



辉河保护区白枕鹤 繁殖期栖息地适宜性评价

马悦^{1#}, 张雨晴^{1#}, 孙雪莹¹, 郭瑞萍¹,
吴志坚², 吕泓学¹, 吴庆明^{1*}, 张剑飞³

1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨, 150040;
2. 内蒙古辉河国家级自然保护区管理局, 海拉尔, 021100;
3. 黑龙江扎龙国家级自然保护区管理局, 齐齐哈尔, 161000)

稿件运行过程

收稿日期: 2023-03-22

修回日期: 2023-04-18



关键词: MaxEnt 模型;
栖息地适宜性;
繁殖期;
白枕鹤;
辉河国家级自然保护区

Key words: MaxEnt model;
Habitat suitability;
Reproductive period;
White-naped crane (*Grus vipio*);
Huihe National Nature Reserve

中图分类号: Q958.1

文献标识码: A

文章编号:

2310-1490(2024)-01-0162-07

DOI: 10.12375/ysdwxb.20240120

摘要

为掌握繁殖期白枕鹤(*Grus vipio*)栖息地适宜情况,2021年4—6月和2022年5—6月基于白枕鹤分布位点,利用MaxEnt模型对辉河国家级自然保护区白枕鹤繁殖期栖息地适宜性进行评价。结果表明:(1)2021年白枕鹤的训练数据AUC值为0.971,测试数据AUC值为0.970;2022年训练数据AUC值为0.974,测试数据AUC值为0.972,结果均大于0.900,表明MaxEnt模型预测结果均达到优秀水平。(2)不同年度白枕鹤繁殖期栖息地利用的主要影响因子不同,2021年主要为归一化植被指数、距道路距离和土壤亮度,2022年主要为土壤湿度、海拔和土壤亮度。(3)不同年度白枕鹤繁殖期栖息地适宜面积有差异,2021年为1 679 hm²(最适和适宜栖息地面积分别为75、1 604 hm²,占保护区总面积的0.48%),2022年适宜面积较大,为8 473 hm²(最适和适宜栖息地面积分别为56、8 417 hm²,占保护区总面积的2.44%)。辉河保护区内白枕鹤繁殖期栖息地面积有限,且不连续、连通度较低,人类活动对白枕鹤繁殖期栖息地的利用存在干扰,建议保护区在白枕鹤繁殖期限制区内人类活动,减少对白枕鹤的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271557);中央高校基本科研业务费专项基金项目(2572022AW19)

第一作者简介: 马悦(1997—),女,硕士研究生;主要从事鸟类生态学研究。E-mail: May199702@163.com

共同第一作者: 马悦; 张雨晴

* 通信作者: 吴庆明, E-mail: qingmingwu@126.com

Habitat Suitability Evaluation of White-naped Crane During Breeding Period at Huihe National Nature Reserve

MA Yue^{1#}, ZHANG Yuqing^{1#}, SUN Xueying¹, GUO Ruiping¹,
WU Zhijian², LÜ Hongxue¹, WU Qingming^{1*}, ZHANG Jianfei³

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China;
2. Administration Bureau of Huihe National Nature Reserve, Inner Mongolia, Hailar, 021100, China;
3. Administration of Heilongjiang Zhalong National Nature Reserve, Qiqihar, 161000, China)

Abstract: In order to evaluate the habitat suitability of the white-naped crane (*Grus vipio*) during the breeding period in Huihe National Nature Reserve, bird distribution data collected from April to June 2021 and from May to June 2022 was used for the analysis via MaxEnt model. Results showed that: (1) the AUC value of the training dataset of the white-naped crane in 2021 was 0.971 and the AUC value of the test data was 0.970, and the AUC value of the training data of the white-naped crane in 2022 was 0.974 and the AUC value of the test data was 0.972, indicating that the prediction results of the MaxEnt model reached the excellent level in both years (greater than 0.900). (2) The main influencing factors of habitat utilization varied by years, and they were normalized difference vegetation index, distance from road and soil brightness in 2021, but were soil moisture, altitude and soil brightness in 2022. (3) The area of suitable habitats also varied by years, with a total of 1,679 hm² in 2021 (the optimal and suitable habitat areas were 75 hm² and 1,604 hm², accounting for 0.48% of the total area of the reserve), and 8,473 hm² in 2022 (the optimal and suitable habitat areas were 56 hm² and 8,417 hm², accounting for 2.44% of the total area of the reserve). Further analysis showed that the breeding habitat area of the white-naped crane at the Huihe Reserve was small, discontinuous with low-connectivity, and human activities interfered with the habitat utilization of the white-naped crane during the breeding period in the reserve. Therefore it is recommended that the reserve shall limit human activities at the breeding area to reduce the impact on white-naped crane.

白枕鹤(*Grus vipio*)隶属于鹤形目(Gruiformes)鹤科(Gruidae),全世界野外种群数量7 000~7 800只(<http://savingcranes.org.cn/west-protect>),2021年白枕鹤被列为国家一级重点保护野生动物^[1]。分布于中国西部的白枕鹤种群数量呈减少趋势^[2]。目前,有关白枕鹤的研究较少,国外研究涉及白枕鹤栖息地选择、分布和种群动态^[3-4]、基因库同质性^[5]及肠道微生物分析^[6]等;国内研究主要集中在白枕鹤繁殖期栖息地质量、栖息地利用、食性组成和营养偏好等^[7-11]。内蒙古辉河国家级自然保护区(以下简称“辉河保护区”)是白枕鹤西部种群重要的繁殖地,但有关该保护区白枕鹤繁殖期栖息地适宜性方面的研究尚属空白,开展白枕鹤繁殖期的研究至关重要,不仅有利于摸清白枕鹤的生物学习性,更有助于白枕鹤繁殖期群体及栖息地资源的科学管理。在栖息地适宜性方面,MaxEnt模型在筛选主要环境影响因子

及栖息地质量评价精度方面均优于其他模型^[12],且在鹤类栖息地研究方面也较为成熟^[13-14]。本研究基于白枕鹤野外分布实际位点,结合遥感影像数据及DEM数字高程数据,通过MaxEnt模型对辉河保护区白枕鹤繁殖期栖息地适宜性进行评价,以为辉河保护区白枕鹤栖息地资源的有效管护提供科学依据。

1 研究区概况

辉河保护区(48°43'—49°4' N,119°4'—119°45' E)地处中温带,位于达乌尔草原东南部、内蒙古高原东北部和鄂温克族自治旗西部的辉河流域,南部与内蒙古红花尔基樟子松林国家级自然保护区相接。保护区建于1997年,2002年晋升为国家级自然保护区,2004年成立保护区管理局,总面积346 848 hm²,有3个核心区,面积为68 400 hm²,占保护区总面积的

19.72%;3个缓冲区,占保护区总面积的23.84%;1个实验区,占保护区总面积的56.44%。保护区有草原、芦苇沼泽、湖泊河谷、低山丘陵、高平原和沙地等多种地貌类型,是集濒危鸟类及其赖以栖息的湿地、草原资源于一体的野生动物类型自然保护区^[15],分布有国家一级重点保护鸟类22种,包括丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白枕鹤等,国家二级重点保护鸟类56种,包括大天鹅(*Cygnus cygnus*)、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)等(辉河国家级自然保护区野生鸟类名录2021年修订版)。

2 研究方法

2.1 数据收集与处理

2021年4—6月和2022年5—6月,采用车行代步,通过样线法、定点观察法对保护区内设定的38个固定观测点进行观察。借助双筒望远镜、单筒望远镜搜索白枕鹤,当观察到白枕鹤个体后,根据行为和体态特征进一步判断其是否为繁殖个体。若为繁殖个体,则通过GPS、激光测距仪和罗盘获取白枕鹤栖息距离和方位角信息。观察到的每只白枕鹤个体至少获取3组信息,以弱化观测误差,后期基于观察点经纬度通过三角定位法^[16]测算白枕鹤栖息分布的经纬度。

野外数据获取频次为4 d/次,1次/月,每个观察点观察时间为30~60 min。实际数据获取过程中根据白枕鹤目标个体的可视度、距离、激光测距精度和天气原因而调整观察时间,个别观测点的观察时间为2~3 h。

通过三角定位法测算出2021年白枕鹤野外栖息位点数据40个,2022年30个。针对上述位点,基于“近距离者高相关性”原则,通过MaxEnt模型反复模拟,以模型预测结果为判断标准,对白枕鹤栖息位点数据进行筛选,筛选结果为2021年白枕鹤野外有效栖息位点为28个,2022年为23个,合计51个。

2.2 环境因子选择与处理

根据繁殖期白枕鹤在辉河保护区内的栖息地利用需求,以及环境因素在遥感影像中提取的可操作性,选择植被、地形地貌和人为干扰因素3大类环境特征变量来评价白枕鹤繁殖期栖息地适宜性^[17-19]。

植被变量用来反映白枕鹤繁殖期栖息地的宏观环境信息,选取绿色植被指数(green vegetation index,

GVI)、土壤亮度指数(soil brightness index, SBI)、土壤湿度指数(soil humidity index, SHI)和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)4个环境因子。其中,GVI包括植被覆盖度、叶面积指数和生物量,用来评估植被生长状况、生物量及植被信息等;SBI包括地表总辐射能量的亮度信息,用来反映相关系数较高的特征遥感指数,如地物目标总辐射能量;SHI用以表征土壤湿度的变化特征;NDVI可反映土地植被的覆盖状况。上述指数运用ENVI 5.3、ArcGIS通过遥感影像提取,提取后进行缨帽变换处理。遥感影像数据下载于USGS(<https://www.usgs.gov/>,来源于NASA发射的Landsat 8 OLI-TIRS卫星的数字产品)。

地形地貌信息反映白枕鹤繁殖期栖息地的微环境信息,选取海拔(altitude, A)、坡度(gradient, G)和坡向(slope aspect, SA)3个环境因子,数据来源于中国科学院科学数据库地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)30 m分辨率的DEM数字高程图,利用ArcGIS 10.8处理提取。

人为干扰因素通过距道路距离(distance from road, DR)表征,与人类活动干扰强度相关。辉河保护区内居民较少,但道路错综复杂。通过ArcGIS 10.8对辉河保护区内省、市、县、乡道路及村道进行投影合并,通过欧氏距离计算获取道路信息。

最后,将处理好的环境因子数据利用保护区边界进行裁剪和统一,并转换成MaxEnt所需的.csv格式。

2.3 模型建立

在MaxEnt 3.3软件中导入筛选的白枕鹤分布位点和上述处理的环境因子变量数据,随机选取75%的位点数据用于建立白枕鹤繁殖期栖息地适宜性模型,剩余25%的位点数据用于验证白枕鹤繁殖期栖息地适宜性模型的准确度,并选择运行刀切法(Jackknife)来检测环境因子的重要性,Jackknife能够判断各环境因子对白枕鹤分布影响的贡献率。模型预测结果通过ROC(receiver operator characteristic)曲线(受试者操作特定曲线)与横坐标轴围成的面积,即AUC(area under curve)值来检验精度。AUC值介于0~1.0,但有效值为0.5~1.0,当AUC值达0.9~1.0时,表明MaxEnt模型评价效果优秀。

2.4 栖息地适宜性评价

将MaxEnt模型运行的结果导入ArcGIS 10.8中,并转换为栅格数据,通过重分类对白枕鹤繁殖期

栖息地适宜性进行等级划分并评价。繁殖期栖息地适宜性划分的最低阈值取决于概率切断点的概率值^[20],即 M_{TSPS} (maximum test sensitivity plus specificity)。基于此,本研究定义: $0 \sim M_{TSPS}$ 为不适宜栖息地 (non-suitable habitat, NSH), $M_{TSPS} \sim 1.0$ 为适宜栖息地,适宜栖息地可进一步分级,即低适宜栖息地 (low suitable habitat, LSH)、较适宜栖息地 (more suitable habitat, MSH)、适宜栖息地 (suitable habitat, SH) 和最适宜栖息地 (high suitable habitat, HSH), 能更充分体

现保护区内白枕鹤的适宜栖息地分布。

3 结果

3.1 MaxEnt 模型预测结果检测

2021年白枕鹤繁殖期栖息地适宜性评价模型训练数据 AUC 值为 0.971, 测试数据 AUC 值为 0.970; 2022年训练数据 AUC 值为 0.974, 测试数据 AUC 值为 0.972, 表明 MaxEnt 模型预测结果均具有较高的预测精度(图1)。

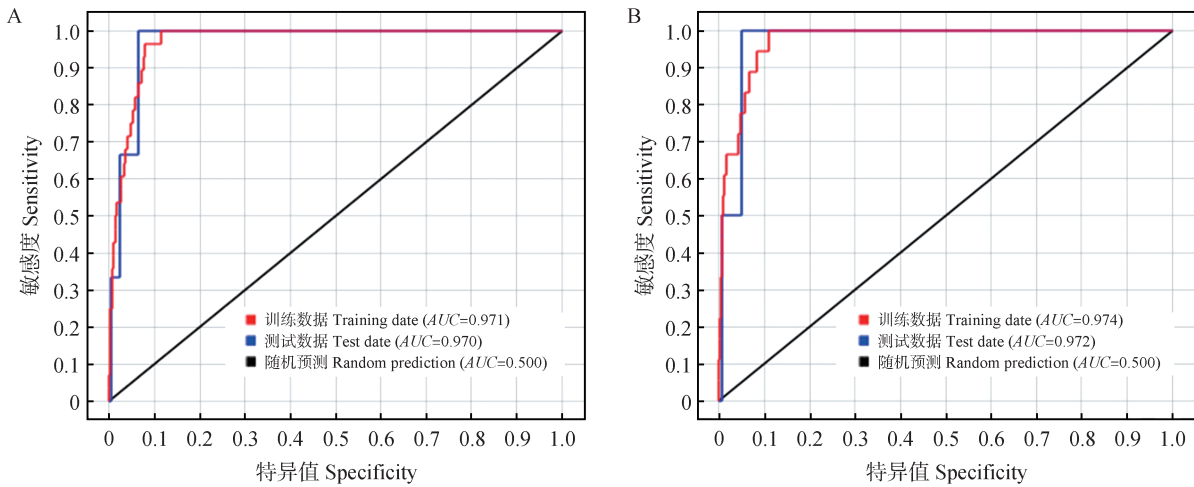


图1 2021年(A)和2022年(B)繁殖期白枕鹤栖息地适宜性评价 MaxEnt 模型 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curves of MaxEnt model for habitat suitability evaluation of white-naped crane during breeding period in 2021 (A) and 2022 (B)

3.2 栖息地利用影响因素

Jackknife 法检验结果表明,辉河保护区白枕鹤繁殖期栖息地利用的主要影响因子存在年度差异,2021年主要为 NDVI、距道路距离和土壤亮度,3个因子对模型的贡献率分别为 40.91%、19.39% 和 18.85%,2022年主要为土壤湿度、海拔和土壤亮度,3个因子对模型的贡献率分别为 35.13%、24.93% 和 13.55%(表1)。

3.3 栖息地适宜性评价

通过 MaxEnt 模型评价 2021 年白枕鹤繁殖期栖息地生境适宜性概率切断点 (M_{TSPS}) 为 0.3183, 以此作为白枕鹤适宜栖息地的最低阈值, 即当 $0 < M_{TSPS} \leq 0.3183$ 为不适宜栖息地, 当 $0.3183 < M_{TSPS} \leq 0.5000$ 为低适宜栖息地, 当 $0.5000 < M_{TSPS} \leq 0.7000$ 为较适宜栖息地, 当 $0.7000 < M_{TSPS} \leq 0.9000$ 为适宜栖息地, 当 $0.9000 < M_{TSPS} \leq 1.0000$ 为最适宜栖息地。2022 年白枕鹤繁殖期栖息地生境适宜性概率切断点为 0.3641, 以此作为白枕鹤适宜栖息地的最低阈值,

表1 辉河保护区繁殖期白枕鹤栖息地环境变量贡献率

Tab. 1 Jackknife for testing the contribution rate of environmental variables in the habitat of white-naped cranes during the breeding period at Huihe Reserve %

年份 Year	环境变量 Environment variable	贡献率 Contribute	累计贡献率 Cumulative
2021	归一化植被指数 NDVI	40.91	40.91
	距道路距离 DR	19.39	60.30
	土壤亮度 SBI	18.85	79.15
	海拔 A	9.22	88.37
	土壤湿度 SHI	4.23	92.60
	绿色植被指数 GVI	3.56	96.16
	坡度 G	2.67	98.83
	坡向 SA	1.17	100.00
2022	土壤湿度 SHI	35.13	35.13
	海拔 A	24.93	60.06
	土壤亮度 SBI	13.55	73.61
	距道路距离 DR	12.25	85.86
	坡度 G	4.85	90.71
	归一化植被指数 NDVI	4.52	95.23
	坡向 SA	2.86	98.09
	绿色植被指数 GVI	1.91	100.00

即当 $0 < M_{\text{TSPS}} \leq 0.3641$ 为不适宜栖息地, 当 $0.3641 < M_{\text{TSPS}} \leq 0.5000$ 为低适宜栖息地, 其余同2021年。得到2021年(图2A)和2022年(图2B)辉河保护区白枕鹤繁殖期栖息地生境的适宜性分布图。结果显示, 2021年白枕鹤繁殖期最适宜栖息地面积为 75 hm^2 , 适宜栖息地面积为 1604 hm^2 , 合计 1679 hm^2 , 占保护区总面积的 0.48% ; 2022年最适宜栖息地面积为 56 hm^2 , 适宜繁殖栖息地面积为 8417 hm^2 , 合计

8473 hm^2 , 占保护区总面积的 2.44% 。

3.4 适宜分布区与保护区功能区规划分析

由图2可以看出, 白枕鹤在辉河保护区的适宜分布区不集中, 呈弥散状, 主要分布在保护区北部及中部, 有 50% 以上处于保护区的高林温多尔湿地核心区内, 其余部分集中分布在北部实验区, 即巴彦塔拉达斡尔民族乡。此外, 白枕鹤分布的实验区属于保护区内人为活动的聚集区, 这对白枕鹤繁殖栖息十分不利。

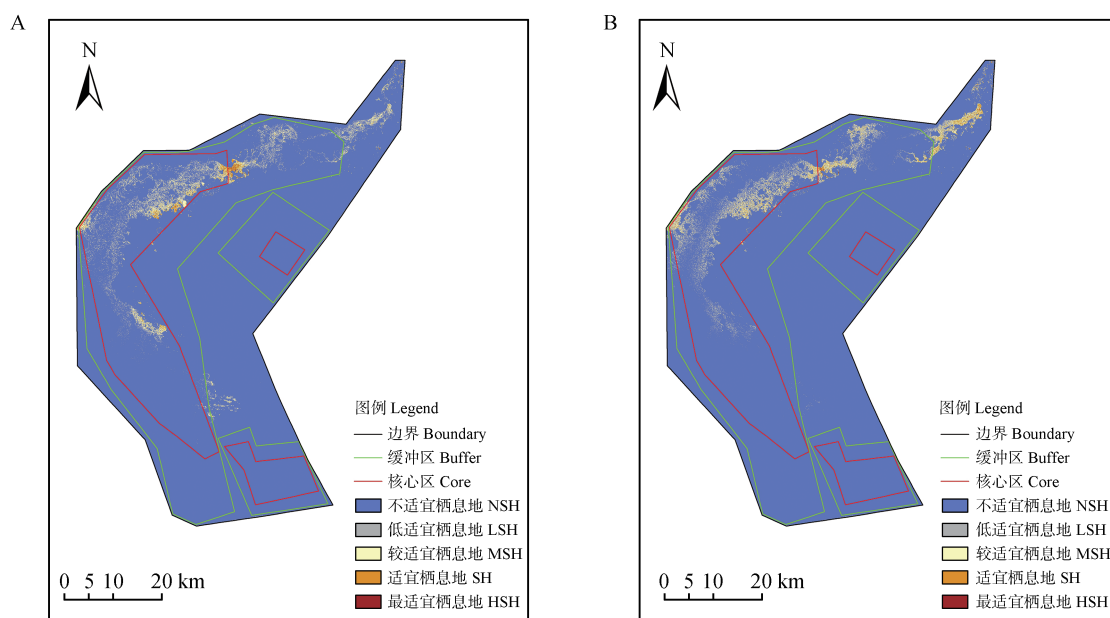


图2 2021年(A)和2022年(B)辉河保护区繁殖期白枕鹤栖息地生境适宜性分布

Fig. 2 Habitat suitability distribution of white-naped crane habitat during breeding period at Huihe Reserve in 2021 (A) and 2022 (B)

4 讨论

4.1 环境因子的选择

鸟类对栖息地的选择受水源、食物和人类干扰程度的影响^[21-22]。本研究调查发现, 白枕鹤繁殖期在辉河保护区偏好选择芦苇沼泽及附近的草地, 而利用刀切法验证得到影响白枕鹤繁殖期栖息地选择的环境因子主要是NDVI、距道路距离、土壤湿度和土壤亮度。其中, NDVI和土壤亮度均为植被变量相关因子, 预测结果与现实野外观察结果一致。预测结果显示距道路距离是影响白枕鹤繁殖期栖息地适宜性评价结果的重要因素之一, 本研究中距道路距离是为了表征人为干扰, 其他研究中关于人为干扰因子的选取还包括距居民点、农田和养殖塘等的距离^[23]。

野外观察发现, 辉河保护区内的人类活动比较

多样, 不仅有道路及相应的人类活动, 还有区域特有的牧民放牧活动, 但后者在本研究中未有体现, 且牧民放牧偏好选择芦苇沼泽及水源旁的草地, 这与白枕鹤偏好选择的栖息地存在时空重叠。野外观察还发现, 白枕鹤与放牧牲畜存在外表颜色重叠, 具有一定程度的保护色功能。放牧活动与同域分布的白枕鹤之间的关系需要从新的视角进行界定, 或许这是白枕鹤选择该区域栖息的主要因素之一, 需在后续研究中加以验证。

4.2 适宜栖息地年度差异

基于辉河保护区7—8月野外鸟类科学考察可知, 辉河保护区2021年和2022年实际繁殖成功的白枕鹤分别为23、24对, 与模型预测使用的繁殖期数据基本一致。但2021年与2022年MaxEnt模型预测得到的适宜栖息地面积存在年度差异, 这可能与年间天气差异有关。2021年4月有降雪, 5—6月多降

雨,而2022年降雨次数明显少于2021年,2021年水位和水量明显高于和多于2022年,影响了2021年白枕鹤栖息地的选择与利用,适宜栖息地大小必然发生变化,这与扎龙保护区丹顶鹤的情况^[16]类似。

4.3 管护建议

基于白枕鹤繁殖期栖息地生境适宜性分布图可知,MaxEnt模型预测得到的辉河保护区白枕鹤繁殖期适宜区域较小,且呈弥散状,约有一半的面积分布在高林温多尔核心区,其余分布在高林温多尔核心区附近的缓冲区及实验区内的巴彦塔拉达斡尔民族乡,民族乡内有村屯等人为活动聚集区和居民放牧地。基于此,提出管护建议:(1)针对保护区内牧民,加强野生动物和生态系统保护的宣传教育工作,避免牧民对区内资源实施破坏性活动。(2)白枕鹤繁殖期时加大巡护力度,为成鸟和幼鸟的救伤、救护做好应急保障。(3)必要时实施生态移民方案,以减少人为活动等对白枕鹤繁殖的影响。

参考文献:

- [1] 国家林业和草原局,农业农村部. 国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订)[J]. 野生动物学报, 2021, 42(2): 605-640.
National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. List of national key protected wild animals (revised on February 1, 2021)[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2021, 42(2): 605-640.
- [2] PARCHIZADEH J, WILLIAMS S T. Waterbirds targeted in Iran's wetlands[J]. Science, 2018, 359(6378): 877-878.
- [3] GALTBAIT B, NATSAGDORJ T, SUKHBAATAR T, et al. Breeding and migration performance metrics highlight challenges for white-naped cranes [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18261.
- [4] YOO S H, KANG T H, KIM H J, et al. Population decline and distribution change of the swan gees *Anser cygnoides* and white-naped cranes *Grus vipio* by habitat loss the *Scirpus planiculmis* at the hanriver estuary [J]. The Korean Journal of Ornithology, 2010, 17(1): 55-66.
- [5] MUDRIK E A, GOROSHKO O A, SURMACH S G, et al. Gene pool homogeneity of western and eastern populations of the white-naped crane *Antigone vipio* in different flyways[J]. Russian Journal of Genetics, 2022, 58(5): 566-575.
- [6] GAO Z S, SONG H W, DONG H Y, et al. Comparative analysis of intestinal flora between rare wild red-crowned crane and white-naped crane[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1007884.
- [7] 刘蕾. 向海湿地鹤类栖息地环境质量与生境选择特性研究[J]. 黑龙江环境通报, 2020, 33(4): 2-3; 7.
- LIU L. Study on habitat environmental quality and habitat selection of crane in Xianghai wetland[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2020, 33(4): 2-3; 7.
- [8] 谷彦昌, 李雪竹. 黑龙江小兴安岭白枕鹤繁殖栖息地监测研究[J]. 湿地科学与管理, 2020, 16(2): 64-67.
GU Y C, LI X Z. Monitoring of breeding habitat of white-naped crane in Xiaoxing'an Mountains, Heilongjiang Province[J]. Wetland Science & Management, 2020, 16(2): 64-67.
- [9] 温立嘉. 白枕鹤繁殖栖息地分布模型及GPS-GSM跟踪数据验证[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
WEN L J. Predicting white-naped crane breeding habitat distribution and testing by GPS-GSM tracking data [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [10] 伍一宁, 倪红伟, 钟海秀, 等. 扎龙湿地育雏期丹顶鹤和白枕鹤的取食差异研究[J]. 国土与自然资源研究, 2015(6): 90-92.
WU Y N, NI H W, ZHONG H X, et al. The feeding differences between red-crown crane and white-naped crane in Zhalong wetland during the brooding period [J]. Territory & Natural Resources Study, 2015(6): 90-92.
- [11] 邹红菲, 李全亮, 吴庆明, 等. 扎龙保护区白枕鹤孵化期食性与营养偏好[J]. 野生动物学报, 2017, 38(2): 236-241.
ZOU H F, LI Q L, WU Q M, et al. Nutritional preference and diet composition of white-naped crane during its incubation period at Zhalong National Nature Reserve, China [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2017, 38(2): 236-241.
- [12] 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.
- [13] NA X D, ZHOU H T, ZANG S Y, et al. Maximum entropy modeling for habitat suitability assessment of red-crowned crane[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 439-446.
- [14] 顾锦程. 最大熵模型与信息熵模型协同支持下的丹顶鹤栖息地适宜性的模拟与变化分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
GU J C. Simulation and analysis of habitat suitability of red-crowned cranes supported by maximum entropy model and information entropy model [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.
- [15] 吕世海, 叶生星, 邓志荣, 等. 辉河国家级自然保护区生物多样性[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 4-48.
LÜ S H, YE S X, DENG Z R, et al. Biodiversity of Huihe National Nature Reserve [M]. Beijing: China Environment Press, 2013: 4-48.
- [16] 朱井丽. 基于生态足迹和繁殖生境需求的扎龙保护区人鹤共存策略[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
ZHU J L. Co-existence strategy between cranes and human in Zhalong Nature Reserve based on breeding habitat requirement and ecological footprint [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.

- sity, 2018.
- [17] 李浙. 耦合景观特征的扎龙保护区白头鹤觅食地选择及适宜性评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- LI Z. Feeding habitat selection and habitat suitability assessment of hooded crane in Zhalong Nature Reserve under coupling of landscape features [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [18] 孙雪莹, 张琦, 吴庆明, 等. 向海保护区青头潜鸭繁殖栖息地的适宜性[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 112-118.
- SUN X Y, ZHANG Q, WU Q M, *et al.* Habitat suitability for baer's pochard (*Aythya baeri*) in Xianghai Reserve [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 112-118.
- [19] 王嘉文, 龙泽旭, 梁鑫, 等. 黑龙江小兴安岭地区西伯利亚狍栖息地适宜性评价[J]. 野生动物学报, 2020, 41(3): 566-572.
- WANG J W, LONG Z X, LIANG X, *et al.* Habitat suitability evaluation for roe deer (*Capreolus pygargus*) in the Lesser Xing'an Mountains of northeast China [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2020, 41(3): 566-572.
- [20] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [21] DESHPANDE P, LEHIKONEN P, THOROGOOD R, *et al.* Snow depth drives habitat selection by overwintering birds in built-up areas, farmlands and forests [J]. Journal of Biogeography, 2022, 49(4): 630-639.
- [22] KOLSTOE S, CAMERON T A. The non-market value of birding sites and the marginal value of additional species: biodiversity in a random utility model of site choice by eBird members [J]. Ecological Economics, 2017, 137: 1-12.
- [23] 王筠, 那晓东, 臧淑英. 人类活动干扰下4个时期松嫩平原丹顶鹤栖息地适宜性研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(3): 438-444.
- WANG Y, NA X D, ZANG S Y. Suitability of red-crowned crane habitat for 4 periods in Songnen Plain under disturbance of human activities [J]. Wetland Science, 2018, 16(3): 438-444.