DOI: 10.20103/j.stxb.202309061937
严晗,孙刚,马雪君,王克春,杨维康,徐峰.新疆大天鹅冬季适宜生境预测与保护空缺分析.生态学报,2025,45(10): - .
Yan H, Sun G, Ma X J, Wang K C, Yang W K, Xu F.Predicting winter habitat suitability and identifying protection gaps for *Cygnus cygnus* in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica,2025,45(10): - .

新疆大天鹅冬季适宜生境预测与保护空缺分析

严　晗[1,2,3,4],孙　刚[5],马雪君[6],王克春[1,2,3,4],杨维康[1,2,3],徐　峰[1,2,3,4 *]

1 荒漠与绿洲生态国家重点实验室,干旱区生态安全与可持续发展重点实验室,中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐　830011
2 中国-塔吉克斯坦生物资源保育与利用联合实验室,乌鲁木齐　830011
3 新疆干旱区生物多样性保育与应用重点实验室,中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐　830011
4 中国科学院大学,北京　100049
5 新疆林业科学院,乌鲁木齐　830000
6 新疆农业大学生命科学学院新疆极端环境生物生态适应与进化重点实验室,乌鲁木齐　830052

摘要:大天鹅是大中型迁徙水鸟的代表物种,开展新疆大天鹅冬季适宜生境预测和保护空缺分析对保护珍稀濒危物种及其生境具有重要意义。本文基于 2003—2023 年新疆大天鹅冬季分布数据,结合气候、人为干扰、土地利用等因素,运用最大熵(MaxEnt)模型预测大天鹅冬季适宜生境,并进行保护空缺分析,探讨现有保护地体系对新疆越冬大天鹅的保护成效。结果表明:大天鹅在新疆冬季适宜生境共有 65359 km^2,主要分布在新疆南部巴州和北部的塔城、阿勒泰,伊犁等地;影响大天鹅冬季生境适宜性的主要因素依次为土地利用类型、距水体距离、bio7(气温年范围)、距耕地距离、bio3(等温性)和距河道距离。目前以自然保护区和湿地公园等为主的保护地体系共覆盖大天鹅越冬适宜生境 10304 km^2,占适宜生境总面积的 15.77%,存在较大保护空缺,且主要集中在保护区难以覆盖的人口密度集中的区域。基于以上结果,本文建议在加强对现有保护体系内的大天鹅进行严格保护和管理的基础上,探索通过尽量减少人为干扰,适当补充食物等方式对保护体系外的越冬大天鹅进行有效保护管理,以便大天鹅等珍稀濒危鸟类能在新疆顺利过冬。

关键词:大天鹅;生境适宜性;最大熵(MaxEnt)模型;土地利用;保护空缺分析

Predicting winter habitat suitability and identifying protection gaps for *Cygnus cygnus* in Xinjiang

YAN Han[1,2,3,4], SUN Gang[5], MA Xuejun[6], WANG Kechun[1,2,3,4], YANG Weikang[1,2,3], XU Feng[1,2,3,4,*]

1 *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*
2 *Sino-Tajikistan Joint Laboratory for Conservation and Utilization of Biological Resources, Urumqi* 830011, *China*
3 *Xinjiang Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Application in Arid lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*
4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
5 *Xinjiang Research Institute of Forestry Science, Urumqi* 830000, *China*
6 *Xinjiang Key Laboratory for Ecological Adaptation and Evolution of Extreme Environment Biology, College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*

Abstract: The Whooper Swan is a representative species among large and medium-sized migratory waterbirds. Predicting suitable winter habitats and identifying protection gaps for the Whooper Swan can provide a significant basis for protecting

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0600);中国科学院生物多样性监测网络项目(Sino-BON)
收稿日期:2023-09-06;　　**网络出版日期**:2025-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xufeng@ ms.xjb.ac.cn

other endangered species and their habitats. Based on the Whooper Swan winter distribution data from 2003 to 2023 and incorporating factors such as climate, anthropogenic disturbances, and land-use type, we utilized the Maximum Entropy (MaxEnt) model to predict the suitable winter habitat of the Whooper Swan and evaluated the effectiveness of the Xinjiang protected area system in protecting Whooper Swans in Xinjiang. The results showed that the total suitable winter habitat for the Whooper Swan is 65,359 km^2, mainly distributed in Bortala in southern Xinjiang and Tacheng, Altay, and Ili in northern Xinjiang. The key factors affecting the suitability of the Whooper Swan's winter habitat are land-use type, distance to water surface, bio7 (annual temperature range), distance to cultivated land, bio3 (isothermality), and distance to rivers. Currently, the protected area system, mainly composed of nature reserves and wetland parks, covers 10304 km^2(15.77%) of suitable wintering habitat for the whooper swan. There is a considerable gap in suitable winter habitats, which is primarily concentrated in densely populated areas that cannot be covered by protected areas. Based on the above results, we suggest strengthening the strict protection and management of the Whooper Swans within the existing protection system and exploring effective protection measures by minimizing human interference and supplementing food for swans outside the protection system. This will ensure that these endangered birds can successfully overwinter in Xinjiang.

Key Words: *Cygnus cygnus*; habitat suitability; MaxEnt model; landuse type; protection gap analysis

生境是维持鸟类生存的基础,它为鸟类提供食物和有效的隐蔽场所,具有适宜的气候条件,同时也是鸟类生存和繁衍的空间[1]。鸟类对生境的利用有选择偏好,适宜生境是鸟类的生存需求与环境相互选择共同作用的结果[2—3]。对迁徙水鸟而言,适宜的生境能满足其迁徙的能量需求,保证其存活和迁徙成功[4]。水鸟处在生活史的不同阶段对生境的需求也有较大差异,因此有必要对鸟类不同生活史阶段的生境需要开展有针对性的分析,以便全面了解鸟类的生境需求以及关键因素[5]。

越冬期是迁徙水鸟生活史的重要阶段,冬季气候条件严酷,食物资源匮乏,因此也是水鸟能否存活的关键阶段[4]。有研究表明冬季的最低气温显著影响东方白鹳的种群数量[6],同时冬季鹤类和小天鹅等水鸟的生境选择也会发生改变,冬季它们会选择在食物丰富且人为干扰较小的水域活动[7—8],这些研究表明冬季的气候条件、食物、人为干扰可能会直接影响越冬水鸟的生境适宜性。明晰水鸟冬季的生境需求,有助于制定针对性的物种保护策略,从而实现对珍稀濒危鸟类及其适宜生境的保护。

大天鹅(*Cygnus cygnus* Linnaeus,1758)是雁形目(Anseriformes)鸭科(Anatidae)天鹅属(*Cygnus*)的大型水鸟,是国家Ⅱ级重点保护野生动物。在我国,大天鹅主要在青海湖、以及山西平陆、山东荣成、陕西榆林、河南三门峡等黄河中下游的湖泊、河流、沼泽地等地越冬[9—10],在新疆大天鹅主要在巴音布鲁克自然保护区以及天山北坡的湿地越冬[11—12]。目前有关大天鹅越冬期的研究多集中在行为、食性、种群数量与生境选择等方面[13—15],对新疆的大天鹅研究则聚焦于巴音布鲁克自然保护区大天鹅的繁殖生态、行为以及生境选择[11,16—18],截止目前,并未见到有关新疆大天鹅冬季适宜生境预测以及保护成效评估的相关研究。

目前,设立自然保护地是保护珍稀濒危野生动物和生物多样性的主要措施[19]。保护空缺分析方法能快速量化现有保护体系对物种分布范围的保护状况,并识别已有物种分布区域而没有被保护体系覆盖的范围,以此视为保护空缺[20]。保护空缺分析大多集中在生物多样性热点地区,少有对单一物种的特定阶段保护状况的综合研究[21]。新疆共有 7 类 201 个不同类型的自然保护地,包括自然保护区 28 个、湿地公园 51 个、自然遗产地 1 个、风景名胜区 24 个、地质公园 13 个、森林公园 57 个、沙漠公园 27 个,总面积达 240600 km^2,占全区国土面积的 14.5%[22]。这些不同类型的自然保护地对大天鹅等越冬水鸟的保护效果如何还不清楚,因此有必要通过保护空缺分析评估现有保护体系对越冬大天鹅的保护现状,这对物种的保护具有实际指导意义。

本研究以 2003 年—2023 年新疆大天鹅冬季的分布位点为基础,结合生物气候、人为干扰、土地利用、水源地距离等变量,采用 MaxEnt 模型评价大天鹅冬季生境适宜性,基于评价结果量化分析新疆现有保护地体系

对大天鹅冬季适宜生境的保护成效。以期回答以下科学问题:(1)新疆大天鹅适宜越冬生境主要在哪些区域;(2)影响大天鹅适宜越冬生境分布的关键因素是什么;(3)现有的保护地体系下,大天鹅越冬生境的保护成效如何。研究结果有助于明确新疆大天鹅冬季适宜生境分布区及影响因素,实现对大天鹅冬季生境的保护与管理。

1　研究区概况

新疆维吾尔自治区位于我国西北部,总面积为 166.49×10^4 km^2,约占全国总面积的 1/6;冬季是新疆气温最低且南北疆温差最大的季节,平均气温为-8.7 ℃,气温总体呈现为南疆高,北疆低的格局,南疆的塔里木盆地西南部冬季气温平均为-4.7 ℃以上,北疆大多数地区气温平均为-12.3—-6.9 ℃[23];在气候变暖的趋势下,新疆地区冬季温度升高,且北疆变暖趋势显著;冬季气温以 0.362 ℃/10a 的增温速率上升,呈现出北疆增温速率高于南疆的现状,北疆以阿勒泰地区的富蕴县增温最多为 1.013 ℃/10a,南疆为吐鲁番地区,增温为 0.615 ℃/10a[24]。

新疆位于我国三大高原湿地区的蒙新高原湿地区,据第三次国土调查新疆共有湿地 15245 km^2,主要分布在巴音郭勒蒙古自治州、和田地区、阿克苏地区、阿勒泰地区、喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、伊犁哈萨克自治州,占全疆湿地的 86%;水域及水利设施用地 53085 km^2,集中分布在巴音郭勒蒙古自治州、和田地区、喀什地区和阿克苏地区,占全疆水域及水利设施用地的 70%[25]。新疆同时位于东非-西亚和中亚两条国际重要候鸟迁徙路线上,每年会有大量的迁徙候鸟路过新疆,仅艾比湖秋季迁徙的鸟类就达 233 种,103875 只[26]。新疆分布的 490 多种鸟类中,越冬水鸟有大天鹅、侏鸬鹚(*Microcarbo pygmeus*)、豆雁(*Anser fabalis rossicus*)、灰鹤(*Grus grus*)、绿头鸭(*Anas platyrhnchos*)等 160 多种[12],是许多大中型水鸟的重要越冬地,例如在新疆阿克苏地区木札特河谷越冬的灰鹤就有 4700 多只[27]。

2　研究方法

2.1　大天鹅冬季分布位点数据

根据大天鹅的物候和越冬期研究文献,将 11 月至次年 3 月划定为大天鹅越冬期[12]。本研究采用实地调查和收集物种分布数据库、历史文献记录、新闻报道等途径获得 2003 年到 2023 年新疆越冬大天鹅分布数据,共获得 393 个分布位点。其中样线调查获得 60 个位点,主要的调查区域分布在新疆南部的巴音布鲁克自然保护区以及库尔勒市,新疆北部的天山北坡玛纳斯河流域,以及伊犁、博乐、阿勒泰等地。物种分布数据库共获得 191 个位点,分别来自中国观鸟中心(www.birdreport.cn)和新疆观鸟网(https://xinjiang.birds.watch.cn);查询全球多样性信息中心(Global Biodiversity Information Facility,GBIF)数据库,共得到 25 个位点。公开发表的期刊论文等文献记录中共获得 20 个位点。通过以新疆和越冬大天鹅为关键词,搜索新闻报道获得 97 个位点。对所获得的位点以物种名和十进制经纬度的形式保存为 *.csv 格式。

为减少位点的空间自相关性和抽样偏差,采用空间过滤的方式减少数据遗漏率,提高模型预测性能[28—29]。运用 R 语言 spThin 包中 thin 功能按照 0.5 km × 0.5 km 的尺度在每个栅格中只保留一个分布位点[30],将模型筛选重复 5 次降低遗漏率后,最终得到 327 个有效位点(图 1)。

2.2　环境数据

本研究将环境变量分为 4 类:生物气候、土地利用、人为干扰、水源地距离。生物气候变量来自世界气候数据库(WorldClim v 2.1, http://www.wordclim.org)19 个生物气候变量和 11 月—4 月的日辐射量、降水量、温度、风速,海拔,所有变量的分辨率为 30″(约为 1 km);土地利用数据来源于全球地理信息公共产品数据库(GlobeLand30,http://www.globalland cover.com)中 2020 年的遥感图层,通过 ArcGIS 空间分析后得到研究区的耕地(包含水田、灌溉旱地、牧草种植地、果树地等)、林地(乔木林、阔叶林、落叶林等)、草地(草原、荒漠草原、城市人工草地等)、灌木地(山地灌丛、荒漠灌丛等)、湿地(内陆沼泽、湖泊沼泽,河流湿地等)、水体(江河

图 1 2003—2023 年新疆大天鹅冬季分布位点

Fig.1 Distribution map of the wintering Whooper Swan in Xinjiang during 2003—2023

湖泊、水库,坑塘等)、人造地表(城镇等各类居民用地、交通设施,不包含建设用地内的绿地和水体)、裸地(荒漠、沙地、盐碱地等)、冰川和永久积雪共九类土地利用类型。

人为干扰和水源地数据来自国家基础地理信息中心最新提供的 1:100 万全国基础地理数据库(https://www.webmap.cn),得到水体(湖泊、水库)、河道(河流、沟渠)、道路(国道、省道、县道,乡道等)、居民点数据(房屋、蒙古包、放牧点等);提取土地利用中的耕地、草地图层后,对耕地、草地、河道、水体、居民点、道路数据,使用 ArcGIS10.5 的 spatial analyst tools 功能计算各变量的欧氏距离;新疆省行政区划边界图层来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台(http://www.resdc.cn);新疆的总保护地图层(包含国家级和省级的自然保护区与湿地公园、地质公园、森林公园、沙漠公园、风景名胜区、自然保护地、自然遗产地)来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)。将所有矢量数据重采样为分辨率 0.5 km 的栅格图层,按照研究区边界范围进行掩膜提取、坐标系设置为 WGS_1984_UTM_Zone_45N,并将所有变量转为 ASCII 格式用于 MaxEnt 模型运算(表 1)。

由于环境变量的多重共线性会使模型结果过度拟合[31—32],运用 R 语言 usdm 包中方差膨胀因子(VIF)对所有环境变量进行多重共线性检验[33]。当环境变量的 VIF>10,表明环境变量间具有较高相关性[34];通过 vifstep 功能计算所有变量的方差膨胀因子后,逐步剔除 VIF>10 的变量,只保留 VIF<10 的变量代入模型。

2.3 MaxEnt 模型优化与参数设置

MaxEnt 模型是基于生态位原理的模型,将物种的“存在点”与环境变量如气候变量、海拔、人为干扰等作为约束条件,探寻限制条件下物种适宜生境的最大熵概率分布[35];该模型对小样本量的数据也有较好的拟合效果,在较大尺度下有较优的预测能力与稳定性,是目前广泛运用的生态位模型[36]。

表 1　MaxEnt 模型中使用的环境变量

Table 1　Environmental variables in MaxEnt model

变量类型 Variables type	变量名称 Variables name	描述 Description	单位 Unit	变量类型 Variables type	变量名称 Variables name	描述 Description	单位 Unit
气候变量	bio1	年均气温	℃		bio16	最湿季降水量	mm
Climatic factors	bio2	平均温范围	℃		bio17	最干季度降水量	mm
	bio3 *	等温性	%		bio18	最暖季度降水量	mm
	bio4	温度季节性	—		bio19	最冷季度降水量	mm
	bio5	最暖月最高温	℃		prec11-04 *	11 月—4 月降水量	mm
	bio6	最冷月最低温	℃		wind11-04 *	11 月—4 月风速	m/s
	bio7 *	气温年范围	℃		srad11-04 *	11 月—4 月日辐射量	KJ m^{-2} d^{-1}
	bio8	最湿季平均温	℃	地形 Terrain factors	海拔	距海平面距离	m
	bio9 *	最干季平均温	℃	人类干扰	距道路距离 *	距最近道路距离	m
	bio10	最暖季平均温	℃	Anthropogenic influence factors	距居民点距离 *	距最近居民点距离	m
	bio11	最冷季平均温	℃	土地利用类型	土地覆盖 *	土地覆盖类型	—
	bio12 *	年降水量	℃	Landuse type	距耕地距离 *	距最近耕地距离	m
	bio13	最湿月降水量	mm		距草地距离 *	距最近草地距离	m
	bio14	最干月降水量	mm		距水体距离 *	距最近水体距离	m
	bio15	降水量季节性	mm		距河流距离 *	距最近河道距离	m

* 的变量代入 MaxEnt 模型中预测适宜生境

(1)模型参数优化:相比 MaxEnt 模型的默认设置,对特定物种的模型优化可得到更真实的预测结果[35],影响模型预测能力的 3 个主要因素为调控系数(Regularization Multiplier,*RM*),函数模式(Feature Class,*FC*)和环境变量。采用 R 语言 ENMeval 包对模型参数优化,将函数模式设置为线性函数(linear,*L*)、二次函数(quadratic,*Q*)、交互函数(product,*P*)、阈值函数(threshold,*T*)、线性分段函数(hinge,*H*)、*LQ*、LQH 组合等,将 *RM* 设置为 0.5—4 共 8 个梯度,每梯度递增 0.5。使用最小信息准则 ΔAICc 值选择最优模型参数(the minimum information criterion AICc value,ΔAICc),当 ΔAICc 值最小时,模型的复杂程度和预测能力达到最优[37]。

(2)模型构建:在 MaxEnt(V3.4.4)模型的环境参数中选择刀切法(Jackknife)检验环境因子贡献率;重复迭代方式(Replicated Run Type)为“Crossvalidate”,模型重复运行 10 次,输出格式设置为“Cloglog”,环境背景值为 10000;

(3)模型验证:采用遗漏率和受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)评价模型预测能力,预测能力较差(0≤AUC<0.7),一般(0.7≤AUC<0.8),较优(0.8≤AUC<0.9),优秀(0.9≤AUC≤1.0);

(4)生境等级划分:将模型输出的 ASCII 文件载入在 ArcGIS 并转化为浮点型栅格文件,通过重分类功能,选择“10 percentile training presence Cloglog threshold”定义大天鹅越冬适宜或不适宜生境,判定大于阈值的为大天鹅冬季适宜生境。

(5)保护空缺分析:在 ArcGIS10.5 中将模型得到的大天鹅适宜生境栅格图层转为面要素后,将大天鹅冬季适宜生境分别与新疆自然保护地、自然保护区、湿地公园图层叠加分析,得到大天鹅冬季适宜生境与新疆自然保护地的重叠面积并计算新疆自然保护地对冬季适宜生境的保护成效。

3　结果

3.1　大天鹅冬季适宜生境预测

对模型参数优化后,模型参数在 *RM* 为 1.5,*FC* 为 QHPT 时模型的 ΔAICc 值最小,模型的遗漏率和测试与训练 AUC 值均低于默认参数建模,AUC 平均值达到最高,说明模型在参数优化后预测能力达到最优(图 2);在最优参数环境下,MaxEnt 模型输出结果的 AUC 值为 0.965,表明模型的预测效果达到优秀水平,可对大天

鹅冬季适宜生境分布精确预测。

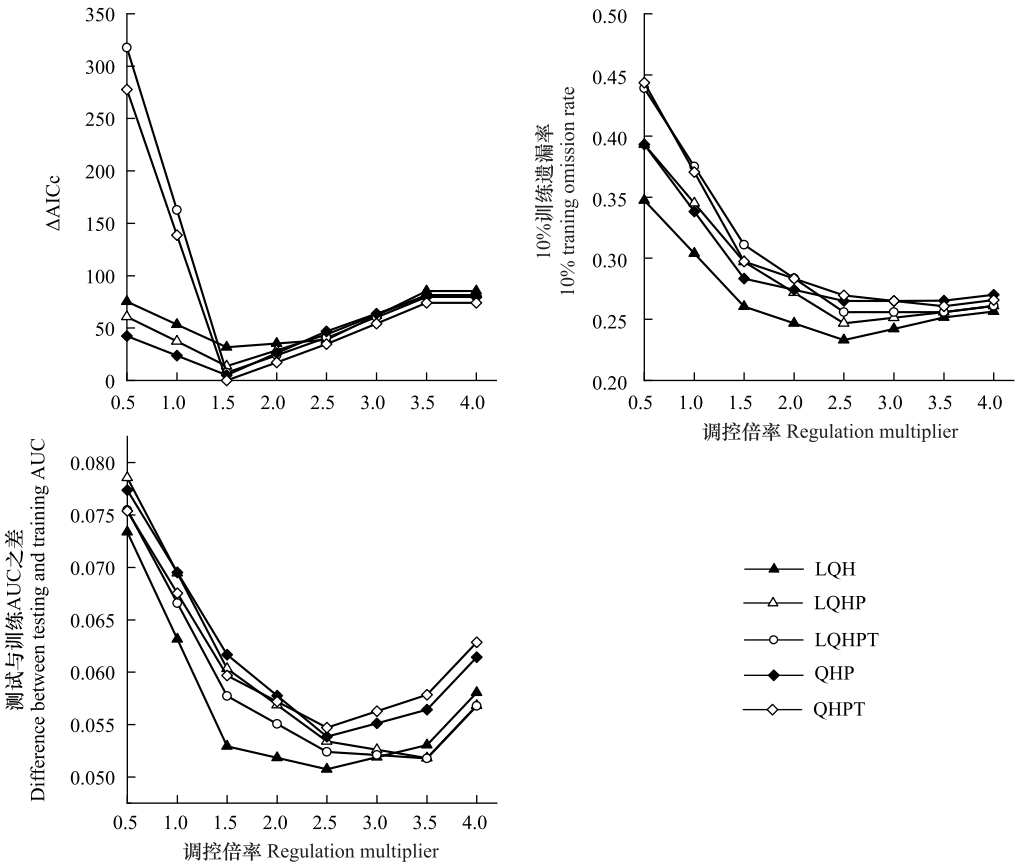

图 2 MaxEnt 模型最优参数调整结果

Fig.2 MaxEnt model optimal parameter adjusting results

ΔAICc 为最小信息准则,the minimum information criterion AICc value,ΔAICc;AUC 为曲线下面积,Area under the curve,AUC;LQH 为线性函数,LQHP 为二次函数,LQHPT 为线性分段函数,QHP 为交互函数,QHPT 阈值函数的耦合。Remark: LQH is a linear function, LQHP is a quadratic function, LQHPT is a piecewise linear function, and QHP is the coupling of an interaction function and a QHPT threshold function

大天鹅在新疆的冬季适宜生境面积共有 65359 km^2,主要分布在巴音郭勒蒙古自治州、塔城地区、阿勒泰地区、伊犁哈萨克自治州、昌吉回族自治州、阿克苏地区,分别占总适宜生境的 19.17%、13.83%、12.69%、12.39%、8.74%、8.62%,说明大天鹅冬季生境多分布于天山北部和中部地区(图 3);大天鹅冬季适宜生境中耕地占比最多,为 40.74%,其次是草地(31.25%)、水体(9.87%)和湿地(7.19%)(图 4)。

通过 MaxEnt 模型对各个环境变量的贡献度分析,刀切法(Jackknife)检验结果表明:大天鹅冬季生境分布贡献率最多的变量是土地利用,其次是距水体距离、距耕地距离、bio3(等温性)、距河道距离、bio7(气温年范围),分别为 34.3%、28%、11.6%、7.7%、5.3%、4.4%,累计贡献率达到 91.3%,表明这 6 个变量是影响大天鹅冬季生境分布的主要因素(表 2)。

各主要环境变量与大天鹅存在概率的响应曲线(图 5)显示,大天鹅在冬季适宜生境的主要分布范围集中在水体距离 500 m、河道距离 300 m 以及耕地距离 1800 m 以内的区域。这一结果表明,大天鹅在冬季倾向于选择靠近水体和河道的耕地区域作为主要活动范围,其生境选择与水体和河道的空间分布具有显著相关性。此外,温度相关变量 bio3(等温性)和 bio7(气温年范围)的分析进一步表明温度作为重要的气候因子,对大天鹅冬季生境选择也具有一定的影响。

表 2　MaxEnt 模型中各环境变量的贡献率

Table 2　Contributions of the environmental variables to the MaxEnt model

变量名称 Variables name	描述 Description	贡献率/% Contribution
土地覆盖 Land cover	各类土地覆盖类型	34.3
距水体距离 Distance to water body	距最近水体距离	28
距耕地距离 Distance to farmland	距最近耕地距离	11.6
Isothermality (bio3)	等温性(bio2/bio7)(×100)	7.7
距河流距离 Distance to river	距最近河流距离	5.3
Temperature annual range (bio7)	气温年范围	4.4
距居民地距离 Distance to residential area	距最近居民地距离	2.1
Mean temperature of driest quarter (bio9)	最干季度平均温度	2
距道路距离 Distance to road	距最近道路距离	1.6
Solar radiation in March (srad03)	3 月日辐射量	1.2
Wind speed in February (wind02)	2 月风速	0.8
Precipitation in December (prec12)	12 月降水量	0.6
Precipitation in March (prec03)	3 月降水量	0.3
距草地距离 Distance to grassland	距最近草地距离	0.1
Annual precipitation (bio12)	年降水量	0.1

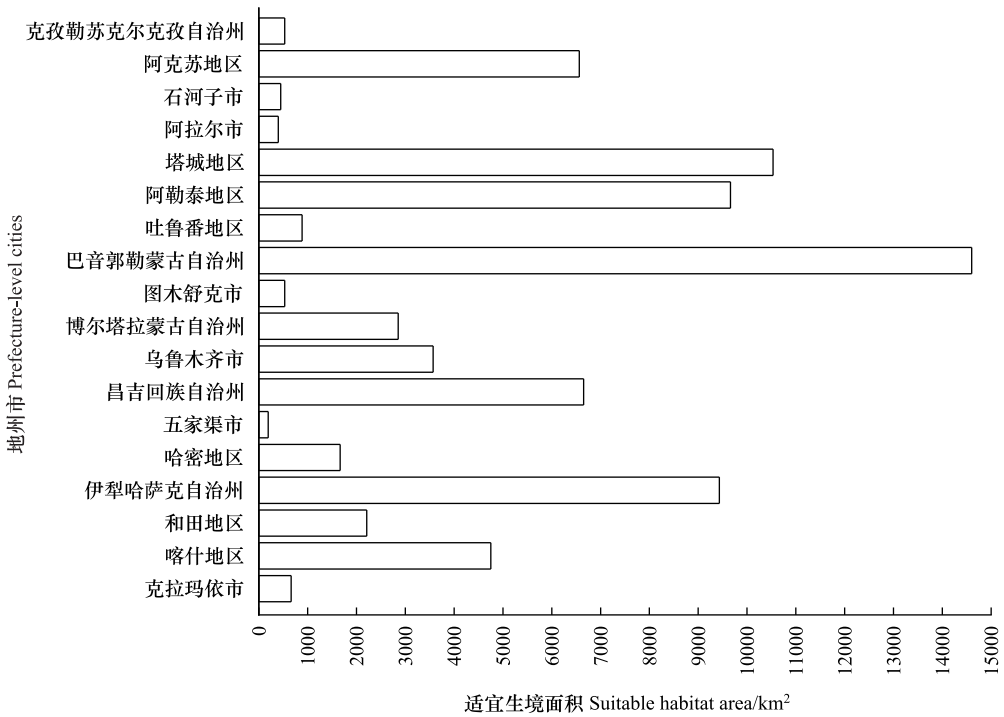

图 3　新疆各地区大天鹅冬季适宜生境分布

Fig.3　Whooper swans winter suitable habitat area in Xinjiang

3.2　大天鹅冬季生境保护空缺分析

为评价新疆现有保护体系对大天鹅冬季适宜生境的保护状况,分别分析了不同类型的保护地中的适宜生境面积占比。新疆所有 7 类 201 个不同类型的保护地共覆盖大天鹅越冬生境 16593 km^2,占适宜生境总面积的 25.39%。覆盖适宜生境最多的保护地类型分别是自然保护区、湿地公园、风景名胜区、自然遗产地、地质公园以及森林公园(表 3)。

将模型预测的大天鹅冬季适宜生境与保护区图层叠加分析得到,以湿地公园和自然保护区的保护体系共

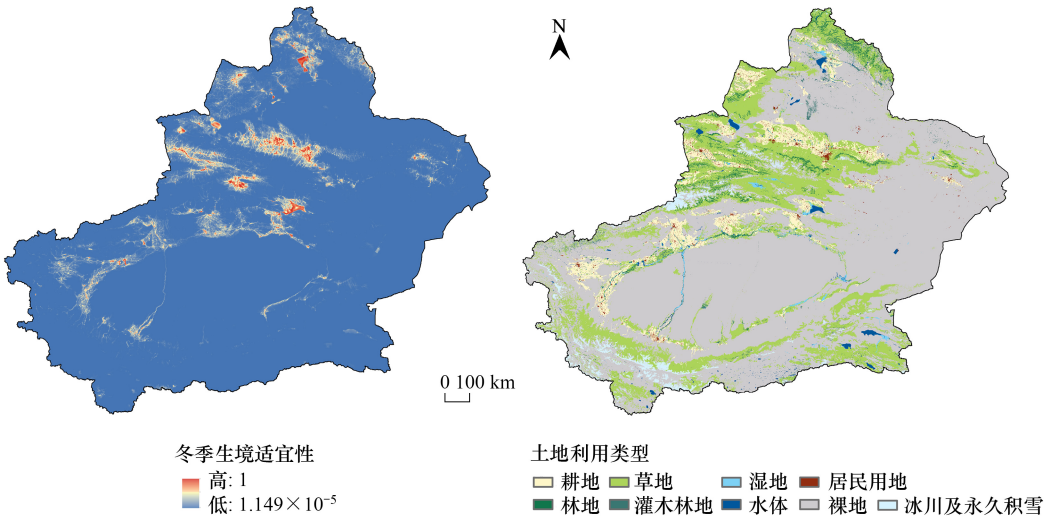

图 4 大天鹅冬季生境适宜性与土地利用类型分布

Fig.4 Whooper Swans winter suitable habitat distribution and landuse types

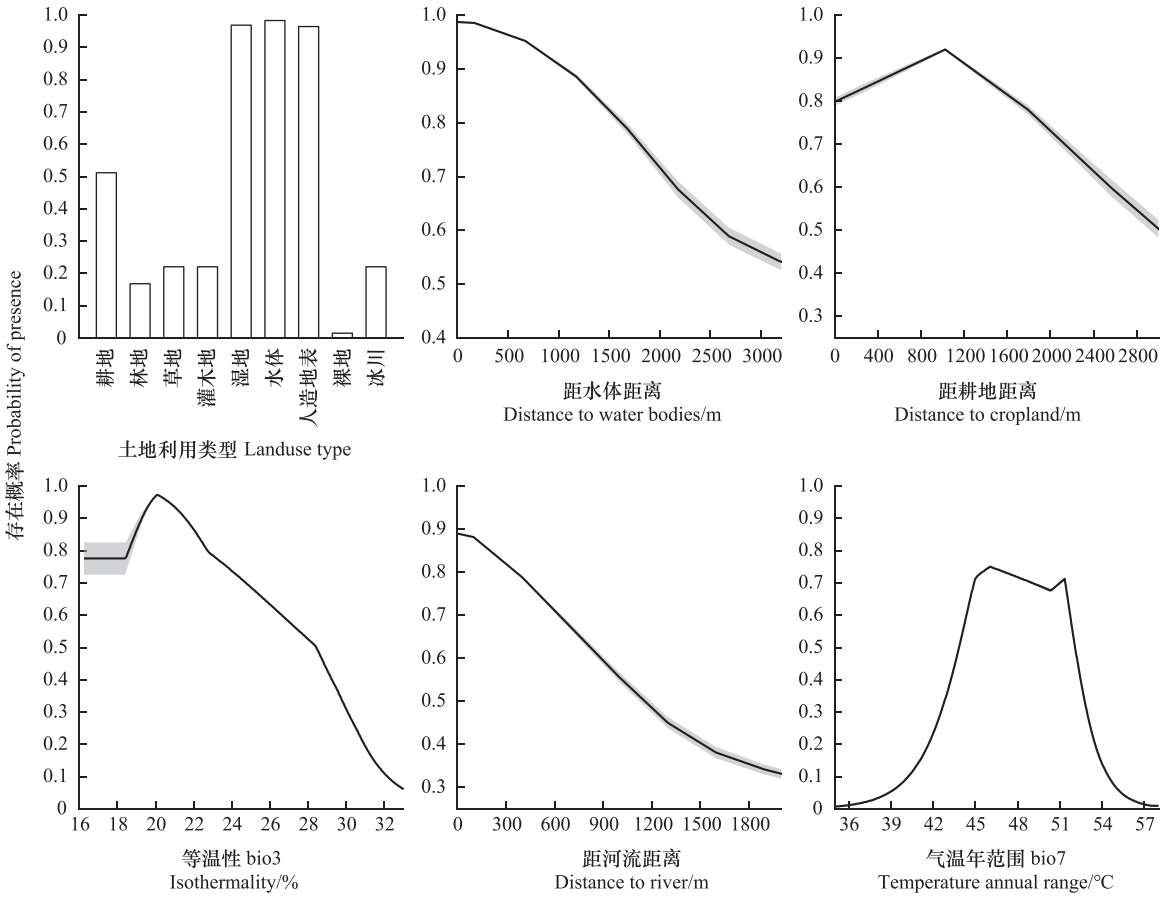

图 5 生境适宜性对主导环境变量的响应曲线

Fig.5 The response curves of habitat suitability to major environmental factors

覆盖大天鹅冬季生境 10304 km^2,占冬季总适宜生境的 15.77%。其中,国家级与省级自然保护区共覆盖大天鹅冬季适宜生境 4690 km^2,占冬季总适宜生境的 7.18%;覆盖冬季生境面积较多的自然保护区为巴音布鲁克国家级自然保护区、艾比湖湿地国家级自然保护区、阿尔泰山两河源自然保护区、沙雅县塔里木河上游湿地自

然保护区、阿勒泰科克苏湿地国家级自然保护区。

表 3　各保护地类型对冬季大天鹅适宜生境的保护成效

Table 3　Conservation effectiveness of each reserve type for winter Whooper Swans suitable habitat

保护地名称 Reserve named	覆盖的适宜生境 km^2 Covered suitable habitat	占总适宜生境的比例/% Proportion of total suitable habitats
自然保护区 Nature reserve	4690	7.18
湿地公园 Wetland park	5392	8.25
风景名胜区 Scenic and historic interest area	3282	5.02
自然遗产地 Natural heritage site	2106	3.22
地质公园 Geopark	152	0.23
森林公园 Forest park	971	1.49
沙漠公园 Desert park	0	0

国家级与省级湿地公园共覆盖大天鹅冬季适宜生境 5392 km^2,占冬季总适宜生境的 8.25%;覆盖面积较多的湿地公园为博斯腾湖国家湿地公园、福海乌伦古湖国家湿地公园,赛里木湖国家湿地公园(表 4)。

表 4　各主要保护区对冬季大天鹅适宜生境的保护成效

Table 4　Conservation effectiveness of the main protected areas in winter Whooper Swans suitable habitat

主要保护区 Major protected areas	覆盖的适宜生境 km^2 Covered suitable habitat	占总适宜生境的比例/% Proportion of total suitable habitats
巴音布鲁克国家级自然保护区 Bayanbulak National Nature Reserve	1793	2.74
艾比湖湿地国家级自然保护区 Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve	885	1.4
阿尔泰山两河源自然保护区 Altai Mountains Two-River Source Nature Reserve	240	0.4
阿勒泰科克苏湿地国家级自然保护区 Altay Kekesu Wetland National Nature Reserve	190	0.3
博斯腾湖国家湿地公园 Bosten Lake National Wetland Park	2215	3.34
福海乌伦古湖国家湿地公园 Fuhai Ulungur Lake National Wetland Park	1484	2.3
赛里木湖国家湿地公园 Sayram Lake National Wetland Park	573	0.88
伊犁那拉提沼泽湿地公园 Ili Nalati Marsh Wetland Park	185	0.3

大天鹅冬季适宜生境存在较大保护空缺,空缺区域面积有 48766 km^2,占总适宜生境的 74.61%;保护空缺区域主要集中在新疆北部的乌鲁木齐市、塔城地区和昌吉回族自治州,新疆南部多集中在喀什地区与和田地区(图 6)。

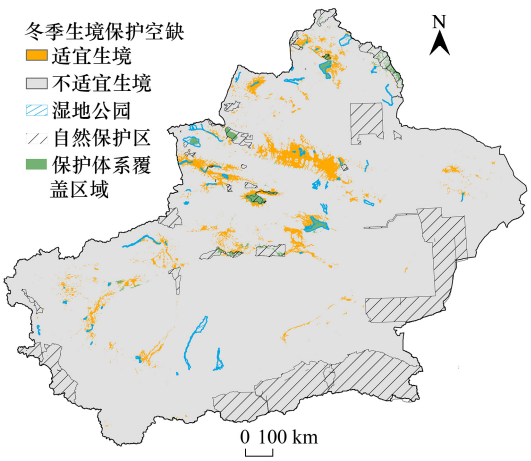

图 6　大天鹅冬季生境保护空缺分析

Fig.6　Conservation gap of Whooper Swans winter suitable habitat

4　讨论

本文基于 2003—2023 年新疆大天鹅冬季分布数据,采用 MaxEnt 模型预测了新疆大天鹅冬季适宜生境,并对现有保护地体系下大天鹅冬季适宜生境进行保护空缺分析。结果表明新疆大天鹅冬季适宜生境呈现出新疆北部地区适宜生境较集中,南部地区较为分散的特点(图 4),适宜生境中耕地和草地类型占比较最高,其次是水体和湿地。现有保护体系共覆盖大天鹅在新疆冬季适宜生境的 25.39%,存在较大保护空缺,空缺区域多集中在人类密集的城市边缘(图 6)。

4.1 影响冬季大天鹅生境适宜性的主要因素

通过 MaxEnt 模型预测结果得知,新疆大天鹅的冬季适宜生境面积为 65359 km^2,主要分布在新疆南部巴州和北部的塔城、阿勒泰,伊犁等地,这与新疆的湿地和水体、湿地的分布相符;大天鹅冬季适宜生境中耕地和草地占比最多,其次是水体和湿地,体现出大天鹅冬季生境主要以水体、湿地、耕地,草地为特点的土地利用类型。影响大天鹅冬季生境适宜性的环境因子主要为土地利用、距水体距离、距耕地距离、bio3(等温性)、距河道距离,bio7(气温年范围)(表 2),这体现了食物、安全性以及气候、距水体与河道的距离是大天鹅冬季生境适宜性的主要影响因素。

冬季是一年中食物最匮乏的季节,食物资源是大天鹅能否顺利越冬的主要限制因素之一。以往的研究表明越冬初期大天鹅多采食湿地中的水生食物,比如轮藻类和酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)等[15],此时的大天鹅也主要在水体、湿地中觅食和休憩[38]。越冬中期随着不冻水面的缩小,大天鹅比较难采食水生植物,这时大天鹅主要采食地表的草本植物比如早熟禾(*Poa annua*)、看麦娘(*Alopecurus aequalis*)、芦苇(*Phragmites australis*)等[39]。越冬末期积雪覆盖加厚,大天鹅采食地表食物更为困难,此时大天鹅主要以人为投放的玉米(*Zea mays*)和小麦(*Triticum aestivum*)等作为食物资源[40]。不同时期大天鹅食性的组成和变化也能直接反应在生境利用上。研究表明部分城市用地也是大天鹅冬季的适宜生境[41],这可能就与越冬后期食物匮乏,大天鹅到城市中的湿地生境中寻找人们投喂的食物有关。三门峡湿地的研究表明人为投食可能对冬季大天鹅有较强吸引作用,大天鹅多停留在城市湿地觅食,增加了大天鹅对城市湿地的利用[42];但人为投食行为过于频繁也会减少大天鹅冬季的觅食行为,干扰大天鹅的正常越冬节律[43]。

大天鹅选择耕地和草地等生境活动也与大天鹅的觅食行为有关[44]。通过模型预测结果显示,大天鹅冬季适宜生境中耕地面积占比较高且距耕地距离对模型的贡献率较高。在野外调查中发现,冬季大天鹅呈家庭群集群活动,倾向在距人为干扰较远且视野开阔的水体栖息,距水体较近的农田可为大天鹅提供较为丰富的食物资源,形成大天鹅的适宜觅食场所[45]。在黄河湿地越冬的大天鹅研究表明,黄河中上游湿地两岸的农田也是大天鹅的适宜生境,大天鹅会在湿地附近的农田觅食小麦,在耕地中寻找食物资源[46],并且小天鹅、大天鹅、疣鼻天鹅在食物资源利用竞争加剧时,也会增加在耕地生境中觅食行为的时间[47],在山西平陆黄河湿地的研究也得到类似的结果[13]。

大天鹅冬季生境利用对水体和湿地的偏好除了受上述食物的影响外,还受自身安全需求的影响。研究表明新疆冬季大天鹅多选择视野开阔、水域面积较大、安全等级高的水域休憩,水体和湿地不仅为大天鹅提供了食物更为大天鹅提供了安全的庇护场所[13]。山东荣成湿地越冬的大天鹅多为家庭式聚集分布在咸水泻湖、河口、滩涂和养殖池,其中人为干扰较少的河口区域是大天鹅冬季主要聚集地[38],河南省三门峡湿地越冬的大天鹅最适宜的土地类型为水塘与浅滩湿地[41],以上结果都与本文的研究结果相似,说明大天鹅冬季多选择人为干扰较少的开阔水域作为冬季生境。

气候对大天鹅冬季生境适宜性也会有较大影响。研究表明在 19 个气候变量中,bio3(等温性)和 bio7(气温年范围)对大天鹅的冬季生境适宜性影响显著。bio3(等温性)反映了一个地区温度变化的相对稳定性或等温程度,数值越高,说明该地区的温度在一年中各月之间的变化相对越均匀,等温性越强,气候相对更稳定;数值越低,则表示温度的月变化相对年变化波动更大,等温性越差,气候的季节性差异可能更明显。bio7(气温年范围)指的是一年中气温的最大值与最小值之间的差值,它主要用于衡量一个地区气温在一年时间跨度内的波动幅度。这两个因素对大天鹅越冬生境适宜性的影响说明大天鹅对温度变化和波动可能比较敏感,这种变化和波动会影响它们越冬地的选择,这也与以往的研究结果类似[41]。大天鹅迁离越冬地时间也与温度呈显著正相关,温度升高会促使大天鹅提早迁徙到繁殖地[45];山东荣成越冬天鹅分布区域与环境温度有关,温度较适宜时,大天鹅在泻湖分布较多,而温度降低则分布在滩涂区域[38]。温度会影响冬季大天鹅的分布、食物来源,越冬行为模式,是影响大天鹅冬季适宜生境的重要因素,也说明了本次研究结果具有较强说服力。

4.2 大天鹅冬季适宜生境保护空缺分析

新疆现有的自然保护体系共涵盖国家与自治区级自然保护区、湿地公园、风景名胜区、自然遗产地、地质

公园、森林公园、沙漠公园等共 7 类 201 个区域,共覆盖大天鹅冬季适宜生境的 17.35%,其中以自然保护区和湿地公园为主,这两类保护地共覆盖大天鹅冬季生境的 13.53%。

大天鹅冬季适宜生境有 82.65%暴露在保护体系外,表明大天鹅冬季适宜生境存在较大保护空缺,空缺区域集中在北疆的乌鲁木齐市、塔城地区和昌吉回族自治州,南疆多集中在喀什地区与和田地区。乌鲁木齐市、昌吉回族自治市、塔城地区作为天山北坡城市群,是丝绸之路经济带的核心区,也是新疆生产力和人口最为密集的地区。新疆先后在乌鲁木齐市、昌吉回族自治州和塔城地区建立了 11 个国家湿地公园和 2 个自然保护区,它们可以在一定程度上缓解大天鹅冬季适宜生境的保护空缺问题,但是保护空缺问题仍然需要引起足够的重视[48]。此外近年新疆的一些地区通过实施退耕还湿、退牧还湿、退塘还湿等生态修复措施增加了湿地面积,同时在保护体系外的一些区域管理人员也加强了针对越冬水鸟保护的巡查和投食,这些措施也可以在一定程度上弥补保护空缺的不足。

4.3　保护建议

新疆的大天鹅冬季适宜生境面积较大,但是其中仅有 17.35%在现有保护体系内,存在较大的保护空缺。在对保护体系内的大天鹅严格保护的基础上,建议相关部门对保护体系外越冬的大天鹅也应该采取相应的措施,以便更好的保护在新疆越冬的大天鹅。具体的保护措施可以分为以下几点:

(1)严格控制保护区外大天鹅适宜分布区内的人为活动,以减少对大天鹅的干扰。由保护空缺分析得出新疆越冬的大天鹅适宜生境大部分并不在现有保护体系内,因此要保护新疆越冬的大天鹅,只有通过对保护体系外的大天鹅开展有效保护才能实现。大天鹅与许多其他珍稀濒危野生动物一样,面临的最主要威胁来自人为活动干扰,而通常保护区外的人为干扰要明显强于保护区内,因此建议相关部门在大天鹅集中越冬的区域开展必要的管控,尽量减少人类干扰,以便大天鹅顺利过冬。

(2)适当补充食物,以便让大天鹅顺利过冬。冬季是一年中食物最匮乏的时期,有没有充足的食物会直接影响到鸟类能不能顺利过冬。本文研究得出大天鹅的部分适宜越冬生境在离人较近的区域,这很可能与冬季人们投食行为有关。投食行为有利有弊,一方面它可以增加食物帮助大天鹅过冬,但是另一方面它可能会引起大天鹅行为等方面的变化,带来负面影响,因此建议有关部门在投食的方式、时间、食物的种类和投食距离等方面进行管控,以达到尽可能较少的影响到大天鹅,又能起到增加食物的效果。

(3)加强日常监测,以便更好地保护在新疆越冬的大天鹅。每年都有不少大天鹅在新疆越冬,但是相关的研究和发表的信息都非常有限。本研究通过实地调查和数据库以及历史文献记录共收集到有效的大天鹅越冬位点 327 个,其中大部分来自于过去 20 年的历史记录,并且仅有分布位点信息,没有种群数量信息,而要准确地评估大天鹅的保护和生存现状,种群数量的信息非常重要。因此建议相关部门组织定期的越冬大天鹅种群数量监测工作,以便后期能为这个物种的保护提供最新的资料,以便进行科学管理和保护。

参考文献(References):

[1] Hirzel A H, Le Lay G. Habitat suitability modelling and niche theory. Journal of Applied Ecology, 2008, 45(5): 1372-1381.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Lunardi V O, Macedo R H, Granadeiro J P, Palmeirim J M. Migratory flows and foraging habitat selection by shorebirds along the northeastern coast of Brazil: The case of Baía de Todos os Santos. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 96: 179-187.

[5] 滕佳昆, 陈继龙, 杨慧, 王冉, 夏少霞, 段后浪, 于秀波, 朱玉扣. 长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化. 生态学报, 2024, 44(20):9233-9241.

[6] 李言阔, 单继红, 马建章, 缪泸君, 李佳, 袁芳凯, 谢光勇. 气候因子和水位变化对鄱阳湖东方白鹳越冬种群数量的影响. 生态学杂志, 2014, 33(4): 1061-1067.

[7] 王成, 董斌, 朱鸣, 黄慧, 赵抗抗, 吕典, 崔玉环, 高祥. 升金湖湿地越冬鹤类栖息地选择. 生态学杂志, 2018, 37(3): 810-816.

[8] 黄田, 徐正刚, 周立波, 赵运林. 水位波动对洞庭湖越冬小天鹅家域的影响. 生态学报, 2019, 39(22): 8657-8666.

[9] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录. 3 版. 北京: 科学出版社, 2017: 20-23.

[10] 张国钢, 董超, 陆军, 侯韵秋. 我国重要分布地大天鹅越冬种群动态调查. 四川动物, 2014, 33(3): 456-459.
[11] 袁国映, 郭凌. 新疆天鹅的分布和保护. 干旱区研究, 1992, 9(3): 60-63.
[12] 马鸣. 新疆鸟类分布名录. 北京: 科学出版社, 2011: 10-11.
[13] 董超, 张国钢, 陆军, 李新平, 马俏飞, 侯韵秋, 关丙役. 山西平陆越冬大天鹅日间行为模式. 生态学报, 2015, 35(2): 290-296.
[14] 高如意, 贾茹, 孔德生, 谢文燕, 茹文东, 吉志红, 陆军, 张国钢. 环境温度对大天鹅越冬行为和活动区的影响. 动物学杂志, 2021, 56(5): 655-662.
[15] 刘利, 刘晓光, 苗春林, 张宇平, 孙艳. 包头南海子湿地春季北迁大天鹅食性初步分析. 动物学杂志, 2014, 49(3): 438-442.
[16] 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.
[17] 井长林, 马鸣, 顾正勤, 才代, 闹日甫, 马俊. 大天鹅在巴音布鲁克地区越冬的调查报告. 干旱区研究, 1992, 9(2): 61-64.
[18] 杨丽红, 谢发兵, 王莉. 玛纳斯国家湿地公园大天鹅越冬期日常行为观测与分析. 新疆林业, 2022, 1(6): 22-25.
[19] Geldmann J, Barnes M, Coad L, Craigie I D, Hockings M, Burgess N D. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines. Biological Conservation, 2013, 161: 230-238.
[20] Joseph L N, Maloney R F, Possingham H P. Optimal allocation of resources among threatened species: a project prioritization protocol. Conservation Biology, 2009, 23(2): 328-338.
[21] 梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25(3): 294-303.
[22] 新疆维吾尔自治区生态环境厅自然生态环保处. 自治区自然保护地概况.(2023-08-23)[2023-09-04]. https://sthjt.xinjiang.gov.cn/xjepd/zrstzrbhd/202308/fae05390291b4aea924fb0431715b5cd.shtml.
[23] 热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘永强, 郭玉川, 何学敏. 新疆近 54 年气温和降水变化特征. 水土保持研究, 2016, 23(2): 128-133.
[24] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 辛宏, 黄小燕. 新疆气候变化研究进展. 干旱区研究, 2011, 28(3): 499-508.
[25] 新疆维吾尔自治区自然资源厅. 新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查主要数据公报.(2022-01-12)[2023-09-04]. http://zrzyt.xinjiang.gov.cn/xjgtzy/c106577/202201/4462e9b540c94bf3ad1ee451e953af4b.shtml.
[26] 马鸣, 克德尔汗·巴亚恒, 李飞, 胡宝文, 吴加清, 马尔科姆·道格拉斯, 高翔, 热合曼·阿曼江, 陈莹, 梅宇, 丁鹏. 新疆艾比湖湿地自然保护区鸟类清单及秋季迁徙数量统计 四川动物, 2010, 29(6): 912-918
[27] 李军伟, 马鸣, 孟凡娟, E I Ilyashenko, V Yu Ilyashenko, O V Belyalov, A E Gavrilov, S Kh Zaripova, N Batbayar, 曹垒. 灰鹤在天山木扎提河湿地越冬及行为观察. 生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 573-579.
[28] Kramer-Schadt S, Niedballa J, Pilgrim J D, Schröder B, Lindenborn J, Reinfelder V, Stillfried M, Heckmann I, Scharf A K, Augeri D M, Cheyne S M, Hearn A J, Ross J, MacDonald D W, Mathai J, Eaton J, Marshall A J, Semiadi G, Rustam R, Bernard H, Alfred R, Samejima H, Duckworth J W, Breitenmoser-Wuersten C, Belant J L, Hofer H, Wilting A. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. Diversity and Distributions, 2013, 19(11): 1366-1379.
[29] Boria R A, Olson L E, Goodman S M, Anderson R P. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. Ecological Modelling, 2014, 275: 73-77.
[30] Aiello-Lammens M E, Boria R A, Radosavljevic A, Vilela B, Anderson R P. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. Ecography, 2015, 38(5): 541-545.
[31] Dormann C, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz J, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P, Münkemüller T, McClean C, Osborne P, Reineking B, Schröder B, Skidmore A, Zurell D, Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography, 2013, 36: 27-46.
[32] 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.
[33] Naimi B, Hamm N A S, Groen T A, Skidmore A K, Toxopeus A G. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? Ecography, 2014, 37(2): 191-203.
[34] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
[35] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
[36] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological Applications, 2011, 21(2): 335-342.
[37] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.

[38] 田晓燕, 陆滢, 陈琤, 刘玉虹. 荣成天鹅湖越冬前期大天鹅数量分布与行为研究. 湿地科学与管理, 2017, 13(1): 29-34.

[39] Chisholm H, Spray C. Habitat usage and field choice by mute and whooper swans in the tweed valley, Scotland. Waterbirds: the International Journal of Waterbird Biology, 2002, 25: 177-182.

[40] Liu Y H, Lu Y, Chen C, Zhang G W, Wang Q Z, Xu Z, Wang Z S. Behavioural responses of the whooper swans *Cygnus cygnus* to human disturbance and their adaptability to the different habitats in the Rongcheng lagoon of China. Ecohydrology, 2018, 11(7): e2013.

[41] 杜博, 吴渊, 刘亚东, 茹文东, 李云峰, 高如意, 谢文燕, 韩铁艳, 宫兆宁, 洪剑明. 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. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 45-51.

[42] 张国钢, 陈丽霞, 李淑红, 高如意, 茹文东, 刘冬平, 孙孟和, 侯韵秋, 陆军. 黄河三门峡库区越冬大天鹅的种群现状. 动物学杂志, 2016, 51(2): 190-197.

[43] 邓大军, 贾茹, 孟维悦, 李淑红, 茹文东, 高如意, 李云峰, 吉志红, 张国钢, 陆军. 三门峡湿地成幼大天鹅昼间越冬行为差异分析. 四川动物, 2019, 38(5): 531-536.

[44] 李淑红, 孟维悦, 陈丽霞, 李云峰, 高如意, 茹文东, 孙孟和, 戴强, 张国钢, 陆军. 黄河中上游春季迁徙期水鸟群落及大天鹅活动特征生态学杂志, 2017, 36(7): 1910-1916.

[45] Wood K A, Hilton G M, Newth J L, Rees E C. Seasonal variation in energy gain explains patterns of resource use by avian herbivores in an agricultural landscape: Insights from a mechanistic model. Ecological Modelling, 2019, 409: 108762.

[46] 贾茹, 高如意, 茹文东, 孔德生, 吉志红, 张国钢. 基于卫星跟踪大天鹅春季迁徙时间及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(15): 6075-6082.

[47] Rees E C, Kirby J S, Gilburn A. Site selection by swans wintering in Britain and Ireland; the importance of habitat and geographic location. Ibis, 1997, 139(2): 337-352.

[48] 王锐锋, 朱舒欣, 郭子良, 林海, 王清春, 崔国发. 新疆自然保护综合地理区划. 生态学报, 2025, 45(2): 1-15.