

DOI: 10.5846/stxb201410101997

吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲. 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. 生态学报, 2016, 36(12): - .

Wu Q M, Wang L, Zhu R P, Yang Y B, Jin H Y, Zou H F. Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MAXENT modeling. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

## 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

吴庆明<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 朱瑞萍<sup>2</sup>, 杨宇博<sup>1</sup>, 金洪阳<sup>3</sup>, 邹红菲<sup>1,\*</sup>

1 东北林业大学野生动物资源学院, 哈尔滨 150040

2 齐齐哈尔市环保局, 齐齐哈尔 161000

3 黑龙江挠力河国家级自然保护区, 富锦 156300

**摘要:**明确物种繁殖栖息地的潜在分布对于受胁物种的保护与科学管理具有十分重要的意义。扎龙保护区是国际濒危物种丹顶鹤西部迁徙种群的主要繁殖地之一, 近年来繁殖种群数量波动较大。本文通过 GIS 空间技术平台, 利用 MAXENT 模型, 结合 2012—2013 年丹顶鹤 (*Grus japonensis*) 营巢分布点和环境特征变量, 对扎龙保护区丹顶鹤营巢生境的适宜性进行了分析。结果表明: 模型的评价效果达到优秀水平 (训练集 AUC = 0.901); 绿度 (34.9%)、距道路距离 (17.1%)、土壤湿度 (16.3%)、海拔 (15.7%) 是丹顶鹤营巢生境的主要环境特征变量; 核心区中部和南部是丹顶鹤主要的适宜营巢分布区, 缓冲区和实验区有少量的适宜营巢区分布, 丹顶鹤适宜营巢生境面积为 35857.35hm<sup>2</sup>, 占保护区总面积的 17.07%。建议在重点管理核心区的同时, 对缓冲区和实验区的小面积芦苇沼泽给予更多关注。

**关键词:**丹顶鹤; 营巢生境适宜性; MAXENT 模型; 扎龙自然保护区

## Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MAXENT modeling

WU Qingming<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZHU Ruiping<sup>2</sup>, YANG Yubo<sup>1</sup>, JIN Hongyang<sup>3</sup>, ZOU Hongfei<sup>1,\*</sup>

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

2 Qiqihaer City Environmental Protection Agency, Qiqihaer 161000, China

3 Heilongjiang Naoli River National Nature Reserve, Fujin 156300, China

**Abstract:** Breeding habitat suitability analysis has significance for the timely conservation and scientific management of threatened species. Zhalong Nature Reserve is one of the main breeding sites of the western group red-crowned crane (*Grus japonensis*) migratory population, with a large, dynamic breeding population. With the objective of predicting the nesting habitat of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve, we obtained nesting occurrence records for this species from the study area collected from 2012—2013, extracted the environmental factors from the thematic mapper (TM) image of Zhalong Nature Reserve in 2013. We analyzed the nesting habitat suitability of red-crowned crane by the combined use of a GIS and MAXENT model. The results showed that the accuracy of the MAXENT model was excellent (training data area under the curve = 0.901). The greenness vegetation index (34.9%), man-made interference (namely, the distance to frequently disturbed zones from human activity, 17.1%), soil wetness index (16.3%), and elevation (15.7%) were the main environmental factors influencing the nesting habitat selection of red-crowned crane. The central and south regions of

**基金项目:**中央高校基本科研业务费(2572014CA05); 国家自然科学基金(31470016, 31401978); 黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q14009)

**收稿日期:**2014-10-10; **网络出版日期:**2015-00-00

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

the core zone were the main suitable nesting zones, and there was a small area of suitable habitat in the buffer zone and the experimental zone; the suitable nesting habitat area was 35857.35 ha, representing about 17.07% of the whole reserve. The results showed that the core zone is the most important management zone for red-crowned crane nesting, and the reserve should also pay more attention to the small reed marsh area in the buffer zone and the experimental zone.

**Key Words:** Red-crowned crane (*Grus japonensis*); nesting habitat suitability analysis; MAXENT model; Zhalong Nature Reserve

栖息地是野生动物完成其生活史周期的场所,适宜的栖息环境能促进野生动物种群的持续生存<sup>[1-2]</sup>。繁殖期是野生动物种群得以延续和维持的关键时期,对繁殖期栖息地的分布及其影响因素进行研究能为制定相关的保护管理对策提供理论依据<sup>[3-4]</sup>。

丹顶鹤(*Grus japonensis*)属鹤形目、鹤科、鹤属,是芦苇沼泽湿地重要的环境指示种,已被世界自然保护联盟(IUCN)列为濒危种<sup>[5]</sup>。近年来,分布于东亚大陆的丹顶鹤迁徙种群数量波动较大,尤其是西线群体,每年以50—150只的速度从1100余只降到不足500只,并且越冬区域缩小为20世纪80年代的8%<sup>[6]</sup>。位于松嫩平原的国际重要湿地黑龙江扎龙国家级自然保护区(以下简称扎龙保护区)是丹顶鹤西线群体最大的繁殖分布区,因此成为专家学者关注的焦点。秦喜文等、张艳红和何春光、王志强等均采用大尺度的遥感技术对扎龙保护区丹顶鹤的繁殖栖息地适宜性进行过探索性分析<sup>[7-9]</sup>。

以遥感影像为载体的3S技术是21世纪以来大尺度评价野生动物栖息地适宜性的主流技术。其中的MAXENT模型是近年来逐渐出现的以生态位为原理的最大熵模型,是评价野生动物栖息地适宜性分析的新兴技术<sup>[10-15]</sup>。该技术最早于2008年被建议可应用于物种分布方面的预测<sup>[16]</sup>,最近两年一些学者对该技术在物种分布预测方面的可行性进行了分析,认为其是目前预测物种潜在分布的较好模型<sup>[17-18]</sup>。目前该方法多应用在哺乳类和鱼类等脊椎动物方面。其中,张熙骛等基于MAXENT模型对麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)和鲫(*Carassius auratus*)两种入侵性鱼类的全球适生区进行了预测,刘振生等应用MAXENT模型对贺兰山岩羊(*Pseudois nayaur*)生境适应性进行了评价,罗翀等通过MAXENT和ENFA两种生态位模型对秦岭山系林麝(*Moschus berezovskii*)生境进行了预测,齐增湘等(2011)基于MAXENT模型对秦岭山系黑熊(*Ursus thibetanus*)的潜在生境进行了分析,李明阳等基于WEB数据库和MAXENT模型对白头叶猴(*Trachypithecus poliocephalus*)的潜在生境进行了研究,徐卫华和罗翀采用MAXENT模型对秦岭川金丝猴(*Rhinopithecus roxellanae*)生境进行了评价。而在鸟类方面的研究较少<sup>[19-20]</sup>;其中,李明阳等基于非连续丹顶鹤巢址数据(1996和2004年)及同期TM遥感影像、DMSP/OLS夜间灯光亮度等信息源对丹顶鹤繁殖生境变化驱动因素进行了跨领域的初步分析,认为人类干扰和气候变化是主要的驱动因素,但该文未对丹顶鹤营巢生境适宜性的空间分布进行分析;Roberto Morenoa等对智利南部温带森林特有鸟类黑喉隐窜鸟(*Pteroptochos tarnii*)和赭胁窜鸟(*Eugralla paradoxa*)的微生境进行了模拟预测。这些研究表明:MAXENT模型能较好地表现出野生动物栖息地的适宜情况和分布预测。为了系统掌握丹顶鹤营巢生境适宜性及分布,基于2012—2013年的野外数据,本文采用MAXENT模型和GIS技术平台对扎龙保护区丹顶鹤营巢生境适宜性及分布进行了评价分析。

## 1 研究地概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地是黑龙江扎龙国家级自然保护区。该保护区位于黑龙江省西部、齐齐哈尔市东南部(N 46°52'—47°32', E 123°47'—124°37'),是乌裕尔河、双阳河两条河流至该区失去明显河道、漫溢形成的淡水芦苇沼泽湿地,是世界丹顶鹤东亚大陆迁徙种群西线群体的主要繁殖区,总面积为21万hm<sup>2</sup>。该区属于大陆性半干旱季风气候,年均降水量为420mm,远小于年均蒸发量1489mm;夏季偏南风,年均风速3.5m/s;年均日照2864h,

年均无霜期 128d<sup>[21]</sup>。植被类型以芦苇(*Phragmites communis*)为主,总盖度 80%—90%,形成了芦苇单优势植物群落,伴有少量的苔草(*Carex dispalata boott*)、漂筏苔草(*Carex pschdo-curaica*)和香蒲(*Section elsholtzia*)等;因位于松嫩平原区域,保护区内海拔高差较小(最低处连环湖海拔仅 135.0m,最高处大山种羊场北岗海拔 178.0m),平均海拔为 144m<sup>[22]</sup>。每年 4—5 月,为野生丹顶鹤卧巢孵卵的主要时期。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 模型介绍

本文使用的是 MAXENT 模型,这是一种基于生态位原理的预测物种潜在分布模型。该模型主要根据物种“出现点”的环境特征变量运算出目标物种分布的约束条件,探寻此约束条件下最大熵的可能分布,据此来预测目标物种在研究地的生境分布及适宜性<sup>[11,23]</sup>。MAXENT 模型具有自检测功能,具有较高的预测能力,近年来已引起了生态学家的广泛关注<sup>[24-28]</sup>,研究证明:MAXENT 模型是预测效果较好的生态位模型,表现出较好的分辨变量相互作用能力及抽样偏差处理能力,操作运行简单快捷,对样本量要求较低(>5),只需要出现点而不需要较难获得的不出出现点数据,更适用于对目标物种分布区域的适宜性进行分析。扎龙保护区核心区芦苇沼泽面积较大,其间被多条水位较深的河道分隔,在丹顶鹤“未出现点”的数据难以准确采集的实际情况下,该模型较其它生态位模型具有较大的优势。

### 1.2.2 数据来源

丹顶鹤巢位点地理分布数据主要来源于野外实地定位。2012—2013 年 4—5 月通过定点观察、自然物标记、实地搜索,共定位丹顶鹤巢位点 34 个<sup>[29]</sup>。环境特征变量主要包括地形、植被、人为干扰三部分。其中,①地形选取海拔、坡度、坡向三个因子,数据通过中国科学院科学数据库 30m 分辨率的 DEM(数字高程图)计算提取得到;②植被数据来源于 NASA(美国国家航空和太空管理局)2013 年 2 月 11 号发射的 Landsat-8 卫星 2013 年 4 月拍摄的 Landsat TM 遥感影像,先通过 ERDAS 软件对影像进行几何精校正、辐射增强、空间子集运算等预处理,然后对其进行缨帽变换(Tasseled Cap transform)将前三个波段提取为土壤亮度指数(简称土壤亮度)、绿色植被指数(简称绿色度)、土壤湿度指数(简称土壤湿度)3 个变量信息,这三个变量分别反映地物目标总辐射能量水平的亮度信息、影像中植被覆盖叶面积指数和生物量等绿色植被信息、影像的湿度信息<sup>[19,30]</sup>;③人为干扰因子选取道路。扎龙保护区内的道路比较明显,主要包括国道、旧国道、省道、铁路、城际铁路、乡间公路等,这些道路均有不同频率的行人或车辆,数据提取过程中采用了归一化处理,数据来源于扎龙保护区 1:250000 的矢量化地图,再利用 ArcGIS10.0 进行缓冲区分析,得到距道路距离。以上所有图层栅格大小统一为 30m×30m,并转化成 MAXENT 3.3 软件所要求的 ASCII 格式文件。

### 1.2.3 模型建立

将丹顶鹤巢位点地理分布数据和提取出的环境特征变量数据导入 MAXENT 3.3 中,随机选取 75%的丹顶鹤巢位点用于建立模型,将剩余的丹顶鹤巢位点用于模型验证。在建立模型过程中,通过 Jackknife 中的 AUC 评价指标对模型的效果和各个环境特征变量的重要性进行检测,来验证模型的准确度。AUC 为模型自带的受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic, ROC)下的面积(area under curve, AUC),不同的值代表不同的重要性级别:0.5—0.6,不及格;0.6—0.7,较差;0.7—0.8,一般;0.8—0.9,良好;0.9—1.0,优秀<sup>[23,31]</sup>。

### 1.2.4 营巢生境适宜性分析

在上述分析基础上,将模型输出结果导入 ARCGIS 中进行栖息地适宜性分析。首先,通过 ARCGIS 中进行重分类操作,并根据专家经验法将丹顶鹤营巢生境分布区域划分为 4 个等级:0—0.50 为不适宜生境,0.50—0.75 为适宜生境,0.75—1.00 为最适宜生境<sup>[32]</sup>。

### 1.2.5 分析软件

数据分析过程中使用了以下软件:ArcGIS 10.0、ERDAS IMAGE 9.2、ENVI 4.7、PHOTOSHOP 12.0、DIVA-GIS、EXCEL、SPSS 19.0、JMP 10、Origin 9.0、Mathtype 6.8、MAXENT3.3 等。

## 2 结果与分析

### 2.1 MAXENT 模型预测结果检测

ROC 曲线评价结果(图 1)为:训练集(Training data)AUC 值为 0.901,验证集(Test data) AUC 值为 0.935,表明 MAXENT 模型的预测结果达到优秀水平。

### 2.2 丹顶鹤营巢生境与环境特征变量关系

Jackknife 检验结果表明(图 2):绿色植被即绿度、人为干扰即距道路距离、土壤湿度、海拔是影响丹顶鹤营巢分布的主要环境特征变量。各环境特征变量对 MAXENT 模型的贡献率表明:绿色植被即绿度(34.9%)、人为干扰即距道路距离(17.1%)、土壤湿度(16.3%)、海拔(15.7%)等 4 个环境特征变量的累积贡献率为 84.6%,基本包含了全部 7 个环境特征变量所具有的信息,能够反映影响丹顶鹤营巢生境分布的绝大部分信息。

### 2.3 丹顶鹤营巢生境适宜性分布

利用 MAXENT 模型对扎龙保护区丹顶鹤营巢生境适应性进行了分析,将模型输出的 ASCII 文件导入到 ArcGIS 10 中,转换成浮点型栅格数据,按照专家经验法将扎龙保护区丹顶鹤营巢生境适宜图重新分为 3 个等级:0.00—0.50 为不适宜,0.50—0.75 为适宜,0.75—1.00 为最适宜,进而得到扎龙保护区丹顶鹤营巢生境适宜性分布图(图 3)。

由图中可以看出,扎龙保护区丹顶鹤营巢适宜生境主要分布在核心区中部区域及南部区域,其范围主要为以下村屯的包围区域:北到克钦村,东到牛尾巴岗子、老马场、育苇场,南到后地房子、老地房子,西到于家窝棚。另有面积相对较小的零星区域分布在缓冲区南部、实验区北部和中南部,分别为乌裕尔河龙安桥、东升水库、杨聋窝棚、崔家窑、后五代与克尔台、特勒南部到扎郎格北部等区域。其中,最适宜营巢生境面积为 4090.41ha,适宜营巢生境面积为 31766.94ha,合计为 35857.35ha,占保护区总面积的 17.07%。

## 3 讨论

### 3.1 MAXENT 模型精度

关于物种栖息地适宜性评价,早在 21 世纪初就已引起了专家学者的广泛关注<sup>[33-34]</sup>,并通过机理模型、回归模型、生态位模型等各种生境评价模型进行了探索性评价,评价结果认为生态位模型中的最大熵模型即 MAXENT 模型的预测效果最优、操作简单快捷、样本数据可得性高,适合进行保护区尺度内物种栖息地潜在分布的预测,是预测物种栖息地适宜性分布的最佳模型之一<sup>[16-18,24-28]</sup>。本文仅用 MAXENT 模型进行了丹顶鹤营巢生境适宜性预测,检测验证结果表明该模型的预测效果较好,丹顶鹤营巢生境适宜性分析结果也得到了野外调查证实,核心区的最适宜营巢栖息地及外围区域的营巢地尤其是缓冲区和实验区区域的零星分布地

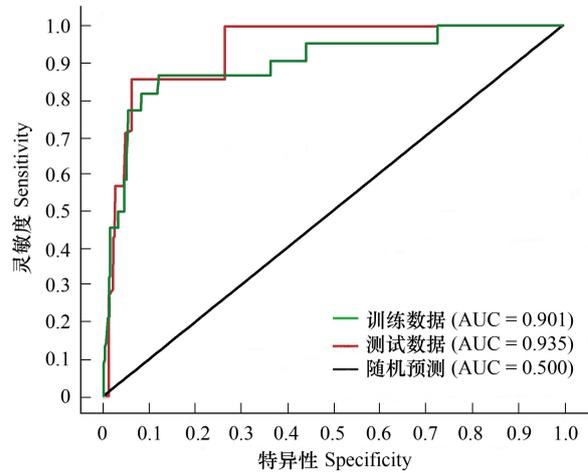


图 1 扎龙保护区丹顶鹤营巢生境分布预测结果的 ROC 曲线验证  
Fig.1 ROC curve verification of nesting habitat distribution of Red-crowned crane in Zhalong nature reserve

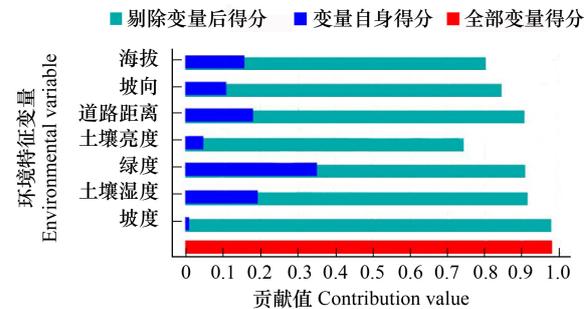


图 2 MAXENT 模型训练数据各环境特征变量得分  
Fig.2 Jackknife test of environmental character variable in training data by MAXENT

均与实际相符。野外调查发现,位于 301 国道附近的缓冲区域、铁路附近的克尔台区域、保护区边缘的杨鸯窝棚区域均连续多年发现了丹顶鹤营巢孵卵。

### 3.2 环境特征变量的选取

#### (1) 人为干扰即距道理距离

关于人为干扰因素,本文仅选用了道路这一环境特征变量。作者前期的研究中将人为干扰分为人为活动频繁区(村屯和道路)和人为活动非频繁区(渔点、人工渠、大车道、堤坝等),研究结果发现丹顶鹤营巢点距人为活动频繁区距离( $2.15 \pm 0.18 \text{ km}$ )与人为活动非频繁区距离( $0.76 \pm 0.08 \text{ km}$ )存在明显差异<sup>[29]</sup>;同时,野外观察发现,虽然丹顶鹤巢址与人为活动非频繁区保持较近的距离,但部分处于觅食状态的孵化鹤对人为活动非频繁区并不敏感。故本文的人为干扰因素仅选取了人为活动频繁区(村屯和道路)。

在人为干扰数据的实际提取过程中,本文未对村屯这一干扰因素进行单独提取。因村屯多位于道路的两端或中间,故在道路提取过程中将村屯与道路进行了归类处理。扎龙保护区内的村屯,仅核心区的赵凯村没有明显的道路,水大时靠船只出入,水小时走不明显的沼泽路;除此之外的其余村屯均有成形的村村通柏油路或者正在使用的成型土路。野外调查发现,赵凯村目前的常住居民已不足十户,多为留守人员,其日常生产生活活动主要以打渔为主,其频率和强度对丹顶鹤营巢繁殖的影响不大,在该村四周均有丹顶鹤、白枕鹤营巢,非繁殖季亦有丹顶鹤、白枕鹤、东方白鹳等对人较为敏感的大型鸟类迁徙停留。

关于道路,扎龙保护区具有较高的多样性;其中,有不同级别的道路如乡间公路、省道、国道,也有不同类型的交通网如道路和轨道(铁路与城际铁路),这些在本文中统称为道路。这些道路上的交通形式、交通载体和交通频率存在较大差异,有的道路上兼有高频率的行人和低频率的车流如乡间公路,有的道路上以高频率的车流为主如国道、省道等,有的道路上以中频率的高速车流为主如铁路和城际铁路。已有研究表明,在野生动物栖息地区域,道路区域成为一种特殊的边缘,会对不同类型的野生动物产生不同的影响,会导致栖息鸟类繁殖下降<sup>[35]</sup>。针对这些道路,丹顶鹤均会采取远离的方式进行回避,不同类型的道路回避的距离会存在差异。纵观扎龙保护区的中高频率车流的道路,主要分布在保护区核心区的外围,也即丹顶鹤主要繁殖区的外围,与丹顶鹤营巢区直接相邻的道路主要为乡间公路。故,本文在对道路提取过程中,采用了归一化处理。

#### (2) 地形即海拔、坡度、坡向

丹顶鹤为地面巢,巢所在植被类型为草本沼泽,这既涉及了环境中水的因素,也涉及了孵化方面的温度与湿度因素,故本文选入海拔、坡度、坡向这一环境特征变量进行分析。分析结果表明,坡度坡向对丹顶鹤营巢生境的贡献不大,海拔具有一定的贡献。

扎龙保护区位于松嫩平原,虽然海拔高差小,但海拔却与水的空间分布、植被的空间分布、丹顶鹤巢的隐蔽性等具有极大相关性。

众所周知,芦苇沼泽是扎龙保护区社区居民的主要经济来源,每年冬季结冰后进行机器收割;收割过程中,常遇到因海拔较高、水量偏少且干旱少雨形成的质量低下的芦苇,这样的芦苇因经济方面的不值得收割而被放弃成为剩余芦苇。对于剩余芦苇,社区居民会于翌年春季通过火烧的方式进行能量转化处理,这种火烧

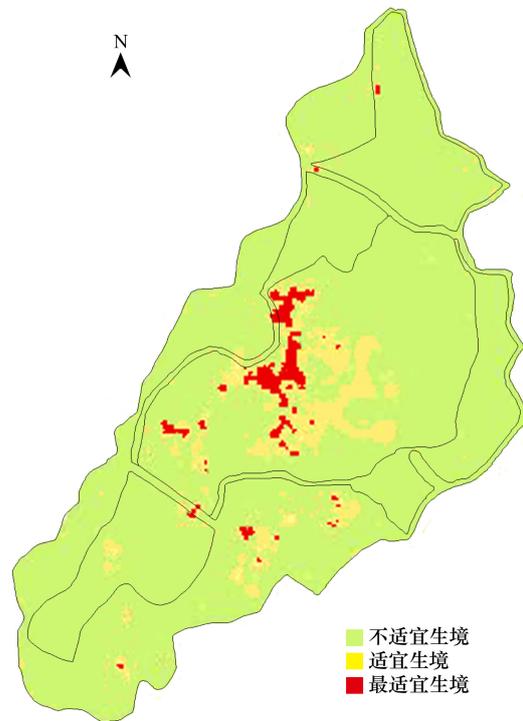


图 3 扎龙保护区丹顶鹤营巢栖息地适宜性分布

Fig. 3 The distribution of suitable nesting habitat of Red-crowned crane in Zhalong nature reserve

每年均有,一旦燃烧不适或控制不当便成为火灾。因此,自 2002 年以来,为了保存扎龙湿地,基于干旱少雨和湿地火烧引发形成了湿地生态补水工程,这使得扎龙保护区的水源具有一定程度的人文特征,但对保护区芦苇植被的分布和丹顶鹤巢的分布有了更大的影响。

高差较小的海拔对于每年的湿地生态补水的流向与流量均具有较大的影响,部分区域会因海拔高度的微小差异得不到生态补水的灌溉,也间接影响芦苇植被的生长与分布,尤其是丹顶鹤的部分营巢区域也会受到直接或间接的影响。

本文的分析结果显示,海拔是丹顶鹤营巢的主要环境变量之一。这一点让人费解,丹顶鹤真的就能对几十米的海拔差异进行判断从而对巢位点进行微观选择吗?野外行为观察和巢址实地定位过程中发现了几例特别的现象,虽不能直接证明丹顶鹤巢位点与海拔的关系,但却与海拔密不可分:(1)丹顶鹤能判断水位与巢高之间的关系。众所周知,扎龙保护区自 2002 年以来建立了基于湿地维持的长效补水机制,但补水时间很不科学、随意性很大,许多时候恰恰是在丹顶鹤卧巢孵化时进行了补水,这种短时间内的大水量很容易淹没丹顶鹤巢,孵化鹤能采取的做法就是用芦苇对巢进行加高,当巢成为浮巢时,曾出现丹顶鹤用喙拽巢的无效行为。(2)看似海拔差异较小的凸凹不平的芦苇沼泽地面,在苇茬的直接作用下,对于丹顶鹤巢的隐蔽性具有较大的贡献;直径为 1.0—1.2m 的丹顶鹤巢的隐蔽距离大约为 30m,这与巢所在位置的海拔具有直接的关系。

有关海拔与巢之间的科学关系还需要进一步的深入研究。

### 3.3 丹顶鹤栖息地适宜性分析

已有研究表明:丹顶鹤的营巢地对芦苇沼泽具有绝对的偏好性<sup>[29]</sup>。本文调查的丹顶鹤巢位点数据也均位于芦苇沼泽中,这是保护区绿度最大的植被类型。关于扎龙保护区丹顶鹤繁殖栖息地适宜性分析,分别有学者<sup>[7-9]</sup>基于 RS 技术、GIS 技术、HIS 模型利用时间不同步的遥感影像与丹顶鹤巢位点对扎龙保护区丹顶鹤 2000 年、2003 年、2004 年生境适宜性进行了评价,其结果分别为 9.132 万 ha、5.89 万 ha、10.895 万 ha,这些结果均远大于本文的预测结果。已有研究表明<sup>[36]</sup>,扎龙保护区 2000 年、2003 年、2004 年芦苇沼泽面积均不足 10 万 ha,遥感影像与丹顶鹤巢位点数据时间上的不同步可能是致使研究结果产生偏差的关键因素之一。但本文的研究结果却与李明阳等(2012)的结果相近,可以认为:Maxent 模型可以用于扎龙保护区丹顶鹤营巢生境适宜性潜在分布方面的分析尝试。该方面,尚需要进一步的补充数据,以减少数据带来的结果偏差,模拟出近于真实的丹顶鹤营巢栖息地情况,为保护区的管护工作提供更为科学的理论借鉴。

众所周知,扎龙保护区是世界丹顶鹤迁徙种群西线群体的主要繁殖地,近年来扎龙保护区芦苇沼泽面积呈现出明显的波动状态,丹顶鹤繁殖栖息地的空间分布也随之变化<sup>[37]</sup>,尤其是边缘区域。基于此,建议保护区对缓冲区和实验区面积相对较小的芦苇沼泽区域给予更多关注。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 蒋爱伍,周放,覃玥,刘迺发. 中国大陆鸟类栖息地选择研究十年. 生态学报, 2012, 32(18): 5918-5923.
- [ 2 ] Cody M L. Habitat Selection in Birds. New York: Academic Press, 1987: 1-559.
- [ 3 ] 董超,张国钢,陆军,侯韵秋,乔龙巴特尔,昂秦. 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择. 生态学报, 2013, 33(16): 4885-4891.
- [ 4 ] 闫永峰,朱杰,翟兴礼,倪自银,刘迺发. 高山雪鸡繁殖期觅食和警戒行为的性别差异. 动物学杂志, 2007, 42(6): 48-52.
- [ 5 ] 吴庆明,邹红菲,金洪阳,马建章. 丹顶鹤春迁期觅食栖息地多尺度选择——以双台河口保护区为例. 生态学报, 2013, 33(20): 6470-6477.
- [ 6 ] Su L Y, Zou H F. Status, threats and conservation needs for the continental population of the Red crowned Crane. Chinese Birds, 2012, 3(3): 147-164.
- [ 7 ] 秦喜文,张树清,李晓峰,那晓东,潘欣,于欢. 基于证据权重法的丹顶鹤栖息地适宜性评价. 生态学报, 2009, 29(3): 1074-1082.
- [ 8 ] 张艳红,何春光. 基于 GIS 扎龙自然保护区丹顶鹤适宜生境动态变化. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 43-45.
- [ 9 ] 王志强,陈志超,郝成元. 基于 HSI 模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价. 湿地科学, 2009, 7(3): 197-201.
- [ 10 ] 张熙鹭,隋晓云,吕植,陈毅峰. 基于 MAXENT 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. 生物多样性, 2014, 22(2): 182-188.

- [11] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 苏云, 王晓勤, 孔芳毅. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. 生态学报, 2013, 33(22): 7243-7249.
- [12] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 2011, 31(5): 1211-1229.
- [13] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价. 生物多样性, 2011, 19(3): 343-352.
- [14] 李明阳, 席庆, 徐海根. 基于 WEB 数据库和 MAXENT 模型的头叶猴潜在生境评价研究. 林业资源管理, 2010, (4): 31-36.
- [15] 徐卫华, 罗翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用. 森林工程, 2010, 26(2): 1-3.
- [16] Phillips S J, Miroslav D. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [17] Radosavljevic A, Anderson R P. Making better MAXENT models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. Journal of Biogeography, 2014, 41(4): 629-643.
- [18] Merow C, Silander J A Jr. A comparison of Maxlike and Maxent for modelling species distributions. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(3): 215-225.
- [19] 李明阳, 张称意, 吴军, 徐婷. 扎龙湿地丹顶鹤繁殖生境变化驱动因素分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 76-80.
- [20] Moreno R, Zamora R, Molina J R, Vasquez A, Herrera M Á. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). Ecological Informatics, 2011, 6(6): 364-370.
- [21] 吴庆明, 邹红菲. 扎龙湿地白枕鹤孵化期觅食生境选择. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1716-1722.
- [22] 吴长申. 扎龙国家级自然保护区自然资源研究与管理. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1999: 1-213.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [24] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [25] Haegeman B, Etienne R. Entropy maximization and the spatial distribution of species. The American Naturalist, 2010, 175(4): E74-E90.
- [26] Stachura-Skierczyńska K, Tumił T, Skierczyński M. Habitat prediction model for three-toed woodpecker and its implications for the conservation of biologically valuable forests. Forest Ecology and Management, 2009, 258(5): 697-703.
- [27] 李明阳, 巨云为, Kumar S, Stohlgren T J. 美国大陆外来入侵物种斑马纹贻贝 (*Dreissena polymorpha*) 潜在生境预测模型. 生态学报, 2008, 28(9): 4253-4258.
- [28] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Townsend P A. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [29] Wu Q M, Zou H F. Nest-site selection pattern of *Grus japonensis* in Zhalong nature reserve of northeast China. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 281-288.
- [30] 刘春悦, 江红星, 张树清, 侯韵秋, 陆军. 基于 TM 与 ASAR 遥感数据的扎龙丹顶鹤繁殖栖息地多尺度特征. 应用生态学报, 2012, 23(2): 491-498.
- [31] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [32] 万基中, 王春晶, 韩士杰, 于景华. 气候变化压力下建立东北红豆杉优先保护区的模拟规划. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(1): 28-32.
- [33] Dettki H, Löfstrand R, Edenius L. Modeling habitat suitability for Moose in coastal northern Sweden: empirical Vs process-oriented approaches. Ambio, 2003, 32(8): 549-556.
- [34] 李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽河三角洲滨海湿地景观规划各预案对指示物种生境适宜性的影响. 生态学报, 2001, 21(4): 550-560.
- [35] 胡忠军, 于长青, 徐宏发, 王涓. 道路对陆栖野生动物的生态学影响. 生态学杂志, 2005, 24(4): 433-437.
- [36] 沃晓棠, 孙彦坤. 扎龙湿地土地利用变化及驱动力分析. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 77-79, 82.
- [37] 王志强, 蒋丽, 刘贤赵, 张桐菓, 陈浩. 近 30 年来扎龙湿地丹顶鹤繁殖种群空间格局及动态. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 27-31.