

DOI: 10.5846/stxb201103110297

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. 生态学报 2012, 32(8): 2361–2370.

Zhai T Q, Li X H. Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(8): 2361–2370.

## 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

翟天庆<sup>1</sup>, 李欣海<sup>2,\*</sup>

(1. 陕西汉中朱鹮国家级自然保护区管理局, 洋县 723300; 2. 中国科学院动物研究所, 北京 100101)

**摘要:** 气候变化的不确定性和物种与环境关系的不确定性使气候变化生物学的研究充满变数。为了降低不确定性, 人们开始用组合模型综合比较的方法研究物种对气候变化的响应。以朱鹮 (*Nipponia nippon*) 为研究对象, 介绍组合模型综合比较方法的特点。朱鹮曾经高度濒危, 目前种群大小在迅速恢复中; 然而其分布区依旧狭小, 气候变化可能是朱鹮面临的新威胁。应用 BIOMOD 模型中的 9 种模型, 选择了每年的最低温和最高温、温度的季节性变异、每年的总降水量和降水的季节性变异共 5 个气候因子, 依据 WorldClim 气候数据的 CGCM2 气候模型的 A2a 排放情形, 计算了朱鹮当前 (1950—2000 年) 的适宜生境和 2020 年、2050 年、2080 年 3 个阶段的潜在生境范围。结果表明朱鹮潜在生境将逐渐北移, 生境中心脱离现在的保护区。因此, 制定朱鹮的长期保护策略是必要的。9 个模型在预测结果上、变量权重上和拟合优度的指标上都有差异, 反映了模型本身的不确定性。气候变化的生物学效应比较复杂, 应用多个模型进行综合比较, 可以尽可能地减少模型所导致的误差。

**关键词:** 气候变化; 朱鹮; 组合模型; 生境偏移; BIOMOD 模型

## Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models

ZHAI Tianqing<sup>1</sup>, LI Xinhai<sup>2,\*</sup>

1 Shaanxi Hanzhong Crested Ibis National Nature Reserve, Shaanxi Province, Yang County 723300, China

2 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** The uncertainty of climate change and uncertainty of species-environment relationship cause great variability in the studies of climate change biology. To reduce such uncertainties, scientists started to use ensemble models in this field. Our objective is to introduce the approach of the ensemble models, and predict the future range shift of one endangered species, the crested ibis (*Nipponia nippon*) as an example.

The crested ibis had been critically endangered, and currently its population is rapidly recovering. The range of the crested ibis is still small after its recovery from the critical endangered status, so that climate change might be a threat to its long term survival. We used the locations of nest site to represent the distribution of the crested ibis, which have a high accuracy level and has being accumulated from 1981 to 2010. We applied nine modes in BIOMOD (a package of R software) to predict the current (1950—2000) and future (i. e. 2020, 2050, and 2080) distribution ranges of the crested ibis using five climate variables (i. e. annual minimum temperature, annual maximum temperature, seasonal variance of temperature, annual total precipitation, and seasonal variance of precipitation) based on CGCM2 climate model A2a emission scenario in WorldClim database. The nine models are Generalized Linear Models, Generalized Additive Models,

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05080701); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05080701); 中欧 ECBP 项目“中国生物多样性和气候变化保护战略与行动计划研究”

收稿日期: 2011-03-11; 修订日期: 2012-02-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixh@ioz.ac.cn

Classification Tree Analysis , Artificial Neural Networks , Mixture Discriminant Analysis , Multivariate Adaptive Regression Splines , Generalized Boosting Models , Random Forest , and Surface Range Envelope.

We compared the current climate conditions with those in 2080 , and found that the current habitat of the crested ibis would become warmer and wetter in the future. All nine models indicated that the crested ibis would have a northward range shift ( actually a higher elevation shift) , and the distribution center would be out of the current nature reserve. Therefore , it is necessary to develop a long term conservation plan for the crested ibis , e. g. adjusting the nature reserve border or design a new nature reserve. The nine models showed differences in predicted ranges , weights of explanatory variables , and goodness-of-fit ( based on ROC curves and Cohen's Kappa indices) . Among five climate variables , the seasonal variance of precipitation is the most important variable that associated with distribution of the crested ibis; and seasonal variance of temperature is the secondly important variable. The overall performance of all models are very high , indicated the distribution of the crested ibis had a strong pattern ( The crested ibis is well constrained by environmental variables , not scattered randomly) . The Random Forest has the highest model performance , and the Artificial Neural Networks ranks the second. The high performance of the two models is partly due to their high complexity.

We should be cautious whenever using species distribution models to predict the effect of climate change , because such models are based on the assumption that climate variables are the limiting variables restricting the range of the species , and the current population is in its favorite climate niche. As to the crested ibis , the assumption can hardly be satisfied , because other environmental variables such as human disturbance , wetland , and vegetation are also important to the crested ibis. As a result , the predicted range shift of the crested ibis is only a trend or potential distribution pattern in the future.

Because of the difference in model prediction and variability of model performance , we suggest to use ensemble models to deal with complex problem such as biological consequences of climate change to decrease the errors from models.

**Key Words:** climate change; crested ibis; ensemble models; range shift; BIOMOD

目前 ,全球气候正经历着一个显著的变暖过程<sup>[1-3]</sup>。许多物种的分布范围将在气候变化的影响下发生变化 ,如纬度上移、海拔上移、分布区缩小等<sup>[4-7]</sup>。研究物种对气候变化的响应是当前保护生物学者面临的重要问题<sup>[2,8]</sup>。

近几十年来 ,人们发展出了许多物种分布模型( Species distribution models ,SDMs) ,可以预测未来气候情形下物种的分布<sup>[9]</sup>。然而 ,数据的不完整性、物种-环境关系的复杂性和模型的局限性导致了预测的不确定性<sup>[10]</sup>。近几年来 ,为了解决这个问题 ,人们提出了组合模型( Ensemble models) 的概念 ,即同时使用多种物种分布模型并进行综合比较 ,以便达到最佳的预测精度<sup>[11-13]</sup>。常用的模型有回归模型、分类树和混合大量模型的神经网络、随机森林等。

朱鹮( *Nipponia nippon*) 属于鹮形目鹮科 ,是一种中型涉禽 ,曾经分布在包括中国、日本、俄罗斯、朝鲜和韩国在内的亚洲东部地区<sup>[14]</sup>。朱鹮种群在上世纪几乎绝灭<sup>[15-16]</sup> ,然而保护工作者的努力下 ,其野生种群大小从 1981 年的 7 只<sup>[17]</sup> 增长到现在的 1000 余只 ,成为中国野生动物保护的成功案例之一<sup>[18-19]</sup>。

尽管朱鹮种群恢复很快 ,当前朱鹮的分布范围依旧比较狭窄<sup>[20-21]</sup> ,气候变化可能对其产生较大的影响。人们对朱鹮的生境选择进行了较多的研究<sup>[22-29]</sup> ,然而在气候变化对朱鹮的影响方面 ,尚无任何研究报道。利用组合模型综合比较的方法 ,尽可能地降低模型预测的不确定性 ,来分析未来气候情形下朱鹮可能的分布范围 ,为长期保护朱鹮提供决策依据。

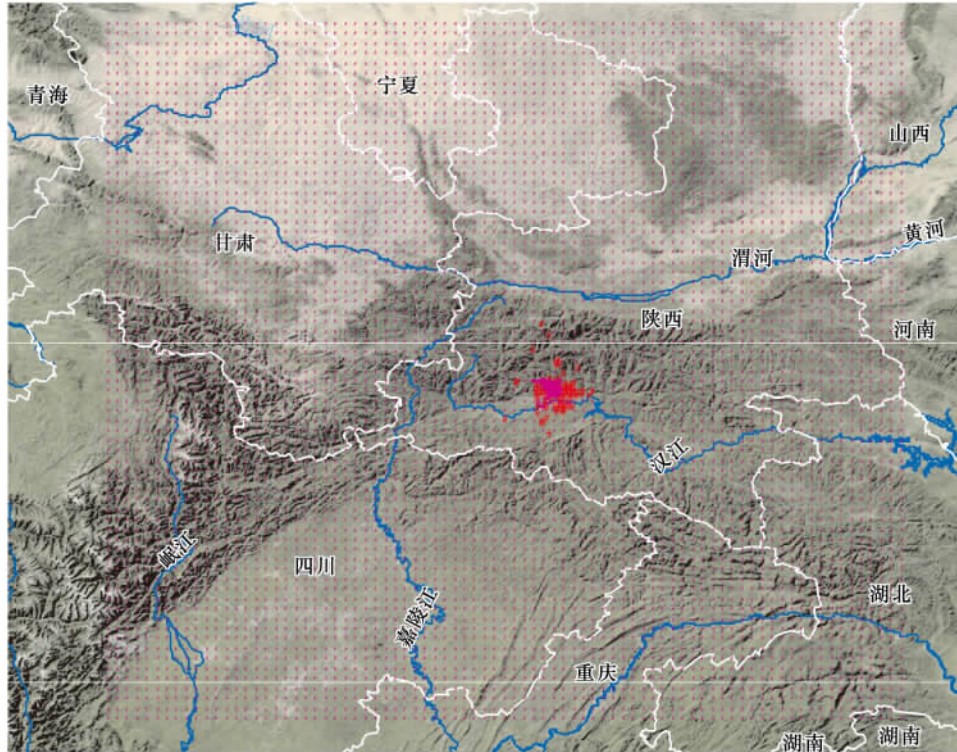
## 1 方法

### 1.1 数据

应用朱鹮巢址的位置来代表朱鹮的分布点。朱鹮在高大乔木上营巢 ,每年巢址固定。用 GPS 定位营巢树 ,精度在 10m 左右<sup>[30]</sup>。繁殖期是影响朱鹮种群动态的关键时期 ,巢址能够较好地反映在这一时期朱鹮的生

境需求,如合适的温湿度、适宜的坡度和坡位、适宜的海拔、高大乔木的存在、较低的人为干扰和较充足的湿地等<sup>[18,22-23]</sup>。汇总了 1981 年至 2010 年朱鹮巢址的信息,共计 558 条记录。

因为朱鹮在 1981 年被重新发现后的 30a 中,没有进行长距离的迁徙。所以,选择的研究范围限定在以朱鹮现有生境为中心的区域,面积为 770 km×770 km(图 1)。在这个区域内每隔 0.1 经度和纬度选择一个点,共计 5751 个点(图 1)。通过比较距离,定义其中 34 个点为朱鹮分布点(558 个巢址与这 34 个点相重合),其它的为没有朱鹮分布的点。



注:背景中的紫色点研究区域的5751个均匀分布的定位点

图 1 1981 年至 2010 年朱鹮巢址(红色三角)的位置和朱鹮国家级保护区(紫色区域)的位置

Fig. 1 The nest sites of the crested ibis (red triangles) and crested ibis national nature reserve (purple area) 背景中的紫色点为研究区域的 5751 个均匀分布的定位点

应用 WorldClim 气候数据集,这个数据集包括全球陆地区域 19 个气候因子的图层<sup>[31]</sup>,是生态学家广泛使用的气候数据。在 19 个气候因子中,选择每年的最低温和最高温、温度的季节性变异、每年的总降水量和降水的季节性变异共 5 个气候因子,来代表生境的气候信息。关于未来的气候,选择加拿大气候模型和分析中心(Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis,简称 CCCma)的 CGCM2(The second generation coupled global climate model)全球气候模型。气候变化预设情景采用 IPCC 提供的温室气体排放情景特别报告 SRES(The Special Report on Emissions Scenarios)的 A2a 的预设情景,即相对偏高的一个增温情景<sup>[1]</sup>。预测 2020 年、2050 年和 2080 年 3 个阶段朱鹮可能的分布区。因此,分析涉及的 5 个气候因子各有 4 个时间阶段,分别为现在、2020 年、2050 年和 2080 年,共计 20 个变量。每个变量以图层的形式储存在地理信息系统中。

用图 1 中均匀分布的 5751 个点在地理信息系统中进行数据提取(用 ZonalStatisticsAsTable 方法),获得每个点对应的 20 个图层的值。基于相关系数矩阵的主成分分析展示这 5751 个点对应的 20 个变量的关系。

## 1.2 模型

分析物种和环境关系的模型有很多<sup>[32]</sup>。应用 R 软件<sup>[33]</sup>的程序包 BIOMOD 中包含的 9 个模型,分别预测朱鹮目前适宜的生境和未来可能的分布区。BIOMOD 是 Biodiversity Modelling 的缩写,通过整合 9 个模型,预测物种分布区及其随气候的变化<sup>[11]</sup>。

### 1.2.1 广义线性模型(Generalized Linear Models, 简称 GLM)

广义线性模型是一般线性模型的扩展,允许因变量为二项分布、泊松分布等离散型的分布,而一般线性模型要求因变量为连续变量,而且其残差为正态分布;因此广义线性模型比一般线性模型有更广泛的应用<sup>[34]</sup>。BIOMOD 应用了自动逐步回归,依据模型拟合优度的统计量 Akaike Information Criterion (AIC) 或 Bayesian Information Criteria (BIC) 去除冗余变量,减少共线性<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 广义可加模型(Generalized Additive Models, 简称 GAM)

广义可加模型是广义线性模型和可加模型的混合,可以通过光滑样条函数进行局部优化,因此残差一般比广义线性模型小,更适宜处理因变量和自变量比较复杂的关系<sup>[35]</sup>。BIOMOD 应用 3 次插值平滑算法,并利用自动逐步回归选取对每个物种影响显著的变量<sup>[11]</sup>。

### 1.2.3 分类树分析(Classification Tree Analysis, 简称 CTA)

分类树分析根据自变量的一致性,对因变量进行重复分组,形成树的枝叶。每次数据均被分为两组,每一组尽量同质,即组内方差最小<sup>[36]</sup>。枝叶节点间的差异反映了能够解释的数据的变异,节点越多解释的变异越多;然而节点越多枝叶就越多,模型就越复杂。分类树分析将在解释的变异(越大越好)和枝叶数间(越小越好)这两个相互矛盾的量之间取得平衡<sup>[36]</sup>。BIOMOD 应用交叉验证取得解释的变异和枝叶数间的平衡值<sup>[11]</sup>。

### 1.2.4 人工神经网络(Artificial Neural Networks, 简称 ANN)

人工神经网络是在结构上类似神经网络的系统中构建模型以达到模型的多重组合。应用较多的模型是广义线性回归模型,通过定义节点权重的衰减程度和一定的隐元,几乎可以趋近任何平滑函数。通过调节模型参数,人工神经网络具有学习的功能<sup>[37]</sup>。BIOMOD 应用交叉验证优化的权重衰减和隐元的数量<sup>[11]</sup>。人工神经网络运算需要较长的时间,要尽量避免额外的交叉验证。

### 1.2.5 混合判别分析(Mixture Discriminant Analysis, 简称 MDA)

混合判别分析是基于混合模型的一种分类方法,是线性判别分析的扩展形式,用混合的正态分布获取每个分类等级的密度估计<sup>[38-39]</sup>。在统计软件 R 中,MDA 可用 MDA 包运行。

### 1.2.6 多元适应回归样条函数(Multivariate Adaptive Regression Splines, 简称 MARS)

MARS 的解释变量在不同的等级,其参数有不同的最优化值<sup>[40]</sup>。这与线性过程中解释变量的系数保持不变不同。MARS 模型参数的临界点或阈值取决于样条函数结点,与分段回归类似。MARS 的优越之处在于样条函数结点是通过运算自动确定的。此外, MARS 可以估计变量间的交互作用<sup>[40]</sup>。

### 1.2.7 广义推进模型(Generalized Boosting Models, 简称 BRT)

广义推进模型通过在迭代过程中调整不同解释变量的权重和解释变量在不同区间的权重,达到优化分类的目的<sup>[41-42]</sup>。

### 1.2.8 随机森林(Random Forest, 简称 RF)

随机森林应用 Breiman 的随机森林算法,通过对大量的分类树的计算来进行分类和回归<sup>[43]</sup>。随机森林把一组解释变量的值(一个向量)输入森林中的每棵分类树中,每棵树都给出这个向量的分类结果(例如物种存在还是不存在)。随机森林对所有的树的分类结果进行打分,并选择得分最高的分类结果。整个算法包括树的生长阶段和投票选择阶段。随机森林在树的构建过程中,随机地从源数据集获取训练集,随机地选择训练集的属性,因此和其它树分类器的工作原理完全不同。随机森林构建的组合树的误差率更加稳定<sup>[43]</sup>。

### 1.2.9 表面分布区分室模型(Surface Range Envelope, SRE)

表面分布区分室模型与 BioClim 模型相同,汇总物种出现记录点每个变量的最大和最小值,预测的物种分布范围气候变量取值在这些最大值和最小值之间<sup>[44]</sup>。这是模拟物种分布的最简单的方法。

上述 9 种模型可分为回归模型、分类树模型和复杂模型三类。回归模型需要估计每个独立变量(环境变量如海拔、温度等)的变化对因变量(连续变量,如生境选择的概率)的影响;分类树模型同聚类分析和判别分



析类似 根据独立变量及其组合的相似性(或差异性)对因变量(分类变量,如生境选择的与否)进行判断;复杂模型一般会混合回归和分类树的算法。广义线性模型、广义可加模型和多元适应回归样条函数是回归模型。在生境选择分析中,广义线性模型把二项分布的因变量(生境选择的与否)通过 logit 转换变为连续变量,然后通过最大似然估计得到每个自变量的系数。广义可加模型在广义线性模型的基础上,增加了在自变量不同取值区间的局部优化(不同区间有不同回归参数)。多元适应回归样条函数同广义可加模型类似,都应用了自变量的局部优化;然而两者算法不同:广义可加模型通过平滑函数或高次的样条进行局部优化,而多元适应回归样条函数应用基本函数(包括常数项、线性项和交互项)进行局部优化。分类树分析和混合判别分析是分类树模型。分类树分析比判别分析复杂,一般是在多个节点的判别分析的组合。混合判别分析用混合的正态分布获取每个分类等级的密度估计,一般比线性判别分析和二次判别分析准确。广义推进模型同时应用了回归模型和分类树模型,通过组合较多的弱判别规则达到最终较为准确的判别。人工神经网络和随机森林是复杂模型,同时包含有回归和分类树的算法。在大多数情况下,人工神经网络与回归模型更为接近,一般是大量广义线性模型的组合。随机森林与分类树模型更为接近,是大量分类树的组合。表面分布区分室模型仅是对因变量(生境选择的与否)在每个自变量取值范围内的限定,不涉及回归或分类树的算法。

### 1.3 模型比较

分别通过模型拟合优度的指标 ROC 曲线和 Cohen’s Kappa 指数来比较不同的模型。ROC 曲线全称为接受者操作特性曲线,就是以虚报概率(即没有物种的地方预测为有)为横轴,实报概率(即存在物种的地方预测为有)为纵轴所组成的坐标图中,实报概率随虚报概率的变化(从 0 到 1)而变化的曲线<sup>[45]</sup>。曲线下面的面积 AUC(Area Under the Curve)越大,模型拟合优度越高。Cohen’s Kappa 指数是进行模型预测一致性检验的指数<sup>[46]</sup>。这个指数排除了由随机因素导致一致性的可能性,因此是更为稳健、更为保守的指标。

## 2 结果

根据 WorldClim 气候数据的 CGCM2 气候模型的 A2a 排放情形,比较了当前(1950—2000 年)年总降水和 2080 年总降水间的差别,以及年均温的差别(图 2),发现目前朱鹮分布的秦岭山区在未来降水将有所增加;整个区域的温度将有显著上升。

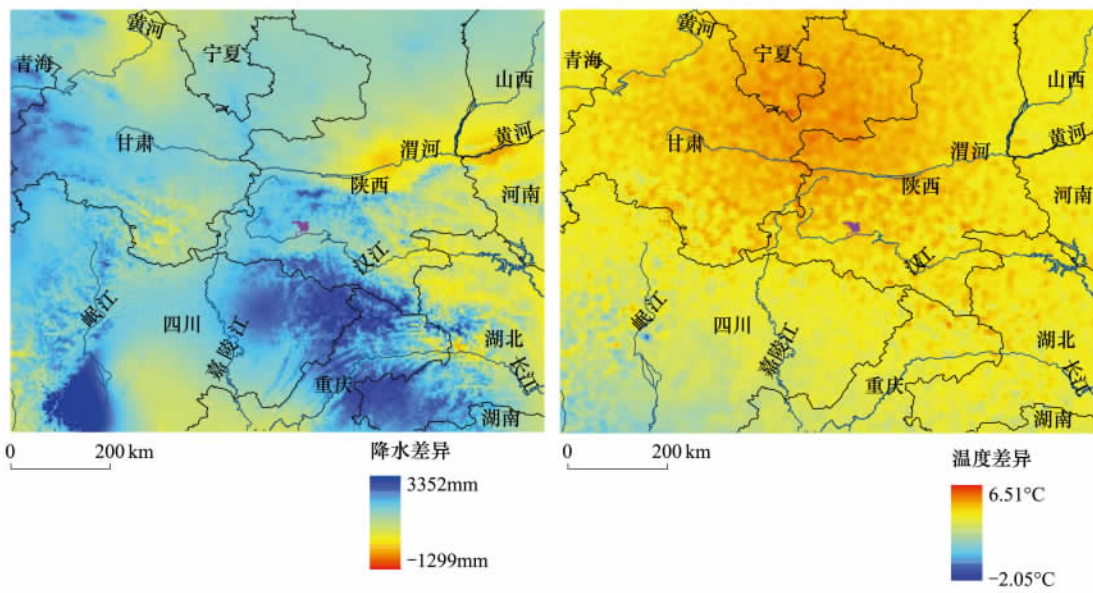


图 2 目前(1950—2000 年)和 2080 年年总降水的差别和年均温的差别

Fig. 2 Differences in annual total precipitation and annual mean temperature at present (1950—2000) and in 2080 based on WorldClim dataset

目前和 2080 年的气候数据取自 WorldClim 气候数据集;中间紫色区域为朱鹮国家级保护区

主成分分析显示了研究区域 5751 个点对应的 20 个变量中,每个气候变量在 4 个时间阶段都略有差别,但差别不大。各个变量间的独立性较好,然而最低温和总降水同降水的季节变异呈负相关(图 3)。这两个主成分解释了 86% 的变异。

9 个模型中,每个模型都给出了朱鹮的潜在生境。潜在生境是指在朱鹮的当前生境为其最适宜生境的前提下,模型预测的未来适宜朱鹮生存的区域(这些区域与当前朱鹮分布核心区的环境条件相似)。9 个模型全部预测出了目前朱鹮的核心分布区(图 4),但是核心区外围的区域有差别(图 4)。在 5 个环境因子中,降水的季节变异和温度的季节变异权重较高。变量的权重在 9 个模型间差别较大(表 1)。

根据 ROC 曲线和 Cohen's Kappa 指数,发现所有模型预测的准确率都比较高,其中随机森林的指标最高,人工神经网络次之(表 2 和表 3)。

根据随机森林预测朱鹮在 2020 年、2050 年和 2080 年的潜在生境,发现朱鹮的潜在分布范围在逐渐北移,其分布中心区从目前的东经 107.5 北纬 33.3,到 2020 年的东经 106.9 北纬 33.8、2050 年的东经 107.6 北纬 34.4 和 2080 年的东经 108.1 北纬 34.3(图 5)。

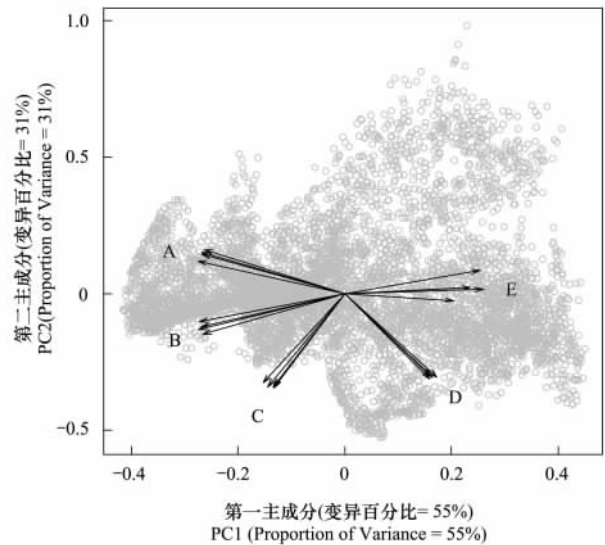


图 3 研究区域 5751 个点对应的 5 个气候因子

Fig. 3 The loadings of 20 variables of five climate factors in the PCA space

A: 每年总降水量; B: 年最低温; C: 年最高温; D: 每年温度的季节性变异; E: 和降水的季节性变异,在当前、2020 年、2050 年和 2080 年 4 个阶段共计 20 个变量,在第一和第二主成分上的负载。图中灰色圆圈显示 5751 个点在第一和第二主成分上的值

表 1 5 个气候变量在 BIOMOD 的 9 个模型中的权重

Table 1 The weights of five climate variables in the nine models in BIOMOD

模型 Models	气候因子 Climate variables				
	p2000	pvar2000	tmax2000	tmin2000	tvar2000
ANN	0.422	0.002	0.389	1.174	0.303
CTA	0	0.979	0	0	0.629
GAM	0	0.941	0	0	0.637
GBM	0.068	0.941	0	0.006	0.138
GLM	0	0.882	0	0	0.652
MDA	0.597	0.617	0.337	0.656	0.712
MARS	0	0.599	0.681	0.897	0.651
RF	0.262	0.355	0.006	0.117	0.238
SRE	0	0.203	0	0	0.041

变量 p2000、pvar2000、tmax2000、tmin2000 和 tvar2000 分别表示年总降水、降水的季节变异、年最高温、年最低温和温度的季节变异

### 3 讨论

每个气候变量在现在、2020 年、2050 年和 2080 年这 4 个时间阶段都略有差别,但差别不大(图 3),显示出气候变化的渐进性。在未来,朱鹮目前的核心栖息地秦岭南坡将会更加温暖湿润(图 4)。目前描述气候变化的模型有若干个,排放情形也有多种;虽然这些模型之间有差异,但是全球气候变暖是毋庸置疑的<sup>[47-48]</sup>。所以只用了一种气候模型(即 CGCM2)的一种排放情形(即 A2a)来预测朱鹮的生境变化。

研究显示朱鹮的潜在分布区将在气候变化的影响下北移,这与大多数气候变化生物学的研究结果一致<sup>[5, 49-51]</sup>。朱鹮在未来的北移,实质上是海拔的上移。目前朱鹮的核心生境在秦岭南坡海拔 400—1200m 的区域;随着气候的变化,朱鹮可能上移到更高的海拔,甚至脱离现有的保护区(图 5)。因此,针对气候变化的

趋势, 制定朱鹮保护的长期策略是很有必要的。

表 2 BIOMOD 中的各个模型基于 ROC 曲线的准确性指标

Table 2 The goodness-of-fit of the nine models in BIOMOD on the basis of ROC curves

模型 Models	灵敏性 Sensitivity	专一性 Specificity
ANN	97.1	98.2
CTA	97.1	97.9
GAM	94.1	92.5
GBM	97.1	97.6
GLM	88.2	91.5
MDA	89.3	92.5
MARS	91.2	92.7
RF	100.0	100.0
SRE	<NA>	<NA>

灵敏性指实报概率; 专一性为虚报概率, 即没有物种的地方预测为没有; SRE 不给出物种分布的概率, 只能给出物种出现或不出现的结果, 所以没有 ROC 曲线

表 3 BIOMOD 中的各个模型基于 Cohen's Kappa 指数的准确性指标

Table 3 The goodness-of-fit of the nine models in BIOMOD on the basis of Cohen's Kappa

模型 Models	灵敏性 Sensitivity	专一性 Specificity
ANN	100.0	98.2
CTA	97.1	97.9
GAM	94.1	92.3
GBM	85.3	99.5
GLM	82.4	93.5
MDA	82.1	91.2
MARS	55.9	99.6
RF	100.0	100.0
SRE	97.1	95.3

灵敏性指实报概率; 专一性为虚报概率

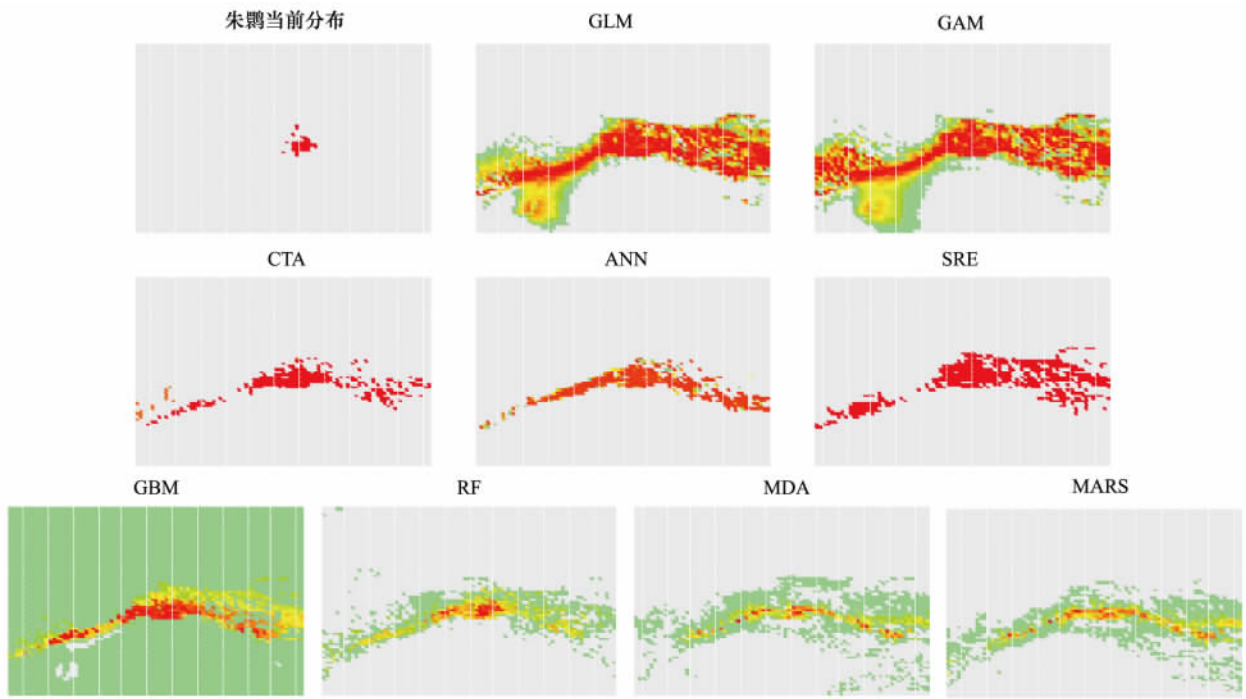


图 4 应用 BIOMOD 中的各个模型计算出来的当前朱鹮的适宜生境( 暖色表示适宜度最高)

Fig. 4 Predicted current suitable habitat of crested ibis using the models in BIOMOD ( The warm color areas are the suitable areas)

根据随即森林模型, 目前朱鹮巢区( 图 5A) 为其最适宜的生境, 在最适宜生境的周围有大面积的中等适宜生境( 绿色区域) ( 图 5B)。本文应用的 9 个模型, 都给出在整个研究区域( 以 5751 个点代表) 朱鹮栖息的概率; 其预测的适宜生境, 都大于朱鹮实际的分布区。原因是朱鹮的分布还受到人为干扰、觅食地( 如水田) 的面积、种内竞争( 领域行为) 和空间阻隔等因素的制约。对于朱鹮 随即森林模型( 只应用 5 个气候变量) 的预测结果与其实际分布的一致性较高( 图 4) 应用 5 个气候变量预测其未来潜在生境的前提。

用 9 种模型预测朱鹮在未来气候条件下的生境变化。这 9 种模型在预测的结果上、变量的权重上和拟合优度的指标上都有差异, 反映了模型本身的不确定性。这正是应用多个模型进行综合比较的原因, 以便尽可



能地减少模型所导致的误差。模型的好坏取决于数据。如果环境变量对朱鹮生境的影响是单调线性的,广义线性模型比较适用;如果环境变量对朱鹮生境的影响有较强的交互作用,多元适应回归样条函数比较适用;如果环境变量对朱鹮生境的影响是波动的,而且变量间的交互作用不明显,广义可加模型比较适用;如果环境变量对朱鹮生境的影响比较复杂,人工神经网络和随机森林模型比较适用。一般而言,比较复杂的模型(如随机森林和神经网络)在各种情况的预测精度都较高。

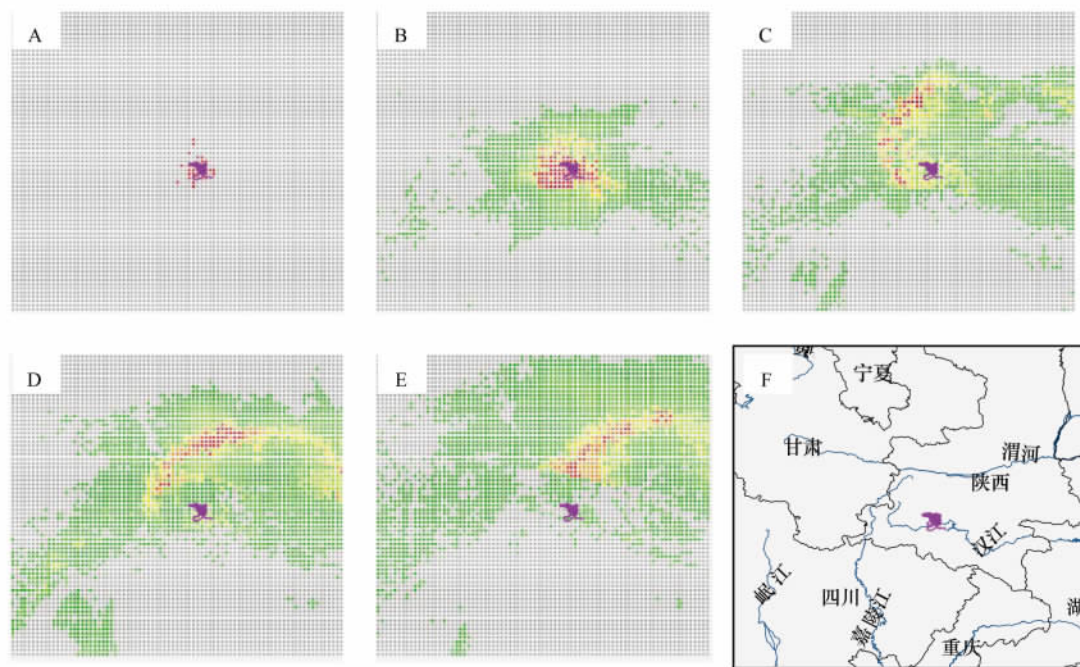


图5 当前朱鹮巢址的分布点(A)、应用随机森林模型预测的当前分布区(B)、2020年的潜在分布区(C)、2050年的潜在分布区(D)、2080年的潜在分布区(E)和研究区域的省界(F)

**Fig. 5** The current occurrences of crested ibis (A), predicted current suitable habitat (B), projected suitable habitat in 2020 (C), projected suitable habitat in 2050 (D), projected suitable habitat in 2080 (E), and the province borders in the study area (F). The model used in prediction is random forest

图中心紫色区域为朱鹮国家级保护区

尽管本研究中随机森林等模型的拟合优度较高(表2和表3),还是不能完全确定朱鹮未来的分布,因为朱鹮与气候因子的关系还是充满不确定性的。一般而言,应用气候-物种分布模型的前提是气候因子是物种分布的主要限制因子,而且当前物种分布范围与气候因子的最适宜区间相一致<sup>[9]</sup>。对于朱鹮,湿地、人类干扰和植被等因素对其影响更大<sup>[18,26,52]</sup>。预测的未来分布区只是在气候驱动下的生境偏移的方向。朱鹮是否面临生境的转移,还主要取决于未来湿地、人类干扰和植被等因素的变化。

#### References:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Araújo M B, Rahbek C. How does climate change affect biodiversity? *Science*, 2006, 313(5792): 1396-1397.
- [3] Beaumont L J, Pitman A J, Poulsen M, Hughes L. Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global Change Biology*, 2007, 13(7): 1368-1385.
- [4] Buermann W, Saatchi S, Smith T B, Zutta B R, Chaves J A, Milá B, Graham C H. Predicting species distributions across the Amazonian and Andean regions using remote sensing data. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(7): 1160-1176.
- [5] Colwell R K, Brehm G, Cardelús C L, Gilman A C, Longino J T. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 2008, 322(5899): 258-261.



- [ 6 ] Kharouba H M , Algar A C , Kerr J T. Historically calibrated predictions of butterfly species' range shift using global change as a pseudo-experiment. *Ecology* , 2009 , 90( 8) : 2213–2222.
- [ 7 ] Sekercioglu C H , Schneider S H , Fay J P , Loarie S R. Climate change , elevational range shifts , and bird extinctions. *Conservation Biology* , 2008 , 22( 1) : 140–150.
- [ 8 ] Thomas C D , Cameron A , Green R E , Bakkenes M , Beaumont L J , Collingham Y C , Erasmus B F N , de Siqueira M F , Grainger A , Hannah L , Hughes L , Huntley B , van Jaarsveld A S , Midgley G F , Miles L , Ortega-Huerta M A , Peterson A T , Phillips O L , Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature* , 2004 , 427( 6970) : 145–148.
- [ 9 ] Wiens J A , Stralberg D , Jongsomjit D , Howell C A , Snyder M A. Niches , models , and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2009 , 106( S2) : 19729–19736.
- [ 10 ] Pearson R G , Thuiller W , Araújo M B , Martinez-Meyer E , Brotons L , McClean C , Miles L , Segurado P , Dawson T P , Lees D C. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* , 2006 , 33( 10) : 1704–1711.
- [ 11 ] Thuiller W , Lafourcade B , Engler R , Araújo M B. BIOMOD — a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* , 2009 , 32( 3) : 369–373.
- [ 12 ] Coetsee B W T , Robertson M P , Erasmus B F N , van Rensburg B J , Thuiller W. Ensemble models predict important bird areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. *Global Ecology and Biogeography* , 2009 , 18( 6) : 701–710.
- [ 13 ] Araújo M B , New M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* , 2007 , 22( 1) : 42–47.
- [ 14 ] BirdLife International. Crested Ibis. *The BirdLife International Red Data Book: Threatened birds of Asia*. Cambridge: BirdLife International , 2001: 315–329.
- [ 15 ] Li X H , Tian H D , Li D M. Why the crested ibis declined in the middle twentieth century. *Biodiversity and Conservation* , 2009 , 18( 8) : 2165–2172.
- [ 16 ] Shi D C , Yu X P , Fan C D , Cao Y H. The description of the decline of the crested ibis. *Journal of Northwest University* , 1991 , 21( Supplement) : 25–30.
- [ 17 ] Liu Y Z. Rediscovery of the crested ibis in Qin-ling range. *Acta Zoologica Sinica* , 1981 , 27( 3) : 273–273.
- [ 18 ] Li X H , Li D M , Ma Z J , Schneider D C. Nest site use by crested ibis: dependence of a multifactor model on spatial scale. *Landscape Ecology* , 2006 , 21( 8) : 1207–1216.
- [ 19 ] Wang G M , Li X H. Population Dynamics and Recovery of Endangered Crested Ibis ( *Nipponia nippon* ) in Central China. *Waterbirds* , 2008 , 31( 3) : 489–494.
- [ 20 ] Zhai T Q , Ding H H , Zhang Z , Qing B P , Wang C , Ke L , Meng J R , Chen Y P. Population status of crested ibis in China and its natural migration. *Chinese Journal of Wildlife* , 2008 , 29( 6) : 319–321.
- [ 21 ] Zhou X H , Jiang L , Wang Q , Zhang W , Cheng K , Ding H H. The tolerance of human disturbance on Crested Ibis ( *Nipponia nippon* ) of wardering stage. *Acta Ecologica Sinica* , 2009 , 29( 10) : 5176–5184.
- [ 22 ] Liu D P , Ding C Q , Chu G Z. Home range and habitat utilization of the crested ibis in the breeding period. *Acta Zoologica Sinica* , 2003 , 49( 6) : 755–763.
- [ 23 ] Liu D P , Ding C Q , Chu G Z. Potential breeding sites of crested ibis *Nipponia nippon*. *Acta Zoologica Sinica* , 2006 , 52( 1) : 11–20.
- [ 24 ] Wang Z Y , Zhao L M. Habitats nested by the Japanese crested ibis ( *Nipponia nippon* ) . *Chinese Journal of Zoology* , 2000 , 35( 1) : 28–31.
- [ 25 ] Li X H , Li D M , Ding C Q , Cao Y H , Lu X R , Fu W K , Ma Z J , Lu B Z , Zhai T Q. A preliminary evaluation of the habitat quality of the crested ibis ( *Nipponia nippon* ) . *Chinese Biodiversity* , 1999 , 7( 3) : 161–169.
- [ 26 ] Li X H , Li D M , Li Y M , Ma Z J , Zhai T Q. Habitat evaluation for crested ibis: a GIS-based approach. *Ecological Research* , 2002 , 17( 5) : 565–573.
- [ 27 ] Li X H , Ma Z J , Li D M , Ding C Q , Zhai T Q , Lu B Z. Using resource selection functions to study nest site selection of crested ibis. *Biodiversity Science* , 2001 , 9( 4) : 352–358.
- [ 28 ] Ma Z J , Ding C Q , Li X H , Lu B Z , Zhai T Q , Zheng G M. Feeding site selection of crested ibis in winter. *Zoological Research* , 2001 , 22( 1) : 46–50.
- [ 29 ] Li X H , Ma Z J , Ding C Q , Zhai T Q , Li D M. Relationship between the distribution of crested ibis and local farmers. *Acta Zoologica Sinica* , 2002 , 48( 6) : 725–732.
- [ 30 ] Hulbert I A R , French J. The accuracy of GPS for wildlife telemetry and habitat mapping. *Journal of Applied Ecology* , 2001 , 38( 4) : 869–878.
- [ 31 ] Hijmans R J , Cameron S E , Parra J L , Jones P G , Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* , 2005 , 25( 15) : 1965–1978.
- [ 32 ] Guisan A , Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* , 2000 , 135( 2/3) : 147–186.

- [33] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011.
- [34] McCullagh P, Nelder J A. Generalized linear models: Chapman and Hall, 1989.
- [35] Hastie T J, Tibshirani R. Generalized additive models. London: Chapman and Hall, 1990.
- [36] Breiman L, Friedman J H, Olshen R A, Stone C J. Classification and Regression Trees. New York: Chapman and Hall, 1984.
- [37] Ripley B D. Pattern Recognition and Neural Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [38] Hastie T, Tibshirani R. Discriminant analysis by Gaussian mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological*, 1996, 58(1): 155-176.
- [39] Hastie T, Tibshirani R, Buja A. Flexible discriminant-analysis by optimal scoring. *Journal of the American Statistical Association*, 1994, 89(428): 1255-1270.
- [40] Friedman J H. Multivariate adaptive regression splines. *The Annals of Statistics*, 1991, 19(1): 1-67.
- [41] Friedman J, Hastie T, Tibshirani R. Additive logistic regression: a statistical view of boosting. *The Annals of Statistics*, 2000, 28(2): 337-407.
- [42] Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [43] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [44] Busby J R. BIOCLIM — a bioclimate analysis and prediction system // Margules CR, Austin MP, eds. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. Canberra: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 1991: 64-68.
- [45] Hanley J A, McNeil B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (roc) curve. *Radiology*, 1982, 143(1): 29-36.
- [46] Landis J R, Koch G G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1977, 33(1): 159-174.
- [47] Kitcher P. The climate change debates. *Science*, 2010, 328(5983): 1230-1234.
- [48] Kerr R A. Climate change. El Niño lends more confidence to strong global warming. *Science*, 2010, 330(6010): 1465-1465.
- [49] Li R Q, Tian H D, Li X H. Climate change induced range shifts of Galliformes in China. *Integrative Zoology*, 2010, 5(2): 154-163.
- [50] Lawler J J, Shafer S L, White D, Kareiva P, Maurer E P, Blaustein A R, Bartlein P J. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 2009, 90(3): 588-597.
- [51] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320(5884): 1768-1771.
- [52] Li X H, Li D M. Current state and the future of the crested ibis (*Nipponia nippon*): A case study by population viability analysis. *Ecological Research*, 1998, 13(3): 323-333.

#### 参考文献:

- [16] 史东仇, 于晓平, 范传道, 曹永汉. 朱鹮衰亡过程之叙述. *西北大学学报: 自然科学版*, 1991, 21(增刊): 25-30.
- [17] 刘荫增. 朱鹮在秦岭的重新发现. *动物学报*, 1981, 27(3): 273.
- [20] 翟天庆, 丁海华, 张治, 庆保平, 王超, 柯立, 蒙进荣, 陈有平. 朱鹮种群现状及自然迁移规律. *野生动物*, 2008, 29(6): 319-321.
- [21] 周学红, 蒋琳, 王强, 张伟, 程鲲, 丁海华. 朱鹮游荡期对人类干扰的耐受性. *生态学报*, 2009, 29(10): 5176-5184.
- [22] 刘冬平, 丁长青, 楚国忠. 朱鹮繁殖期的活动区和栖息地利用. *动物学报*, 2003, 49(6): 755-763.
- [23] 刘冬平, 丁长青, 楚国忠. 朱鹮的潜在繁殖地. *动物学报*, 2006, 52(1): 11-20.
- [24] 王中裕, 赵利敏. 朱鹮营巢生境的分析. *动物学杂志*, 2000, 35(1): 28-31.
- [25] 李欣海, 李典谟, 丁长青, 曹永汉, 卢西荣, 傅文凯, 马志军, 路宝忠, 翟天庆. 朱鹮(*Nipponia nippon*) 栖息地质量的初步评价. *生物多样性*, 1999, 7(3): 161-169.
- [27] 李欣海, 马志军, 李典谟, 丁长青, 翟天庆, 路宝忠. 应用资源选择函数研究朱鹮的巢址选择. *生物多样性*, 2001, 9(4): 352-358.
- [28] 马志军, 丁长青, 李欣海, 路宝忠, 翟天庆, 郑光美. 朱鹮冬季觅食地的选择. *动物学研究*, 2001, 22(01): 46-50.
- [29] 李欣海, 马志军, 丁长青, 翟天庆, 李典谟. 朱鹮分布与栖息地内农民的关系. *动物学报*, 2002, 48(6): 725-732.