

# 扎龙湿地丹顶鹤繁殖栖息地的选择及扩散

宫兆宁<sup>1,2,3,4</sup>, 苏朔<sup>1,2,3,4</sup>, 杜博<sup>1,2,3,4</sup>, 关晖<sup>5</sup>, 张强<sup>5</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京水资源安全实验室, 北京 100048; 3. 北京市资源环境与GIS重点实验室, 北京 100048; 4. 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 5. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100086)

**摘要:** 景观演变对野生动物栖息地质量和连接度造成的影响, 一直是威胁全球生物多样性保护的关键问题, 开展扎龙湿地丹顶鹤(*Grus japonensis*)繁殖栖息地选择及繁殖期生境间的扩散研究, 对野生丹顶鹤的保护具有重要的意义。首先利用需要“出现点”的生态位MAXENT模型, 进行适宜栖息地选择研究。从水源、食物、干扰、隐蔽物四个方面选择明水面距离、土壤湿度、NDVI、道路距离和居民地距离五个环境变量作为丹顶鹤繁殖栖息地选择的影响因子, 预测扎龙保护区可供丹顶鹤进行营巢繁殖的栖息地分布, 并分析各影响因子的反应曲线。结果显示: 丹顶鹤易于选择远离道路和居民地干扰且靠近明水面的区域作为营巢栖息地, 栖息地土壤湿度较高并且植被覆盖较多。从MAXENT模型中提取了38个适宜栖息地斑块, 基于电路理论模拟丹顶鹤繁殖期失去飞行能力时的多路径扩散, 最大电流密度图突出了可能的“夹点”, 模拟出具有一定宽度范围的连接区域, 可供丹顶鹤在繁殖期间进行扩散。累积电流密度图突出了在维持网络连通性方面起到积极作用的斑块, 并进行面积加权来评估适宜栖息地斑块的综合重要性。结果表明, 在MAXENT模型预测出的适宜栖息地斑块基础上, 考虑丹顶鹤繁殖期的迁移扩散行为, 利用累积电流密度面积加权来评估适宜栖息地斑块的综合重要性, 得到的适宜性等级更符合丹顶鹤真实巢址的分布。研究成果可为保护区丹顶鹤栖息繁殖生境的恢复和保护提供科学依据。

**关键词:** 丹顶鹤; 繁殖栖息地选择; 扩散; 最大熵模型; 电路理论; 扎龙湿地自然保护区

人类社会的发展与自然界其他物种密切相关, 人口数量的急剧增长以及人类活动的强烈干扰, 野生动物面临前所未有的栖息地丧失和破碎化问题, 物种灭绝日益加剧, 遗传多样性减少, 严重威胁全球生物多样性的保护<sup>[1,2]</sup>。扎龙湿地作为丹顶鹤(*Grus japonensis*)的主要繁殖地, 位于《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011—2030年)划定的松嫩平原优先保护区<sup>[3]</sup>。丹顶鹤是世界级珍稀濒危物种, 其生活史中的重要一环——繁殖, 是为延续种族所进行的产生后代的生物学过程。繁殖成功率是种群动态和物种延续的直接影响因素。20世纪50年代以来, 剧烈的人类活动强度不仅使湿地蓄水量明显下降, 丹顶鹤生境面积大幅减少且破碎化程度加剧, 最终的结果将是丹顶鹤的生存与繁衍受到严重限制<sup>[4]</sup>。

影响物种分布的主要因素是适宜栖息地的选择和物种的迁移扩散能力, 栖息地丧失是物种濒危的主要原因之一, 栖息地的破碎化会影响物种在生境间的迁移扩散, 增加物种灭绝的风险<sup>[5,6]</sup>。某个生物个体、种群或群落完成如繁殖、越冬等生活史阶段中产生的

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971381); 北京水务局重点项目(TAHP-2018-ZB-YY-490S)

作者简介: 宫兆宁(1976-), 女, 山东青岛人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态遥感方面的研究。

E-mail: gongzhn@163.com

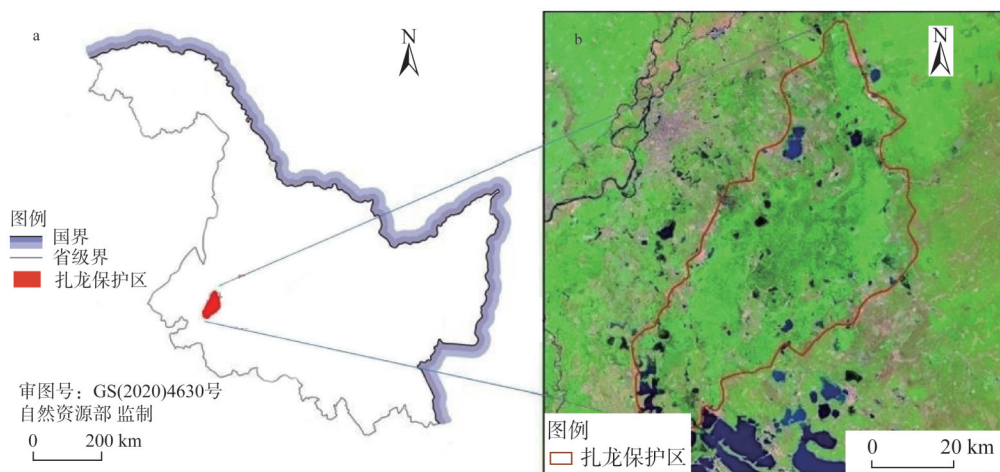
对环境条件的主动选取过程称为栖息地选择<sup>[7]</sup>。以往对于扎龙湿地丹顶鹤繁殖期栖息地评价大多只是静态模拟，忽略了丹顶鹤在繁殖期的迁移扩散。传统的扩散研究是利用生物遥测跟踪个体的运动路径，该方法所需数据量较大，时间周期较长，近年来有学者开始使用景观连接度进行模拟研究。物种在进行迁移扩散、基因流动等生态过程中，景观连接度表征了景观在生境斑块之间运动的促进或阻碍作用，通过保护和恢复连接区或廊道来维持相互连接的生境，正成为缓解人为和气候变化影响下最常见的保护策略之一<sup>[8-10]</sup>。在连接度的度量方法中，相比较图论将栖息地斑块抽象为点，斑块之间的连接情况抽象为线，模拟物种在生境斑块间单路径扩散，电路理论能够模拟出多条具有一定宽度范围的连接区域，模拟更为合理的扩散路径<sup>[11-14]</sup>。

本文在采用生态位模型中的最大熵模型进行丹顶鹤的适宜栖息地选择分析的基础上，以影响种群数量和持续生存的关键因素——生境斑块间的迁移扩散为切入点，基于电路理论进行景观连接度分析，识别湿地中重要栖息地斑块与垫脚石，模拟繁殖期丹顶鹤的扩散路线。以期为丹顶鹤生境恢复、降低生存风险提供科学依据，对保护区合理布局 and 科学管理具有重要意义。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

扎龙湿地位于中国东北部松嫩平原的西部（图1），乌裕尔河和双阳河流域下游尾间地带，该区域是在第四纪早更新世早期乌裕尔河地区大规模沉降，以及平原区整体抬升而形成的<sup>[15]</sup>。湿地内水路纵横、芦苇闭目，为两栖类动物、鱼类、昆虫和各种禽鸟提供了庇护场所。丹顶鹤迁徙种群的四分之一在此繁殖，一般每年4月下旬到达繁殖地，10月份南下进行越冬，在扎龙湿地的生活史大约6个月<sup>[16-18]</sup>。1987年4月国务院批准成立扎龙国家级自然保护区。保护区位于黑龙江省齐齐哈尔市和大庆市交界处，横跨二区四县，总面积2100 km<sup>2</sup>，地理坐标为123°47′~124°37′E、46°52′~47°32′N。



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图1 扎龙湿地自然保护区区域位置图

Fig. 1 Geographical location of Zhalong Wetland National Nature Reserve

1.2 研究方法

1.2.1 最大熵模型

在栖息地选择研究方法中，最大熵（MAXENT）模型是以生态位理论为基础的模型，Elith等<sup>[19]</sup>利用多种生态模型对不同地区的226个物种进行栖息地分布预测，结果表明MAXENT模型预测结果最为准确，更加接近实际分布。MAXENT模型在栖息地选择的原理是，首先将地理空间和生态空间联系起来，通过获取物种已知分布点数据和影响栖息地选择的环境变量，基于机器学习理论判断物种的生态需求，通过模型运算得到研究区物种出现的概率分布情况，进而预测其在实际地理空间内的分布<sup>[20,21]</sup>。

MAXENT模型首先将研究区域划分为*x*个有限数量网格，记*p(x)*为赋予各网格的概率，模型如式（1）所示：

$$\begin{cases} p(x) = e^{[c1f1(x) + c2f2(x) + \cdots cnfn(x)]} / Z \\ H\left(\frac{1}{p}\right) = -\sum \frac{1}{p}(x) \\ \sum p(x) = 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中：*c1, c2, …, cn*、*Z*为常量；*f1(x), f2(x), …, fn(x)*为目标地区的各种环境特征方程；*H*为*p*分布的熵。

首先由所给限定条件的特征方程计算出研究区域概率分布的熵值，通过不断迭代，将研究对象分布区域的概率分布不断叠加，这时研究区域概率分布的最大熵也随之不断增加，直到执行到最大迭代次数或者达到收敛阈值，这时得到的熵最大的分布即为最优分布<sup>[22]</sup>。

1.2.2 电路理论

在基于景观连接度的物种扩散模拟方法中，电路理论（Circuit Theory）通过随机漫步理论（Random Walk Theory）将物理学中电路与物种扩散的生态过程联系起来，在研究某一物种扩散或基因交流过程中，地表景观覆被代表电路中的电阻（Resistance），将有利于某种生态过程的景观要素赋予较低的电阻，而电阻值高的景观要素则代表具有物种迁移或是基因交流障碍的景观特征<sup>[23]</sup>。电路理论模型（图2a）将景观抽象为一系列焦点（Focal node）和电阻（Resistance），焦点代表物种的栖息地或保护区，其中电阻、电流（Current）和横跨景观的电压（Voltage）的计算与扩散的生态过程相关，得到电流值的大小用来表示物种沿某一路径扩散概率。具体物理学术语与其在生态学中的对照意义见表1。

物种扩散的阻力栅格数值代表电阻值，栅格值为零的网格（“短路区域”）用白色显示，一般表示物种的栖息地源斑块或适宜性较高的栖息地，黑色的栅格单元表示完全

表1 电路理论中物理学术语与其生态学意义对照表  
Table 1 Comparison of physical terms and their ecological meanings in circuit theory

名词	生态学解释
电阻	与生态学中景观阻力概念相似，电阻阻值越大，景观对物种扩散的阻碍能力越强
电压	用来预测物种离开任意一个焦点并成功到达下一个给定焦点的可能概率
电流	表示物种在运动过程中沿某一路径扩散的概率
电源	表示物种进行扩散过程前的种群数量
接地	表示物种在某一焦点停留，不继续扩散过程



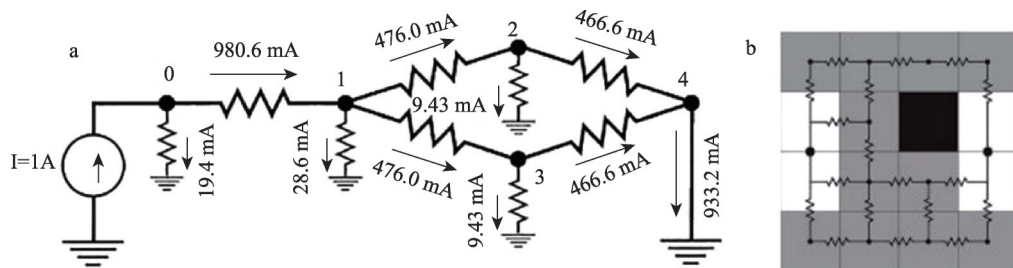


图2 电路理论连接度模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circuit theory connectivity model

阻碍物种扩散, 阻力值无限大, 其余有一定阻力大小的景观要素用灰色显示 (图2b)。

### 1.3 数据处理

在分析丹顶鹤栖息地生境要素与生境结构的基础上, 基于2016年7月经过预处理后的 Landsat8 OLI 遥感影像提取丹顶鹤繁殖栖息地选择的影响因子。从水源、食物、干扰、隐蔽物四个方面提取明水面距离、土壤湿度、NDVI、道路距离和居民地距离五个变量。

利用 ENVI\_5.3 进行波段运算提取 NDVI; 对影像进行缨帽变换获得土壤湿度分布; 在距离计算中, 相比较欧式距离, 添加高程数据的路径距离更为合理, 利用 ArcGIS 10.2 工具箱中的 path distance 工具计算路径距离, 获得明水面距离、道路距离和居民地距离。结合收集丹顶鹤巢址位点数据 (图3) 建立最大熵模型。巢址位点数据与所有环境变量图层投影坐标系均统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_51N; 数据格式均采用 30 m×30 m 像元大小栅格的图层, 且全部统一裁剪成同一区域最终将全部转成 ESRI 格式的 ASCII 数据。

利用电路理论进行景观连接度分析时, 所需的焦点和电阻指代的生态学数据分别是丹顶鹤栖息地斑块和扩散阻力栅格。在阻力栅格方面, 表示丹顶鹤从一个斑块扩散到其他斑块所需克服的阻力, 阻力层主要包括研究区景观要素的空间位置、方位及在扩散过程中各景观要素对物种扩散的阻力系数, 阻力层的构建目前主要采用土地覆被类型图。根据扎龙湿地实际情况构建分类体系, 将土地覆被类型分为芦苇沼泽、明水面、草地、盐碱地、耕地和建筑用地 (图3), 然后进行阻力赋值。不同土地覆被类型的阻力赋值如表2, 其中建筑道路用地对丹顶鹤迁移扩散完全

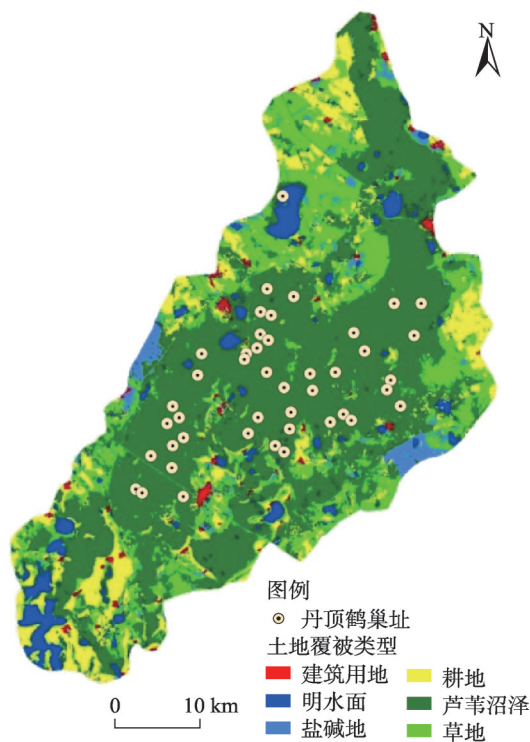


图3 扎龙保护区丹顶鹤巢址和土地覆被类型

Fig. 3 The nests distribution of red-crowned cranes and land cover types in Zhalong Nature Reserve

阻碍，视为障碍物，赋值无限大。

2 结果分析

2.1 丹顶鹤栖息地选择

将收集到的丹顶鹤巢位点数据和提取出的影响因子图层导入到MAXENT\_3.4软件中，在模型中设定75%的位点用于建立模型，将剩余收集到的出现点数据用于模型验证。应用受试者工作特征曲线（Receiver Operating Characteristic Curve, ROC）分析法对MAXENT软件预测的丹顶鹤巢址适宜性分布结果进行精度检验，ROC曲线下面的面积（Area Under Curve, AUC）值，是模型预测能力的准确性指标。AUC值取值范围为0.5~1，越接近1说明预测的结果越好，其模型预测的结果就越准确<sup>[24]</sup>。AUC值为0.50~0.60（失败），0.60~0.70（较差），0.70~0.80（一般），0.80~0.90（好），0.90~1.0（非常好）。将遥感反演得到的5个环境变量与丹顶鹤巢址数据构建最大熵模型之后（图4），训练集（training data）的AUC值是0.903，验证集（test data）的AUC值是0.864，说明了利用最大熵模型进行模拟的结果较为理想。

MAXENT模型同时预测出丹顶鹤分布概率即栖息地适宜性随各影响因子变化的曲线（图5），横坐标表示影响因子的数值变化，纵坐标表示适宜丹顶鹤营巢的概率值（取值0~1）。在干扰方面，道路和居民区的人类活动较为频繁，对丹顶鹤造营巢造成了主要影响，在靠近道路和居民区的区域，丹顶鹤在此营巢的可能性较小。在水源方面，随着明水面距离的增加丹顶鹤营巢的概率减小；营巢概率随着土壤湿度值的增加表现为，先增加后减小，当大于临界值后，说明地表覆被为明水面，水深不适宜丹顶鹤筑巢。在食物和隐蔽物方面，随着NDVI的增加，丹顶鹤出现的概率增大。扎龙保护区内的芦苇湿地为丹顶鹤在繁殖期提供了隐蔽的觅食环境。

繁殖期丹顶鹤主要有空间移动行为、维护行为、营养觅食行为、繁殖行为和种间行为等<sup>[25]</sup>。野外调查发现，扎龙湿地丹顶鹤在繁殖前期主要进行筑巢、产卵、孵化，活动范围和领域面积都较小，但对周围警觉性较高，会选择靠近明水面区域，但对道路、居民区强干扰因子会通过远离的方式进行回避<sup>[26]</sup>。繁殖期丹顶鹤主要在湿地周边芦苇沼泽及浅水区中觅食，以植物性食物为主，浅水中的昆虫、小鱼等也是丹顶鹤重要的食物种类。同时植被高度、植被类型等因素也会影响丹顶鹤巢址生境的选择。在众多影响因素中，植被类型所占权重最大，即丹顶鹤在芦苇沼泽中筑巢的可能性最大，并且巢址周围要有一定面积以及一定高度的苇丛，并伴随少量面积的明水面<sup>[27-29]</sup>。

表2 不同土地覆被类型阻力赋值

Table 2 Resistance assignment for different land cover types

土地覆被类型	阻力值
芦苇沼泽	1
明水面	10
草地	25
盐碱地	50
耕地	75
建筑道路用地	Infinite

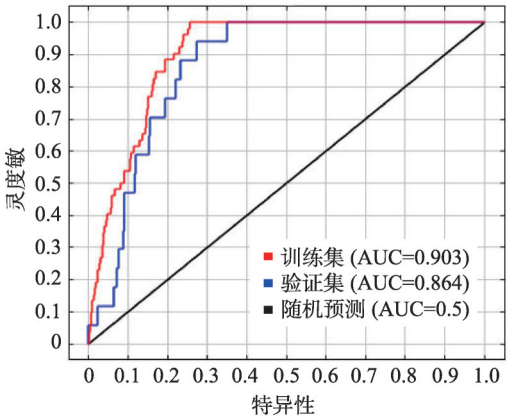


图4 最大熵模型预测结果ROC曲线验证  
Fig. 4 ROC curve verification of MAXENT prediction

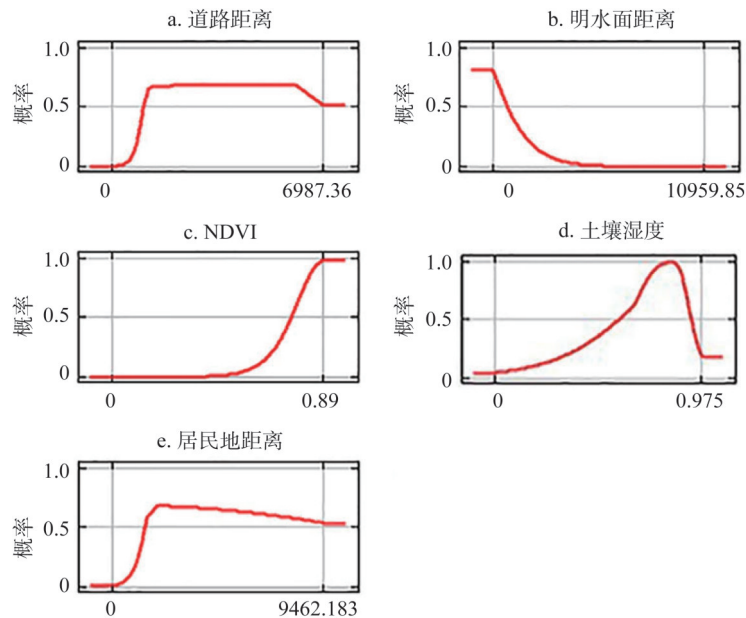


图5 影响因子对栖息地选择的反应曲线  
Fig. 5 Response curve of environmental factor to probability

MAXENT模型预测出扎龙保护区丹顶鹤的适宜繁殖栖息地分布如图6。301国道和滨州铁路将扎龙保护区丹顶鹤适宜营巢栖息地分为三个部分。301国道以北，主要分布在小河东村、小河东村马场、前南洼子和东升水库等区域；301国道以南，滨州铁路以北，为适宜丹顶鹤营巢的主要分布区，其范围主要为以下村屯的合围区域：北到黎明亮子，西到扎龙保护区管理局、獾洞岗，东到建新一队；滨州铁路以南主要分布在马家华房子、平安屯和黑地岗子以东。另有面积相对较小的零星区域分布在克钦湖、翁海、大黑山、新立屯、陈地房子、扎郎格、傅地房子等区域。

2.2 基于电路理论扩散模拟

最大熵模型预测出丹顶鹤繁殖栖息地适宜性空间分布，提取最适宜的38个繁殖栖息地斑块作为焦点，其余皆为基质。运用Circuitscape\_4.0.5软件计算栖息地斑块在连接度方面的电流密度值<sup>[30]</sup>，结果通过得到的电流图分析不同丹顶鹤栖息地间的连接度。基于电路理论的连接度模型有多种计算模式，本文采用成对计算模式（Pairwise mode），计算后生成最大电流密度图和累积电流密度图。

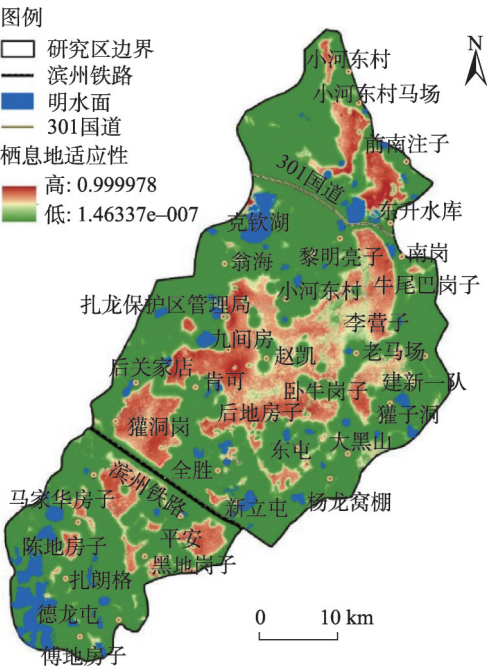


图6 扎龙保护区丹顶鹤适宜栖息地分布  
Fig. 6 Distribution of suitable habitats of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve



在所有成对斑块间进行迭代计算，得到的最大电流密度图（maximum current）（图 7a）突出了适宜栖息地斑块间的“夹点”（pinch point），电流密度较大的红色区域为“夹点”，可供丹顶鹤在繁殖期间进行扩散。斑块3和斑块6、斑块23和斑块15、斑块23和斑块27之间，道路对丹顶鹤扩散影响较大，在道路分布区域完全不能通过，不存在“夹点”。“夹点”区域是丹顶鹤的次适宜栖息地，对丹顶鹤扩散影响较小，主要土地覆被类型为明水面、草地和芦苇沼泽。“夹点”作为丹顶鹤在繁殖期进行扩散的唯一通道，同样需要管理人员进行维护。

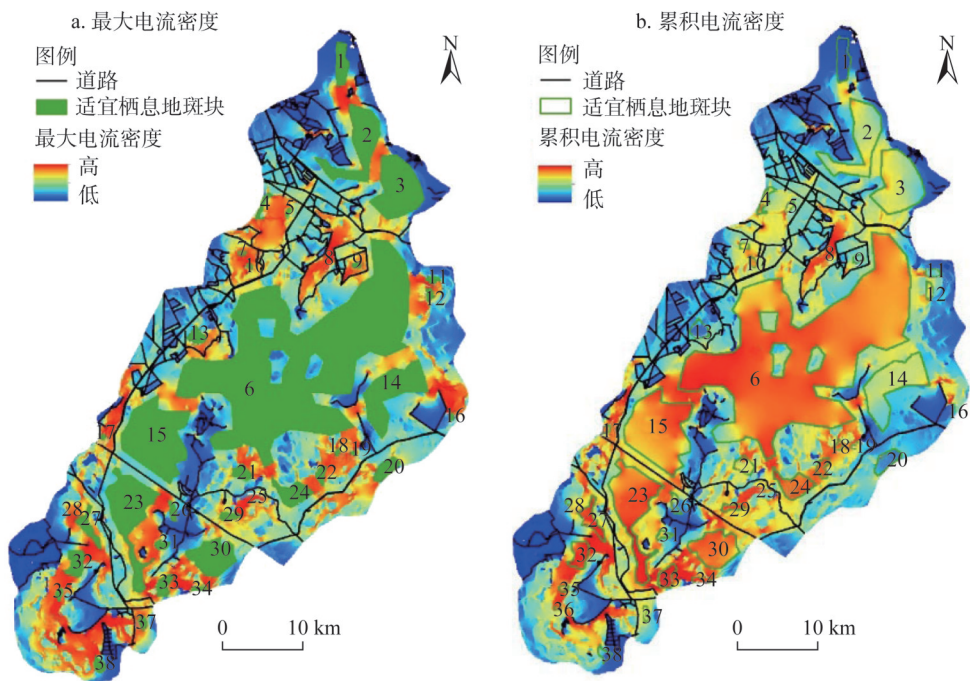


图 7 丹顶鹤扩散的最大电流密度和累积电流密度  
Fig. 7 Maximum current and cumulative current of red-crowned cranes

本文预测出的丹顶鹤繁殖栖息地斑块中有一部分实际并无丹顶鹤巢址，以往研究者预测的适宜栖息地也出现同样的情况<sup>[31,32]</sup>，主要原因是没有考虑丹顶鹤的迁移扩散。生态位建模的前提是强调物种的迁移能力是无限的，然而在现实中，地理的阻隔作用有时比较强，会影响模型的预测。在迁徙到扎龙湿地后，在夏季时会进行一次换羽，暂时失去飞行能力，丹顶鹤的迁移扩散会受到现实中地理阻隔的影响。扎龙湿地内部的301国道和滨州铁路部分由于没有构建生态廊道，对丹顶鹤繁殖期的迁移扩散具有明显的阻隔。

所有成对栖息地斑块在进行迭代运算后，同时会得到一个研究区累积电流密度图（cumulative current），是通过该像元的所有电流之和。累积电流密度值越大，在整个栖息地网络连通性中发挥的作用越大。累积电流密度值较大的为红色区域，主要分布在扎龙保护区的中部和西南部。与这里相比，扎龙保护区的东部边缘以及北部区域累积电流密度相对较小，主要是在因为在这两片区域分布较少的分散栖息地斑块。现实中累积电流密度对应的是丹顶鹤在所有栖息地间可能扩散路径的叠加，经过栖息地斑块的可能扩散路径越多，说明其在许多在维持栖息地网络连通性方面发挥的作用越大。

丹顶鹤在迁徙至扎龙湿地进入繁殖前期需要占据一定的领域面积, 繁殖期丹顶鹤对在领域内进行取食, 领域内出现其他丹顶鹤, 会表现出振翅鸣叫, 激烈争夺等领域行为<sup>[33]</sup>。因此在累积电流密度图中, 评价栖息地网络连通性方面同时需要考虑适宜斑块面积, 利用面积加权来评估适宜栖息地斑块的重要性。提取每一个栖息地斑块内的累积电流密度值, 然后将该斑块内所有像元的累积电流密度值相加得到扎龙保护区适宜栖息地重要性空间分布 (图8)。斑块6、斑块15和斑块23累积电流值较大且面积相对较大, 重要程度最大。斑块2、斑块3和斑块14虽然面积相对剩余斑块面积较大, 由于累积电流密度值较小, 因此重要性较低。斑块27、斑块32、斑块33和斑块35虽然累积电流密度值较大, 由于面积较小, 重要性中等, 可以作为丹顶鹤扩散的垫脚石。结果显示在MAXENT模型预测出的适宜栖息地斑块基础上, 考虑丹顶鹤繁殖期的迁移扩散行为, 利用累计电流密度面积加权进行重要性分析, 得到的适宜性等级更符合丹顶鹤真实巢址的分布。

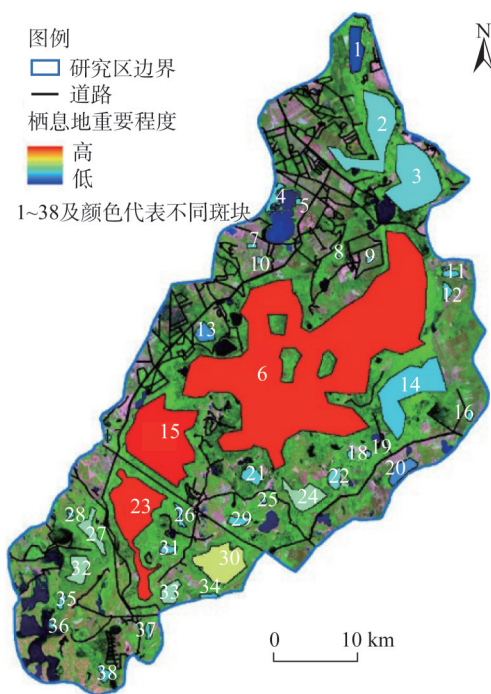


图8 基于电路理论的适宜栖息地重要性  
Fig. 8 Importance of suitable habitat for red-crowned cranes

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

影响丹顶鹤繁殖栖息地选择的因素主要是生态位的选择和扩散能力, 在扎龙湿地利用传统野外观测的方法难度极大。在适宜栖息地选择分析中, 考虑到濒危物种难以获取“非出现点”数据, 在丹顶鹤生态位选择的模型构建中, 采用仅需要物种“出现点”的MAXENT模型, 分析影响丹顶鹤繁殖生境选择的环境因子并预测出适宜栖息地。在适宜栖息地选择提取的道路距离影响因子以及在扩散模拟中对道路进行阻力赋值过程中, 没有对不同等级的道路分开处理, 包括横跨扎龙湿地的滨洲铁路及301国道。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可能会存在差异。希望在下一步研究中着重探讨不同道路类型对丹顶鹤繁殖期的影响程度。

在扩散模拟研究中, 基于电路理论进行景观连接度分析, 确定不同繁殖期丹顶鹤的多路径扩散路线, 识别维持湿地中适宜栖息地网络连通性的重要斑块。累积电流密度图, 显示适宜栖息地斑块在维持整个栖息地网络连通性中发挥作用, 累积电流密度值较大的为红色区域, 主要分布在扎龙保护区的中部和西南部。利用面积加权对适宜栖息地斑块的重要性进行综合评估, 得到适宜栖息地重要性分布图, 斑块6、斑块15和斑块23重要程度最大, 弥补了生态位预测模型的不足, 更准确说明了丹顶鹤繁殖期栖息地的选择机制。在模拟丹顶鹤繁殖期失去飞行能力的移动扩散时, 根据最大熵模型得出的各环



境变量对丹顶鹤栖息地选择的影响, 基于土地覆被类型进行阻力赋值。不同土地覆被类型的阻力值大小只是一个相对值, Beier等<sup>[34]</sup>在基于不同阻力赋值对13个物种扩散影响的不确定性研究中指出, 湊型阻力赋值 (compressed values) 和分散型阻力赋值 (dispersed valuse) 对于8个物种没有影响, 对另外5个物种影响较小。

### 3.2 结论

对扎龙湿地丹顶鹤繁殖栖息地的保护, 不仅要考虑适宜丹顶鹤繁殖的栖息环境, 还应考虑丹顶鹤在栖息地间进行迁移扩散的生态过程, 即适宜生境的景观连接度。基于最大熵模型的丹顶鹤繁殖栖息地选择结果显示, 丹顶鹤易于选择远离道路和居民地干扰且靠近明水面的区域作为营巢栖息地, 栖息地土壤湿度较高并且植被覆盖较多。湿地内301国道和滨州铁路将扎龙保护区丹顶鹤适宜营巢栖息地分为三个部分, 预测的丹顶鹤繁殖栖息地斑块中有一部分实际并无丹顶鹤巢址, 主要原因是在利用最大熵模型进行栖息地预测时, 忽略了丹顶鹤在栖息地斑块之间的扩散, 导致预测出的适宜丹顶鹤营巢栖息地在实际观察时并不存在。

基于景观连接度的扩散主要取决于丹顶鹤的扩散能力和栖息地的完整性。在丹顶鹤扩散能力方面, 在换羽失去飞行能力后的丹顶鹤移动扩散能力受到地表覆被类型的影响。在对栖息地完整性保护方面, 面积较大的适宜栖息地可作为丹顶鹤主要繁殖地, 面积较小的适宜栖息地可作为丹顶鹤扩散的垫脚石。适宜栖息地间的“夹点”区作为丹顶鹤扩散的唯一通道, 对维持栖息地网络的连通性至关重要, 是丹顶鹤的次适宜栖息地, 同样需要进行科学保护和管理。

在栖息地连接度方面, 建议进行廊道修复, 扎龙保护区内所有丹顶鹤巢址基本上分布在301国道以南, 滨州铁路的以北区域, 此区域为主要繁殖栖息地。本文结果显示除了以上区域, 其他区域依然存在适宜丹顶鹤繁殖的栖息地, 没有选择在其他适宜栖息地筑巢很可能是和保护区中心繁殖栖息地连通性较差。近年来修建的公路和铁路以及居民区的扩张增加了丹顶鹤在各栖息地斑块之间扩散的阻力, 面临更大的风险。如果进行廊道修复, 增加丹顶鹤繁殖栖息地之间的连接度, 为丹顶鹤繁殖提供多种选择, 在一个栖息地斑块受到破坏时, 可以转移到其他斑块, 降低丹顶鹤生存的威胁。因此建议将保护区内对丹顶鹤影响较大的道路进行修复, 为丹顶鹤提供在扩散时可以通过的廊道。

### 参考文献(References):

- [1] PECL G T, ARAÚJO M B, BELL J D, et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 2017, 355(6332): 9214.
- [2] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 等. 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 2014, 59(6): 430-437. [WEI F W, NIE Y G, MIAO H X, et al. Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 430-437.]
- [3] 刘慧明, 高吉喜, 张海燕, 等. 2010—2015年中国生物多样性保护优先区域人类干扰程度评估. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1456-1465. [LIU H M, GAO J X, ZHANG H Y, et al. Human disturbance monitoring and assessment in the biodiversity conservation priority area of China. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(11): 1456-1465.]
- [4] 佟守正, 吕宪国, 苏立英, 等. 扎龙湿地生态系统变化过程及影响因子分析. *湿地科学*, 2008, 6(2): 179-184. [TONG S Z, LYU X G, SU L Y, et al. Changing process and the impact factors of wetland ecosystem in Zhalong Wetland. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 179-184.]
- [5] LAWLER J J, RUESCH A S, OLDEN J D, et al. Projected climate-driven faunal movement routes. *Ecology Letters*,

- 2013, 16(8): 1014-1022.
- [6] AMANO T, SZÉKELY T, SANDEL B, et al. Successful conservation of global waterbird populations depends on effective governance. *Nature*, 2017, 553: 199-201.
- [7] 杨维康, 钟文勤, 高行宜. 鸟类栖息地选择研究进展. 干旱区研究, 2000, 17(3): 71-78. [YANG W K, ZHONG W Q, GAO X Y. A review of studies on avian habitat selection. *Arid Zone Research*, 2000, 17(3): 71-78.]
- [8] HOEGH-GULDBERG O, HUGHES L, MCINTYRE S, et al. Assisted colonization and rapid climate change. *Science*, 2008, 321(5887): 345-346.
- [9] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 景观连接度的概念、度量及其应用. 生态学报, 2010, 30(7): 1903-1910. [WU C G, ZHOU Z X, WANG P C, et al. The concept and measurement of landscape connectivity and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1903-1910.]
- [10] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255. [CHEN C D, JIA Z Y, WU S J, et al. A bibliometric review of Chinese studies on the application of landscape connectivity. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3243-3255.]
- [11] 欧维新, 袁薇锦. 基于景观连接度的盐城滨海湿地丹顶鹤生境斑块重要性评价. 资源科学, 2015, 37(4): 823-831. [OU W X, YUAN W J. Priority of red-crowned crane wintering habitat patches using landscape connectivity in the Yancheng Coastal Wetland. *Resources Science*, 2015, 37(4): 823-831.]
- [12] 张宇, 李丽, 吴胜胜, 等. 基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析. 生态学报, 2016, 36(1): 51-58. [ZHANG Y, LI L, WU G S, et al. Analysis of landscape connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) based on habitat patches. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 51-58.]
- [13] DICKSON B G, ROEMER G W, MCRAE B H, et al. Models of regional habitat quality and connectivity for pumas (*Puma concolor*) in the Southwestern United States. *PLoS One*, 2013, 8(12): e81898, Doi: 10.1371/journal.pone.0081898.
- [14] 李慧, 李丽, 吴胜胜, 等. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. 生态学报, 2018, 38(6): 2221-2228. [LI H, LI L, WU G S, et al. Analysis of the landscape level connectivity of the Yunnan snub-nosed monkey habitat based on circuit theory. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2221-2228.]
- [15] 张玉红, 苏立英, 于万辉, 等. 扎龙湿地景观动态变化特征. 地理学报, 2015, 70(1): 131-142. [ZHANG Y H, SU L Y, YU W H, et al. Characteristics of landscape dynamic changes in Zhalong Wetland. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 131-142.]
- [16] 冯夏清, 章光新. 自然一人双重作用下扎龙湿地水文情势分析. 资源科学, 2010, 32(12): 2316-2323. [FENG X Q, ZHANG G X. Analysis of the hydrologic regime affected by natural and human factors over the Zhalong Wetland. *Resources Science*, 2010, 32(12): 2316-2323.]
- [17] 邹红菲, 朱井丽, 吴庆明, 等. 扎龙保护区湿地注水恢复期鸟类群落多样性. 野生动物学报, 2016, 37(3): 207-215. [ZOU H F, ZHU J L, WU Q M, et al. Avian community diversity during the restoration stage after wetland irrigation in Zhalong Nature Reserve. *Chinese Journal of Wildlife*, 2016, 37(3): 207-215.]
- [18] 刘学昌, 吴庆明, 邹红菲, 等. 丹顶鹤(*Grus japonensis*)东、西种群巢址选择的分异. 生态学报, 2009, 29(8): 4483-4491. [LIU X C, WU Q M, ZOU H F, et al. The difference in characteristics of the nestsite selection between the east and west populations of the Red-crowned Cranes (*Grus japonensis*). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4483-4491.]
- [19] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [20] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196. [ZHU G P, QIAO H J, et al. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10): 1189-1196.]
- [21] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 应用GIS和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843-852. [GAO B, WEI H Y, GUO Y L, et al. Using GIS and Maxent to analyze the potential distribution of *Abies chensiensis*. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 843-852.]
- [22] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.

- [23] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352. [SONG L L, QIN M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3344-3352.]
- [24] 周志华. 机器学习. 北京: 清华大学出版社, 2016: 31-36. [ZHOU Z H. Machine Learning. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 31-36.]
- [25] 赵正阶. 中国鸟类志. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001: 414-415. [ZHAO Z J. Avifauna of China. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2001: 414-415.]
- [26] SU L, ZOU H. Status, threats and conservation needs for the continental population of the Red-crowned Crane. Chinese Birds, 2012, 3(3): 147-164.
- [27] 江红星, 刘春悦, 钱法文, 等. 基于3S技术的扎龙湿地丹顶鹤巢址选择模型. 林业科学, 2009, 45(7): 76-83. [JIANG H H, LIU C Y, QIAN F W, et al. A model of nest-site selection of Red-crowned Crane based on RS, GIS and GPS techniques at Zhalong Wetland, China. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(7): 76-83.]
- [28] 李枫, 杨红军. 扎龙湿地丹顶鹤巢址选择研究. 东北林业大学学报, 1999, 27(6): 57-60. [LI F, YANG H J. The nest-site selection by Red-crowned Crane in the Zhalong Wetland. Journal of Northeast Forestry University, 1999, 27(6): 57-60.]
- [29] 郭殿繁, 臧淑英, 那晓东. 扎龙保护区丹顶鹤栖息地适宜性评价. 地理与地理信息科学, 2015, 31(1): 54-58. [GUO D Y, ZANG S Y, NA X D. Habitat suitability evaluation of Red-Crowned Crane in Zhalong National Nature Reserve. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(1): 54-58.]
- [30] MCRAE B H, SHAH V B, MOHAPATRA T K. Circuitscape 4 User Guide. The Nature Conservancy. [http://docs.circuitscape.org/circuitscape\\_4\\_0\\_user\\_guide.html?&id=gsite](http://docs.circuitscape.org/circuitscape_4_0_user_guide.html?&id=gsite), 2013.
- [31] 秦喜文, 张树清, 李晓峰, 等. 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. [QIN X W, ZHANG S Q, LI X F, et al. Assessment of Red-crowned Crane's habitat suitability based on weights-of-evidence. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1074-1082.]
- [32] 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. [WANG Z Q, CHEN Z C, HAO C Y. Breeding habitat suitability evaluation of Red-crown Crane in Zhalong National Nature Reserve by the method of habitat suitability index. Wetland Science, 2009, 7(3): 197-201.]
- [33] 李方满, 李佩. 丹顶鹤与白枕鹤的领域比较. 生态学杂志, 1999, 18(6): 33-37. [LI F M, LI P. A comparative study on territories of White-Naped Crane and Red-Crowned Crane. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(6): 33-37.]
- [34] BEIER P, MAJKA D R, NEWELL S L. Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages. Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America, 2009, 19(8): 2067.



## Habitat selection and dispersal of red-crowned cranes during breeding period in Zhalong Wetland National Nature Reserve

GONG Zhao-ning<sup>1,2,3,4</sup>, SU Shuo<sup>1,2,3,4</sup>, DU Bo<sup>1,2,3,4</sup>, GUAN Hui<sup>5</sup>, ZHANG Qiang<sup>5</sup>

(1. College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Water Resources Security Laboratory, Beijing 100048, China; 3. Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal, Beijing 100048, China; 4. Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Beijing 100048, China; 5. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

**Abstract:** The impact of landscape changes on the quality and connectivity of habitats for multiple wildlife species is a global conservation concern. Zhalong Wetland is not only the priority areas of biodiversity conservation in China, but also the largest habitat in the world with a large number of red-crowned cranes (*Grus japonensis*) breeding. The red-crowned crane was listed as a globally endangered species by the IUCN Red List of threatened species (IUCN, 2012), which is the umbrella species and the most sensitive biological indicator species of ecological changes in Zhalong Wetland. The selection of breeding habitat and the dispersal between suitable habitats in the study area are of great significance to the protection of wild red-crowned cranes. Firstly five variables (distance to water, soil wetness, NDVI, distance to roads and distance to buildings) were derived, which was hypothesized to influence the quality of habitat for red-crowned cranes according to the actual investigation within an area encompassing the entire Zhalong Nature Reserve. The MAXENT model was used to predict the suitable habitat distribution of red-crowned crane and analyze the response curve of each factor. The results showed that the red-crowned cranes were more likely to inhabit far away from roads and residents, and the breeding habitat might be close to water with more vegetation in a higher soil moisture condition. Finally, 38 suitable habitat patches were extracted from MAXENT model to simulate the multipath dispersal of red-crowned cranes when they lost flight ability based on circuit theory in landscape connectivity. Our map of maximum current flow between patches highlighted the possible pinch points, which can be used for red-crowned cranes moving directly between patch pairs. Current flow summed across all pairs of patches highlighted areas important for keeping the entire network connected. The results show that based on the suitable habitat patches predicted by MaxEnt model, considering the migration and diffusion behavior of the red-crowned crane in the breeding period, the comprehensive importance of the suitable habitat patches is evaluated by using the area weighting of the cumulative current density, and the suitability level is more consistent with the real nest distribution of the red-crowned cranes. Map results can be used to support the planning efforts concerned with the maintenance of red-crowned cranes metapopulation structure, as well as to protect the landscape features that facilitate the dispersal process.

**Keywords:** red-crowned crane; habitat selection during breeding period; dispersal; MAXENT Model; circuit theory; Zhalong Wetland National Nature Reserve