 呈显著正相关关系,500 m 左右达到最高值,>500 m 后迅速下降,呈显著负相关关系,>700 m 后负相关强度降低.由图 4-f 可见,最适宜朱鹮栖息的海拔高度为 400~700 m,低海拔地区有较高的适宜性.这可能是因为朱鹮觅食地多位于湿地和稻田区域,这些区域海拔普遍较低,可以提供更多的食物来源.

3)对土地利用因子的响应分析.土地利用因子方面,朱鹮较适宜的栖息地主要为林地、水田和湿地(图 4-g),在其他土地类上分布较少,这符合朱鹮的栖息习性.因此,应加大对平原地区,尤其是湿地周边的高大的榆树、山杨等乔木的保护力度,重视已经被朱鹮利用的和潜在可利用的乔木林,减轻对这些林地的干扰.同时,随着朱鹮分布区耕作方式的改变,大量冬水田排水转变成旱田,导致了朱鹮栖息地质量的

下降^[34-35].应结合当地种植结构调整与生态保护恢复规划,加强朱鹮适生生境区的水田保护,维护河滩、池塘、溪流和沼泽等自然湿地,适度构建人工湿地,提高朱鹮适生生境面积.

3 结论

本文构建了秦岭南部朱鹮适宜栖息地模拟模型,实施适宜生境分级,对影响朱鹮分布的主导环境因子进行了重要性和相关性分析.主要结论如下:适宜朱鹮栖息的生境面积占研究区总面积的 39.17%,60.83% 的研究区为不适宜区和低适宜区;适宜区主要集中在洋县、城固县和汉台区,一部分分布在西乡县、留坝县、佛坪县和宁陕县;季节性降水量变化相对贡献率与重要性均比较高,是影响朱鹮栖息地适宜度的最重要环境因子;栖息地适宜度对降水、温度、海拔和土地利用因子的响应比较明显,最适宜朱鹮栖息的季节性降水量变化率为 72%~77%,海拔为 400~700 m,较适宜的土地利用类型主要为林地、水田和湿地,应注意加强对较低海拔地区的类似生境的保护和恢复.

4 参考文献

- [1] 王金亮,陈姚. 3S 技术在野生动物生境研究中的应用[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 44
- [2] 王秀磊. 普氏原羚生境的景观动态与适宜性评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2004
- [3] RASMUSSEN P C. Threatened Birds of Asia: The BirdLife International Red Data Book[J]. *The Auk*, 2004, 121(2): 619
- [4] LI X H, TIAN H D, LI D M. Why the crested ibis declined in the middle twentieth century[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2009, 18(8): 2165
- [5] 刘荫增. 朱鹮在秦岭的重新发现[J]. *动物学报*, 1981, 27(3): 273
- [6] 李国富,尹伟平,李晓民. 中国鹮科鸟类研究现状及展望[J]. *野生动物学报*, 2016, 37(3): 234
- [7] 翟天庆,李欣海. 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2361
- [8] 赵洪峰,罗磊,侯玉宝,等. 基于层次分析法的朱鹮栖息地质量综合评价[J]. *资源科学*, 2013, 35(1): 50
- [9] SUN Y W, WANG T J, SKIDMORE A K, et al. Predicting and understanding spatio-temporal dynamics of species recovery: implications for Asian crested ibis *Nipponia nippon* conservation in China[J]. *Diversity and Distributions*, 2016, 22(8): 893

- [10] ZHENG L M, WANG Y M, ZHU J G, et al. Habitat evaluation for reintroduced crested ibis (*Nipponia nippon*) in Dongzhai national nature reserve, China, based on a maximum entropy model[J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2018, 50(4): 1319
- [11] 邵方泽. 基于 MaxEnt 模型的道路对朱鹮繁殖生境的影响研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016
- [12] 吴曼菲. 白头叶猴(*Trachypithecus leucocephalus*)栖息地破碎化评价及潜在生态廊道研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020
- [13] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 等. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价 [J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4181
- [14] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231
- [15] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161
- [16] 高忠斯. 基于丹顶鹤秋迁期生境保护的松嫩平原保护空缺分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018
- [17] 张典, 王玉玉, 俞炜炜, 等. 厦门湾红树林生境适宜性评估及修复潜力分析 [J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 43
- [18] 甄静. 未来气候变化对大熊猫栖息地影响精细评估与应对 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018
- [19] 周宇. 入侵物种福寿螺在中国的潜在分布及不同尺度下的种群遗传学 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019
- [20] SAUPE E E, QIAO H J, HENDRICKS J R, et al. Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(10): 1159
- [21] 徐卫华, 罗翀. MaxEnt 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用 [J]. *森林工程*, 2010, 26(2): 1
- [22] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 等. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(3): 343
- [23] 李响, 张成福, 贺帅, 等. MaxEnt 模型综合应用研究进展分析 [J]. *绿色科技*, 2020(14): 14
- [24] 李鑫泽, 冯佳楠, 支晓亮, 等. 东北地区三种鹿科动物潜在栖息地预测与保护空缺分析 [J]. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 318
- [25] 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
- [26] 张旭惠. 基于随机森林模型的落葵薯入侵中国分布及气候变化对其潜在影响研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2020
- [27] 木希叶乐. 基于 GIS 的内蒙古自治区人口空间分布模拟研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2017
- [28] 王茹琳, 王明田, 罗家栋, 等. 基于 MaxEnt 模型的美味猕猴桃在中国气候适宜性分析 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, 34(3): 522
- [29] 陈小南, 李琼雯, 余建平, 等. 钱江源国家公园白颈长尾雉生境适宜性评价研究 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1832
- [30] 温平, 彭科, 陈旭, 等. 基于 MaxEnt 模型的白水河国家级保护区有蹄类保护动物生境适宜性评价 [J]. *四川林业科技*, 2021, 42(1): 70
- [31] 王超, 刘冬平, 庆保平, 等. 野生朱鹮的种群数量和分布现状 [J]. *动物学杂志*, 2014, 49(5): 666
- [32] 张雪仙. 朱鹮(*Nipponia nippon*)再引入种群夜宿集群行为初步研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2016
- [33] 姚世博, 姜大膀, 范广洲. 中国降水季节性的预估 [J]. *大气科学*, 2018, 42(6): 1378
- [34] 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
- [35] 王开锋, 史东仇. 朱鹮雏鸟的存活及失存差异 [C]// 中国野生动物保护协会, 中国鸟类学会, 陕西省野生动物保护协会. 稀世珍禽: 朱鹮'99, 国际朱鹮保护研讨会文集. 北京: 中国林业出版社, 1999: 150

Habitat suitability assessment of crested ibis in southern Qinling Mountains by MaxEnt modeling

CHEN Fengnan¹⁾ CHEN Hongyu²⁾ HONG Qian¹⁾ LIU Chao¹⁾ LI Xi³⁾
JIANG Shixiong³⁾ CHEN Yutong²⁾ ZHAO Yanwei²⁾

(1)State Grid Economic and Technological Research Institute Co Ltd, Beijing, China;

2)School of Environment, Beijing Normal University, Beijing, China;

3)State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou, Fujian, China)

Abstract The crested ibis is China's first-level protected animal and is at the top of the list of "Four Treasures in the Qinling Mountains". Due to habitat degradation, the crested ibis was once on the brink of extinction. Since then, the population of crested ibis has recovered to some extent, but the habitat distribution is still limited. Conducting habitat suitability assessments is of great significance for their protection and management. The distribution data of crested ibis in southern Qinling Mountains from 2018 to 2023 and environmental variable data were used here to construct a suitable habitat simulation model for crested ibis by MaxEnt. The dominant environmental factors affecting the distribution of crested ibis are analyzed. The habitat area suitable for crested ibis was found to account for 39.17% of the study area, mainly distributed in Yang county, Chenggu county, Hantai district, Xixiang county, Liuba county, Foping county and Ningshan county. The relative contribution rate and importance of seasonal precipitation changes are relatively high, making it the most important environmental factor. The habitat suitability is highly correlated with precipitation, temperature, altitude, and land use factors. The most suitable seasonal precipitation variation rate for habitat was found to be 72%-77%, and the most suitable altitude 400-700 m. The most suitable land use types are wetlands, paddy fields, and forest land. It is important to strengthen the protection and restoration of similar habitats located at lower altitudes.

Keywords crested ibis; habitat; MaxEnt model; suitability; Qinling Mountains

【责任编辑:武 佳】