

应用 Maxent 模型分析秦巴地区朱鹮 适宜繁殖地的分布

颜文博^① 王琦^① 王超^②

① 陕西理工学院生物科学与工程学院 汉中 723000; ② 陕西汉中朱鹮国家级自然保护区管理局 洋县 723300

摘要: 明确濒危鸟类的潜在繁殖地分布, 对制定合理有效的保护对策十分重要。本文以朱鹮 (*Nipponia nippon*) 为研究对象, 选取 125 个朱鹮巢址分布数据和 9 个环境因子, 应用 Maxent 模型分析其潜在繁殖地的分布及主要影响因子。结果表明, 海拔、土壤亮度、坡度、土壤绿度是影响朱鹮繁殖地分布的主要环境因子, 其对模型的综合贡献值分别为 38.1%、18.3%、16.4%和 14.3%。朱鹮适宜繁殖地分布的最佳海拔范围是 500 ~ 1 200 m; 土壤亮度指数结果显示, 适宜繁殖地的分布随着地表裸化程度的增加而显著减少; 繁殖地的适宜度与坡度呈现显著负相关关系; 土壤绿度指数结果显示, 朱鹮繁殖地在中等程度的植被覆盖区域适宜度最高, 低植被覆盖区域和高植被覆盖区域的适宜度都降低。当栖息地适宜度指数 (habitat suitability index, HSI) 阈值分别大于 0.5、0.6、0.7 时, 研究地区内朱鹮适宜繁殖地的总面积分别是 1 682.63 km²、944.38 km²、432.96 km²。本研究揭示秦巴地区适宜繁殖地的分布和面积可以满足朱鹮未来几年的自然扩散和再引入保护。

关键词: 朱鹮; 繁殖地; Maxent 模型

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 02-185-09

Evaluation of Potential Breeding Habitat Distribution with Maxent Model for Crested Ibis in the Qinling-Bashan Region

YAN Wen-Bo^① WANG Qi^① WANG Chao^②

① *School of Bioscience and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000*; ② *Shaanxi Hanzhong Crested Ibis National Nature Reserve, Shaanxi Province, Yang County 723300, China*

Abstract: Understanding the distribution of potential breeding habitat of endangered birds is critical to formulate effective protective measures. The crested ibis (*Nipponia nippon*) had been critically endangered, and currently its population is rapidly recovering. A predictive breeding habitat distribution map of this species was estimated using the Maxent model with a total of 125 recorded nest points and 9 environmental factors. The distribution of potential breeding habitat and its relationship with major environmental factors were analyzed with Maxent 3.3. Accuracy of result produced by model with area was evaluated by ROC

基金项目 陕西理工学院科研计划项目 (No. SLGQD13-14);

第一作者介绍 颜文博, 男, 博士; 研究方向: 保护生物学; E-mail: yanwb_26@163.com。

收稿日期: 2014-04-28, 修回日期: 2014-09-23 DOI: 10.13859/j.cjz.201502004

(AUC). Importance and contribution of environmental factor to model's prediction was evaluated by Jackknife test. Suitable habitat distribution was indicated by habitat suitability index (HSI). Habitat with value $HSI > 0.5$ was considered to be fundamental suitable habitat for ibis, $HSI > 0.6$ was moderate suitability, $HSI > 0.7$ was high suitability. The results of Jackknife test showed that four variables, elevation, brightness index, slope, and green vegetation index had the greatest effect on habitat selection for Ibis, with a value of contribution for 38.1%, 18.3%, 16.4% and 14.3% respectively (Fig. 2). The overall preferred elevations by Ibis were 500 - 1 200 m (Fig. 3), however, the former studies on this species reveal habitat located below 800 m was obviously preferred. Brightness index indicated that the area of suitable habitat decreased with degree of bare ground increasing. Suitable habitat was significantly negative correlation with slope. Suitable habitat was mostly distributed in the moderate vegetation coverage area according to Green vegetation index (Fig. 3). Total of 1 682.63 km² breeding habitat of crested ibis would be expected when suitability threshold was set by 0.5, while if the suitability thresholds increased to 0.6 and 0.7, the breeding habitat would be reduce to 944.38 km² and 432.96 km² respectively. Most of the larger suitable habitat patches (area > 15 km², $HSI > 0.5$) were distributed in the Yangxian county, Chenggu county and Xixiang county (Fig. 4). The suitable habitat for ibis was most located in Yangxian county (491.24 km², $HSI > 0.5$), while this value reduced to larger than 100 km² in each of the following counties, Chenggu, Xixiang, Nanzheng and Ankang. Only less than 50 km². suitable habitat could be located in the Hanyin county, Mianxian county and Shiquan county. Our study indicated that the crest Ibis population was safe since enough breeding habitat available for their current requirement on dispersal and reintroduction.

Key words: Crested Ibis (*Nipponia nippon*); Breeding habitat; Maxent model

鸟类的繁殖成功率受到多个环境因素的影响, 例如捕食者、食物、天气、巢址、亲代和幼雏的身体强壮程度等 (Houston et al. 2005, Warburton et al. 2005, Fontaine et al. 2006, Morrison et al. 2007), 其中巢址周边环境对鸟巢内幼雏的成活率具有重要影响 (Clark et al. 1999)。因此, 能否选择适宜的繁殖地将会影响到鸟类的生存、繁殖和扩散等各方面 (Alerstam et al. 1982)。特别是对于濒危鸟类, 如果不能确定适宜的繁殖地, 对于它们的种群复壮和再引入都是盲目的且难以成功的。

近几十年来发展出许多物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 来预测物种的适宜栖息地分布, 如一般线性模型 (generalized linear model)、多元回归模型 (multivariate regression model)、GARP (genetic algorithm for rule set production) 模型等 (Li et al. 2013)。一般线性模型和多元回归模型这两类模

型需要在野外调查物种的“出现点”和“不出现点”数据 (Manly et al. 2002)。对于一些历史分布广泛当前处于种群增长状态的濒危物种, 它们的“不出现点”数据很难确定。因此, 近年来以 Maxent 模型 (最大熵值模型) 为代表的只需要物种“出现点”数据的生态位模型发展较快 (Phillips et al. 2008)。Maxent 模型简单易用且预测精度高, 进行适宜栖息地预测具有较大优势 (Phillips et al. 2008, Elith et al. 2011)。

朱鹮 (*Nipponia nippon*) 属于鹮形目鹮科, 历史上在包括中国、日本、俄罗斯、朝鲜和韩国在内的亚洲东部地区广泛分布 (BirdLife-International 2001)。野生朱鹮在 20 世纪中期几乎绝灭, 到 1981 年仅剩余 7 只分布在陕西的洋县 (刘荫增 1981)。经过保护工作者多年的努力, 朱鹮的野生种群增加到现在的 1 000 多只 (王超等 2014), 且已开始向洋县周围地区扩散。对于朱鹮繁殖地的研究主要集中

在洋县及其周围地区的巢址选择（李欣海等 2001）、巢址或繁殖地分布（Li et al. 2006, 刘冬平等 2006），为在大景观尺度上定量分析朱鹮繁殖地与环境因子的关系、评价整个秦巴地区朱鹮繁殖地的分布提供了科学基础。

随着朱鹮种群的进一步增加，洋县繁殖地内的营巢密度也逐渐增加，例如，洋县花园繁殖区内的营巢密度在 2001 年就达到了 1 巢/40 hm²（刘冬平等 2003）。随着营巢密度的增加，朱鹮必然会因竞争压力而分散甚至扩散繁殖。在秦巴地区提前确定朱鹮适宜繁殖地的分布及其面积，为朱鹮的自然扩散制定科学的保护管理措施，将是一项有效的解决措施。同时，人们也开展了再引入保护工程扩大朱鹮的野生种群，例如 2007 年开始在陕西安县开展了朱鹮的野化放飞实验（马小春 2012）。而明确秦

巴地区朱鹮潜在繁殖地的分布及其面积，是再引入保护成功与否的前提，对于制定朱鹮未来的保护管理措施具有重要意义。因此，本研究在采用 Maxent 模型对朱鹮的繁殖地进行评价的基础上，进一步分析朱鹮的潜在繁殖地在秦巴地区的分布及主要影响因子，确定秦巴地区适合朱鹮扩散的区域，为朱鹮再引入保护的实施提供适宜的地点。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区

本研究地位于陕西省境内的秦巴地区，属于朱鹮的历史分布区（李保国等 1992）。该地区位于汉江上游的秦岭和巴山之间的汉中盆地以及周边地区（北纬 32°32′~33°50′，东经 106°3′~109°9′）（图 1），总面积约 41 383.56 km²。本

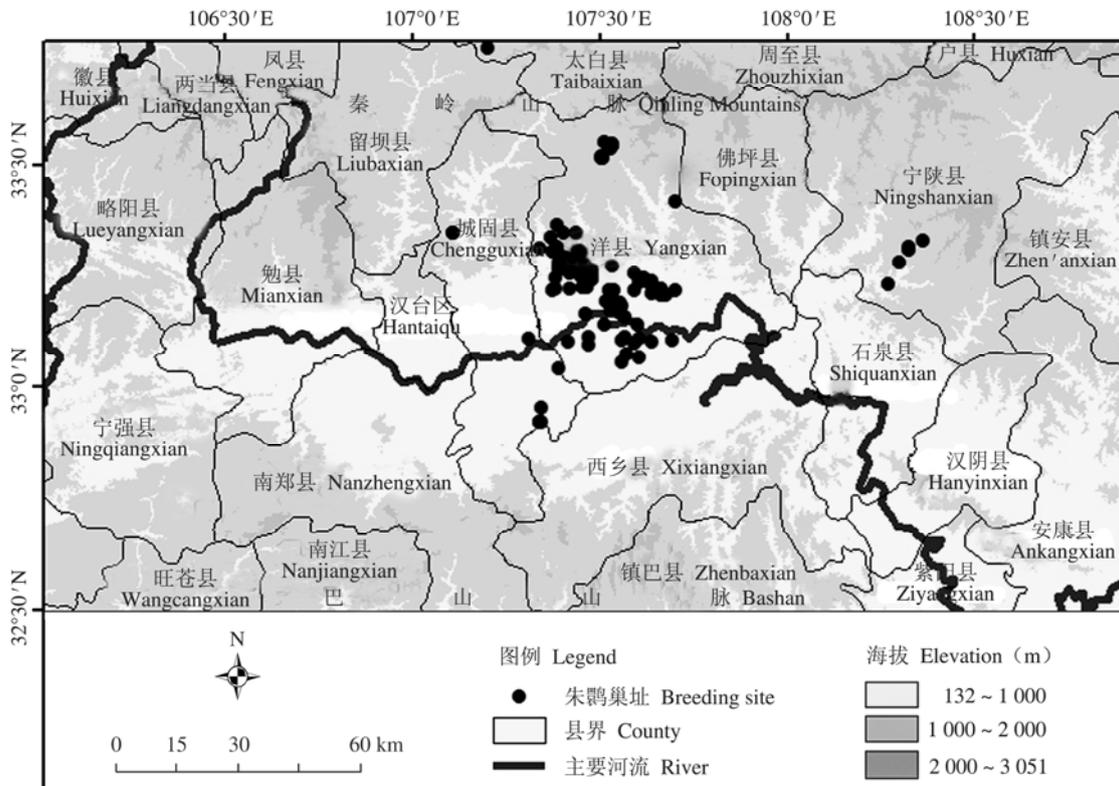


图 1 研究地区的位置和 2011 年洋县及周边地区朱鹮巢址的分布

Fig. 1 The location of study area and breeding sites of the crested ibis in and around Yangxian

地区属于暖温带到北亚热带的过渡气候, 年平均气温 12 ~ 14℃, 年平均降水量 900 ~ 1 000 mm, 海拔 132 ~ 3 051 m。落叶阔叶林和常绿阔叶林是本地区的主要植被, 优势树种有马尾松 (*Pinus massonianna*) 和栓皮栎 (*Quercus variabilis*)。该地区的自然环境与当前朱鹮的集中分布地洋县的自然环境相似, 因此, 把陕西省境内的秦巴地区作为朱鹮潜在繁殖地分布的研究区域。

1.2 研究方法

1.2.1 朱鹮巢址数据的采集和处理 朱鹮巢址数据来源于野生种群和野外放飞种群两部分。野生种群的巢址经纬度数据来源于朱鹮国家级自然保护区管理局 2011 年对洋县及周边地区朱鹮繁殖结果的统计数据, 共 120 个。2012 年再引入种群的巢址信息来源于马小春 (2012) 2010 年对宁陕再引入种群巢址分布的调查数据, 剔除地理位置相近的巢址后得到 5 个巢址。对这 125 个巢址数据使用 Arcgis10.0 处理得到朱鹮巢址分布数据 (图 1)。

1.2.2 环境因子数据的采集和处理 根据前人对朱鹮巢址和繁殖地研究分析, 地形、植被、水体和人类干扰对朱鹮潜在繁殖地的分布具有重要影响 (李欣海等 2001, Li et al. 2006, 刘冬平等 2006)。因此, 本研究评价朱鹮潜在繁殖地的栖息地变量包括以下环境因子, 地形(海拔、坡度和坡向), 植被, 距水域距离 (巢址到最近水域的直线距离), 距居民地距离 (巢址到最近居民地的直线距离), 距道路距离 (巢址到最近道路的直线距离)。采用 30 m × 30 m 的数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 地图数据 (来自数据共享网站 <https://wist.echo.nasa.gov/>), 在 Arcgis10.0 中使用空间分析工具获取海拔、坡度和坡向 3 个地形环境因子栅格数据。植被数据利用遥感影像来提取, 所用遥感影像数据是 2 景分辨率为 30 m × 30 m 的 Landsat 5 影像数据, 轨道号分别是 127/037 (2010 年 6 月 17 日获取) 和 128/037 (2010 年 5 月 23 日获取)。由于研究地区内地形起伏

较大, 阴影影响严重, 监督分类的误差将会增大, 因此采用对遥感影像进行缨帽变换, 提取土壤亮度指数 (brightness index, BI)、土壤绿色植被指数 (或绿度指数 green vegetation index, GVI)、土壤湿度指数 (wet index, WI) 作为植被的 3 个环境因子。土壤亮度指数是反映地表裸化程度的一个定量指数, 和生态环境呈负相关关系 (周小成等 2009, 张明华等 2010)。土壤绿度指数是反映地表植被覆盖程度的一个指数, 植被覆盖程度大的地区的指数值就高。土壤湿度指数是反映地表湿度状态的一个指数, 湿度高的地区的指数值就高。采用聚类自动提取方法对遥感影像提取研究地区的水体分布 (席晓燕等 2009)。采用决策树方法提取研究地区的居民地和道路分布 (韩丛丛等 2007)。然后在 Arcgis10.0 中使用距离分析工具分别提取距水体、居民地和道路距离的 3 个栅格数据。把所有环境变量统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影坐标系统和 30 m × 30 m 象元的栅格数据。使用 ENMTools (environmental niche modeling tools) 工具分析环境因子的相关性。

1.2.3 朱鹮繁殖地的 Maxent 模型和适宜度分析 采用 Maxent 3.3 软件构建朱鹮繁殖地的分布模型, 最大重复数设定为 2 500, 随机背景点设定为 10 000, 其他参数为模型默认值 (Phillips et al. 2008)。根据 ROC 曲线 (受试者工作特征曲线) 下面积 (area under curve, AUC) 对 Maxent 模型的精度进行评价 (Phillips et al. 2006)。同时根据以下 2 种方式分析环境因子的重要性: Jackknife 检验环境因子对模型预测的重要性和贡献值; 每个环境因子的反应曲线。朱鹮繁殖地的适合度数据结果输出格式采用 Logistic, 因此输出结果为 0 ~ 1 之间栖息地适宜度指数 (habitat suitability index, HSI) 形式的连续栅格数据 (Phillips et al. 2008)。把适宜度指数 0.5 作为基本适宜度阈值, 适宜度指数大于 0.5 的地区认为是朱鹮的基本适宜繁殖地, 大于 0.6 的地区认为是中适宜度繁殖地, 大于 0.7 的地

区认为是高适宜度繁殖地。

2 结果

2.1 朱鹮繁殖地与环境因子的关系

环境因子的相关性分析结果显示各因子之间的空间相关性都小于 0.5。朱鹮繁殖地 Maxent 模型的 AUC 值达到了 0.943，表明本模型对朱鹮适宜繁殖地具有很高的预测准确度。Jackknife 检验结果，海拔、土壤亮度、坡度、土壤绿度是影响朱鹮繁殖地分布的主要环境因子（图 2），其对模型的综合贡献值分别为 38.1%、18.3%、16.4%和 14.3%。距道路距离、距居民地距离、距水域距离、土壤湿度等因子次之，坡向对朱鹮繁殖地分布的影响很小。

环境因子的反应曲线（图 3）显示，朱鹮繁殖地分布的最佳海拔范围是 500~1 200 m，其他海拔的适宜度均显著降低。土壤亮度指数数据显示，朱鹮适宜繁殖地的分布随着地表裸化程度的增加而显著减少。繁殖地的适宜度与坡度呈现显著负相关关系，随着坡度的增加而

适宜性指数显著减少。土壤绿度指数数据显示，朱鹮适宜繁殖地与植被覆盖呈现一种抛物线似的相关关系，在植被覆盖中等程度的区域适宜度最高，低植被覆盖区域和高植被覆盖区域的适宜度都降低。距道路距离、距水域距离和土壤湿度等因子随着距离或指数的增加，繁殖地适宜度降低，呈现负相关关系。在小于 200 m 的范围内，距居民地距离与适宜性指数呈显著正相关关系；当距离大于 200 m 后，则显示出显著的负相关关系。

2.2 朱鹮繁殖地适宜度分析与评价

经 Maxent 模型分析，研究地区内还存在数量可观的朱鹮潜在适宜繁殖地（图 4）。当适宜度指数阈值分别大于 0.5、0.6、0.7 时，朱鹮适宜繁殖地的总面积分别是 1 682.63 km²、944.38 km²、432.96 km²（表 1）。但是，这些适宜繁殖地的分布相对分散和破碎化。较大的几个适宜于作为朱鹮繁殖地的斑块（面积大于 15 km²）主要分布在洋县、城固和西乡县境内。

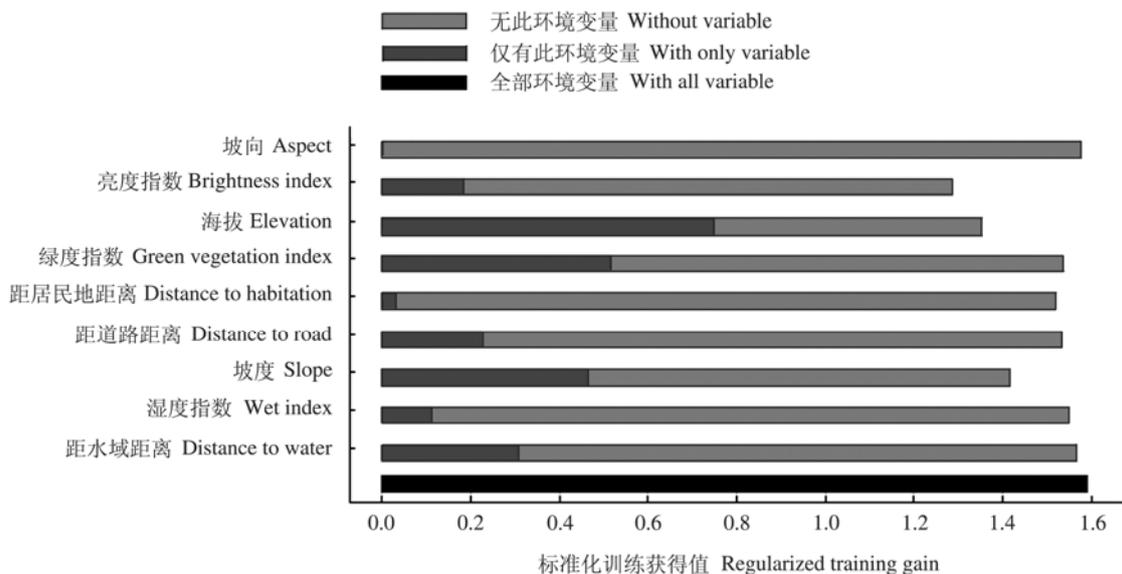


图 2 Jackknife 检验环境因子对朱鹮繁殖地适宜度的重要性比较

Fig. 2 Result of Jackknife test for evaluating relative importance of the environmental factor to the crested ibis breeding habitat suitability index

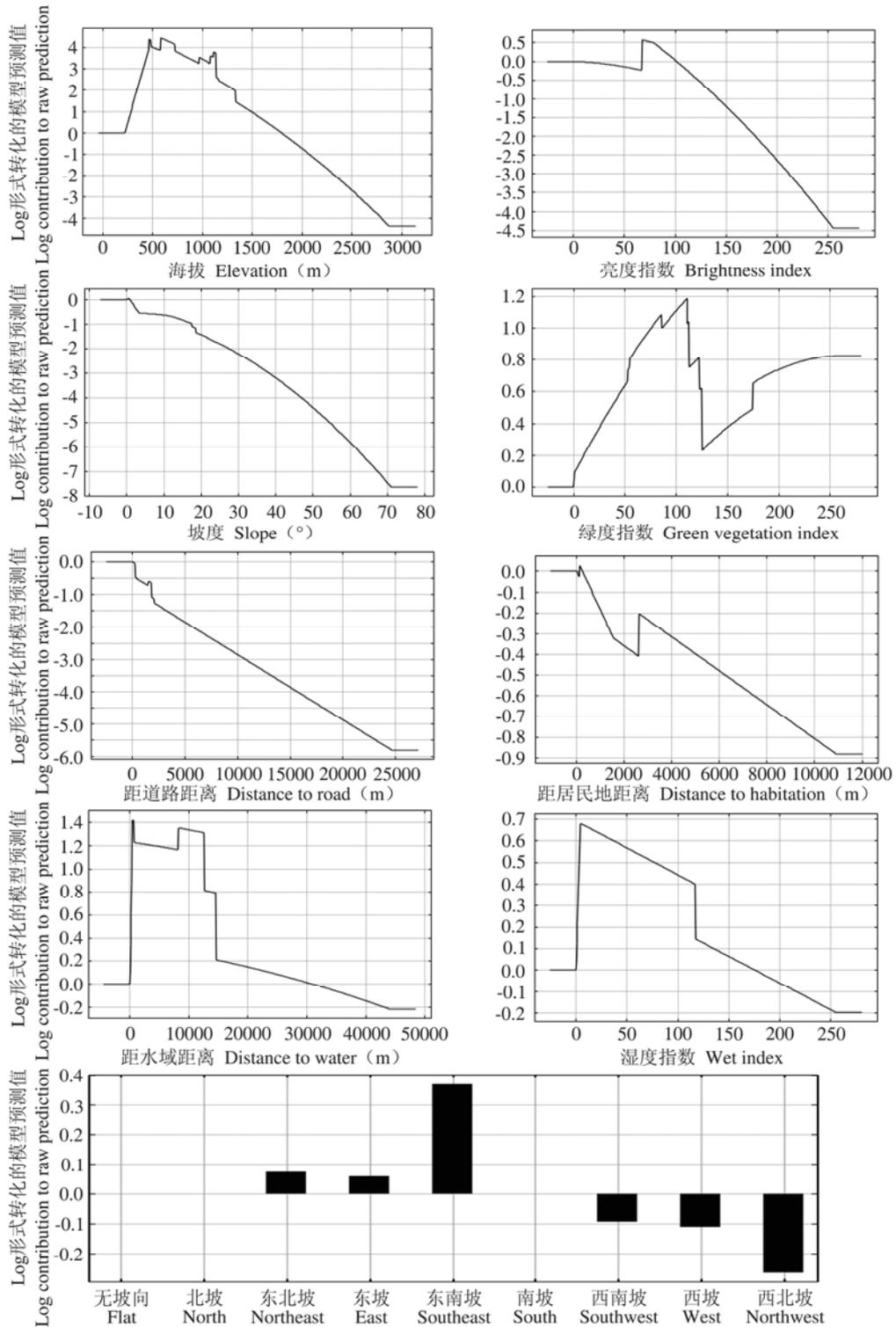


图 3 环境因子对模型预测的反应曲线

Fig. 3 Response curves of environment factors for model prediction

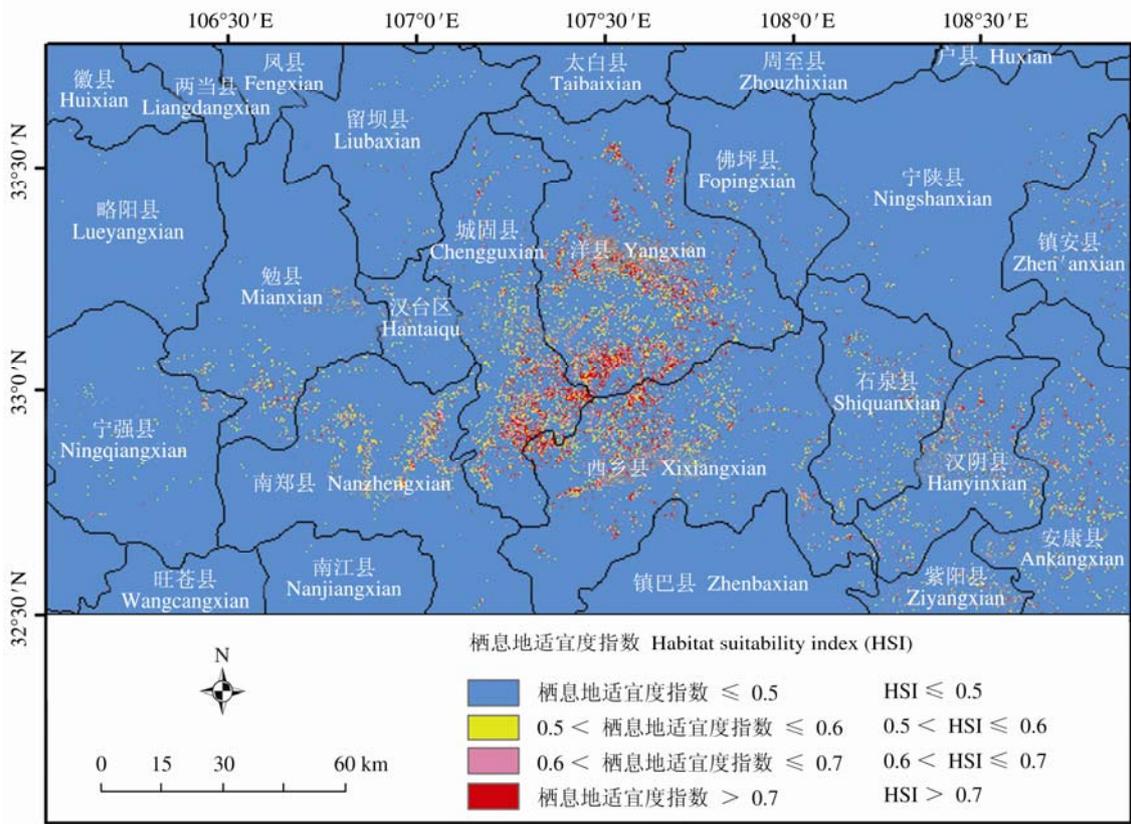


图 4 秦巴地区朱鹮适宜繁殖地的分布

Fig. 4 Suitable breeding habitat distribution of crested ibis in the Qinling-Bashan region

表 1 秦巴地区朱鹮适宜繁殖地在各县的分布面积 (单位: km^2)

Table 1 Area of suitable breeding habitat of crested ibis in each Qinling-Bashan County

县区 County	栖息地适宜度指数 Habitat suitability index (HSI)			
	HSI > 0.5	$0.5 < \text{HSI} \leq 0.6$	$0.6 < \text{HSI} \leq 0.7$	HSI > 0.7
洋县 Yangxian	491.24	179.03	149.45	162.76
西乡县 Xixiang	314.16	121.76	95.19	97.21
城固县 Chenggu	294.23	119.52	89.67	85.04
安康市 Ankang	128.30	68.05	39.52	20.74
南郑县 Nanzheng	115.57	65.34	36.58	13.65
汉阴县 Hanyin	85.82	45.61	26.32	13.89
石泉县 Shiquan	59.36	31.10	18.20	10.06
勉县 Mianxian	54.14	31.46	16.07	6.62
镇安县 Zhenan	35.29	16.67	10.61	8.01
紫阳县 Ziyang	29.48	14.92	9.43	5.13
宁强县 Ningqiang	20.59	14.71	4.80	1.08
宁陕县 Ninshan	16.31	8.02	4.89	3.40
汉台区 Hantai	15.59	10.51	3.78	1.30
留坝县 Liuba	11.68	6.22	3.61	1.85
佛坪县 Foping	10.87	5.34	3.31	2.22
总计 Total	1 682.63	738.25	511.42	432.96

最大的适宜繁殖地斑块位于洋县和城固交界处 (面积 101.08 km^2 , $\text{HSI} > 0.5$, 图 4)。朱鹮适宜繁殖地在洋县地区的分布面积最大 (491.24 km^2 , $\text{HSI} > 0.5$), 尤其是高适宜度的繁殖地面积相对更多 (表 1)。除洋县外, 朱鹮适宜繁殖地面积大于 100 km^2 的地区还有城固、西乡、南郑和安康地区, 大于 50 km^2 的有汉阴、勉县和石泉地区 ($\text{HSI} > 0.5$)。宁陕县境内适宜繁殖地的分布面积仅有 16.31 km^2 ($\text{HSI} > 0.5$), 当 $\text{HSI} > 0.7$ 时, 适宜面积更是仅有 3.40 km^2 。

3 讨论

随着野生种群数量逐渐增加, 朱鹮逐渐扩散到洋县周边地区进行繁殖。为了尽快增加朱鹮野生种群的数量和分布, 陕西省林业局 2007 年开展了野外放飞实验。朱鹮扩散成功的前提在于寻找到适宜的繁殖地。Maxent 模型假定研究地区内的所有象元构成物种的可能分布空间, 根据“出现点”数据的环境变量得出约束条件, 得到此约束条件下的最大熵的可能分布 (Phillips et al. 2006)。最大熵原理可以确保所有的环境变量信息都被使用, 并且避免了变量信息的误用 (Jaynes 1957)。因此, Maxent 模型的预测结果可以避免研究者的主观性, 更具有环境客观性。对于目前仅占据栖息地部分地区的物种来说, 使用 Maxent 模型预测潜在栖息地的分布更具有优势 (Engler et al. 2004)。而且 Maxent 模型相比其他传统方法仅需要较小的样本数据就可以得到很好的预测结果 (Phillips et al. 2006)。因此, Maxent 模型在濒危动物潜在栖息地的预测方面具有很大的应用前景。

本预测结果显示, 秦巴地区分布有一定数量的朱鹮适宜繁殖地。洋县、城固、西乡和南郑县是适宜繁殖地的主要分布地区, 而且适宜繁殖地斑块之间的间隔距离很短, 朱鹮可以轻松飞越。汉中市林业局 2013 年对朱鹮营巢地的野外调查统计数据也显示, 在城固、西乡和南郑县地区都已经发现了朱鹮的繁殖巢。虽然野

生朱鹮的种群数量由 1981 年的 7 只增加到当前的 1 000 多只 (王超等 2014)。虽然 20 世纪 80 年代的许多研究表明, 朱鹮具有较强的领域性, 通常一对朱鹮占领一条山沟 (路宝忠 1989)。但是如果环境容纳量增加, 朱鹮也表现出集群营巢的趋势, 例如保护区内的花园繁殖区朱鹮营巢密度在 2001 年就达到了 1 巢/ 40 hm^2 (刘冬平等 2003)。我们的结果显示, 在研究地区内朱鹮适宜繁殖地的面积为 $1\ 682.63 \text{ km}^2$, 最适繁殖地面积也达到了 432.96 km^2 。根据营巢密度, 研究地区内的适宜繁殖地的分布和面积可以满足朱鹮种群未来几年内的自然扩散需要。

朱鹮的再引入保护也是增加野外种群分布和数量的一个有效方法。但是如果不能选择合适的区域, 再引入种群将不可能建立可长期持续生存种群, 最终导致再引入保护的失败 (Soorae 2008)。宁陕县是当前朱鹮野外放飞实验的地区, 但是我们的结果显示, 该地区内的适宜繁殖地面积较少, 因此该地区可能无法维持较大朱鹮种群的长期生存。我们的结果还显示, 安康、汉阴和石泉等地区的适宜繁殖地分布面积较大, 因此未来可以考虑在这几个地区开展再引入。

海拔是影响朱鹮栖息地分布的重要环境因子。过去一般认为在春季早期, 朱鹮由低海拔地区飞到海拔 $680 \sim 1\ 300 \text{ m}$ 地区进行繁殖 (Li et al. 2002)。但是, 前人的一些研究结果显示, 繁殖地的分布与海拔呈负相关关系 (李欣海等 2001, Li et al. 2006), 这可能是由于统计方法所形成的主观误差 (李欣海等 2001)。我们的结果显示, 朱鹮繁殖地与海拔的关系类似抛物线函数形式, 并不是简单的直线关系。朱鹮繁殖地的最适海拔为 500 m 左右, 其最适海拔明显低于以前认为的最适海拔范围 ($800 \sim 1\ 200 \text{ m}$) (Li et al. 2002)。但是低海拔地区是人类活动干扰严重的地区, 应该加强对这些地区的保护管理, 使其尽快发展成为朱鹮的适宜繁殖地, 是未来保护管理工作的一个重要内容。

致谢 感谢中国科学院动物研究所宋延龄研究员在论文修改方面给予的极大帮助。本次研究在项目设计方面得到了荷兰特文特大学汪铁军教授的极大帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- Alerstam T, Högstedt G. 1982. Bird migration and reproduction in relation to habitats for survival and breeding. *Ornis Scandinavica*, 13(1): 25–37.
- BirdLife-International. 2001. Crested ibis. *Threatened Birds of Asia: the BirdLife International Red Data Book*. UK: Bird Life International, 315–329.
- Clark R G, Shutler D. 1999. Avian habitat selection: pattern from process in nest-site use by ducks? *Ecology*, 80(1): 272–287.
- Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43–57.
- Engler R, Guisan A, Rechsteiner L. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology*, 41(2): 263–274.
- Fontaine J J, Martin T E. 2006. Habitat selection responses of parents to offspring predation risk: an experimental test. *The American Naturalist*, 168(6): 811–818.
- Houston A I, Székely T, McNamara J M. 2005. Conflict between parents over care. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(1): 33–38.
- Jaynes E T. 1957. Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 106(4): 620–630.
- Li X H, Li D M, Ma Z J, et al. 2006. Nest site use by crested ibis: dependence of a multifactor model on spatial scale. *Landscape Ecology*, 21(8): 1207–1216.
- Li X H, Li D M, Li Y M, et al. 2002. Habitat evaluation for crested ibis: A GIS-based approach. *Ecological Research*, 17(5): 565–573.
- Li X H, Wang Y. 2013. Applying various algorithms for species distribution modelling. *Integrative Zoology*, 8(2): 124–135.
- Manly B F, McDonald L, Thomas D, et al. 2002. *Resource Selection by Animals: Statistical Design and Analysis for Field Studies*. 2nd ed. New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Morrison J L, McMillian M, Cohen J B, et al. 2007. Environmental correlates of nesting success in red-shouldered hawks. *The Condor*, 109(3): 648–657.
- Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259.
- Phillips S J, Dudik M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2): 161–175.
- Soorae P S. 2008. *Global Re-introduction Perspectives: Re-introduction Case studies from Around the Globe*. Abu Dhabi, UAE: IUCN/SSC Re-introduction Specialist Group.
- Warburton L S, Perrin M R. 2005. Nest-site characteristics and breeding biology of the Black-cheeked Lovebird *Agapornis nigrigenis* in Zambia. *Ostrich-Journal of African Ornithology*, 76(3/4): 162–174.
- 韩丛丛, 逢杰武, 吴泉源, 等. 2007. TM 影像中居民地提取的决策树方法研究——以烟台市为例. *遥感信息*, (6): 73–76.
- 李保国, 杨兴中, 王开锋, 等. 1992. 朱鹮在陕西地理分布的变迁. *生态学杂志*, 11(5): 50–55, 58.
- 李欣海, 李典谟, 丁长青, 等. 1999. 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 栖息地质量的初步评价. *生物多样性*, 7(3): 161–169.
- 李欣海, 马志军, 李典谟, 等. 2001. 应用资源选择函数研究朱鹮的巢址选择. *生物多样性*, 9(4): 352–358.
- 刘冬平, 丁长青, 楚国忠. 2003. 朱鹮繁殖期的活动区和栖息地利用. *动物学报*, 49(6): 755–763.
- 刘冬平, 丁长青, 楚国忠. 2006. 朱鹮的潜在繁殖地. *动物学报*, 52(1): 11–20.
- 刘荫增. 1981. 朱鹮在秦岭的重新发现. *动物学报*, 27(3): 273.
- 路宝忠. 1989. 朱鹮的人工投食. *野生动物*, 10(5): 23–24.
- 马小春. 2012. 陕西北朱鹮 (*Nipponia nippon*) 再引入种群的繁殖生态学初步研究. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文.
- 王超, 刘冬平, 庆保平, 等. 2014. 野生朱鹮的种群数量和分布现状. *动物学杂志*, 49(5): 666–671.
- 席晓燕, 沈楠, 李小娟. 2009. ETM+影像水体提取方法研究. *计算机工程与设计*, 30(4): 993–996.
- 张明华, 谭悦. 2010. 基于 ETM+影像的唐山地区生态环境质量评价. *水土保持研究*, 17(4): 104–108.
- 周小成, 汪小钦, 江洪, 等. 2009. 九龙江流域生态环境质量遥感评价与分析. *地球信息科学学报*, 11(2): 231–236.