•研究报告•

甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响

王博驰¹, 裴雯², 杨巨才², 色拥军², 李雪竹^{1*}, 娜尔力玛³, 杨海蓉²

1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 甘肃盐池湾国家级自然保护区管护中心, 甘肃酒泉 736300; 3. 甘肃省酒泉市肃北蒙古族自治县畜牧兽医技术服务中心, 甘肃酒泉 736300

摘要: 作为高原旗舰物种, 黑颈鹤(*Grus nigricollis*)是反映高原生态健康状况的重要参考。为了解黑颈鹤如何在多因素作用下适应人类改造过的栖息地环境, 本研究利用遥感解译、最近邻分析与随机森林模型对繁殖于甘肃盐池湾国家级自然保护区党河湿地的黑颈鹤的筑巢栖息地偏好及人为干扰进行研究。2019年和2020年每年的4–9月在党河湿地内对巢位点等数据进行收集。研究表明: 党河湿地内巢址与人为干扰的分布位置明显不同, 两者的主要分布区呈现镶嵌状。距深水沼泽距离、距浅水沼泽距离与距湖泊距离是影响黑颈鹤筑巢栖息地选择最关键的3个环境因子。黑颈鹤筑巢时偏好在距离深水沼泽< 125 m、距离浅水沼泽< 130 m、距离湖泊< 270 m的区域内筑巢。黑颈鹤对沼泽、湖泊等资源的偏好是其巢址分布格局的主要驱动力, 而房屋与公路等人为干扰对栖息地选择的影响很小。黑颈鹤筑巢时强烈偏好的栖息地在湿地内占比低、分布聚集且适宜范围有限, 繁殖区域较狭窄。黑颈鹤巢址间距离的上升表明黑颈鹤栖息地质量可能有所下降, 牲畜数量的增长、冬季牧场的全季利用以及气候变化可能是主要原因。建议在党河湿地内不新增房屋及公路等人为干扰, 同时继续适当限牧, 并给予牧民充足的经济补偿。

关键词: 黑颈鹤; 盐池湾; 筑巢栖息地; 人为干扰; 随机森林模型

王博驰, 裴雯, 杨巨才, 色拥军, 李雪竹, 娜尔力玛, 杨海蓉 (2022) 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响. 生物多样性, 30, 21241. doi: 10.17520/biods.2021241.

Wang BC, Pei W, Yang JC, Se YJ, Li XZ, Naerlima, Yang HR (2022) Nesting habitat preference of the black-necked crane and influence of anthropogenic disturbance in Yanchiwan, Gansu. Biodiversity Science, 30, 21241. doi: 10.17520/biods.2021241.

Nesting habitat preference of the black-necked crane and influence of anthropogenic disturbance in Yanchiwan, Gansu

Bochi Wang¹, Wen Pei², Jucai Yang², Yongjun Se², Xuezhu Li^{1*}, Naerlima³, Hairong Yang²

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2 Management and Conservation Center of Yanchiwan National Nature Reserve, Jiuquan, Gansu 736300

3 Animal Husbandry and Veterinary Technical Service Center of Subei Mongolian Autonomous County, Jiuquan, Gansu 736300

ABSTRACT

Aims: The black-necked crane (*Grus nigricollis*) is a flagship species of plateau and an important indicator of the health status of the plateau ecosystem. In recent years, plenty of research on black-necked cranes has been implemented, but these studies mainly focus on the migration, nest site selection, and foraging habitat selection of black-necked cranes. We know little about the preference of nesting habitat of black-necked cranes and the selection mechanism of nesting habitat. Black-necked cranes are divine birds in Tibetan Buddhism, and the species has always lived in harmony with the believers of Tibetan Buddhism. However, with the progression of human lifestyle, the problem of anthropogenic disturbance has become more prominent. Our research aims to provide a reference for understanding how black-necked cranes adapt to human modified habitats between multiple factors.

收稿日期: 2021-06-18; 接受日期: 2021-09-26

基金项目: 2019年中央财政林业改革发展资金珍稀濒危野生动物植物保护补助项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liyueyizhihua@126.com

<https://www.biodiversity-science.net>

Methods: Nest sites and number of black-necked cranes were collected in Danghe Wetland from April to September in 2019 and 2020. Satellite interpretation was utilized to classify the habitats of the black-necked cranes. To study the distribution pattern of the nests and anthropogenic disturbance, we used nearest neighbor analysis and kernel density estimation. A random forest model was applied to explore nesting habitat selection mechanism of the black-necked cranes.

Results: There are two concentrated breeding grounds of black-necked crane nests in the Danghe Wetland and the nests are extremely concentrated. The two breeding grounds are located in the marsh in the north and south of the Danghe River. The houses of herders in the wetland are distributed in a strip on the gobi at the southern edge of the wetland. The density distribution of house is more concentrated on the south bank of the Danghe River, and the roads are also distributed along the south bank of the Danghe River. There is obvious geographical separation between the black-necked crane nests and anthropogenic disturbances. Meadows are the most prominent landscape type of wetland ecosystems and the sum of the proportions of marsh meadow and salinized meadow exceeds 50%. The proportion of shallow water marsh is relatively small, not exceeding 10% in two years. Deep water marsh and lake have smaller areas, below 3% and 2% respectively (average of two years). The distance from deep water marsh, shallow water marsh, and lake are the three critical environmental variables affecting the nesting habitat selection of the black-necked cranes, while the distance from houses and roads are less critical. The black-necked cranes prefer to nest in areas < 125 m from deep water marsh, < 130 m from shallow water marsh, and < 270 m from lake.

Conclusion: The deep water marsh, which the black-necked cranes strongly prefer when nesting in Danghe Wetland, is characterized by a relatively low percentage and clustered distribution. Meanwhile, the range of suitable habitat for the black-necked cranes to nest is narrow (< 125 m from deep water marsh, < 130 m from shallow water marsh, < 270 m from lake). Therefore, the breeding distribution of black-necked cranes is narrow. Resource factors are the main driving force for the distribution pattern of the black-necked crane nests. However, anthropogenic disturbance has little impact on nesting habitat selection. Therefore, the geographical separation between the black-necked crane nests distribution and anthropogenic disturbance is largely due to the preference for resources rather than avoiding disturbance. The habitat quality of the black-necked cranes in Danghe Wetland may decline, and the increase of livestock, multi-season utilization of pasture, and climate change may be the main reasons.

Key words: black-necked cranes; Yanchiwan; nesting habitat; anthropogenic disturbance; random forest model

黑颈鹤(*Grus nigricollis*)是一种仅生活在高原上的大型涉禽,为国家I级重点保护野生动物,被IUCN列为近危(NT)。在中国,黑颈鹤主要繁殖于青藏高原,越冬于云贵高原、雅鲁藏布江河谷等地。本文的研究对象,甘肃盐池湾国家级自然保护区(以下简称盐池湾)的黑颈鹤主要繁殖于盐池湾内的党河湿地。党河湿地是当地牧民主要的冬季牧场,但近些年部分牧民开始在春季和夏季也使用党河湿地进行放牧。而以往的研究表明党河湿地内黑颈鹤繁殖季的放牧活动给黑颈鹤的繁殖造成了严重干扰(Zhang et al, 2017)。在藏传佛教中,黑颈鹤被视为吉祥神圣的象征,长久以来与当地居民和谐相处(王博驰等, 2021)。但持续增长的家畜数量与牧民越来越倾向于定居的生活方式可能已经成为黑颈鹤生存的新威胁(Farrington & Zhang, 2013)。党河湿地自2019年起开始实施限牧,为期三年。但湿地内的公路、牧民房屋等人为干扰仍可能影响繁殖中的黑颈鹤,随着高原居民生存模式的改变,人为干扰问题可能会日渐突出。

了解鹤类的筑巢栖息地以及它们如何选择筑巢栖息地对于保护这些物种至关重要(Jiao et al, 2014)。以往关于黑颈鹤巢址的研究更多地关注微生境下黑颈鹤的巢址选择及巢特征等问题,而景观尺度下黑颈鹤筑巢时对不同栖息地的不均匀利用研究相对较少,或仅以描述性的方式对巢址所在栖息地类型进行说明(王有辉等, 1989; Wu et al, 2009; 邝粉良等, 2010)。本研究以遥感解译结合随机森林模型(random forest model)的方式呈现出多因素共同作用下黑颈鹤筑巢栖息地选择偏好,同时对黑颈鹤的栖息地可能存在的问题进行分析,以期管理者提供科学的保护意见,同时也为了解黑颈鹤如何适应人类改造下的栖息地提供参考依据。

1 研究区域概况

盐池湾位于(95°21′–97°10′ E, 38°26′–39°52′ N)甘肃省酒泉市肃北蒙古族自治县,地处青藏高原北缘。属典型高寒大陆性气候,夏季凉爽少雨,冬季干燥寒冷。盐池湾包罗了冰川冻土、高原荒漠、高

山草原、河流湿地等自然景观, 其中党河湿地是盐池湾内面积最大的湿地。沼泽化草甸与盐化草甸构成了党河湿地的主要景观类型, 沼泽化草甸中主要分布有华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)和黑褐穗薹草(*Carex atrofusca*), 盐化草甸则以西藏早熟禾(*Poa tibetica*)与赖草(*Leymus secalinus*)为主。党河湿地是盐池湾黑颈鹤的主要繁殖场所, 与此同时, 赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)、斑头雁(*Anser indicus*)、红脚鹬(*Tringa totanus*)等鸟类也繁殖于此。

2 材料与方法

2.1 黑颈鹤巢址位点数据采集、牧场分布调查及黑颈鹤种群数量统计

巢址位点采集与牧场分布调查: 2019年和2020年每年的4–6月在党河湿地开展黑颈鹤巢址的调查工作。乘车沿公路寻找黑颈鹤, 发现黑颈鹤繁殖对后, 使用单筒望远镜观察, 并用GPS定位鸟巢位置。同年7月和8月对当地季节性牧场的分布状况进行实地调查, 后又通过线上采访的方式对牧场分布地进一步确认。

黑颈鹤种群数量统计: 2018–2021年每年的7–9月采用望远镜观察并直接计数的方法对党河湿地内的黑颈鹤成鸟、幼鸟以及亚成体的数量进行至少2次数量普查, 当年数量以所记录数量最多的1次为准, 并计算增补率(本文定义的增补率指新增幼鸟的个数与成体及亚成体数量之和的比值)用以评估牧场多季节利用对黑颈鹤幼鸟数量的影响。

2.2 遥感解译划分土地类型

根据云量、湿地冰雪覆盖情况、植被生长情况以及黑颈鹤在党河湿地的繁殖时间, 分别选取2019年5月12日和2020年5月16日的卫星图, 在ENVI 5.3中进行解译, 并通过实地考察进行验证。参考刘迺发等(2010)的研究与实地调查, 将土地类型划分为10类, 即浅水沼泽、深水沼泽、河流、湖泊、沼泽化草甸、盐化草甸、戈壁、山脉、公路、房屋。其中浅水沼泽、深水沼泽、河流、湖泊、沼泽化草甸、盐化草甸为黑颈鹤筑巢时可能会利用的栖息地。房屋所占面积过小, 因此并未对其进行解译, 而以点要素代替。

2.3 应用最近邻与核密度估计分析鸟巢、人为干扰与栖息地的分布模式

应用最近邻分析(nearest neighbor analysis)对分

布于党河湿地内的牧民房屋、黑颈鹤巢址以及栖息地的聚集状态进行分析。最近邻分析的返回值主要有3个, 即NN比率、Z得分以及P值。定义 $P < 0.01$ 、NN比率 < 1 且 $|Z| \geq 2.58$ 时为极显著聚集分布; $P < 0.01$ 、NN比率 > 1 且 $|Z| \geq 2.58$ 时为极显著离散分布。使用核密度估计(kernel density estimation)对鸟巢以及牧民房屋的数量分布进行评估, 热力图中颜色越冷的区域密度越低, 而颜色越暖的区域密度越高。核密度估计以及最近邻分析在ArcMap 10.8中进行。

2.4 筑巢栖息地选择

在所有黑颈鹤巢址位点的外围建立最小凸多边形, 将该最小凸多边形设为繁殖区。为将全部的房屋包含在内, 在上述最小凸多边形的外围建立起6 km宽的缓冲区, 将该缓冲区包围的区域设为研究区。在研究区内产生与该年份巢位点数相同的随机点, 分别计算巢位点与随机点距10种土地类型间的最小距离。将此最小距离与海拔、坡度、坡向一同定义为影响黑颈鹤筑巢的环境因子。对各环境因子进行Pearson简单相关分析, 而后使用随机森林模型对各因子进行排序。将巢址距离深水沼泽、浅水沼泽、湖泊、沼泽化草甸等资源的距离定义为资源因素, 距公路、房屋的距离定义为干扰因素, 海拔、坡度和坡向定义为地形因素。随机森林重要性排序、相关性分析在R 3.6.2中完成。距土地类型的最小距离及地形因素的提取在ArcMap 10.8中完成。

3 结果

3.1 黑颈鹤巢址分布及影响因素

黑颈鹤在党河湿地内有两处较集中的繁殖地, 鸟巢极显著聚集(表1), 两处繁殖地分别位于党河北部与南部的沼泽地带, 沼泽沿山体边缘分布, 且也呈现出聚集分布的特点。浅水沼泽分布于深水沼泽周围, 而山脉和沼泽化草甸包围着浅水沼泽, 山脉-浅水沼泽-深水沼泽-沼泽化草甸所构成的生态体系是黑颈鹤的重要繁殖生境(图1C)。湿地内的牧民房屋以带状分布在湿地南侧边缘的戈壁上, 数量较集中于党河南岸, 公路也沿党河湿地南岸分布(图1B)。党河湿地内黑颈鹤巢址与人为干扰的分布位置明显不同, 且两者分布区域呈镶嵌状(图1A, B)。环境因子相关性分析的结果显示, 距深水沼泽距离

表1 党河湿地内栖息地、房屋及黑颈鹤巢址的最近邻分析结果
Table 1 The result of nearest neighbor analysis of habitats, houses and nests of black-necked cranes in Danghe Wetland

空间要素 Spatial elements	NN比率 NN ratio	P	Z得分 Z score
2019			
深水沼泽 Deep water marsh	0.323	0.000	-104.427
浅水沼泽 Shallow water marsh	0.433	0.000	-210.412
湖泊 Lake	0.324	0.000	-175.593
2020			
深水沼泽 Deep water marsh	0.339	0.000	-98.065
浅水沼泽 Shallow water marsh	0.449	0.000	-214.506
湖泊 Lake	0.314	0.000	-142.180
两年的巢址 Nest of two years	0.550	0.000	-6.664
牧民房屋 House of herder	0.785	0.000	-3.399

图1 党河湿地内黑颈鹤巢址(A)、牧民房屋(B)以及鸟巢、公路及房屋分布(C)
Fig. 1 The nests of black-necked cranes (A), houses of herders (B) and nests, roads and houses (C) in Danghe Wetland

与距浅水沼泽距离间有较强相关性,但考虑到两者的生态学意义,均予以保留(附录1)。栖息地选择模型显示,距深水沼泽距离、距浅水沼泽距离、距湖泊距离是影响黑颈鹤筑巢栖息地选择的最关键的3个环境因子,而距房屋距离与距公路距离的排序均在较后,且与前三位在数值上相差较大(附录2)。

3.2 筑巢栖息地偏好及筑巢生境分析

随机森林响应曲线显示,黑颈鹤倾向于在距离深水沼泽<125 m、距离浅水沼泽<130 m且距离湖泊<270 m的区域内筑巢(图2)。卫星解译结果显示,湿地内沼泽化草甸与盐化草甸面积占比最大,两种草甸占比之和超过50%,是湿地内主要的景观类

图2 黑颈鹤筑巢栖息地环境因子响应曲线

Fig. 2 Environmental variables response curves for the selection of the nesting habitat of the black-necked cranes

型。浅水沼泽占比相对较小, 两年解译均小于10%, 深水沼泽和湖泊占比最小, 分别在3%与2%以下(两年解译均值), 表明黑颈鹤偏好的3种筑巢栖息地在景观中的占比均较小(附录3)。

3.3 牧场分布及幼鸟数量调查

盐池湾的牧民有较明确的季节性牧场。春季牧场(如牙马图、南宁郭勒等)主要分布于党河上游平缓的山谷地带。夏季牧场主要集中在大水河西岸(如巴音泽尔肯乌勒、野牛沟等)以及党河北部的缓坡地带(如大德德基)。冬季牧场主要集中在党河湿地内(如巴嘎德德基)(附录4)。然而, 近些年部分牧民开始在春季和夏季也使用冬季牧场放牧, 其中巴嘎德德基等冬季牧场位于党河北部黑颈鹤繁殖地附近。

2019年共记录到黑颈鹤巢址35处, 2020年共记录到26处, 2020年有1处巢址定位失效, 未参与分析。2018–2021年幼鸟存活数量分别为23、30、42、39只, 四年的增补率分别为15.8%、24.2%、26.9%和23.8%。

4 讨论

4.1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好与巢址分布的因素

对处于繁殖期的鸟类而言, 食物的可利用性、安全性以及隐蔽等因素都可能影响其筑巢位置的选择(Bautista et al, 2004; MacDonald et al, 2016)。在党河湿地, 浅水沼泽是深水沼泽与沼泽化草甸的过渡区, 即生态交错带, 交错带中丰富的动植物种类可以为动物提供更多的筑巢、隐蔽和摄食条件(傅伯杰等, 2011)。鸟类繁殖时的适合度成本可能取决于周围的环境条件(Visser & Lessells, 2001), 高原寒冷环境的鸟类更是如此。黑颈鹤筑巢时偏好浅水沼泽, 因为浅水沼泽有利于黑颈鹤繁殖期的有效觅食。然而, 栖息地选择模型的模拟结果显示, 黑颈鹤筑巢时对深水沼泽有最强烈偏好, 其次才是浅水沼泽。而有研究表明, 水深是影响黑颈鹤巢址选择的关键因素, 较深的水可以阻挡捕食者(Wu et al, 2009)。因此, 对于盐池湾黑颈鹤而言, 安全性是筑巢栖息地

选择的第一要素, 其次才是食物。

盐池湾黑颈鹤与若尔盖黑颈鹤筑巢栖息地的偏好有较大差异, 若尔盖的黑颈鹤更倾向于将湖泊作为筑巢栖息地, 这可能是因为两地的气候条件不同。若尔盖属典型高寒湿润季风气候, 湖泊占比约5.40% (Wu et al, 2009), 而盐池湾属典型高寒大陆性气候, 湿地内的湖泊仅占1.61% (两年遥感解译结果均值), 可供黑颈鹤筑巢的湖泊相对较少。黑颈鹤筑巢时最偏好的深水沼泽在湿地内占比为2.34%, 而黑颈鹤最偏好的3种栖息地中占比面积最大的浅水沼泽也仅为8.92% (两年遥感解译结果均值), 且均呈现聚集分布。与此同时, 随机森林响应曲线的结果也显示, 在各环境因子水平上, 适宜黑颈鹤筑巢的栖息地范围较小。因此, 适宜黑颈鹤筑巢的栖息地在党河湿地内属稀缺资源, 黑颈鹤的巢址分布范围较狭窄。

4.2 巢址分布格局驱动因素

Pearse等(2016)的研究显示, 在北美大平原越冬的沙丘鹤(*Antigone canadensis*)的越冬地分布有大量风力发电设备, 但近90%的风力发电设备安装在沙丘鹤不倾向选择的土地上, 沙丘鹤表现出的对风力发电设备的回避行为更多是由于资源偏好而不是躲避干扰。因此, 对资源的偏好是沙丘鹤栖息地选择的主要驱动因素。然而, 邹红菲等(2018)对丹顶鹤(*Grus japonensis*)的研究显示, 决定其巢址选择的首要驱动因素是干扰因素。在党河湿地内, 由于沼泽与湖泊附近不宜修建房屋与公路, 95.6%的房屋分布在戈壁或盐化草甸这样质地坚硬且远离沼泽及湖泊的土地类型上, 公路也主要修建在戈壁及盐化草甸上。房屋、公路与黑颈鹤筑巢时偏好的栖息地在空间上本身存在较明显的分离。栖息地选择模型的结果也显示, 对沼泽、湖泊等资源因素的偏好是黑颈鹤巢址分布格局的主要驱动力, 而房屋与公路等干扰因素对黑颈鹤栖息地选择的影响较小。因此, 黑颈鹤巢址分布与人为干扰间的地理分离很大程度上是由于对资源的偏好, 而并非回避干扰。色拥军等(2020)有关黑颈鹤巢址分布格局的研究显示, 在党河两岸, 牧民的数量分布与黑颈鹤的巢址分布呈明显的负相关, 干扰是黑颈鹤巢址分布的关键驱动因素。但该研究主要考虑了干扰这一单一因素的影响, 而忽略了资源、地形等因素的综合

作用, 因此与本研究的结果有所不同。

4.3 牧场分布情况及栖息地质量下降原因

牧场分布调查显示, 部分冬季牧场可能与黑颈鹤的繁殖分布有较大程度重合, 牧场的多季节利用将会使党河湿地内的牲畜数量在黑颈鹤的繁殖季有所升高。而以往的研究表明, 牲畜和散养的犬只都是盐池湾黑颈鹤面临的主要干扰(Zhang et al, 2017)。四年的黑颈鹤数量调查结果显示, 自2019年实施限牧, 黑颈鹤幼鸟的数量开始明显提升, 2019–2021年幼鸟数量较2018年分别提高了30.4%、82.6%和69.6%, 限牧效果显著, 这从侧面说明牧场的多季节利用一直较强烈地限制着黑颈鹤的数量。与此同时, 冬季牧场的多季节利用与牲畜数量的增长(附录5)可能会导致黑颈鹤栖息地质量的下降。种群密度可以反映出栖息地的适宜程度, 尤其对于在繁殖期有强烈领地需求的鹤类动物而言, 当鹤巢间距离增大、种群密度下降时, 意味着栖息地质量的下降(Johnsgard, 1983; Leito et al, 2005)。2019和2020两年的巢址距离平均值分别为 $1,861.31 \pm 100.84$ m和 $1,777.04 \pm 315.96$ m, 2013、2014与2015年的巢址平均距离分别为 718.66 ± 430.50 m、 $1,064.51 \pm 323.99$ m和 534.99 ± 195.45 m (Zhang et al, 2017), 2019年和2020年有较明显的增长, 说明党河湿地的栖息地质量可能有所下降。Mahamued等(2021)的研究也显示, 高强度放牧导致的草场退化可能是阿切氏歌百灵(*Heteromirafra archeri*)种群数量下降的原因。然而, 也有研究表明放牧活动可以为无脊椎动物提供丰富的食物与庇护所, 这可能会给黑颈鹤间接地提供稳定的食物来源(Horgan, 2002; Helden et al, 2010; Liu et al, 2020), 但从限牧后幼鸟数量的增长情况来看, 放牧活动对黑颈鹤的消极影响可能更大。蒸发和降雨是高原湿地景观改变的主导因素(Li et al, 2020)。然而, 党河湿地的水位变化经常受冰川融水的影响(Zhang et al, 2017)。肃北县近十一年草甸生长期(4–8月)的温度呈现下降趋势(附录6), 较低的气温可能会影响湿地水分的补给, 进而限制湿地内植被的生长。因此, 气候变化也可能是黑颈鹤栖息地质量下降的又一原因。

5 保护建议

根据上述分析, 本文提出以下保护建议: (1)鼓

励、引导部分当地牧民恢复传统的轮牧转场,在转场未完全恢复前,继续适当限牧并给予牧民足够的经济补偿。(2)保持湿地内现有的房屋、公路分布状况,不新增类似的人为干扰。(3)深水沼泽在党河湿地内分布并不连续,加之面积小且分布呈现斑块状聚集的特点,栖息地存在局域性消失的风险。因此,建议在干旱年份适当地对深水沼泽进行人工补水,以保证黑颈鹤的正常繁殖。

致谢: 感谢甘肃盐池湾国家级自然保护区管护中心的监测人员在野外给予的帮助。感谢额尔登达莱先生、孟克达拉先生、孟梗草勒先生、索郎夺尔基先生关于补偿政策、牧场分布以及牧民现状的解答。

参考文献

- Bautista LM, García JT, Calmaestra RG, Palacín C, Martín CA, Morales M, Bonal R, Viñuela J (2004) Effect of weekend road traffic on the use of space by raptors. *Conservation Biology*, 18, 726–732.
- Farrington JD, Zhang XL (2013) The black-necked cranes of the Longbao National Nature Reserve, Qinghai, China. *Mountain Research and Development*, 33, 305–313.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM, Wang YL (2011) Principles and Applications of Landscape Ecology. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟 (2011) 景观生态学原理及应用. 科学出版社, 北京.]
- Helden AJ, Anderson A, Sheridan H, Purvis G (2010) The role of grassland sward islets in the distribution of arthropods in cattle pastures. *Insect Conservation and Diversity*, 3, 291–301.
- Horgan FG (2002) Shady field boundaries and the colonisation of dung by coprophagous beetles in Central American pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91, 25–36.
- Jiao SW, Guo YM, Huettmann F, Lei GC (2014) Nest-site selection analysis of hooded crane (*Grus monacha*) in Northeastern China based on a multivariate ensemble model. *Zoological Science*, 31, 430–437.
- Johnsgard PA (1983) *Cranes of the World*. Indiana University Press, Bloomington.
- Kuang FL, Cangjuezhuma, Li JC, Yang L, Liu N (2010) Nest site characteristics and foraging habitat selection of breeding black-necked cranes in Bange, Tibet Autonomous Region, China. *Journal of Northeast Forestry University*, 38(11), 89–92. (in Chinese with English abstract) [邝粉良, 仓决卓玛, 李建川, 杨乐, 刘宁 (2010) 藏北繁殖黑颈鹤的巢址特征及觅食地选择. 东北林业大学学报, 38(11), 89–92.]
- Leito A, Ojaste I, Truu J, Palo A (2005) Nest site selection of the Eurasian crane *Grus grus* in Estonia: An analysis of nest record cards. *Ornis Fennica*, 82, 44–54.
- Li WL, Xue PF, Liu CL, Yan HP, Zhu GF, Cao YP (2020) Monitoring and landscape dynamic analysis of alpine wetland area based on multiple algorithms: A case study of Zoige Plateau. *Sensors*, 20, 7315.
- Liu NF, Zhang HC, Dou ZG (2010) *Synthetical Scientific Investigation on Yanchiwan National Reserve in Gansu Province*. Lanzhou University Press, Lanzhou. (in Chinese) [刘迺发, 张惠昌, 窦志刚 (2010) 甘肃盐池湾国家级自然保护区综合科学考察. 兰州大学出版社, 兰州.]
- Liu W, Jin YY, Wu YJ, Zhao CH, He XC, Wang B, Ran JH (2020) Home range and habitat use of breeding black-necked cranes. *Animals*, 10, 1975.
- MacDonald EC, Camfield AF, Martin M, Wilson S, Martin K (2016) Nest-site selection and consequences for nest survival among three sympatric songbirds in an alpine environment. *Journal of Ornithology*, 157, 393–405.
- Mahamued BA, Donald PF, Collar NJ, Marsden SJ, Ndag'ang'a PK, Wondafrash M, Abebe YD, Bennett J, Wotton SR, Gornall D, Lloyd H (2021) Rangeland loss and population decline of the critically endangered Liben lark *Heteromirafra archeri* in southern Ethiopia. *Bird Conservation International*, 31, 1–14.
- Pearse AT, Brandt DA, Krapu GL (2016) Wintering sandhill crane exposure to wind energy development in the central and southern Great Plains, USA. *The Condor*, 118, 391–401.
- Se YJ, Dou ZG, Yang JC, Wang YM, Dabuxilite, Ma ZB, Wang BC (2020) Distribution patterns of breeding sites of black-necked crane in Yanchiwan, Gansu Province. *Wetland Science & Management*, 16(1), 64–68. (in Chinese with English abstract) [色拥军, 窦志刚, 杨巨才, 王煜民, 达布西力特, 马志兵, 王博驰 (2020) 甘肃盐池湾黑颈鹤繁殖分布格局. 湿地科学与管理, 16(1), 64–68.]
- Visser ME, Lessells CM (2001) The costs of egg production and incubation in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 268, 1271–1277.
- Wang BC, Pei W, Se YJ, Yang JC, Wang YM, Yang HR, Fu HY, Yu FQ, Wang ZJ, Lang XM, Pu Z, Guo YM (2021) Colliding with power lines being the main reason of the death of satellite-tracked black-necked crane juveniles in wintering area. *Chinese Journal of Zoology*, 56, 161–170. (in Chinese with English abstract) [王博驰, 裴雯, 色拥军, 杨巨才, 王煜明, 杨海蓉, 付红彦, 于凤琴, 王子建, 郎雪敏, 蒲真, 郭玉民 (2021) 卫星跟踪揭示撞击电线是黑颈鹤幼鸟越冬地死亡的主要原因. 动物学杂志, 56, 161–170.]
- Wang YH, Wu ZK, Li ZM, Li DH, Zhou ZJ, Bishop MA (1989) An observation on the nests, eggs and chickens of black-necked cranes. *Guizhou Science*, 7(1), 50–57. (in Chinese with English abstract) [王有辉, 吴至康, 李筑眉, 李德浩, 周志军, 玛丽·安娜·比索普 (1989) 黑颈鹤巢、卵

王博驰等: 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响

和雏鸟的观察. 贵州科学, 7(1), 50–57.]

Wu HQ, Zha K, Zhang M, Yang XJ (2009) Nest site selection by black-necked crane *Grus nigricollis* in the Ruorgai Wetland, China. Bird Conservation International, 19, 277–286.

Zhang LX, An B, Shu ML, Yang XJ (2017) Nest-site selection, reproductive ecology and shifts within core-use areas of black-necked cranes at the northern limit of the Tibetan Plateau. PeerJ, 5, e2939.

Zou HF, Gao ZS, Wu QM, Huang HZ, Li QL, Tao R, Yang YB (2018) Using resource selection functions to study nest site selection of *Grus japonensis*. Chinese Journal of Wildlife, 39, 566–572. (in Chinese with English abstract) [邹红菲, 高忠斯, 吴庆明, 黄华智, 李全亮, 陶蕊, 杨宇博 (2018) 应用资源选择函数研究丹顶鹤的巢址选择. 野生动物学报, 39, 566–572.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子间相关性系数

Appendix 1 The correlation coefficient between environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-1.pdf>

附录2 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子的重要性排序

Appendix 2 Permutation importance of environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-2.pdf>

附录3 黑颈鹤不同类型栖息地的占比

Appendix 3 The proportion of different habitat types of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-3.pdf>

附录4 季节牧场分布

Appendix 4 The distribution of the seasonal pastures

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-4.pdf>

附录5 盐池湾牲畜数量

Appendix 5 The number of livestock in Yanchiwan

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-5.pdf>

附录6 肃北县近年来气温变化趋势

Appendix 6 Temperature change trend in Subei County in recent years

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-6.pdf>

附录1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子间相关性系数(1、2、3…代表左侧对应的环境因子)
Appendix 1 The correlation coefficient between environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes (1, 2, 3... represent left corresponding variables)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 距深水沼泽距离 Distance to deep water marsh	0.71	-0.14	0.45	0.48	-0.01	0.15	-0.15	-0.12	-0.21	0.00	-0.09	-0.05
2 距浅水沼泽距离 Distance to shallow water marsh		-0.07	0.34	0.36	-0.14	0.12	-0.04	-0.08	0.19	-0.04	-0.13	-0.05
3 距盐化草甸距离 Distance to salinized meadow			0.09	0.20	0.06	-0.18	0.09	-0.01	-0.07	0.04	-0.00	-0.14
4 距沼泽化草甸距离 Distance to marsh meadow				0.61	0.09	0.13	-0.01	0.01	-0.03	0.09	-0.03	-0.03
5 距湖泊距离 Distance to lake					0.06	0.02	-0.19	-0.10	-0.10	0.45	-0.13	-0.03
6 距河流距离 Distance to river						0.17	0.08	-0.15	-0.13	0.25	-0.04	-0.03
7 距山脉距离 Distance to mountain							0.17	-0.51	-0.03	-0.01	-0.35	-0.18
8 距戈壁距离 Distance to gobi								0.06	0.27	-0.06	0.08	0.19
9 距公路距离 Distance to road									-0.03	-0.03	0.57	0.28
10 距房屋距离 Distance to house										-0.09	0.06	0.01
11 海拔 Altitude											-0.12	-0.03
12 坡度 Slope												0.54
13 坡向 Aspect												

附录2 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子的重要性排序
Appendix 2 Permutation importance of environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

环境因子 Environmental variables	重要性 Score
距深水沼泽距离 Distance to deep water marsh	23.58
距浅水沼泽距离 Distance to shallow water marsh	20.39
距湖泊距离 Distance to lake	5.05
距戈壁距离 Distance to gobi	2.61
海拔 Altitude	1.63
距河流距离 Distance to river	1.43
距房屋距离 Distance to house	1.42
距沼泽化草甸距离 Distance to marsh meadow	1.20
距山脉距离 Distance to mountain	0.84
距公路距离 Distance to road	0.52
距盐化草甸距离 Distance to salinized meadow	0.51
坡向 Aspect	0.43
坡度 Slope	0.33

附录3 黑颈鹤不同类型栖息地的占比(其他包括公路、戈壁及山脉)
Appendix 3 The proportion of different habitat types of black-necked cranes (Other includes road, gobi and mountain)

附录4 季节牧场分布(部分)

Appendix 4 The distribution of the seasonal pastures (partial)

附录5 盐池湾牲畜数量
Appendix 5 The number of livestock in Yanchiwan

附录6 肃北县近年来气温变化趋势
Appendix 6 Temperature change trend in Subei County in recent years