三门峡天鹅湖国家城市湿地公园大天鹅栖息地适宜性评价

杜 博[1,2] 吴 渊[3] 刘亚东[3] 茹文东[4] 李云峰[4] 高如意[4] 谢文燕[4] 韩铁艳[4]
宫兆宁[1,2] 洪剑明[3*]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048;
3. 首都师范大学生命科学学院,北京 100048; 4. 三门峡市天鹅湖国家城市湿地公园管理处,河南 三门峡 472000)

摘要:近年来黄河中游人类活动日益增加,大天鹅(*Cygnus cygnus*)的适宜越冬栖息地不断减少. 三门峡天鹅湖国家城市湿地公园大天鹅种群密度较高,空间分布不尽合理,对大天鹅健康形成威胁,改善现有栖息地和寻找潜在的栖息地十分迫切. 本文利用遥感和 GIS 技术进行适宜性分析,从影响大天鹅栖息地的食物、水源和周围生态环境 3 个方面选取7 个环境变量,结合记录的大天鹅位点,构建最大熵模型,分析栖息地选择的主要环境变量及影响机制,并预测湿地公园内大天鹅适宜栖息地概率分布. 结果显示:投食点距离、改进归一化水体指数(MNDWI)、道路距离和植被指数(NDVI)等 4 个环境变量为主要影响因素,投食点距离和 NDVI 值越大,大天鹅分布的概率越低;MNDWI 和道路距离值越大,分布概率越高. 参照联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)土地适宜性分级标准,将公园内大天鹅栖息地适宜性概率分布划分为 5 个等级,最适宜栖息地面积 0.41 km^2,土地利用类型为坑塘水面. 研究结果可用于天鹅湖内栖息地改造和在黄河中游寻找潜在越冬栖息地并开展湿地修复. 大天鹅易于选择远离道路干扰的开阔水域作为越冬栖息地,冬季食物匮乏,前期可投食玉米引导大天鹅种群合理分布.

关键词:越冬大天鹅;栖息地适宜性;遥感与 GIS;最大熵模型
中图分类号:TP79 **DOI**:10. 19789/j. 1004-9398. 2020. 03. 010

0 引 言

湿地鸟类是湿地生态系统重要组成部分,在能量流动和维持系统稳定性方面起着举足轻重的作用[1]. 大天鹅(*Cygnus cygnus*)作为湿地水鸟的一种,属雁形目鸭科天鹅属,是国家二级保护动物,被列入中国濒危动物红皮书中[2]. 大天鹅是一种迁徙鸟类,春天飞往欧亚大陆北部繁殖后代,冬季迁徙到南方进行越冬[3]. 越冬栖息地在我国主要分布在山东沿海、黄河中下游湿地、青海湖等地. 文献记载大天鹅的适宜栖息地有:泰加林和桦木林带附近的沼泽低地、河流三角洲、山间积水盆地、水草丰茂的浅水湖泊和流动缓慢的河流[4].

三门峡天鹅湖国家城市湿地公园(以下简称天鹅湖湿地公园)是大天鹅在黄河中游的主要越冬地之一,近年来公园管理处加强对大天鹅的保护工作,并与高校开展大天鹅生态招引,增加了觅食栖息地,采取为天鹅投食等措施,每年冬季在天鹅湖湿地公园栖息的大天鹅数量可达 2 000 只左右. 2014 年冬季进行栖息地修复之后,天鹅湖湿地公园大天鹅数量最多达到 6 000 余只. 2015 年初由于种群密度过高等因素,湿地公园发生了大天鹅感染高致病性禽流感病毒的疫情[5].

为合理引导大天鹅种群分布,迫切需要对大天鹅越冬栖息地进行适宜性评价,分析大天鹅的生境需求. 在栖息地适宜性评价中,邹丽丽等[6]采用 Logistic 模型对鹭科水鸟的栖息地适宜性进行评价,为栖息地适宜性分析提供了参考. 吴庆明等[7]采用最大熵模型(Maxent),结合遥感和 GIS 等技术手段对扎龙湿地丹顶鹤营巢生境进行了分析,为保护区的管护工作提供更为科学的理论借鉴. 利用遥感和 GIS 空间分析技术对栖息地开展研究具有定量、省时、清晰可见等特点,本文采用 Maxent 模型对大天

收稿日期:2019-09-09
* 通信作者:1660261741@ qq. com

鹅栖息地进行了适宜性评价,用于指导栖息地恢复和景观格局优化.

1 三门峡天鹅湖国家城市湿地公园概况

天鹅湖湿地公园位于三门峡市东、西城区之间的生态区,东起 209 国道立交桥,西到陕州大道与沿黄观光路交叉处,南接陕州大道,北至黄河滩涂.核心景区包括双龙湖白天鹅观赏区、陕州古城和沿黄生态林带.公园中青龙湖(水域面积 1.20 km^2)和苍龙湖(水域面积0.73 km^2)是大天鹅在天鹅湖的主要栖息地.区域内地形主要以黄土台地和黄河湿地为主(图 1),平均海拔 320 ~ 354 m,年平均降水量为 560 ~ 630 mm;属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,多西风和西北风,年平均气温 13.9℃,极端最低气温 - 13.0℃[8].夏季 7—9 月份降水集中,冬、春季节水量较少[9].每年 10 月—次年 3 月,三门峡大坝蓄水期间,上千只大天鹅在此栖息越冬,形成三门峡市一道亮丽风景线,天鹅湖也因此得名.

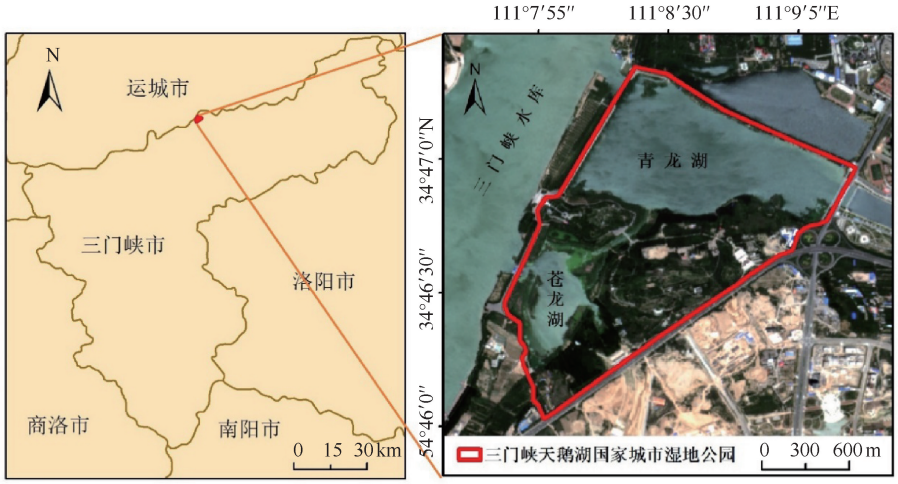


图 1 三门峡天鹅湖国家城市湿地公园区位

2 研究方法与数据处理

2.1 栖息地适宜性评价方法

栖息地适宜性评价研究在相当长的时间内只能定性描述环境变量的影响,而无法定量描述每个影响因子的贡献率以及预测物种潜在的空间分布情况[10].随着 3S 技术水平的提高,栖息地选择研究得以飞跃发展.目前,在栖息地适宜性评价中模型方法较多,根据栖息地研究中按模型所需“出现点”(presence)和“非出现点”(absence)的不同,分为机理模型(mechanism model)、回归模型(regression model)和生态位模型(ecological niche model)[11].机理模型在运算过程中既不需要目标物种的“出现点”数据,也不需要“非出现点”数据,而是研究人员在清晰地了解到所研究物种的生态需要之后,根据生态需要进行建模预测.但此类模型存在很强的主观性,不同研究人员对各环境因子的权重赋值不同,将会导致评价结果存在明显差异[12].回归模型,通过环境变量与“出现点”和“非出现点”建立回归函数进行研究.在利用回归模型的众多研究中发现,只有获得真实的“非出现点”数据,回归模型才能计算出准确的预测结果[13].而现实情况是,天鹅湖湿地公园内大天鹅会进行游动,对于观测时没有大天鹅分布的位置以后可能会被记录到,从而引起误差.生态位模型一般利用物种的出现点数据和相关环境变量,通过一系列的算法运算预测物种的实际分布和潜在分布[14].在动植物资源适宜栖息地适宜性评价中出现了包括生态位因子分析模型、基于规则集的遗传算法模型和 Maxent 模型在内的多种生态位模型,而 Elith 等[15]利用多种生态位模型对不同地区 226 个物种进行栖息地分布预测,结果表明 Maxent 模型预测最为准确,更加接近实际分布,因此本文选取 Maxent 模型.

2.2 Maxent 模型

本文选择仅需要物种“出现点”的 Maxent 模型,预测大天鹅的适宜生态位分布,并分析各个环境变量对栖息地选择的影响.Maxent 模型在栖息地选择中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,进而预测其在地理空间内的分布[16-17].

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,模型如公式(1)所示:

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

其中,$c1, c2, \cdots, cn, Z$ 为常量;$f1(x), f2(x), \cdots, fn(x)$ 为目标地区的各种环境特征方程,H 为 p 分布的熵.

满足这些限制条件的分布有很多,由限定条件列出特征方程,首先计算出研究区域概率分布的熵值,然后通过不断迭代,最后将研究对象分布地区的概率分布不断增加. 这时研究区域概率分布的最大熵也不断增加,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[18].

2.3　数据收集与处理

2015 年 12 月—2016 年 2 月,在天鹅湖湿地公园以样线法调查大天鹅的栖息地. 1 条样线沿青龙湖周围步道,自东观鸟屋起至苍龙涧河河口终,全长 3.2 km. 另 1 条样线沿苍龙湖周围步道,自苍龙涧河河口起至苍龙湖南路边观测平台终,全长 1.9 km. 每月调查 1 次,每次调查记录大天鹅数量与大天鹅所在的栖息地环境类型,同时记录天鹅湖湿地公园投食位点(图 2).

通过观察,在分析大天鹅栖息地生境要素与生境结构的基础上,结合收集到的卫星影像、野外调查数据和大天鹅实测数据,从影响大天鹅栖息地的食物、水源和周围生境 3 方面选取投食点距离、改进归一化水体指数(MNDWI)、植被指数(NDVI)、道路距离、土地利用类型、坡度和坡向作为环境变量.

土地利用类型采用 2015 年 12 月资源三号卫星遥感影像(中国资源卫星应用中心提供)人工目视解译得到,NDVI 和 MNDWI 利用同时期 Landsat8 OLI 遥感影像在 ENVI 5.3 中进行波段运算得到,Landsat8 影像由美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 提供,坡度和坡向利用 DEM 水文分析得到.

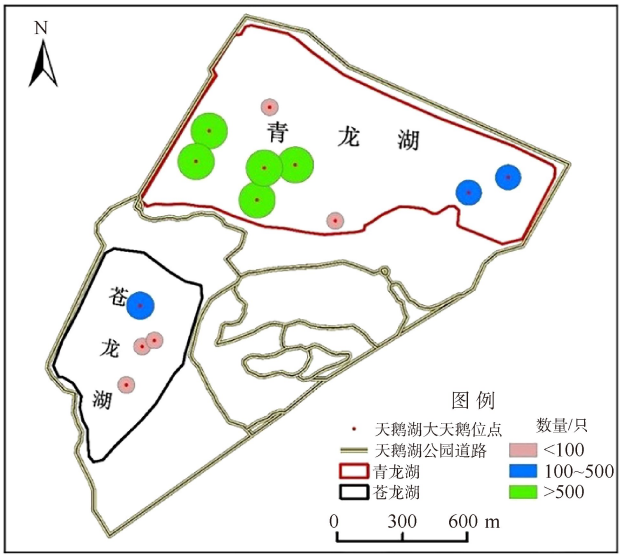


图 2　三门峡天鹅湖国家城市湿地公园内大天鹅的空间及数量分布

天鹅湖湿地公园总面积2.91 km^2,主要有人工表面(包括建筑物和道路)、坑塘水面、林地、芦苇湿地和草地 5 种土地利用类型(图 3). 其中,坑塘水面面积最大,达到 1.32 km^2,主要是青龙湖和苍龙湖的水域面积;林地面积1.18 km^2,成为天鹅湖公园陆地地面主要类型;人工表面散布于天鹅湖公园,面积总计 0.27 km^2;芦苇湿地主要分布在苍龙湖,面积 0.07 km^2;草地较少,面积 0.06 km^2,散布于苍龙湖周围和公园东部.

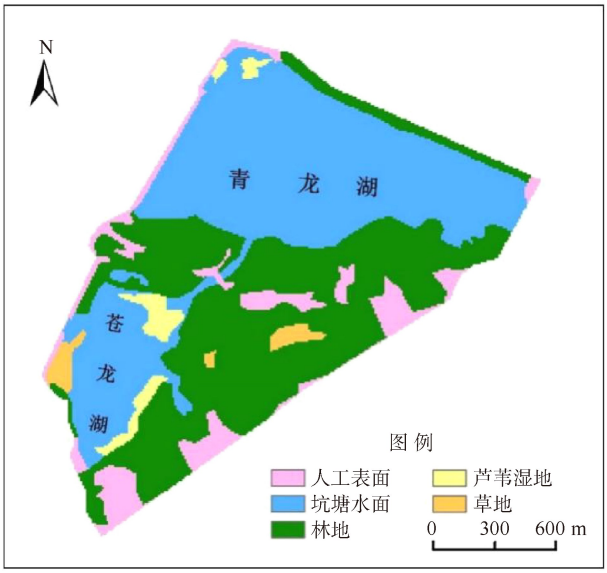


图 3　三门峡天鹅湖国家城市湿地公园土地利用类型

3　结果与分析

将收集到的大天鹅位点数据和提取出的影响

因子图层导入到 Maxent 3.4 软件中,预测大天鹅适宜性概率分布. 刀切法(Jackknife)判断各环境因子对物种分布影响的重要性,结果以柱状图形式显示,见图 4“仅使用此变量”重要性水平越大表示重要程度越高. 从图 4 中可以观察到对大天鹅栖息地适宜性的重要程度从高到低依次为投食点距离、MNDWI、道路距离、NDVI、土地利用、坡度和坡向. 单独使用投食点距离变量建模时增益值最大,排除投食点距离时增益值最小,表明投食点距离是大天鹅栖息地适宜性评价中最重要的因素.

Maxent 模型同时模拟出大天鹅分布概率(P)即栖息地适宜性随各影响因子变化的曲线(图 5),

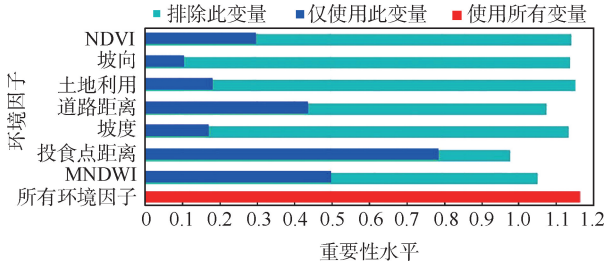


图 4　基于刀切法的环境因子重要性

横坐标表示影响因子的数值变化,纵坐标表示适宜大天鹅栖息的概率值(取值 0 ~ 1.0). 投食点距离和 NDVI 值越大,大天鹅分布的概率越低;MNDWI 和道路距离值越大,分布概率越高.

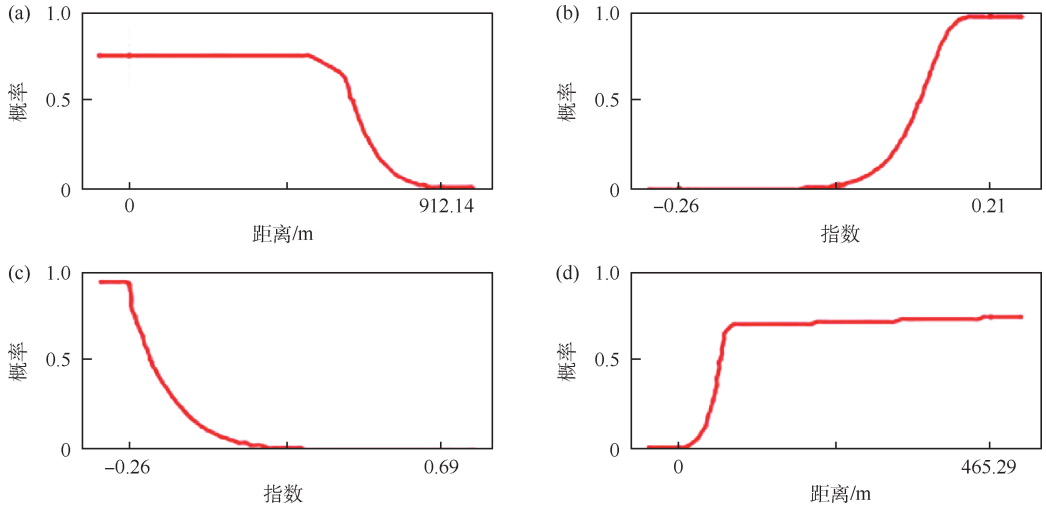


图 5　影响因子对栖息地选择的反应曲线

(a)投食品距离;(b)改进归一化水体指数;(c)植被指数;(d)道路距离

参照 FAO 土地适宜性分级标准[19],将天鹅湖湿地公园内大天鹅栖息地适宜性分布概率划分为 5 个等级:Ⅰ为 $0.8 \leqslant P < 1.0$,为最适宜栖息地,土地开发程度低,环境抗干扰能力强,最适宜大天鹅栖息;Ⅱ为 $0.6 \leqslant P < 0.8$,为适宜栖息地,土地开发程度低,环境抗干扰能力较强,不影响大天鹅活动,适宜大天鹅栖息;Ⅲ为 $0.4 \leqslant P < 0.6$ 的基本适宜栖息地,土地开发程度中等,环境抗干扰能力中等,对大天鹅栖息有较小影响,大天鹅可以栖息;Ⅳ为 $0.2 \leqslant P < 0.4$ 的不适宜栖息地,栖息地开发程度高,有大部分城镇用地,对大天鹅影响较大,大天鹅难以长期停留;Ⅴ为 $0 \leqslant P < 0.2$ 不可栖息地,栖息地被开发程度很高,几乎不能自动恢复,大天鹅不可栖息.

利用天鹅湖湿地公园矢量边界在 ArcGIS10.2 中对研究区的大天鹅越冬栖息地适宜性分级图进行裁剪,得到大天鹅越冬栖息地适宜性分级,见图 6. 利用 ArcGIS10.2 中的空间统计功能计算面积,经统计,公园总面积 2.91 km^2,其中最适宜栖息地面积 0.41 km^2,适宜栖息地面积 0.48 km^2,基本适宜栖息地面积 0.65 km^2,不适宜栖息地面积 0.50 km^2,不可栖息地面积 0.87 km^2. 大天鹅可栖息和最适宜的土地利用类型都是坑塘水面.

4　根据评价结果扩大适宜越冬栖息地

实地调查结果(表 1)表明:大天鹅主要栖息于青龙湖的浅滩及周围水域,出现的大天鹅次数占统计到大天鹅总数的 68.24%;其次是青龙湖与苍龙湖的开阔水域,占总数的 30.05%;在青龙湖和苍龙湖的荷花群落周围统计到大天鹅占总数的 5.18%;苍龙湖的芦苇群落周围统计到大天鹅占总数的 1.30%.

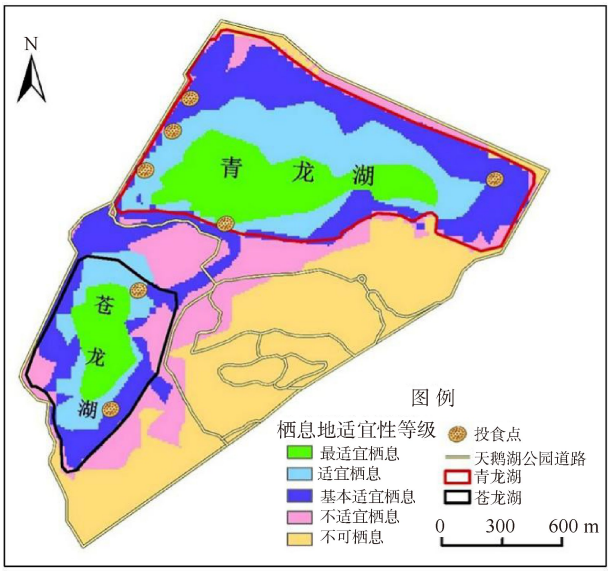


图 6　三门峡天鹅湖国家城市湿地公园大天鹅栖息地适宜性等级

表 1　大天鹅在不同栖息地的频度及比例

栖息地类型	出现频度/(只·次$^{-1}$)	栖息地所占比例/%
开阔水面	1 913	30.05
浅滩及周围水域	4 345	68.24
荷花群落周围	330	5.18
芦苇群落周围	83	1.30

调查显示大天鹅在天鹅湖湿地公园主要选择栖息于浅滩及周围水域和开阔水面,这与利用大天鹅栖息地适宜性选择模型的结果相似,主要适宜栖息地在青龙湖和苍龙湖的开阔水面.但又不完全相同,实地调查发现大天鹅多栖息于浅滩等靠近岸边的浅水区域,这在栖息地适宜性分级图中,不是最优的选择.可能是浅滩上有人为投食,对大天鹅有较强吸引力,成为大天鹅选择到浅滩栖息的重要原因.此外,观察显示:若距离人类较近的大天鹅在受到人类活动干扰如鲜艳颜色的衣服和汽车鸣笛等,均容易导致大天鹅往湖中心游动,这也说明距离人为干扰较近的栖息地并不是大天鹅稳定选择的栖息地.

根据表 1 和图 2 的结果,天鹅湖湿地公园内大天鹅的空间及数量分布主要集中在投食点附近的浅滩浅水区,局部大天鹅数量多时达 2 000 只,密度过大;而且青龙湖的数量超过 3 000 只,苍龙湖不到 1 000 只.因此,应根据最适栖息地的特点,对苍龙湖的生境进行改造,增加浅滩和浅水区,并对西堤下的大面积芦苇湿地进行改造,降低高程,减少芦苇的面积,增加其他适合大天鹅食用的野生植物.在大天鹅抵达天鹅湖湿地公园越冬前,秋季前对芦苇地上部分进行刈割,减少因植物体内养分回流到水体中增加水体的富营养化风险.青龙湖也应在南侧增加一部分投食点,分散大天鹅觅食地过于集中的现状,使整个天鹅湖湿地公园的天鹅分布更加均匀和分散.

根据适宜性评价结果,还应在黄河两岸寻找潜在越冬栖息地,大天鹅易于选择远离道路干扰的开阔水域作为栖息地,以满足其正常的行为活动.在寻找新的适宜栖息地时,库区湿地保护区部分开阔水域被违法改造成鱼塘,建议拆除此类违建,进行栖息地修复.食物是大天鹅对栖息地选择最重要的影响因素,大天鹅主要取食沉水植物的茎叶、挺水植物的根茎、农作物和湿生植物的果实等.由于冬季温度较低,植物生长缓慢,大天鹅取食的野生植物有限,人工投食玉米可作为主要食物来源.

5　结　论

本文基于遥感和 GIS 技术手段,采用仅需要物种出现点的 Maxent 模型,对天鹅湖湿地公园内越冬大天鹅进行了栖息地适宜性评价,并从空间尺度探讨环境变量对大天鹅栖息地选择的影响机制. 模型预测出适宜大天鹅栖息的生境类型为远离道路干扰的开阔水域,集中分布在苍龙湖和青龙湖中心区域.通过实地验证对比,大天鹅实际空间分布与实验分析结果基本一致.投食点距离、MNDWI、道路距离和 NDVI 为大天鹅栖息地选择的主要影响因子,由于冬季野生食物的短缺,人工投食的玉米对大天鹅具有较强的吸引作用.

受自然条件和人类活动的影响,较少的适宜栖息地导致了大天鹅的过度聚集.根据本文研究结果,除了在现有栖息地进行改善外,在黄河两岸寻找潜在栖息地并进行生境修复更为迫切,对引导大天鹅种群的合理分布具有重要意义.

参 考 文 献

[1] MCLAUGHLIN D L, COHEN M J. Realizing ecosystem services: wetland hydrologic function along a gradient of ecosystem condition[J]. Ecological Applications, 2013, 23(7):1619 – 1631.

[2] 郑光美,王岐山. 中国濒危动物红皮书:鸟类[M]. 北京:科学出版社,1998:38 – 39.

[3] 傅承钊, 郑琳. 大天鹅的生态习性[J]. 自然资源研究, 1987(3):61 – 63.

[4] 杜博, 宫兆宁, 茹文东,等. 三门峡水库越冬大天鹅栖息地选择研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(3):370 – 376.

[5] 张国钢, 陈丽霞, 李淑红,等. 黄河三门峡库区越冬大天鹅的种群现状[J]. 动物学杂志, 2016, 51(2): 190 – 197.

[6] 邹丽丽, 陈晓翔, 何莹,等. 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价[J]. 生态学报, 2012, 32(12):3722 – 3728.

[7] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍,等. 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[J]. 生态学报, 2016, 36(12):3758 – 3764.

[8] 李景玉, 杨胜天, 徐宗学,等. 三门峡水库回水变动区土地利用/土地覆被变化及其景观格局分析[J]. 农业工程学报,2007, 23(3):61 – 68.

[9] 徐文茜, 汤茜, 丁圣彦. 河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区景观格局动态分析[J]. 湿地科学, 2016, 14(2):235 – 241.

[10] 杨维康, 钟文勤, 高行宜. 鸟类栖息地选择研究进展[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3):71 – 78.

[11] 王学志, 徐卫华, 欧阳志云,等. 生态位因子分析在大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用[J]. 生态学报, 2008, 28(2):821 – 828.

[12] 董张玉, 刘殿伟, 王宗明,等. 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价[J]. 生态学报, 2014, 34(6):1503 – 1511.

[13] 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[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 76 – 83.

[14] GUISAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. Ecol Modell, 2000, 135(2): 147 – 186.

[15] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species′ distributions from occurrence data[J]. Ecography, 2006, 29(2):129 – 151.

[16] 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[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189 – 1196.

[17] 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[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843 – 852.

[18] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3):231 – 259.

[19] 刘纪元. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京:中国科学技术出版,1996.

Assessment of Habitat Suitability for Whooper Swan in Sanmenxia Swan Lake National Urban Wetland Park

DU Bo[1,2]　WU Yuan[3]　LIU Yadong[3]　RU Wendong[4]　LI Yunfeng[4]　GAO Ruyi[4]
XIE Wenyan[4]　HAN Tieyan[4]　GONG Zhaoning[1,2]　HONG Jianming[3]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing　100048; 2. Resource, Environment and Geogaraphical Information System Key Laboratory of Beijing　100048; 3. School of Life Sciences, Capital Normal University, Beijing　100048; 4. Management Office of Sanmenxia Swan Lake National Wetland Park, Sanmenxia Henan　472000)

Abstract: In recent years, the human activities increase in the middle reaches of the Yellow River, and the suitable overwintering habitats of whooper swan (*Cygnus cygnus*) decrease. The population density of whooer swan is high and the spatial distribution is unreasonable in Sanmenxia Swan Lake National Urban Wetland Park. It is very urgent to improve the existing habitats and find some potential habitats. In this paper, remote sensing and GIS techniques are used to assess the habitat suitability of whooer swan, and seven environmental variables are selected from the aspects of food, water source and surrounding habitat. Combined with the recorded location of whooer swan, the Maxent model is constructed to analyze the main environmental variables and influence mechanism of habitat selection, and to predict the habitat probability of whooper swan in Sanmenxia Swan Lake National Urban Wetland Park. The results show that the four environmental variables of the distance to feeding point, MNDWI, distance to roads and NDVI are the main influencing factors. The distance to feeding point and NDVI value are larger, the habitat probability of whooer swan is lower, the MNDWI value and distance to roads are larger, and the habitat probability is higher. According to the standard of FAO land suitability classification, the habitat probability of whooer swan in Sanmenxia Swan Lake Nationl Urban Wetland Park is divided into five grades, the most suitable habitat area is 0.41 km^2, and the land use type is pond water surface. The results can be used for habitat reconstruction in Sanmenxia Swan Lake National Urban Wetland Park, and contribute to find potential habitats can be restored in the middle reaches of the Yellow River. The whooer swan in Sanmenxia Swan Lake National Urban Wetland Park likes to choose the open water far from the road disturbance as the overwintering habitat. The food of whooer swan is scarce in winter, then the corn can be used to guide the reasonable distribution of the whooer swan.

Keywords: wintering whooper swan; habitat suitability; remote sensing and GIS; Maxent model