

分类号

密级

UDC



北京林业大学

学术型硕士学位论文

基于卫星跟踪揭示两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用

(中文题名)

Migration patterns, habitat use of two Black-necked Crane (*Grus nigricollis*) populations revealed by satellite tracking

(英文题名)

王野

(作者姓名)

指 导 教 师 郭玉民 教授

学 院 生态与自然保护学院

学 科 专 业 野生动植物保护与利用

研 究 方 向 动物生态学与行为学

二〇二〇 年 七 月 二三 日

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下独立进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京林业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名: 王野 日 期: 2020.7.23

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解北京林业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京林业大学；学校有权保留并向国家有关部门或机构递交论文的纸质版和电子版，允许学位论文被查阅、借阅和复印；学校可以将学位论文的全部或部分内容公开或编入有关数据库进行检索，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

签 名: 王野 导师签名: 郭淑英 日 期: 2020.7.23

摘要

黑颈鹤 (*Grus nigricollis*) 是唯一的一种终生生活在高原的鹤类, 近年来因为栖息地丧失, 人为干扰加剧, 其种群受到威胁。2015-2016 年, 课题组在云南省大山包湿地和西藏林芝地区分别为 5 只和 7 只黑颈鹤佩戴了 GPS-GSM 跟踪器。基于卫星跟踪数据, 分析比较了黑颈鹤若尔盖-大山包种群和青海-林芝种群的迁徙模式和栖息地利用情况。

本研究首次揭示了黑颈鹤青海-林芝迁徙路线, 确定了若尔盖种群的白河和青海种群的巴松措、沙珠玉河共三个重要的迁徙停歇地。若尔盖种群的迁徙时间 (春季: 4.2 ± 3.9 d; 秋季: 7.0 ± 2.9 d) 和迁徙距离 (春季: 755.0 ± 64.8 km; 秋季: 774.5 ± 48.0 km) 均小于青海种群的迁徙时间 (春季: 8.7 ± 4.6 d; 秋季: 30.0 ± 10.6 d) 和迁徙距离 (春季: 1182.5 ± 90.4 km; 秋季: 1455.7 ± 138.0 km)。

使用核密度估计法算出跟踪个体的活动区面积 (95% KDE) 和核域面积 (60% KDE)。对于若尔盖种群, 夏季和冬季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均远小于非繁殖个体; 对于青海种群, 夏季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均远小于非繁殖个体, 而冬季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均大于非繁殖个体。基于土地覆盖数据分析了两个种群的栖息地选择类型, 发现黑颈鹤偏好于湿地与水体类型的栖息地, 在度夏地更偏好于草地类型的栖息地, 在越冬地更偏好于耕地类型的栖息地。基于公共平台获得的环境因子数据建立物种分布模型对栖息地选择的环境因子进行重要性排序, 发现海拔在度夏期和越冬期均对黑颈鹤的栖息地选择有较大影响, 坡度和降水量相关的因子对度夏期栖息地选择有较大影响, 温度相关的因子对越冬期栖息地选择有较大影响。研究结果为进一步探索黑颈鹤的迁徙行为和栖息地利用情况奠定了基础, 为黑颈鹤未来的科学的研究及保护管理等提供参考。

关键词: 黑颈鹤; 迁徙模式; 栖息地选择; 核密度估计; 物种分布模型; 环境因子重要性; GPS-GSM 跟踪

Migration patterns, habitat use of two Black-necked Crane (*Grus nigricollis*) populations revealed by satellite tracking

Abstract

The Black-necked Crane (*Grus nigricollis*) is the only crane that lives on the plateau all its life. In recent years, the population has been threatened by increased human disturbance and habitat loss. From 2015 to 2016, five and seven Black-necked Cranes in Dashanbao wetland in Yunnan Province and Nyingchi Prefecture in Tibet autonomous region were attached with GPS-GSM transmitters, respectively. Based on satellite tracking data, we compared the migration patterns and habitat use of the Ruoergai-Dashanbao and Qinghai-Ningzhi Black-necked Crane populations.

This research revealed the migration route of the Black-necked Cranes from Qinghai to Nyingchi for the first time. Three important migration stopover sites were identified for the Bai River in the Ruoergai population and the Basom Lake and Shazhuyu River in the Qinghai population. Migration period (spring: 4.2 ± 3.9 d; autumn: 7.0 ± 2.9 d) and migration distance (spring: 755.0 ± 64.8 km; autumn: 774.5 ± 48.0 km) of Ruoergai population were shorter than the migration period (spring: 8.7 ± 4.6 d; autumn: 30.0 ± 10.6 d) and migration distance (spring: 1182.5 ± 90.4 km; autumn: 1455.7 ± 138.0 km) of Qinghai population.

The home range (95% KDE) and core area (60% KDE) of the tracked individuals were calculated by kernel density estimation. For Ruoergai population, the home range and core area of breeding individual in summer and winter are much smaller than that of non-breeding individuals. For Qinghai population, the home range and core area of breeding individuals in summer are much smaller than non-breeding individuals; but the home range and core area of breeding individual in winter are larger than that of non-breeding individual. Based on the landcover data, the habitat use of two populations was compared. Black-necked Cranes prefer wetland and water type habitats. Grassland type habitats are preferred in summer and cultivated land type habitats are preferred in winter. The species distribution model was established based on the environmental factor data obtained from the public platform to rank the importance of environmental factors in habitat selection. Altitude has a great influence on the habitat selection of Black-necked Crane in both summer and wintering periods, the factors related to slope and precipitation have a great influence on the habitat selection in summer, and the factors related to temperature have a great influence on the habitat selection in winter. The research results lay a foundation for further exploration about the migration behavior and habitat use of Black-necked Cranes and provide references for future scientific research and conservation management.

Key words: Black-necked Crane, Migration model, Habitat selection, Kernel density estimation, Species distribution model, Environmental factor importance, GPS-GSM tracking

目录

摘要	I
Abstract	II
1 引言	1
1.1 基于卫星跟踪技术的鸟类迁徙和栖息地选择研究	1
1.1.1 鸟类迁徙研究	1
1.1.2 鸟类栖息地选择研究	2
1.2 物种分布模型	3
1.2.1 物种分布模型简介	3
1.2.2 MaxEnt 模型	4
1.2.3 物种分布模型评价方法	5
1.3 黑颈鹤研究概况	5
1.3.1 黑颈鹤物种简介	5
1.3.2 黑颈鹤迁徙研究	6
1.3.3 黑颈鹤栖息地选择研究	6
2 方法	8
2.1 研究区域	8
2.2 数据收集	9
2.2.1 跟踪数据收集	9
2.2.2 环境数据收集	10
2.3 数据分析	11
2.3.1 数据分析使用的主要软件	11
2.3.2 数据分析主要步骤	12
3 结果	13
3.1 数据收集结果	13
3.2 两个黑颈鹤种群迁徙模式研究	15
3.2.1 黑颈鹤若尔盖-大山包种群迁徙模式研究	15
3.2.2 黑颈鹤青海-林芝种群迁徙模式研究	20
3.3 两个黑颈鹤种群栖息地利用研究	25
3.3.1 黑颈鹤若尔盖-大山包种群活动区及栖息地选择研究	25
3.3.2 黑颈鹤青海-林芝种群活动区及栖息地选择研究	29
4 讨论	33
4.1 两个黑颈鹤种群迁徙模式比较	33

4.1.1 迁徙模式.....	33
4.1.2 迁徙停歇地.....	34
4.2 两个黑颈鹤种群栖息地利用比较.....	34
4.2.1 活动区面积.....	34
4.2.2 栖息地选择.....	35
4.2.3 黑颈鹤栖息地选择环境因子的重要性排序.....	35
4.3 黑颈鹤栖息地的威胁与保护.....	36
5 结论	38
参考文献	39
个人简介	46
导师简介	47
获得成果目录	48
致谢	49

1 引言

1.1 基于卫星跟踪技术的鸟类迁徙和栖息地选择研究

研究鸟类迁徙和栖息地选择等生态问题，需要对个体进行识别并确定其位置。就迁徙鸟类而言，确定其迁徙路线和迁徙停歇地，对其种群管理和栖息地保护很有必要，但在大空间尺度对其迁徙生态学的研究难以开展（Higuchi *et al.*, 2004; Faaborg *et al.*, 2010）。鸟类跟踪通过定点调查、环志、雷达监测、卫星跟踪、光敏地理定位等方法，来确定跟踪个体的位置（马志军，2013）。卫星跟踪技术在鸟类迁徙研究上的逐渐应用，使揭示大型鸟类的迁徙模式成为可能（Mi *et al.*, 2018）。本研究基于 GPS-GSM 的方法达到卫星跟踪的目的，其原理是通过 GPS 定位，结合 GSM 通讯的手段，将数据以短信的方式发送到电脑、手机等设备上，以便及时获取研究对象的位置信息（付建明等，2000）。卫星跟踪技术可以在短时间内得到物种大量的准确即时信息，如迁徙开始时间、迁徙结束时间、重要停歇地及迁徙路线等数据，且跟踪范围尺度广，时间跨度长，可以在全球范围内对野生动物进行跟踪监测（马志军，2009）。

1.1.1 鸟类迁徙研究

鸟类迁徙是指鸟类有规律地进行一定距离移动的习性，是人类最感兴趣的生物学现象之一（郑光美，2012）。随着科技的不断进步，鸟类迁徙的研究方法也有了长足的发展，这使人们能够更好的了解鸟类的迁徙活动。鸟类迁徙的研究方法从最初的野外观察，逐渐发展到雷达监测、环志、卫星跟踪、稳定同位素、室内控制实验以及分子生物学方法等。鸟类在迁徙过程中需要在一个或多个地点停留，摄入食物以补充能量，以完成迁徙活动，这些地点称为迁徙停歇地（马志军，2009）。鸟类迁徙规律研究是鸟类研究中的一个重要部分，在北美、欧洲等国家，科研人员对鸟类迁徙路线、迁徙生理生态、迁徙对种群动态的影响、迁徙的研究方法等方面做了大量研究（Newton, 2008）。完整的迁徙对策在鸟类迁徙过程中必不可少，其有利于优化鸟类的迁徙活动（Alerstam and Hedenstrom, 1998）。迁飞区是由一个或多个迁徙停歇地将度夏地与越冬地连接起来的区域（马志军，2009）。就迁徙过程中的能量代谢而言，脂肪提供了绝大部分的能量，而蛋白质与碳水化合物在迁徙过程中也是必不可少的（Jenni *et al.*, 1998）。由此可见，对鸟类的迁徙路线进行深入研究，对其保护管理和种群发展有着十分重要的作用。

近年来，国内外学者利用卫星跟踪技术开展了大量的大型涉禽的迁徙研究工作。在国外，Higuchi *et al.* (1996) 在白枕鹤越冬地日本跟踪了 15 只白枕鹤 (*Grus vipio*)，发现了白枕鹤日本-扎龙迁徙路线及朝鲜半岛非军事区等重要的迁徙停歇地。Higuchi *et al.* (1998) 在俄罗斯兴安斯基自然保护区和汗卡湖自然保护区跟踪了 14 只丹顶鹤 (*G. japonensis*)，发现了丹顶鹤俄罗斯兴安斯基自然保护区-中国江苏省迁徙路线和俄罗斯汗卡湖-朝鲜半岛迁徙路线，及中国的盘锦湿地、唐山市东南部的沿海滩涂和

黄河口等重要的迁徙停歇地。Kanai *et al.* (2002) 等在白鹤 (*G. leucogeranus*) 的繁殖地, 西伯利亚东北部跟踪了 12 只白鹤, 发现了白鹤雅库特-鄱阳湖迁徙路线及齐齐哈尔、白城等重要的迁徙停歇地。Fronczak *et al.* (2017) 等跟踪了 42 只东部种群沙丘鹤 (*G. canadensis*) 来探讨该种群的迁徙模式, 旨在发现重要的迁徙停歇地和越冬地, 为该种群的保护管理提供参考。Pearse *et al.* (2018) 等通过卫星跟踪技术来研究美洲鹤 (*G. americana*) 的迁徙行为, 发现迁徙行为的灵活性有利于其种群的恢复。在国内, 谢鹏等(2018)在黑龙江红河自然保护区跟踪了 8 只东方白鹳 (*Ciconia boyciana*) 幼鸟, 以初步分析其幼鸟扩散行为。郭玉民和何芬奇 (2017)、温立嘉等 (2017) 在内蒙古鄂尔多斯遗鸥自然保护区跟踪了 5 只蓑羽鹤 (*Anthropoides virgo*), 分析得到了蓑羽鹤近乎环形的迁徙模式。Mi *et al.* (2018) 在中国东北和俄罗斯南部, 跟踪了 16 只白头鹤 (*G. monacha*), 分析其迁徙模式以及为相关保护提出参考建议。综上, 卫星跟踪技术为大型涉禽的研究提供了技术上的支持, 使人们对大型涉禽的迁徙路线、迁徙行为和迁徙模式等有了更深入的了解。

1.1.2 鸟类栖息地选择研究

栖息地是指动物生活的周围环境, 指动物个体、种群或群落为了生存和繁衍所利用的各种生境因子的总和 (Morrison *et al.*, 1992; 孙儒泳, 1992)。鸟类栖息地是指在分布区内鸟类的生活环境, 即进行各种生命活动的场所 (楚国忠和郑光美, 1993)。Johnson (1980) 通过动物使用某种特定类型的栖息地的频率来对栖息地的选择进行等级划分, 不同的等级代表着不同的栖息地选择的尺度, 不同的尺度上影响物种选择栖息地的因子也不同。鸟类对栖息地选择的等级包括: (1) 物种分布的地理范围; (2) 分布范围内个体或者种群的巢区; (3) 巢区范围内鸟类使用的不同栖息地类型; (4) 觅食地的实际环境条件。这四个等级的栖息地选择尺度不同, 前两个选择尺度被称作宏栖息地, 后两个选择尺度被称作微栖息地。鸟类对栖息地选择在这两种选择尺度的基础上, 受多种生态环境因子综合作用, 是一个复杂的过程 (杨维康等, 2000)。

关于鸟类的活动区, 最早的估算方法是最小凸多边型法 (Minimum convex polygon, MCP), 之后出现了基于鸟类活动位点的分布频率—利用分布 (Utilization distribution, UD) 的方法来估算活动区 (Blair, 1940; Keating and Cherry, 2009)。自核密度估计法 (Kernel density estimation) 出现之后, 它便成了估计活动区的首选方法 (Worton, 1989; Laver and Kelly, 2008)。核密度估计法认为鸟类的活动区是其在特定时间以一定概率出现的区域, 这一概率通常被划定为 95% (Powell, 2000; Kernohan, 2001)。

随着鸟类卫星跟踪技术的发展, 开展了一系列的大型涉禽的栖息地选择研究。在国内, 温立嘉 (2017) 基于繁殖巢位点信息建立了白枕鹤繁殖栖息地分布模型, 并使用跟踪数据对模型结果进行了验证, 发现我国松嫩平原地区和中蒙俄交界的达乌尔草原地区等地是其繁殖期主要的分布区域。在国外, Minton *et al.* (2003) 将跟踪数据和全球土地覆盖数据相结合, 来分析比较东北亚四种迁徙鹤类 (白鹤、白头鹤、白枕鹤

和丹顶鹤)的栖息地利用差异。Fujita *et al.* (2004) 在俄罗斯东部跟踪了 5 只白枕鹤, 发现在迁徙过程中其更偏好于湿地与草地类型的栖息地。Jiguet and Villarubias(2004) 跟踪了 7 只黑鹳 (*Ciconia nigra*), 来估算其繁殖期的家域范围并研究其栖息地选择情况, 结果显示其偏好于在河流密集的林地中觅食, 且繁殖个体与非繁殖个体的家域范围有很大程度的重叠。El-Hacen *et al.* (2013) 在非洲西部跟踪了 6 只毛里塔尼亚琵鹭 (*Platalea leucorodia balsaci*), 发现其只在潮间带觅食, 尤其是海草覆盖的区域, 觅食时间主要发生在退潮期。Pickens *et al.* (2017) 等在美国跟踪了 53 只美洲鹤, 通过布朗桥运动模型来估计其季节性的核域并评估栖息地选择情况, 结果显示其核域面积为 $4.7\text{--}438 \text{ km}^2$ ($n = 283$), 随着水域面积的变化, 栖息地利用情况也发生了季节性的变化。由此可知, 开展鸟类的栖息地选择研究, 保护鸟类的栖息地, 对鸟类种群的生存和繁衍有重要意义。

1.2 物种分布模型

1.2.1 物种分布模型简介

物种分布模型 (Species Distribution Models) 主要基于物种的分布数据, 并结合环境变量信息, 使用特定的算法对研究物种的生态位进行估计的模型 (Elith and Leathwick, 2009; 许仲林等, 2015; Mi *et al.*, 2017)。物种分布模型的结果能够以物种出现的概率等形式来预测物种的潜在分布(Franklin, 1995; Guisan and Thuiller, 2010)。物种分布模型现已成为生态学和生物地理学研究的重要工具。近年来, 其在生态系统恢复、自然资源管理、生态系统评估、气候变化与物种分布间的关系、保护区的规划设计等方面均有重要的指导意义 (Anderson and Raza, 2010; Cushman and Huettmann, 2010; Xu *et al.*, 2012; 翟天庆和李欣海, 2012; Humphries and Huettmann, 2014)。

对生态学知识的忽视是使用统计模型预测物种分布的限制因素。统计建模主要包括三个方面:(1)涉及生态学理论的生态模型;(2)涉及数据收集和测量的数据模型;(3)涉及统计理论和方法的统计模型。物种分布模型基于生态位理论建立, 它通过建模的方式来估计物种生态位的大小以预测其地理分布 (Austin, 2002; Soberón and Peterson, 2005; Hizel and Le, 2008)。很多学者对生态位做出了相应的定义, 其中最有代表性的是 Grinnell 提出的空间生态位、Elton 提出的功能生态位和 Hutchinson 提出的超体积生态位。空间生态位的定义是基于限制性环境因子、功能生态位的定义是基于物种在群落中的功能地位、而超体积生态位则是基于生物对多维环境变量的选择范围。环境变量在物种分布模型中起着至关重要的作用, 它可以用来帮助预测物种的生态位, 最终得到预测的物种分布区 (Grinnell, 1917; Elton, 1927; Hutchinson, 1987; 李契等, 2003; 李国庆等, 2013)。

物种分布模型的发展最早是基于 BIOCLIM 模型的开发利用, 随后出现了 DOMAIN、生态位因子分析模型、分类与回归树模型、MaxEnt 模型等基于统计的和

基于人工智能的人工神经网络等模型、以及基于规则集的遗传算法(许仲林等, 2015)。

BIOCLIM 模型基于超体积生态位来实现, 它有着易操作、算法简单和通用性好等特点, 同时还具有预测气候变化导致物种潜在分布变化的能力 (Busby, 1991)。DOMAIN 模型基于点与点之间的相似矩阵, 为物种的潜在分布模型的构建提供了简洁有效的方法 (Carpenter *et al.*, 1993)。生态位因子分析模型基于超体积生态位的概念, 通过计算环境变量的偏差和边界性来确定栖息地的适宜性 (Hirzel *et al.*, 2002)。广义线性模型是在多元线性回归模型的基础上衍生而来, 它可用于建立响应变量与空间预测变量之间的关系 (Lehmann *et al.*, 2002)。分类与回归树模型通过归递划分的方法, 变量值按照一定准则被分割, 从而达到分类的目的。该模型能够更直观的表达物种分布的预测结果 (Vayssières *et al.*, 2000)。人工神经网络模型常被用来分析自变量和因变量间的关系, 它依据人工神经元来模仿生物神经网络的结构和功能, 以达到预测的目的 (Foody and Cutler, 2006)。GARP 模型可依据物种分布数据和环境数据产生的不同类型的集合, 从而对物种潜在分布区进行预测 (李双成和高江波, 2008)。

1.2.2 MaxEnt 模型

最大熵模型 MaxEnt 模型是基于生态位原理建立的模型, 根据已知物种的分布位点和所处位点的多个环境变量建立约束条件, 探寻该条件下最大熵的分布可能性, 从而可以预测物种在研究区域适宜的生境分布 (Phillips *et al.*, 2004)。MaxEnt 自被开发以来, 得到了相关研究领域的广泛应用 (Phillips *et al.*, 2006)。与其他的物种分布模型相比, 该模型能够更好的处理响应变量和预测变量间的相互作用, 可有效地避免模型的主观性等缺点 (吴文等, 2016)。该模型基于固有的物种生态位, 对物种实际分布点的环境变量进行提取, 通过对已知数据的分析, 进而对研究物种的生态位需求进行模拟和归纳, 将所得结果投射到研究区域中, 便可预测出物种的潜在分布区。该模型的操作界面简单易懂, 当物种分布数据较少时也可使用, 且结果的准确性也较高(张路, 2015; Chakraborty *et al.*, 2016)。

近年来, MaxEnt 模型在保护生物学和入侵生物学等方面的生物多样性保护领域得到应用, 该模型已广泛运用于国内外的研究中。目前该模型的研究对象主要是濒危珍稀物种、外来入侵物种、经济作物和病虫害防治等 (曹学仁, 2011; 孙敬松和周广胜, 2012; Barros *et al.*, 2016; 戎战磊等, 2017; Bossenbroek *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019)。关于濒危珍稀物种的研究目前主要包括两方面: 一是预测珍稀物种的适宜生境或潜在分布区, 二是对珍稀物种的分布区进行生境适宜性评价(刘振生等, 2013; 朱井丽等, 2018); 就外来入侵物种而言, MaxEnt 模型基于入侵物种的分布数据, 预测其可能会出现的地理范围, 引起保护人员的重视, 提前做好相关的预防工作 (柯明剑, 2017; 周宇等, 2018); 对于一些经济作物的预测可以更好的了解适宜它们栽培的条件, 提高经济效益 (胡秀等, 2013; 郭杰等, 2017); 关于病虫害防治则主要是预测病虫害的分布以便提前做出防护措施, 降低经济损失 (杨会枫等, 2016; 王茹琳

等, 2017)。此外, 预测精度的问题在 MaxEnt 模型的研究也不容忽视(陈新美等, 2012; 朱耿平和乔慧捷, 2016)。

MaxEnt 软件能够通过较少的某物种已知的分布位点来相对准确的预测该物种的整体分布, MaxEnt 软件可以基于这些特性建立模型, 预测物种的分布区(Hernandez et al., 2010; Hu et al., 2014)。许多濒危物种由于栖息地环境恶劣、破碎化等原因, 人们对其地理分布和生态学方面的知识知之甚少, 关于保护方面的研究很有必要。MaxEnt 软件可以预测物种的分布区, 为相关的研究提供科学依据, 预测结果可为种群发展和栖息地保护等提供参考。当然 MaxEnt 软件也存在一些问题, 其中最主要的问题就是过度拟合。过度拟合是指预测的分布区过于集中在已知的物种分布区。为了得到更好的预测结果, 需要对模型进行优化。通过对取样偏差校正、调整模型的复杂性、分析比较物种分布的阈值选择等方法, 过度拟合对预测结果产生的影响将会大幅度降低, 物种的真实分布区和潜在分布区将被更好的区分开(孔维尧等, 2019)。

1.2.3 物种分布模型评价方法

物种分布模型预测中产生的错误主要分为两类, 即假阳性错误和假阴性错误。假阳性错误是指研究物种在预测出的分布区内实际上并未分布, 即错误的预测了物种的实际分布区域; 假阴性错误是指研究物种在预测出的未分布地区存在实际分布的情况, 即错误的预测了物种的无分布区域。与此相对应的, 真阳性是指研究物种在预测出的分布区内实际分布; 而真阴性是指研究物种在预测出的未分布区内无实际分布(王运生等, 2007; 王雅男等, 2007)。目前常用的模型评价指标有总体准确度、特异度、灵敏度、TSS、AUC 等(Hanley and Mcneil, 1982; Allouche et al., 2006; 王运生等, 2007; Cohen, 2016)。

受试者工作曲线(Receiver operating characteristic curve)即 ROC 曲线, 以假阳性率为横坐标, 真阳性率为纵坐标绘制而成。ROC 曲线最初被用来评价雷达信号的接收能力, 而后又被广泛的用来评价医学诊断试验性能(Metz, 1978; Zweig and Cambell, 1993)。本研究选择 MaxEnt 软件自带的 AUC 值来评估模型的精准性, AUC 值就是 ROC 曲线下的面积, AUC 值越大表示模型的精准度越高, 预测效果越好。AUC 值的评判标准是: 0.5-0.6 失败, 0.6-0.7 较差, 0.8-0.9 好, 0.9-1.0 非常好。使用模型自带的刀切法来衡量每一个因子对于模型建立的贡献情况(Stockwell and Peterson, 2002; 崔绍朋等, 2018)。

1.3 黑颈鹤研究概况

1.3.1 黑颈鹤物种简介

黑颈鹤是鹤形目(Gruiformes)鹤科(Gruidae)鹤属(*Grus*)的大型涉禽, 体长 110-120 cm, 体重 4-6 kg。其体羽灰白色, 头部、前颈及飞羽黑色, 尾羽褐黑色。头顶前方裸区呈暗红色, 是世界 15 种鹤类中唯一的一种终生生活在高原湿地的鹤(Johnsgard,

1983）。黑颈鹤的全球种群数量为 10000-10200 只，为国家一级重点保护野生动物，世界自然保护联盟（IUCN）将其列为易危物种（VU）（IUCN, 2019）。黑颈鹤无亚种分化，且该物种的个体都具有迁徙习性（Johnsgard, 1983）。

根据以往的调查和研究可知：在夏季，黑颈鹤的繁殖地是大面积、连续的区域，而在冬季，则分为东部、中部和西部 3 个越冬区域。就繁殖地而言，黑颈鹤的繁殖地主要在四川、青海、新疆、西藏、甘肃和拉达克地区（Li, 2014）。就越冬地而言，东部越冬种群冬季主要在云南东北部和贵州西北部活动（李来兴, 1997）。中部越冬种群冬季主要在云南西北部活动（王凯等, 2009）。西部越冬种群冬季主要在西藏中南部和不丹国活动（Ministry of Environmental Protection of P. R. China, 2010）。

1.3.2 黑颈鹤迁徙研究

黑颈鹤是 15 种鹤类中最晚被发现的，且分布区的环境条件较恶劣，对其的相关研究较少。在 20 世纪 90 年代，基于环志的方法推测了黑颈鹤的东部、中部和西部迁徙路线，但明确的迁徙路线和迁徙停歇地尚未确定（吴至康等, 1993）。随着卫星跟踪技术的发展，之前的研究已经发现了四条黑颈鹤的迁徙路线。1998 年 2 月，研究人员在不丹东部跟踪了 1 只黑颈鹤幼鸟，跟踪数据表明该黑颈鹤幼鸟在春季迁徙时飞过喜马拉雅山，在日喀则停留一段时间后，到达申扎地区时信号消失。由不丹东部到申扎之间的直线距离约为 480 km（Archibald, 2005）。我国首次卫星跟踪黑颈鹤的迁徙是在 2005 年。研究人员对 4 只黑颈鹤进行跟踪，卫星跟踪结果显示在云南省昭通大山包国家级自然保护区和贵州省威宁草海国家级自然保护区越冬的黑颈鹤会飞到四川省若尔盖县进行繁殖，且迁徙的直线距离为 700-710 km，迁徙时间为 3-4 d（杨晓君等, 2005；Qian *et al.*, 2009）。2009 年 2-11 月，对在纳帕海湿地越冬的 5 只黑颈鹤进行了卫星跟踪，调查其在繁殖地与越冬地（纳帕海湿地）之间的迁徙路线。研究人员发现并确定了沙鲁里山地区（川西南），包括稻城、理塘、白玉、新龙县，为黑颈鹤的新繁殖区。纳帕海与稻城的距离（180 km）是鹤类迁徙路线中最短的迁徙距离之一（Liu *et al.*, 2012）。2018 年 7-10 月，王子建等在甘肃省盐池湾国家级自然保护区成功跟踪了 9 只黑颈鹤幼鸟，发现这些黑颈鹤会到西藏自治区林周地区越冬。平均迁徙距离约为 1500 km，平均迁徙时间 31.33 d，大柴旦湖是其迁徙途中的重要停歇地，它们在这的平均停留时间为 27.11 ± 8.43 d（Wang *et al.*, 2020）。

1.3.3 黑颈鹤栖息地选择研究

黑颈鹤的繁殖地为高原草甸、沼泽湿地、河湖岸边（Wu *et al.*, 2009）。它们通常在高海拔的草甸或湿地中的水生植物上营巢，且水体面积、人为干扰程度、水深、巢离岸边距离、巢的栖息地类型等都对黑颈鹤巢址选择有影响（Zhang *et al.*, 2017）。黑颈鹤喜欢在有浅水的、宽阔的沼泽地活动，其为了防御天敌，会选择淤泥基质较厚的浅水湿地筑巢。在育雏期，亲鹤会带雏鹤到水多草密的沼泽以利于隐蔽；在育幼期，亲鹤常带幼鹤在草甸上活动，来训练其觅食和飞行能力（李筑眉和李凤山, 2005）。

在贵州草海，黑颈鹤在越冬期的觅食栖息地主要分为莎草草甸、浅水沼泽、草地、玉米地和蔬菜地 5 种类型。其对不同类型栖息地的选择偏好不同，其对莎草草甸的选择偏好最大，对玉米地的选择偏好最小，对其余类型栖息地的选择会因地理位置不同而有差异。草海地区人类活动的加剧也是影响黑颈鹤栖息地选择的一个重要因素（李凤山，1999）。在云南大山包保护区内，黑颈鹤在农田、草地、沼泽和浅水边活动，对于这四种栖息地类型，黑颈鹤展示了不同的行为反应：农田和草地是其主要的觅食地。黑颈鹤通常会选择在低草地、浅水、人类活动干扰少，离夜栖地比较近的栖息地活动（Kong *et al.*, 2011）。雷桂林等在西藏林周卡孜水库研究了 11 个黑颈鹤越冬夜栖地，发现其更偏好开阔、温度适宜、无风的湿地（雷桂林等，2012）。

对黑颈鹤的栖息地进行预测，能够为未来黑颈鹤的保护管理提供重要依据。Han *et al.* (2018) 基于机器学习的方法，对黑颈鹤在气候变化的大环境下，在 2070 年的保护优先级进行了分析。预测结果表明，未来黑颈鹤在青藏高原腹地的繁殖栖息地面积可能会进一步扩大，但高适宜性的繁殖栖息地的面积在缩小。可以依据预测结果制定一个保护区网络，以应对环境变化对黑颈鹤的影响。基于物种分布模型对黑颈鹤的繁殖栖息地进行分析，已经成为我们了解其繁殖栖息地的一个重要手段。通过 7000 km 的样线调查和公开的数据，结合模型分析的方法，得到了黑颈鹤当前的保护空缺占预测的繁殖栖息地面积的 26.7%。横断山脉北部、昆仑山脉中部的北侧、帕米尔高原的部分地区、巴基斯坦高原的北部和兴都库什山脉的西部被认为是黑颈鹤重要的潜在繁殖栖息地（Han *et al.*, 2017）。

2 方法

2.1 研究区域

本研究的研究区域包括两部分。(1) 黑颈鹤若尔盖-大山包种群的研究区域：包括该种群个体的度夏地若尔盖地区、越冬地昭通地区及迁徙过程中经过的区域（图 2-1 右）。(2) 黑颈鹤青海湖-林芝种群的研究区域：包括该种群的度夏地青海湖地区和金子海湿地、越冬地林芝地区及迁徙过程中经过的区域（图 2-1 左）。

若尔盖湿地国家级自然保护区位于四川省北部 ($102^{\circ}29'-102^{\circ}59' E$, $33^{\circ}25'-34^{\circ}00' N$)，平均海拔 3500 m，总面积 166570.6 hm^2 。该区域属高原寒温带湿润气候，年降水量 656.8 mm (刘洋等, 2009)。大山包黑颈鹤国家级自然保护区位于云南省东北部 ($103^{\circ}14'-103^{\circ}23' E$, $27^{\circ}18'-27^{\circ}28' N$)，平均海拔 3100 m，总面积 19200 hm^2 。该区域属温带湿润型季风气候，年降水量 1125.1 mm (杨倩等, 2019)。以上这两个自然保护区均基于保护黑颈鹤为主而建立的。青海湖 ($99^{\circ}36'-100^{\circ}16' E$, $36^{\circ}32'-37^{\circ}15' N$) 地处青藏高原的东北部，西宁市的西北部，是中国最大的内陆湖泊和咸水湖，面积约为 4200 km^2 ，湖面海拔 3193 m，是多种水鸟，如斑头雁 (*Anser indicus*)、赤麻鸭 (*Tadorna ferruginea*) 和渔鸥 (*Larus ichthyaetus*) 的繁殖地 (史建全等, 2004)。林芝地区 ($92^{\circ}09'-98^{\circ}47' E$, $26^{\circ}52'-30^{\circ}40' N$) 位于西藏东南部，雅鲁藏布江中下游，平均海拔 3100 m。林芝属热带湿润和半湿润气候，植被覆盖率高，水资源丰富，年降水量 650-2000 mm，是多种珍稀野生动物，如雪豹 (*Panthera uncia*) 等猫科动物以及黑鹳和黑颈鹤等大型珍禽的分布区 (张敏, 2006)。

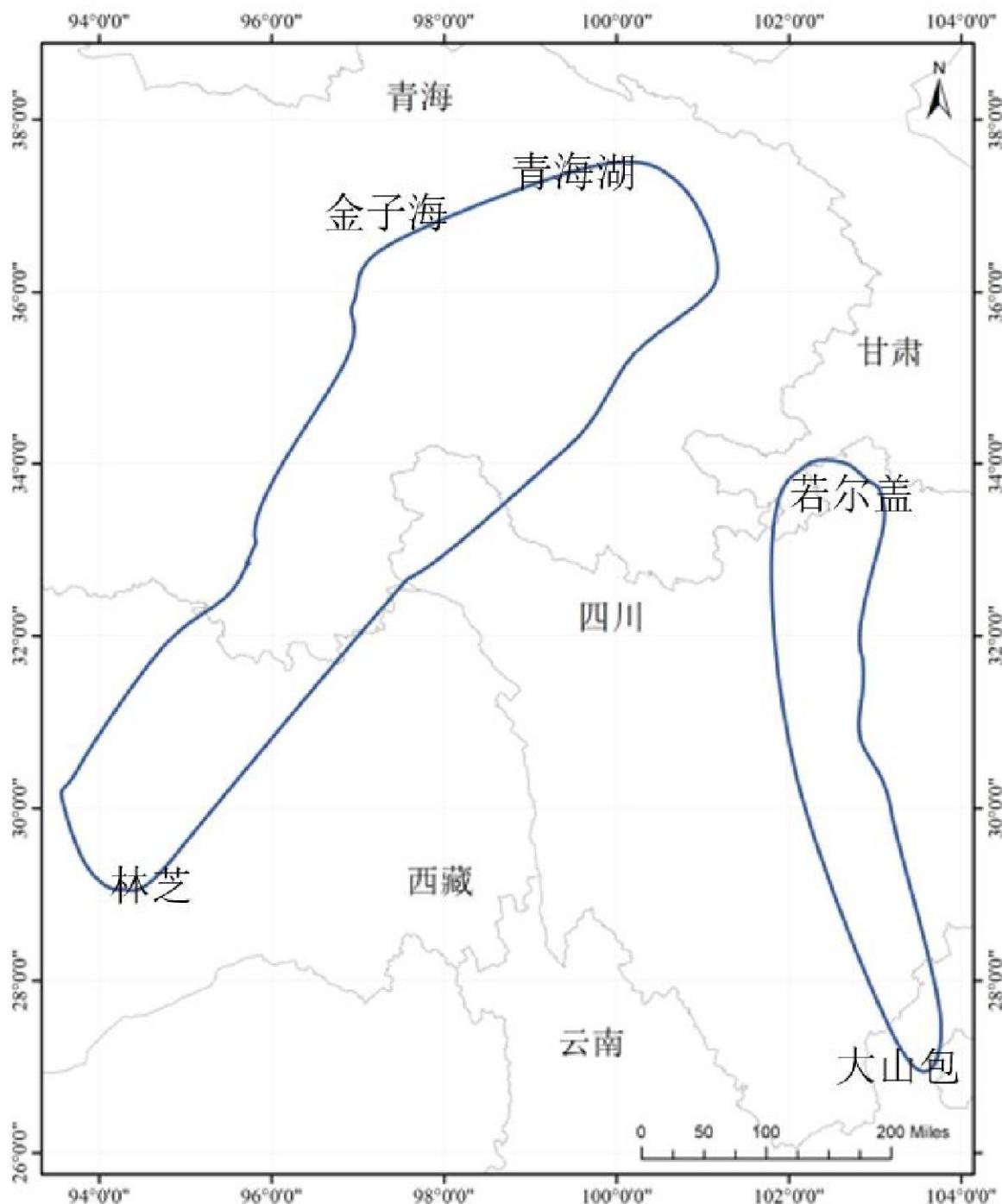


图 2-1 研究区域

Figure 2-1 Study area

2.2 数据收集

2.2.1 跟踪数据收集

在 2015 年 2-3 月和 2016 年 3 月，在黑颈鹤越冬地云南省大山包地区和西藏林芝地区使用翻弓法和地套法分别对 5 只和 7 只黑颈鹤进行安全捕捉，并佩戴 GPS-GSM 跟踪器。同时在被跟踪个体的腿上加装上红底白字的彩环，并当即放飞。跟踪器的生

生产厂家为湖南环球信士科技有限公司，型号为 HQBP3622 和 HQLN0421。HQBP3622 型跟踪器的安装方式为背负式，使用特氟龙条带将跟踪器绑定在黑颈鹤的背部，跟踪器的重量为 22 g。HQLN0421 型跟踪器以腿环卡扣的方式进行安装，根据跟踪个体腿部粗细情况而使用不同内径的卡扣，腿环内径在 14-24 mm 之间，本研究使用内径为 20-22 mm 的卡扣，重量为 25-45 g。两种跟踪器的重量均小于黑颈鹤体重的 3%，不会影响他们的正常活动 (Bodey *et al.*, 2018)。这两种类型的跟踪器均采用 GPS 进行卫星定位，GSM 进行信号传输。供电方式为太阳能供电，内置锂电池续航。每条定位信息包括经度、纬度、瞬时速度、海拔高度、温度、精度、航向、电压共 8 项。跟踪数据的精度被分为 5 个等级：A 级误差 (0-5 m)、B 级误差 (5-10 m)、C 级误差 (10-20 m)、D 级误差 (20-100 m) 和无效数据 (无法使用)。

春季迁徙的起始位点是在越冬地的最后一个位点，春季迁徙的结束位点是到达度夏地的第一个位点。与此相对应的，秋季迁徙的起始位点是在度夏地的最后一个位点，秋季迁徙的结束位点是到达越冬地的第一个位点 (Mi *et al.*, 2018)。基于以上信息，可以确定迁徙距离和迁徙时间。迁徙距离表示跟踪黑颈鹤在度夏地与越冬地之间的迁徙路线长度，迁徙时间表示黑颈鹤往返于度夏地与越冬地之间的时间。迁徙直线率等于迁徙实际距离和度夏地与越冬地间直线距离的比值 (Abrahms *et al.*, 2017; Buechley *et al.*, 2018)。迁徙停歇地被定义为鸟类迁徙过程中停留时间多于两天的地点，夜栖地被定义为迁徙过程中停留时间少于两天的地点 (Kölzsch *et al.*, 2015)。速度等于零的跟踪位点被定义为停歇位点，速度大于 10 km/h 的跟踪位点被定义为迁飞位点 (Mi *et al.*, 2018)。

2.2.2 环境数据收集

本研究基于清华大学地球系统科学系的 30 m 分辨率的 2017 年全球土地覆盖数据 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)，对黑颈鹤跟踪个体的栖息地利用进行初步分析。本文考虑到可能影响黑颈鹤度夏及越冬栖息地选择的环境因子，选择了 22 个空间分辨率为 1 km 的环境因子来评价它们对栖息地选择的重要性。包括海拔、坡度、坡向 3 个地形因子和 19 个生物气候因子。其中 19 个生物气候因子和海拔数据均来源于 WorldClim 数据库 (<http://www.worldclim.org>)，坡度和坡向数据由海拔数据中提取，详见表 2-1。

表 2-1 环境变量列表
Table 2-1 List of environmental variable

环境变量	中文名称	来源
Bio_1	年均温 (°C)	WorldClim
Bio_2	昼夜温差月均值 (最高温-最低温) (°C)	WorldClim
Bio_3	等温性 (Bio_2/Bio_7) (*100°C)	WorldClim
Bio_4	温度季节性 (标准差*100°C)	WorldClim
Bio_5	最暖月份最高温 (°C)	WorldClim
Bio_6	最冷月份最低温 (°C)	WorldClim
Bio_7	年温变化范围 (Bio_5-Bio_6) (°C)	WorldClim
Bio_8	最湿季度平均温 (°C)	WorldClim
Bio_9	最干季度平均温 (°C)	WorldClim
Bio_10	最暖季度平均温 (°C)	WorldClim
Bio_11	最冷季度平均温 (°C)	WorldClim
Bio_12	年降水量 (mm)	WorldClim
Bio_13	最湿月份降水量 (mm)	WorldClim
Bio_14	最干月份降水量 (mm)	WorldClim
Bio_15	降水季节性 (变化方差) (mm)	WorldClim
Bio_16	最湿季度降水量 (mm)	WorldClim
Bio_17	最干季度降水量 (mm)	WorldClim
Bio_18	最暖季度降水量 (mm)	WorldClim
Bio_19	最冷季度降水量 (mm)	WorldClim
Altitude	海拔 (m)	WorldClim
Slope	坡度 (°)	由海拔数据提取
Aspect	坡向	由海拔数据提取

注：所有环境数据均来自网址 <http://www.worldclim.org>。

2.3 数据分析

2.3.1 数据分析使用的主要软件

本研究将主要使用 ArcGIS v10.2、ArcView GIS 3.3、MaxEnt v3.4.1 和 R v3.6.3 四种软件进行数据分析。

ArcGIS v10.2 是数字地图制图的应用，包含了全球范围内的底图、地图数据，可以用于创建 Web 地图、发布 GIS 服务、共享地图、数据和应用程序。本研究使用 ArcGIS v10.2 绘制地图。ArcView GIS 3.3 通过核密度估计法来计算动物的活动面积。MaxEnt v3.4.1，MaxEnt 软件基于最大熵原理被开发，具有物种的分布预测和生境评价的功能。软件中的自检验功能可对模型预测的结果进行自检。本研究使用该软件结合 ArcGIS v10.2 对影响黑颈鹤度夏期和越冬期栖息地选择的环境因子进行排序。R v3.6.3，R 是基于 R 语言的一种开源的数理统计软件，具有完善的数据类型，可以实现经典的、现代的统计方法。本研究使用 R 语言中的程序包对卫星跟踪数据进行分

析。

2.3.2 数据分析主要步骤

对于黑颈鹤的迁徙模式研究，我们使用 ArcGIS 软件绘制出其迁徙路线，并通过“计算几何”功能得到迁徙实际距离。通过统计迁徙时间、迁徙直线率等参数，来比较两个黑颈鹤种群跟踪个体的迁徙模式。用迁徙途中停歇位点在保护区内的比例来定义迁徙路线上 的 保 护 效 率（World Database on Protected Areas: <https://www.iucn.org/theme/protected-areas/our-work/world-database-protected-areas>）。

对于黑颈鹤栖息地利用情况的研究，根据跟踪个体成幼及在 5 月中旬至 6 月中旬间的活动范围确定不同个体在不同年周期是否参与繁殖，利用 ArcView 软件计算跟踪个体的活动区和核域。基于全球土地覆盖数据和跟踪数据，使用 ArcGIS 软件中的空间分析工具中的“多值提取至点”功能，得到度夏地、越冬地和迁徙停歇地的栖息地利用情况，进而比较两个黑颈鹤种群栖息地利用情况的异同。用 R 软件对选择的环境因子进行 Spearman Test 测试，去除相关性较高的变量 ($|r| > 0.9$) (Costa *et al.*, 2010)。最终保留了包括 12 个生物因子 (Bio1-Bio6, Bio8, Bio9, Bio12, Bio14, Bio15, Bio17) 和海拔、坡度和坡向共 15 个环境因子。对这 15 个环境变量进行处理，得到 15 个分辨率为 1000 m，范围相同的环境变量图层。使用 R 软件中的“wallace”程序包对度夏地和越冬地速度为零的跟踪位点以 1000 m 的距离进行筛选，以避免位点间存在的空间自相关影响模型分析 (Betts *et al.*, 2009)。筛选得到的位点中，将 75% 的分布位点作为训练集来建立模型，25% 的分布位点作为测试集来检验模型。运行 MaxEnt 软件，将物种分布数据以及筛选完的环境变量导入到软件中，模型设置 500 次循环，重复运行 5 次。使用 MaxEnt 软件自带的 Jack-knife 法对变量的重要性进行排序 (刘振生等, 2013)。

3 结果

3.1 数据收集结果

2015 年 2-3 月在云南省大山包地区跟踪了 5 只黑颈鹤，2016 年 3 月在西藏林芝地区跟踪了 7 只黑颈鹤，共跟踪了 12 只黑颈鹤，获得跟踪数据 113158 条，其中有效数据 110130 条，数据有效率为 97.32%，累计跟踪了 5624 d。其中 1 号个体跟踪时为 1 龄幼鸟，在春季迁徙时失联；2 号个体为受救助的成体，在大山包湿地二次被救助，后不久死亡；6 号个体跟踪不久后，跟踪器出现故障，该个体一直存活；7 号个体跟踪不久后，跟踪器脱落，根据彩环确认该个体多次在度夏地青海湖和越冬地林芝地区被观察记录，此 4 只个体的跟踪数据不做分析。黑颈鹤 11 号个体数据缺失，只使用 2017 年春季迁徙之前的数据用于分析。用于分析的 8 只跟踪个体中，黑颈鹤 12 号个体获得的数据量最多，跟踪的时间最长，获得 27511 条有效数据，跟踪了 1153 d；黑颈鹤 9 号个体获得的数据量最少，跟踪的时间最短，跟踪了 81 d，获得 1857 条有效数据（见表 3-1）。

基于卫星跟踪揭示两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用

表 3-1 黑颈鹤 GPS-GSM 跟踪信息

Table 3-1 The Black-necked Crane GPS-GSM tracking information

编号	跟踪起始时间	跟踪结束时间	跟踪天数 (d)	跟踪数据 (条)	有效数据 (条)	成幼	起始点
BNC1	2015.2.14	2015.5.7	83	1931	1920	幼	大山包
BNC2	2015.2.14	2015.2.25	12	226	92	成	大山包
BNC3	2015.2.14	2017.11.18	1009	24069	24049	成	大山包
BNC4	2015.3.17	2017.6.23	830	18374	18350	成	大山包
BNC5	2015.3.20	2017.11.20	977	17101	14878	成	大山包
BNC6	2016.3.4	2016.3.9	6	73	73	幼	林芝
BNC7	2016.3.6	2016.3.10	5	103	103	成	林芝
BNC8	2016.3.7	2016.11.6	245	5709	5700	幼	林芝
BNC9	2016.3.7	2016.5.26	81	1912	1857	成	林芝
BNC10	2016.3.11	2016.10.5	209	4890	4871	成	林芝
BNC11	2016.3.10	2018.12.18	1014	11182	10726	成	林芝
BNC12	2016.3.13	2019.5.9	1153	27588	27511	幼	林芝

3.2 两个黑颈鹤种群迁徙模式研究

3.2.1 黑颈鹤若尔盖-大山包种群迁徙模式研究

在云南省大山包湿地越冬的 3 只黑颈鹤跟踪个体（BNC3、BNC 4、BNC 5），均迁徙到四川省若尔盖湿地度夏，春季迁徙和秋季迁徙的路径相似（图 3-1）。黑颈鹤若尔盖-大山包种群的 3 只个体均完整的跟踪了 2015-2017 年的 3 次春季迁徙和 2015-2016 年的 2 次秋季迁徙。3 月 19 日-4 月 12 日，3 只黑颈鹤开始进行春季迁徙，它们从越冬地到度夏地的迁徙距离为 755.0 ± 64.8 km，迁徙时间为 4.2 ± 3.9 d，迁徙直线率为 0.92 ± 0.06 ；11 月 1 日-12 日，3 只黑颈鹤开始秋季迁徙，它们从度夏地到越冬地的迁徙距离为 774.5 ± 48.0 km，迁徙时间为 7.0 ± 2.9 d，迁徙直线率为 0.9 ± 0.07 （表 3-2）。黑颈鹤跟踪个体春季和秋季迁徙的迁徙距离（ $p=0.7$ ）、迁徙时间（ $p=0.19$ ）和迁徙直线率（ $p=0.49$ ）均无显著性差异。

黑颈鹤若尔盖-大山包种群春季迁徙和秋季迁徙分别有 11 处和 8 处迁徙停歇地和夜栖地（表 3-3）。其中四川省红原县的白河是跟踪个体在迁徙过程中最重要的迁徙停歇地，5 号个体在 2015-2017 年的 3 次春季迁徙中，在此停留了 5.7 ± 5.2 d；3 号和 4 号个体在 2015-2016 年及 5 号个体在 2015 年共 5 次秋季迁徙中，在此停留了 4.2 ± 2.7 d。本研究发现该黑颈鹤种群在迁徙途中，只有 13.5%（96/709）的停歇地和夜栖地的跟踪位点在保护区内（图 3-2）。迁徙途中跟踪个体在 4 个保护区停歇：（1）甘肃省黄河首曲自然保护区（7/96，7.3%），累计停歇了 1 d；（2）四川省日干乔湿地（27/96，28.1%），累计停歇了 2 d；（3）四川省大熊猫栖息地（包括卧龙、四姑娘山和喇叭河等自然保护区）（60/96，62.5%），累计停歇了 9 d；（4）四川省美姑大风顶自然保护区（2/96，2.1%），累计停歇了 1 d。然而，迁徙过程中最重要的迁徙停歇地：白河却不在保护区内。

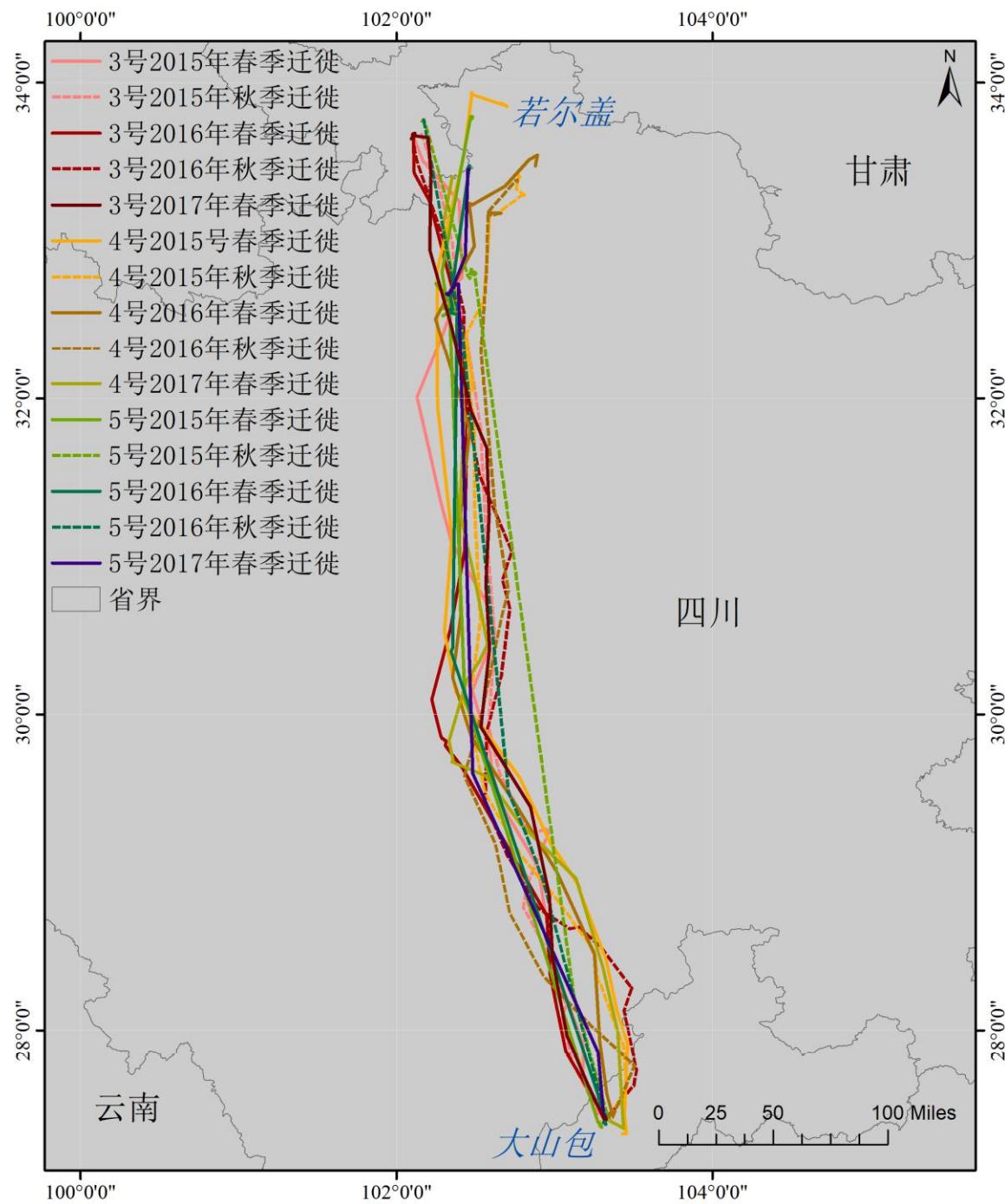


图 3-1 黑颈鹤若尔盖-大山包迁徙路线

Figure 3-1 Migration routes of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population

结果

表 3-2 黑颈鹤若尔盖-大山包种群迁徙参数

Table 3-2 Migration parameters of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population

编号	迁离时间	抵达时间	迁徙时间 (d)	迁徙距离 (km)	迁徙直线率
春季迁徙					
BNC03	2015.3.20	2015.3.22	3	741.9	0.94
	2016.3.19	2016.3.21	3	724.6	0.97
	2017.3.22	2017.3.23	2	728.8	0.96
BNC04	2015.3.30	2015.4.1	3	789.2	0.92
	2016.3.19	2016.3.20	2	738.0	0.91
	2017.3.19	2017.3.20	2	726.4	0.92
BNC05	2015.4.12	2015.4.26	15	927.0	0.77
	2016.4.3	2016.4.6	4	710.1	0.95
	2017.4.7	2017.4.10	4	709.3	0.95
秋季迁徙					
BNC03	2015.11.12	2015.11.15	4	846.8	0.83
	2016.11.12	2016.11.16	5	742.8	0.93
BNC04	2015.11.9	2015.11.14	6	831.2	0.81
	2016.11.6	2016.11.12	7	754.1	0.88
BNC05	2015.11.1	2015.11.13	13	758.0	0.94
	2016.11.5	2016.11.11	7	714.0	0.99

基于卫星跟踪揭示两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用

表 3-3 黑颈鹤若尔盖-大山包种群迁徙途中的停歇地和夜栖地

Table 3-3 Stopover and roosting sites used by the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population during migration

地点	经度/纬度(°)	累计停歇时间(天数/个体数量)	栖息地利用类型	迁徙时期	栖息类型
昭觉县	103.04/28.06	1/1	草甸沼泽	秋季	夜栖地
美姑县	103.12/28.22	1/1	草甸沼泽	秋季	夜栖地
雷波县	103.15/28.65	2/2	草甸沼泽	秋季	夜栖地
甘洛县	102.86/28.72	1/1	草甸沼泽	秋季	夜栖地
峨边县	103.16/28.88	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
汉源县	102.61/29.63	3/3	草甸沼泽	春季	夜栖地
荥经县	102.32/29.83	2/2	草甸沼泽	春季、秋季	夜栖地
天全县	102.43/30.09	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
康定县	102.36/30.42	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
宝兴县	102.67/30.85	3/2	草甸沼泽	秋季	停歇地、夜栖地
马尔康县	102.46/31.92	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
白河	102.33/32.58	38/3	河谷沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
红原县	102.47/32.79	7/3	河谷沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
若尔盖县	102.48/33.23	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
玛曲县	102.11/33.43	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地
黑河	102.48/33.93	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地

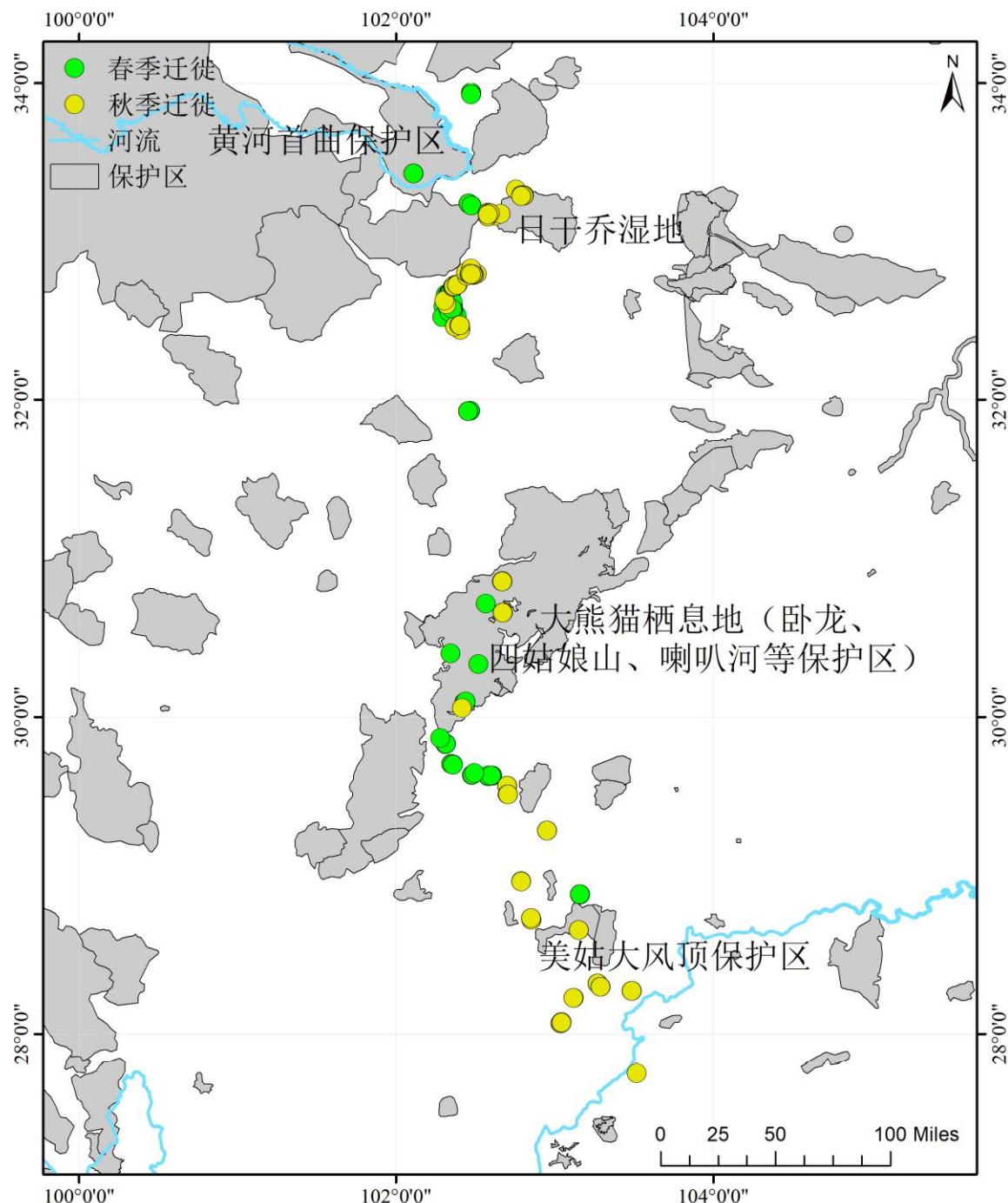


图 3-2 黑颈鹤若尔盖-大山包种群迁徙停歇位点的空间分布及与保护区的空间关系
 Figure 3-2 Spatial distribution of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population stopover and roosting points during migration and the locations of protected areas within the study areas

3.2.2 黑颈鹤青海-林芝种群迁徙模式研究

在西藏自治区林芝越冬的 5 只黑颈鹤跟踪个体 (BNC 8、BNC 9、BNC 10、BNC 11、BNC 12)，4 只个体 (BNC 8、BNC 9、BNC 10、BNC12) 迁徙到青海省青海湖地区度夏，1 只个体迁徙到青海省金子海湿地度夏 (BNC11) (图 3-3)。黑颈鹤青海-林芝种群的 3 只个体 (BNC 8、BNC9、BNC10) 跟踪了 2016 年的 1 次春季迁徙，1 只(11 号个体)个体跟踪了 2016-2017 年的 2 次春季迁徙和 2016 年的 1 次秋季迁徙，1 只个体跟踪了 2016-2019 年的 4 次春季迁徙和 2016-2018 年的 3 次秋季迁徙。3 月 12 日-4 月 10 日，5 只黑颈鹤开始进行春季迁徙，它们从越冬地到度夏地的迁徙距离为 1182.5 ± 90.4 km，迁徙时间为 8.7 ± 4.6 d，迁徙直线率为 0.80 ± 0.07 ；9 月 26 日-10 月 31 日，2 只黑颈鹤开始秋季迁徙，它们从度夏地到越冬地的迁徙距离为 1455.7 ± 138.0 km，迁徙时间为 30.0 ± 10.6 d，迁徙直线率为 0.66 ± 0.05 (表 3-4)。黑颈鹤跟踪个体春季和秋季迁徙的迁徙距离 ($p=0.002$)、迁徙时间 ($p=0.001$) 和迁徙直线率 ($p=0.009$) 均具有显著性差异。

黑颈鹤青海-林芝种群春季迁徙和秋季迁徙分别有 12 处和 14 处迁徙停歇地和夜栖地 (表 3-5)。西藏自治区的巴松措湖地区是跟踪个体在春季迁徙过程中重要的迁徙停歇地，跟踪的 9 只次迁徙路线中的 7 只次在此停留了 4.4 ± 3.7 d；青海省的沙珠玉河流域是跟踪个体在秋季迁徙过程中重要的迁徙停歇地，跟踪的 4 只次迁徙路线中的 3 只次在此停留了 26.3 ± 10.7 d。本研究发现该黑颈鹤种群在迁徙途中，只有 17.7% (516/2914) 的停歇地和夜栖地的跟踪位点在保护区内 (图 3-4)。迁徙途中跟踪个体在三个保护区停歇：(1) 西藏自治区雅鲁藏布大峡谷自然保护区 (66/516, 12.8%)，累计停歇了 9 d；(2) 青海省三江源自然保护区 (432/516, 83.7 %)，累计停歇了 43 d；(3) 四川省长沙贡玛自然保护区 (18/516, 3.5%)，累计停歇了 4 d。然而，迁徙过程中最重要的迁徙停歇地：巴松措湖和沙珠玉河，却不在保护区内。

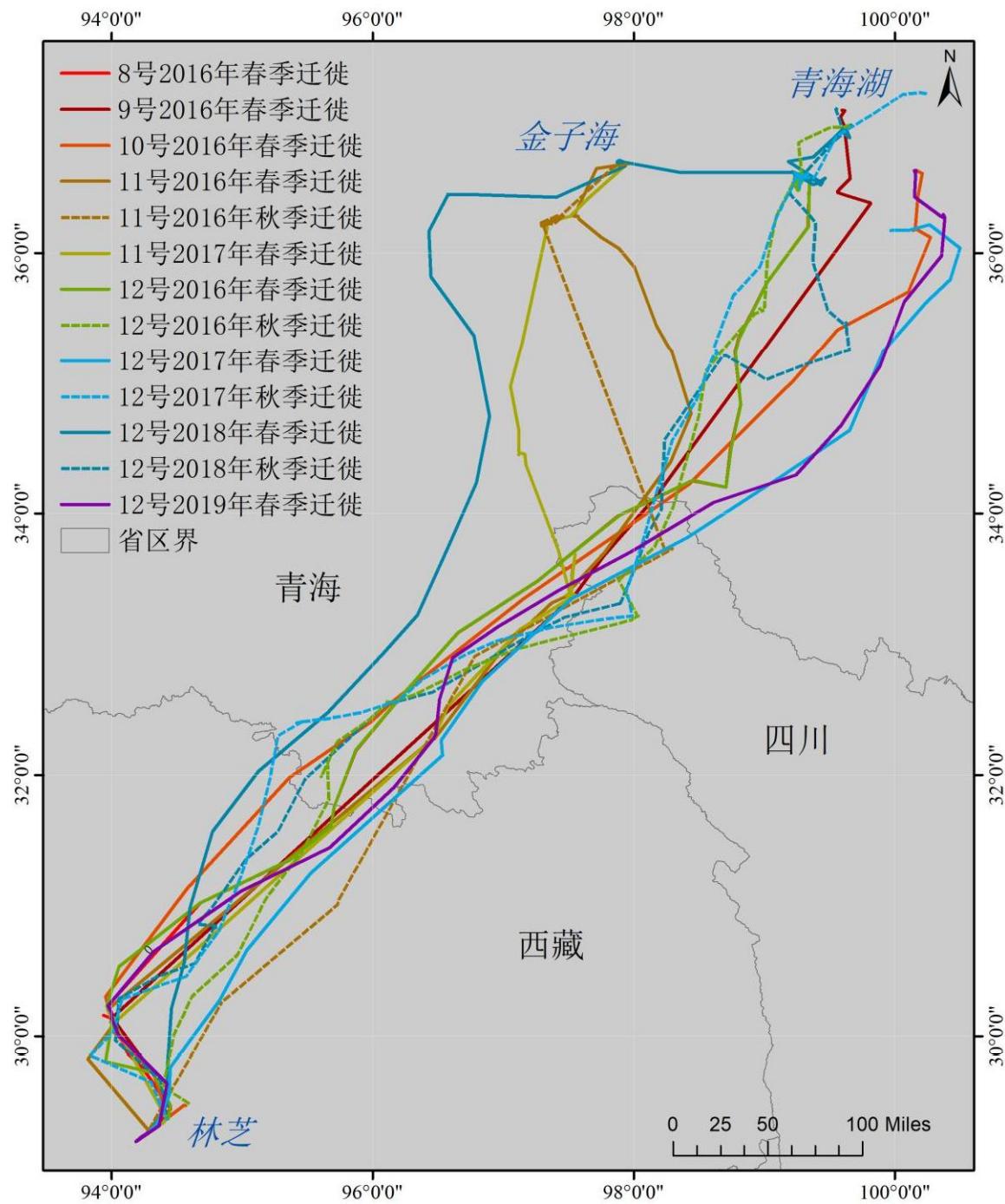


图 3-3 黑颈鹤青海-林芝迁徙路线

Figure 3-3 Migration routes of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population

基于卫星跟踪揭示两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用

表 3-4 黑颈鹤青海-林芝种群迁徙参数

Table 3-4 Migration parameters of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population

编号	迁离时间	抵达时间	迁徙时间 (d)	迁徙距离 (km)	迁徙直线率
春季迁徙					
BNC08	2016.4.10	2016.4.17	8	1169.3	0.78
BNC09	2016.4.8	2016.4.13	6	1135.2	0.86
BNC10	2016.4.1	2016.4.4	4	1114.0	0.85
BNC11	2016.3.12	2016.3.27	16	1274.4	0.70
	2017.3.19	2017.3.31	13	1218.2	0.72
BNC12	2016.4.8	2016.4.17	10	1173.7	0.78
	2017.3.22	2017.3.24	3	1035.2	0.90
	2018.3.28	2018.4.10	14	1367.3	0.72
	2019.4.3	2019.4.6	4	1155.5	0.85
秋季迁徙					
BNC11	2016.10.31	2016.11.20	21	1294.0	0.69
BNC12	2016.9.26	2016.11.9	46	1646.6	0.58
	2017.10.12	2017.11.13	33	1522.1	0.67
	2018.10.24	2018.11.12	20	1360.1	0.72

结果

表 3-5 黑颈鹤青海-林芝种群迁徙途中的停歇地和夜栖地

Table 3-5 Stopover and roosting sites used by the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population during migration

地点	经度/纬度 (°)	累计停歇时间 (天数/个体数量)	栖息地利用类型	迁徙时期	栖息类型
巴松措湖	94.00/30.12	32/5	湖边沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
雄曲	94.83/30.25	9/2	河谷沼泽	秋季	停歇地、夜栖地
达曲	95.73/31.03	1/1	河谷沼泽	秋季	夜栖地
布托湖	95.68/31.60	2/2	湖边沼泽	春季	夜栖地
囊谦县	95.65/32.07	1/1	草甸沼泽	秋季	夜栖地
昂曲	95.45/32.40	1/1	河谷沼泽	秋季	夜栖地
扎曲	96.27/32.43	8/3	河谷沼泽	春季、秋季	夜栖地
玉树市	96.78/32.90	1/1	草甸沼泽	秋季	夜栖地
子曲	96.08/32.93	1/1	河谷沼泽	春季	夜栖地
雅鲁江	97.75/33.30	11/3	河谷沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
麻母河	98.28/33.73	1/1	河谷沼泽	秋季	夜栖地
玛多县	98.70/34.20	2/2	草甸沼泽	春季	夜栖地
多曲河	97.12/34.45	1/1	河谷沼泽	春季	夜栖地
冬给措纳湖	98.67/35.22	2/1	湖边沼泽	秋季	夜栖地
大河坝河	99.63/35.45	1/1	河谷沼泽	秋季	夜栖地
察汗乌苏河	98.98/35.57	1/1	河谷沼泽	秋季	夜栖地
茫拉河	100.42/35.78	1/1	河谷沼泽	春季	夜栖地
更嘎湖	100.15/36.18	1/1	湖边沼泽	春季	夜栖地
柴达木河	97.30/36.32	12/2	湖边沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
沙珠玉河	99.37/36.55	92/2	湖边沼泽	春季、秋季	停歇地、夜栖地
都兰县	97.95/36.68	1/1	草甸沼泽	春季	夜栖地

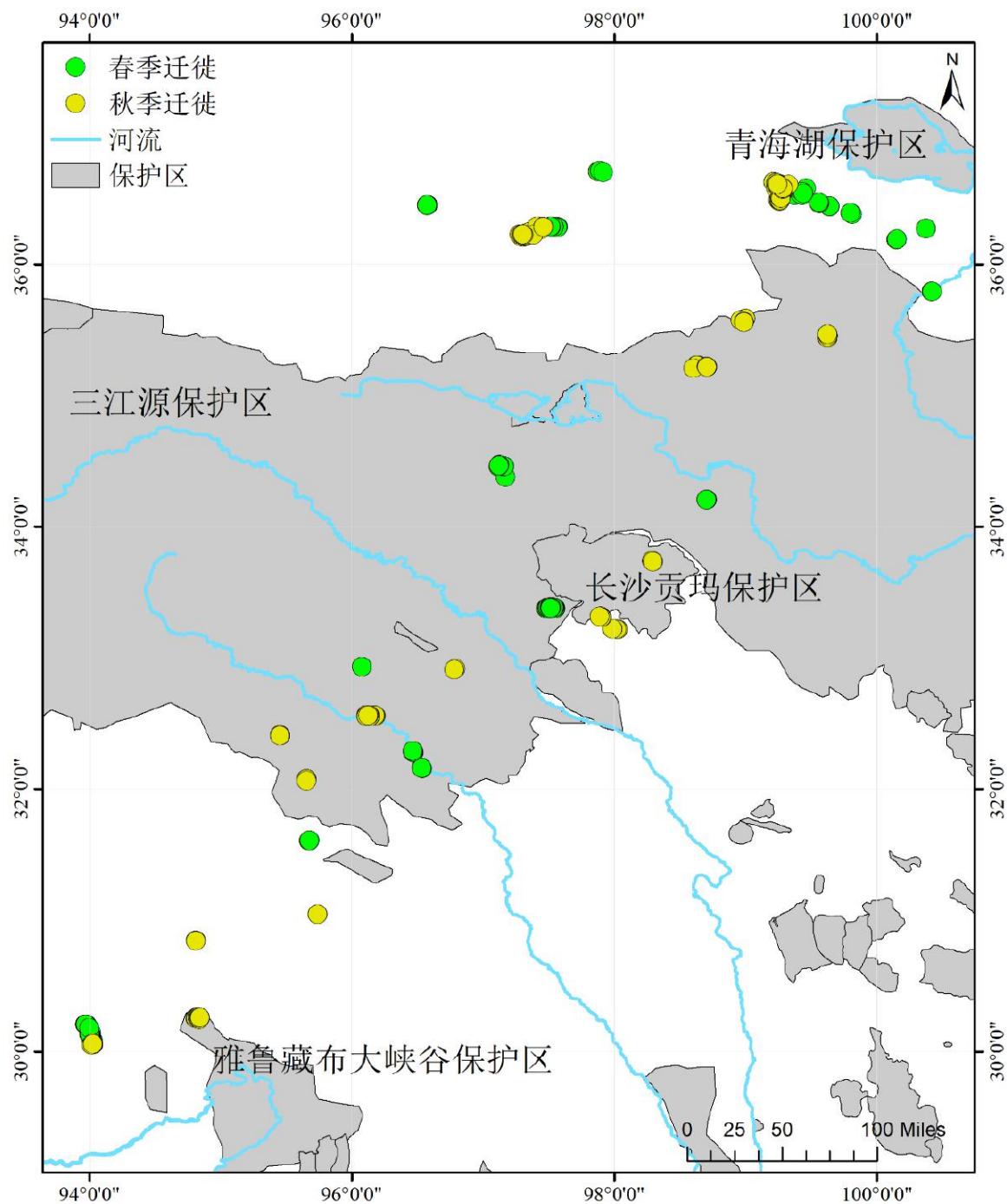


图 3-4 黑颈鹤青海-林芝种群迁徙停歇位点的空间分布及与保护区的空间关系
Figure 3-4 Spatial distribution of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population stopover and roosting points during migration and the locations of protected areas within the study areas

3.3 两个黑颈鹤种群栖息地利用研究

3.3.1 黑颈鹤若尔盖-大山包种群活动区及栖息地选择研究

本研究用 95% 核密度估计法 (95% KDE) 计算了黑颈鹤若尔盖-大山包种群跟踪个体度夏期和越冬期的活动区，用 60% 核密度估计法 (60% KDE) 计算跟踪个体度夏期和越冬期的核域。夏季繁殖个体 (BNC3) 的平均活动区面积为 $1.4 \pm 0.8 \text{ km}^2$ ($n=3$)，非繁殖个体 (BNC4、BNC5) 的平均活动区面积为 $277.5 \pm 254.9 \text{ km}^2$ ($n=4$)。不同个体间多年平均活动区面积差异较大：BNC3 (1.4 km^2 , $n=3$)、BNC4 (26.0 km^2 , $n=2$) 和 BNC5 (528.9 km^2 , $n=2$)。夏季繁殖个体的平均核域面积为 $0.2 \pm 0.1 \text{ km}^2$ ($n=3$)，非繁殖个体的平均核域面积为 $46.9 \pm 43.7 \text{ km}^2$ ($n=4$)。不同个体间多年平均核域面积差异也较大：BNC3 (0.2 km^2 , $n=2$)、BNC4 (3.4 km^2 , $n=2$) 和 BNC5 (90.3 km^2 , $n=2$)。冬季当年繁殖个体 (BNC3) 的平均活动区面积为 $0.7 \pm 0.2 \text{ km}^2$ ($n=2$)，当年非繁殖个体 (BNC4、BNC5) 的平均活动区面积为 $36.3 \pm 19.5 \text{ km}^2$ ($n=4$)。不同个体间多年平均活动区面积差异较大：BNC3 (0.7 km^2 , $n=2$)、BNC4 (47.1 km^2 , $n=2$) 和 BNC5 (25.5 km^2 , $n=2$)。冬季当年繁殖个体的平均核域面积为 $0.2 \pm 0.1 \text{ km}^2$ ($n=2$)，当年非繁殖个体的平均核域面积为 $4.9 \pm 2.5 \text{ km}^2$ ($n=4$)。不同个体间平均核域面积差异也较大：BNC3 (0.2 km^2 , $n=2$)、BNC4 (6.1 km^2 , $n=2$) 和 BNC5 (3.6 km^2 , $n=2$) (表 3-6)。综上可知，夏季和冬季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均远小于非繁殖个体。

将该种群跟踪个体度夏期、迁徙期和越冬期的跟踪位点与土地覆盖数据叠加，可初步得到其栖息地选择情况。跟踪个体在迁徙期利用的主要生境为草地 (68.6%) 和水体 (13.4%)；在度夏期利用的主要生境为草地 (75.0%) 和湿地 (21.8%)；在越冬期利用的主要生境为草地 (45.5%)、耕地 (26.1%) 和水体 (24.8%)。可以看出黑颈鹤在各时期均偏好草地类型的栖息地，在越冬期对耕地的利用较频繁 (图 3-5)。

筛选后使用跟踪个体度夏地的 180 个跟踪位点和越冬地的 65 个跟踪位点进行 MaxEnt 建模，确定了度夏地和越冬地栖息地选择的环境因子的重要性排序 (图 3-6)。模型结果显示，海拔、坡度和降水季节性是影响该种群黑颈鹤度夏栖息地选择的 3 个重要环境因子，其余影响黑颈鹤度夏栖息地选择的因子分别为年平均气温，温度季节性，最暖月份最高气温和年降水量等。昼夜温差月均值和等温性是影响该种群黑颈鹤越冬栖息地选择的 2 个重要环境因子，其余影响黑颈鹤越冬栖息地选择的因子分别海拔，年平均气温，最干季度平均气温和降水季节性等。

基于卫星跟踪揭示两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用

表 3-6 黑颈鹤若尔盖-大山包种群夏季和冬季活动区及核域面积

Table 3-6 Home range and core area of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population in summer and winter

时期	跟踪位点数量	活动区面积 (km ² , 95% KDE)	核域面积 (km ² , 60% KDE)
夏季			
3 号 2015 年夏季			
3 号 2015 年夏季	5567	0.4	0.1
3 号 2016 年夏季	5610	2.4	0.3
3 号 2017 年夏季	5655	1.4	0.2
4 号 2015 年夏季	5283	34.0	4.4
4 号 2016 年夏季	5042	18.0	2.5
5 号 2015 年夏季	3660	587.4	84.1
5 号 2016 年夏季	3953	470.4	96.5
冬季			
3 号 2015 年冬季			
3 号 2015 年冬季	2958	0.5	0.1
3 号 2016 年冬季	2999	0.9	0.2
4 号 2015 年冬季	2974	33.9	4.8
4 号 2016 年冬季	3019	60.3	7.3
5 号 2015 年冬季	2279	6.7	0.8
5 号 2016 年冬季	1734	44.4	6.5

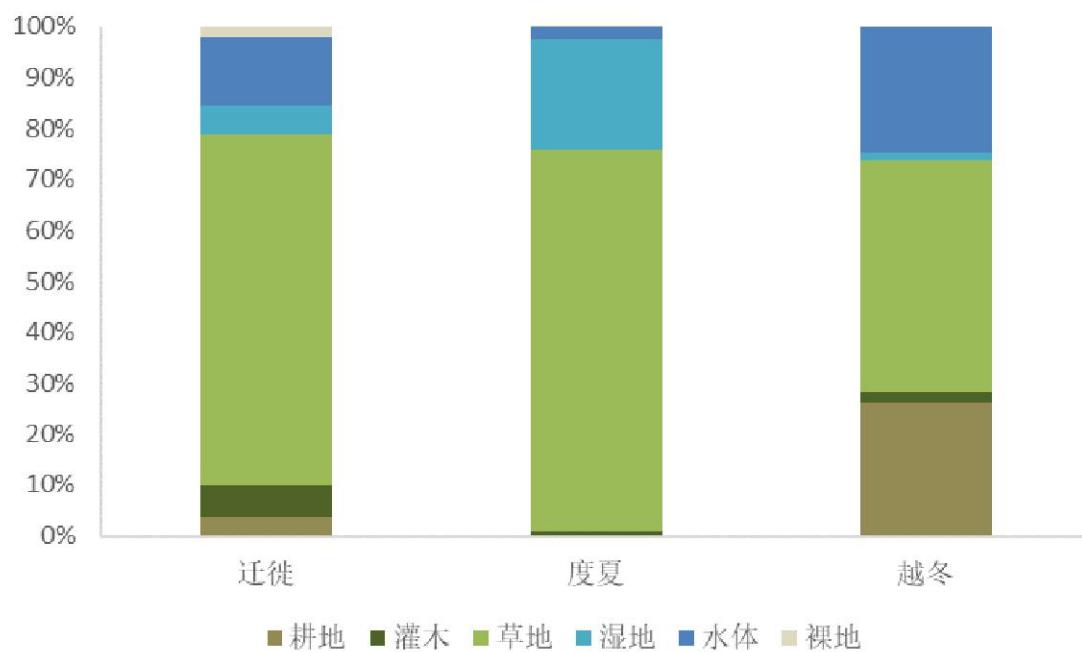
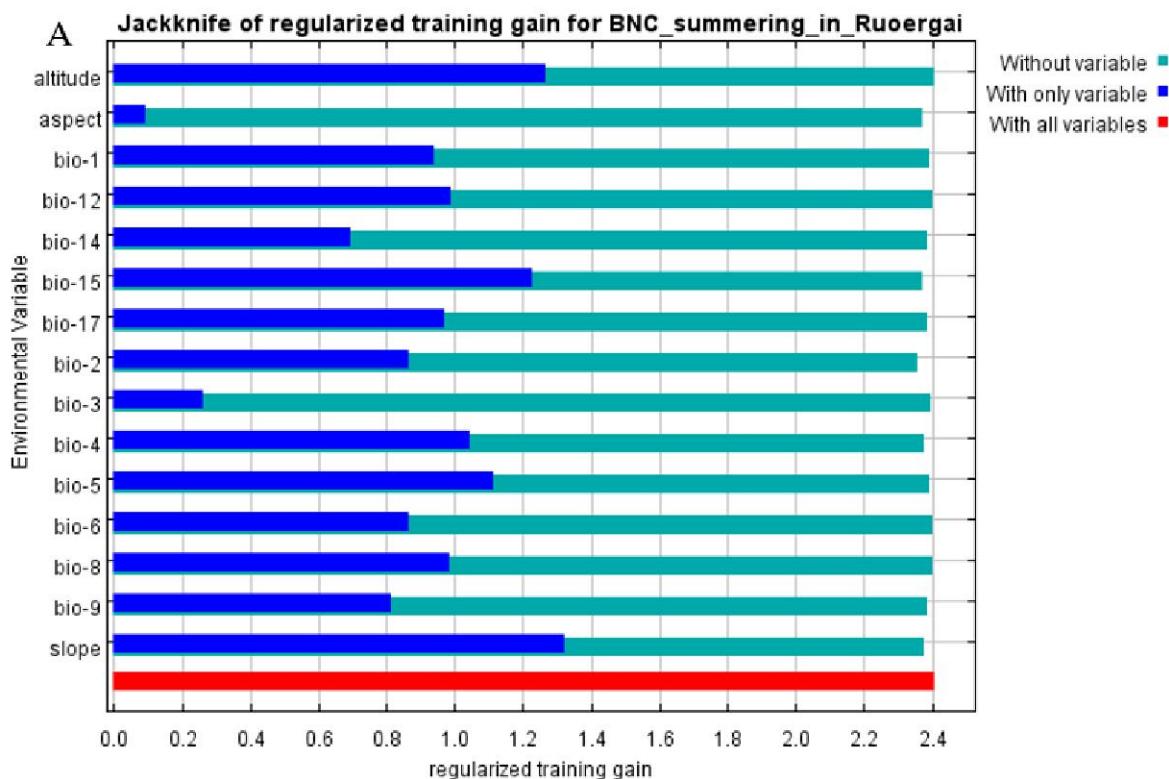


图 3-5 黑颈鹤若尔盖-大山包种群栖息地利用情况

Figure 3-5 Habitat use of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population.



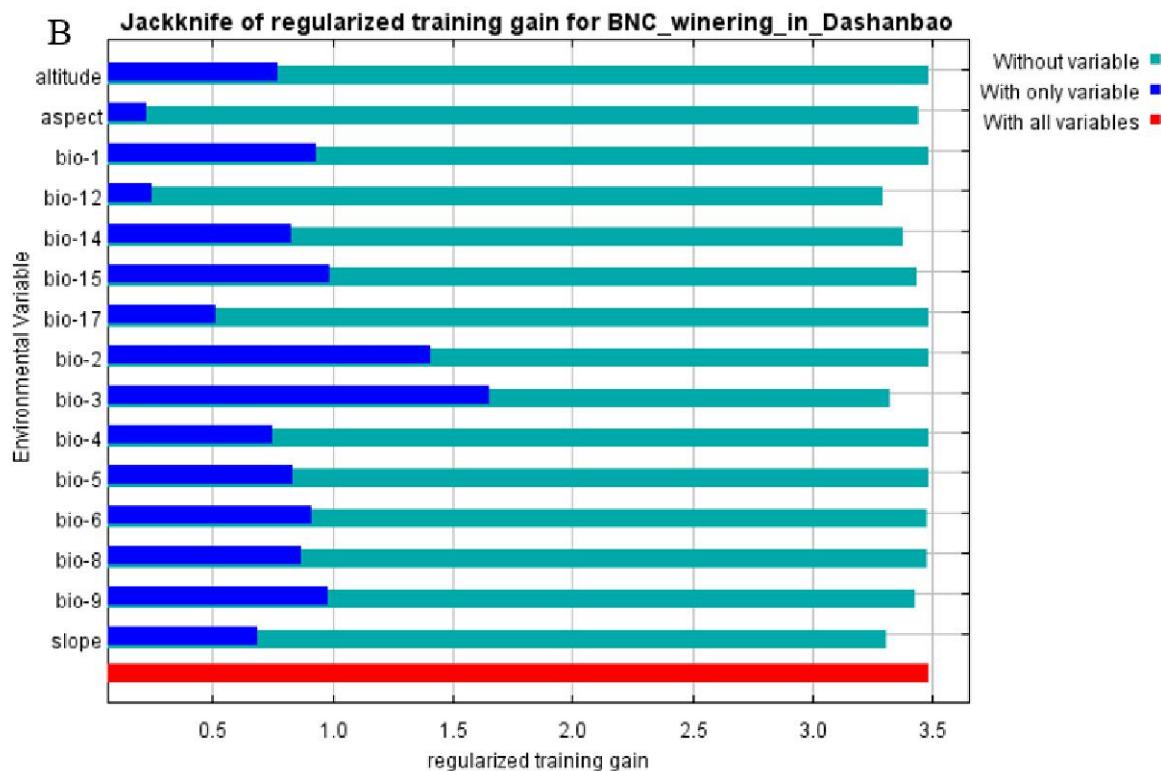


图 3-6 黑颈鹤若尔盖-大山包种群栖息地选择的环境因子重要值排序 (A: 夏季, B: 冬季)

Figure 3-6 The relative importance of environmental factors about the habitat use of the Ruoergai-Dashanbao Black-necked Crane population (A: summer and B: winter)

3.3.2 黑颈鹤青海-林芝种群活动区及栖息地选择研究

对黑颈鹤青海-林芝种群跟踪个体的活动区（95% KDE）和核域（60% KDE）的计算结果表明，夏季繁殖个体（BNC10、BNC11）的平均活动区面积为 $7.7 \pm 10.1 \text{ km}^2$ （n=3），非繁殖个体（BNC8、BNC12）的平均活动区面积为 $713.4 \pm 487.5 \text{ km}^2$ （n=4）。不同个体间多年平均活动区面积差异较大：BNC8（ 597.6 km^2 , n=1）、BNC10（ 22.0 km^2 , n=1）、BNC11（ 0.6 km^2 , n=2）和BNC12（ 752.0 km^2 , n=3）。夏季繁殖个体的平均核域面积为 $1.8 \pm 2.4 \text{ km}^2$ （n=3），非繁殖个体的平均核域面积为 $160.5 \pm 106.1 \text{ km}^2$ （n=4）。不同个体间平均核域面积差异也较大：BNC8（ 126.2 km^2 , n=1）、BNC10（ 5.1 km^2 , n=1）、BNC11（ 0.1 km^2 , n=2）和BNC12（ 171.9 km^2 , n=3）。冬季当年繁殖个体（BNC11）的活动区面积为 174.9 km^2 （n=1），当年非繁殖个体（BNC12）的平均活动区面积为 $52.1 \pm 35.3 \text{ km}^2$ （n=3）。冬季当年繁殖个体（BNC11）的核域面积为 35.0 km^2 （n=1），当年非繁殖个体（BNC12）的平均核域面积为 $7.2 \pm 5.1 \text{ km}^2$ （n=3）（表3-7）。综上可知，夏季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均远小于非繁殖个体，而冬季繁殖个体的平均活动区面积和平均核域面积均大于非繁殖个体。

对跟踪个体不同时期（度夏期、迁徙期和越冬期）的栖息地选择情况进行初步分析可知（图3-7），跟踪个体在迁徙期利用的主要生境为草地（40.9%）和水体（26.6%）和湿地（13.7%）；在度夏期利用的主要生境为草地（44.7%）、水体（23.9%）和湿地（16.8%）；在越冬期利用的主要生境为水体（34.8%）、耕地（34.3%）和湿地（18.8%）。该种群跟踪的黑颈鹤在各时期均偏好于湿地与水体类型的栖息地，在迁徙期和度夏期则偏好于草地类型的栖息地，在越冬期更偏好于利用耕地类型的栖息地。

筛选后使用跟踪个体度夏地的143个跟踪位点和越冬地的84个跟踪位点进行MaxEnt建模，确定该种群度夏地和越冬地栖息地选择的环境因子的重要性排序（图3-8）。模型结果显示，坡度、年降水量和最干季度降水量是影响该种群黑颈鹤度夏栖息地选择的3个重要环境因子，其余影响黑颈鹤度夏栖息地选择的因子分别为海拔，最干月份降水量和降水季节性等。海拔、年平均气温和温度季节性等多种因子均对该种群的黑颈鹤越冬栖息地选择有重要影响，坡向和降水季节性则对黑颈鹤越冬栖息地选择影响较小。

表 3-7 黑颈鹤青海-林芝种群夏季和冬季活动区及核域面积

Tab. 3-7 Home range and core area of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population in summer and winter.

时期	跟踪位点数量	活动区面积 (km ² , 95% KDE)	核域面积 (km ² , 60% KDE)
夏季			
8 号 2016 年夏季	4786	597.6	126.2
10 号 2016 年夏季	4287	22.0	5.1
11 号 2016 年夏季	3478	0.8	0.1
11 号 2017 年夏季	4237	0.4	0.1
12 号 2016 年夏季	3830	1486.7	339.7
12 号 2017 年夏季	4805	632.7	112.7
12 号 2018 年夏季	3266	136.5	63.3
冬季			
11 号 2016 年冬季	1203	174.9	35.0
12 号 2016 年冬季	3160	100.1	14.4
12 号 2017 年冬季	3169	39.8	4.6
12 号 2018 年冬季	3312	16.4	2.7

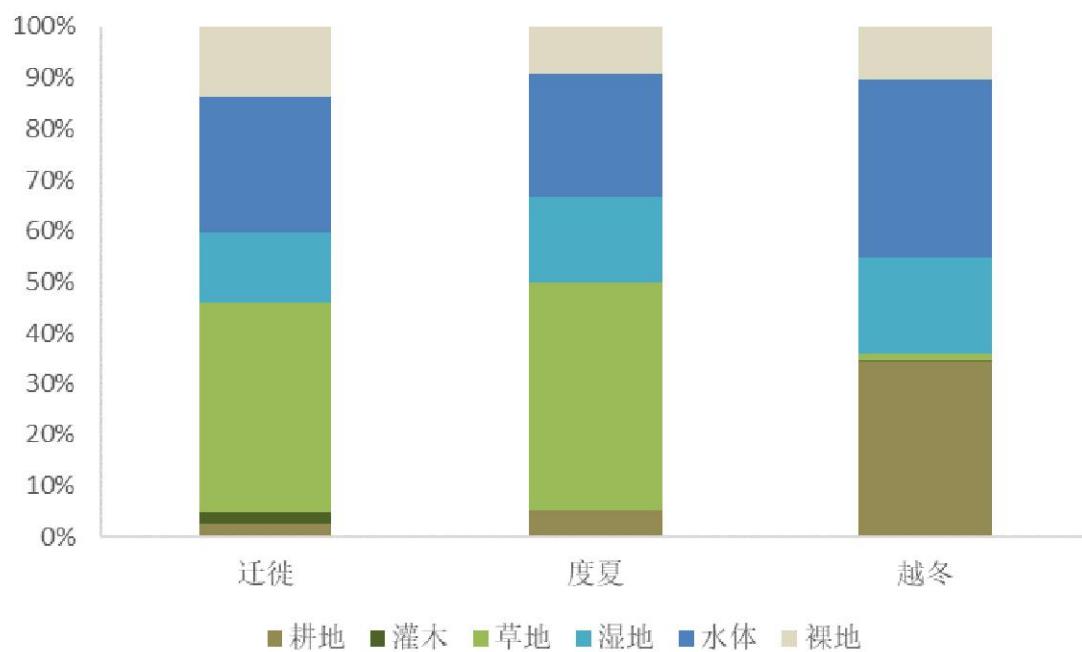
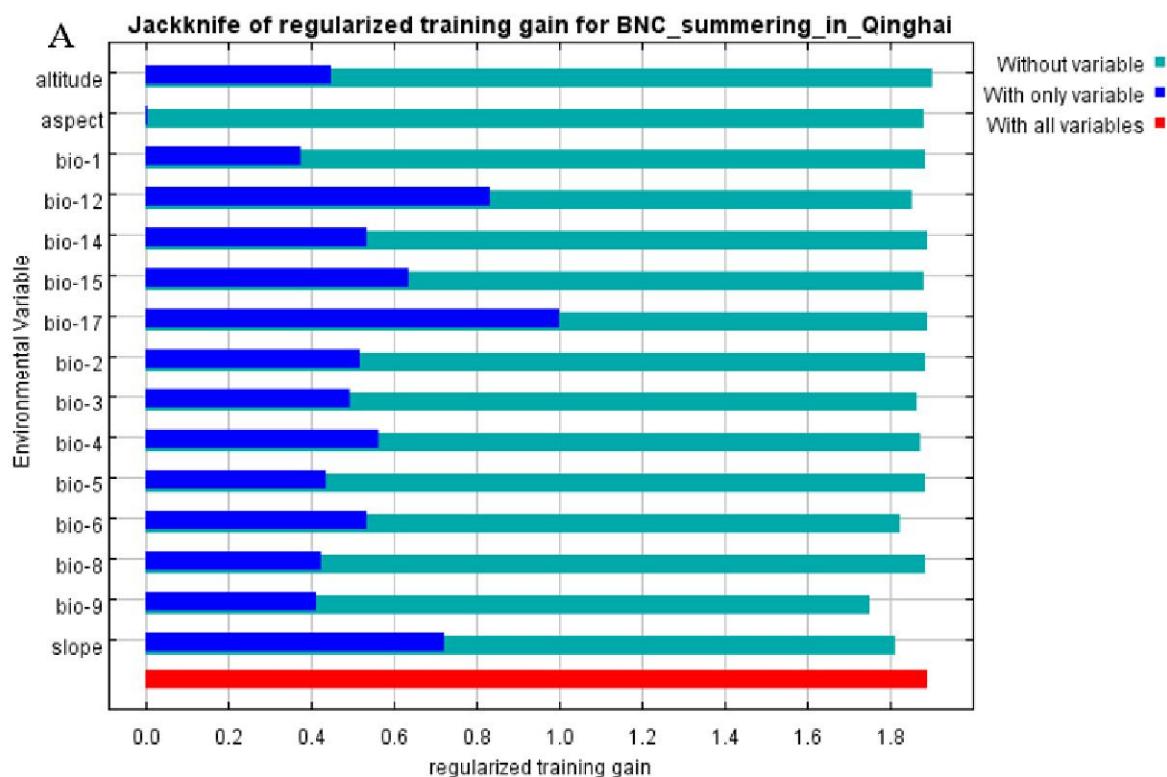


图 3-7 黑颈鹤青海-林芝种群栖息地利用情况

Figure 3-7 Habitat use of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population



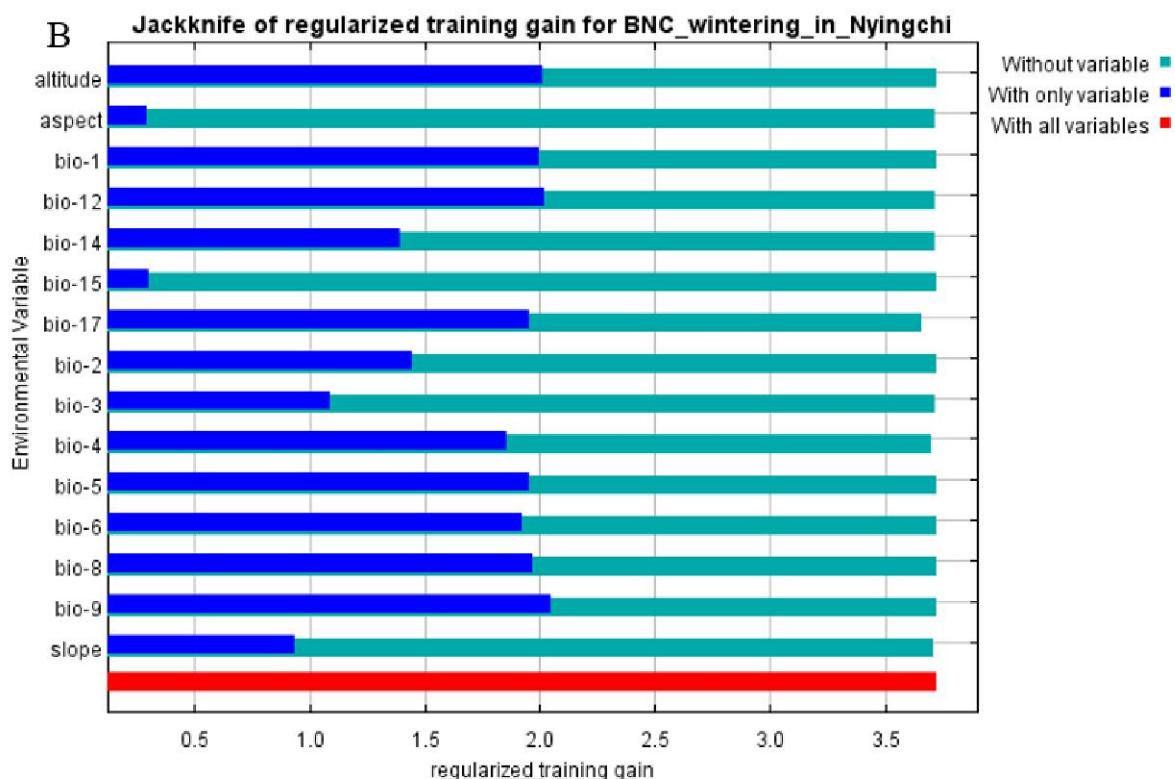


图 3-8 黑颈鹤青海-林芝种群栖息地选择的环境因子重要值排序 (A: 夏季, B: 冬季)
 Figure 3-8 The relative importance of environmental factors about the habitat use of the Qinghai-Nyingchi Black-necked Crane population (A: summer and B: winter)

4 讨论

4.1 两个黑颈鹤种群迁徙模式比较

4.1.1 迁徙模式

本研究跟踪的 12 只黑颈鹤属于两个种群，即黑颈鹤若尔盖-大山包种群和青海-林芝种群，并首次发现在林芝越冬的黑颈鹤的迁徙路线和相应的度夏地。在林芝越冬的黑颈鹤跟踪个体有两个度夏地：青海湖和新发现的青海省都兰地区金子海湿地（图 3-3）。结合之前的研究结果，目前通过卫星跟踪共确定了 5 个黑颈鹤种群，即不丹-申扎种群、青海-林芝种群、盐池湾-林周种群、若尔盖-大山包种群和沙鲁里山-纳帕海种群（吴至康等，1993；Archibald *et al.*, 2005；杨晓君等，2005；Qian *et al.*, 2009；Liu *et al.*, 2012；Wang *et al.*, 2020）。

青海-林芝种群的平均迁徙时间（春季：8.6 d；秋季：30.5 d）与盐池湾-林周种群相似（秋季：31.3 d），长于若尔盖-大山包种群（春季：4.2 d；秋季：7.0 d）和沙鲁里山-纳帕海种群（春季：1.8 d；秋季：4.6 d）。不丹-申扎种群跟踪数量少（1 只），迁徙时间不具代表性。青海-林芝种群的平均迁徙距离（春季：1183 km；秋季：1456 km）和盐池湾-林周种群相似（秋季：1500 km），长于若尔盖-昭通种群（春季：755 km；秋季：775 km）、不丹-申扎种群（春季：480 km）和沙鲁里山-纳帕海种群（春季：256 km；秋季：219 km）（Archibald, 2005；Liu *et al.*, 2012；Wang *et al.*, 2020）。迁徙路线连接着迁徙鸟类的度夏地和越冬地，先前的研究发现海拔是影响黑颈鹤度夏地和越冬地选择的重要因素（覃建庸等，2008；Rappole, 2013；Han *et al.*, 2017；韩雪松和郭玉民，2018）。高原地区的地势在较小的范围内可能发生很大变化（Liu *et al.*, 2012），这些因素或许能解释不同黑颈鹤种群迁徙模式的不同。东亚几种鹤类的迁徙距离，包括蓑羽鹤（6600 km）、白头鹤（3000 km）和白枕鹤（2558 km），均长于黑颈鹤（郭玉民和何芬奇，2017；Higuchi, 2004；Mi *et al.*, 2018）。鸟类在高原迁徙面临着高海拔和低含氧量等挑战（Liu *et al.*, 2018），所以滑翔鸟类可能会选择缩短迁徙距离来减少死亡率（ZaLakevicius, 2000；Lehikoinen and Sparks, 2010）。因此，我们推测黑颈鹤缩短迁徙距离对其种群有益，具体的机制需要进一步研究。

2017-2019 年，黑颈鹤 12 号个体一直处于亚成体阶段，没有参与繁殖，它的迁徙路线也比较曲折（图 3-3）。曲折的迁徙路线可能会增加黑颈鹤的能量消耗和死亡率，但亚成体也可以引领种群的扩散，找到更多合适的栖息地（Zhao *et al.*, 2017；Gao *et al.*, 2019）。2016 和 2017 年，研究人员在林芝地区分别记录到了 460 和 527 只黑颈鹤（约 5% 的全球总数量），且两年的幼体新增率为 8.64% 和 6.64%（韩雪松和郭玉民，2018）。结合我们的卫星跟踪结果，推测黑颈鹤青海-林芝种群是稳定的。该种群与之前已经确定的种群共同丰富了黑颈鹤的种群生态学（Li, 2014；Wang *et al.*, 2020）。这些稳定种群如果因人为干扰和栖息地的丧失导致种群数量下降，将对黑颈鹤的生存产

生巨大的影响。青海-林芝种群与之前通过环志确定的隆宝滩-纳帕海种群在迁徙路线上存在交叉，两个种群之间是否存在交流在未来需要更多的卫星跟踪研究来进一步验证（吴至康等，1993）。

4.1.2 迁徙停歇地

由于黑颈鹤迁徙时间较短等特性，黑颈鹤对迁徙停歇地的忠诚度有限，并非每只黑颈鹤在跟踪时期均使用同样的迁徙停歇地。若尔盖种群迁徙途经横断山脉，由于自然环境的限制，迁徙路线上适宜停歇地较少，而青海-林芝种群迁徙路线上河流众多，可为停歇提供自然条件。黑颈鹤青海-林芝种群在迁徙停歇地的平均停歇时间（春季：巴松措湖，4.4 d；秋季：沙珠玉河，26.3 d）与盐池湾-林周种群相似（秋季：大柴旦湖，31.3 d），长于若尔盖-大山包种群（春季，白河：5.7 d；秋季，白河：4.2 d），但比其他长距离迁徙鹤类的迁徙停歇时间短，如白头鹤（春季：27.5 d；秋季：47.0 d）（Mi *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020）。本研究中青海-林芝种群的黑颈鹤迁徙途中主要在河谷沼泽停歇。与若尔盖-大山包种群相比，青海-林芝种群的迁徙路线更长，迁徙过程中需要消耗更多能量。青海-林芝种群的黑颈鹤在迁徙过程中沿着河谷迁徙，利用河谷上空的上升气流降低能量的消耗，以顺利完成迁徙（Pirotta *et al.*, 2018）。迁徙停歇地是连接度夏地和越冬地的重要枢纽，在迁徙鸟类的生活史中起重要作用（马志军等，2005）。本研究中重要的迁徙停歇地：白河、巴松措湖和沙珠玉河均不在保护区内。未来可根据实际情况建立季节性保护地来降低黑颈鹤迁徙途中的损失。

4.2 两个黑颈鹤种群栖息地利用比较

4.2.1 活动区面积

本研究用核密度估计法（KDE）确定了黑颈鹤若尔盖-大山包种群和青海-林芝种群跟踪个体的活动区面积（95% KDE）和核域面积（60% KDE）。结果发现夏季繁殖个体的平均活动区面积（若尔盖-大山包种群：1.4 km²；青海-林芝种群：7.7 km²）和平均核域面积（若尔盖-大山包种群：0.2 km²；青海-林芝种群：1.8 km²），均远小于非繁殖个体的平均活动区面积（若尔盖-大山包种群：277.5 km²；青海-林芝种群：713.4 km²）和平均核域面积（若尔盖-大山包种群：46.9 km²；青海-林芝种群：160.5 km²）。冬季若尔盖-大山包种群当年繁殖个体的平均活动区面积（0.7 km²）和平均核域面积（0.2 km²），均小于当年非繁殖个体的平均活动区面积（36.3 km²）和平均核域面积（4.9 km²）；而青海-林芝种群冬季当年繁殖个体的活动区面积（174.9 km²）和核域面积（35.0 km²），均大于当年非繁殖个体的平均活动区面积（52.1 km²）和平均核域面积（7.2 km²），我们推测这可能与数据量和种群间的差异有关。若尔盖-大山包种群跟踪个体夏季的平均核域面积（BNC3：0.2 km²；BNC4：3.4 km²；BNC5：90.3 km²）和青海-林芝种群跟踪个体夏季的平均核域面积（BNC8：126.2 km²；BNC10：5.1 km²；BNC11：0.1 km²；BNC12：171.9 km²）在个体水平上差异较大。跟踪个体中，幼鸟

(BNC8、BNC12) 和不参与繁殖的成鸟 (BNC4、BNC5) 在度夏地有较大的活动区域, 而参与繁殖的成鸟 (BNC3、BNC10、BNC11) 在度夏地的活动区域较小。舒美林 (2017) 通过卫星跟踪发现盐池湾的 2 只黑颈鹤迁徙前在度夏地的活动面积分别为 0.55 km^2 和 1.55 km^2 , 这与我们的结果相似。在冬季, 若尔盖-大山包种群跟踪个体的平均核域面积 (BNC3: 0.2 km^2 ; BNC4: 6.1 km^2 ; BNC5: 3.6 km^2) 和青海-林芝种群跟踪个体的平均核域面积 (BNC11: 35.0 km^2 ; BNC12: 7.2 km^2) 在个体水平上差异不大, 这表明不同年龄段的个体在冬季的活动区域面积无明显不同。刘强 (2010) 在纳帕海湿地对黑颈鹤的空间生态学进行研究, 发现黑颈鹤 90% 利用区域面积为 2.2 km^2 , 这表明黑颈鹤在越冬期活动面积较小。

4.2.2 栖息地选择

了解迁徙鸟类的栖息地利用可以帮助保护工作者确定优先保护区域, 提高保护效率 (Kong *et al.*, 2018)。本研究的黑颈鹤在生活史的不同时期, 对栖息地利用的情况有所不同, 这一方面与黑颈鹤不同时期的主要生存需求有关, 另一方面可能与不同时期当地的栖息地情况有关 (Jorgensen and Dinan, 2016)。在度夏期, 主要的生境类型是湖泊、沼泽湿地和高原草甸, 黑颈鹤更偏好湿地与水体及草地栖息地类型, 可以满足黑颈鹤繁殖期筑巢、育雏的主要需求 (李筑眉和李凤山, 2005; Wu *et al.*, 2009; 窦亮等, 2013)。但由于栖息地的景观差异, 若尔盖-大山包种群与青海-林芝种群相比, 对草地类型的栖息地利用率更高。在迁徙期, 黑颈鹤若尔盖-大山包种群由大山包湿地依次经过长江上游金沙江、一直向北到达黄河上游白河及黑河沿岸若尔盖湿地内, 与高立波等 (2007) 的研究相似, 而青海-林芝种群由林芝地区一直向北到黄河源至青海湖和金子海湿地, 期间由于觅食、夜栖等需要, 会在草地、湿地与水体类型的栖息地停歇 (雷桂林等, 2012)。在越冬期, 黑颈鹤对夜栖地的选择更偏好于湿地与水体类型的栖息地, 觅食栖息地偏好于选择湿地与水体、草地及耕地类型的栖息地 (李凤山, 1999; 贺鹏等, 2011)。但由于大山包湿地草地类型的栖息地较为丰富, 若尔盖-大山包种群在越冬地对草地类型的栖息地利用率更高。黑颈鹤在越冬期偏好以易于吸收的谷物为主要的食物来源 (Bishop 和李凤山, 2002)。但近年来, 西藏和云南等黑颈鹤越冬省份农作物种植的转变 (例如玛卡代替青稞) 和农业的机械化收割, 增加了黑颈鹤的取食难度 (Li, 2014)。

4.2.3 黑颈鹤栖息地选择环境因子的重要性排序

本研究基于两个黑颈鹤种群度夏地和越冬地的跟踪位点和环境因子建立物种分布模型, 通过软件自带的刀切法, 得到了两个种群度夏期和越冬期栖息地选择环境因子的重要性排序。结果显示, 海拔在度夏期和越冬期均对黑颈鹤的栖息地选择有较大影响, 坡度和降水量相关的因子对度夏期栖息地选择有较大影响, 温度相关的因子对越冬期栖息地选择有较大影响 (图 3-6, 3-8)。在度夏期, 两个种群在栖息地选择时均对年降水量需求高, 但若尔盖-大山包种群对海拔的需求高于青海-林芝种群。若尔

盖湿地的海拔略高于青海湖和金子海湿地，这可能是若尔盖种群对海拔需求更高的原因。在越冬期，两个种群在栖息地选择时均对坡向需求不高，但若尔盖-大山包种群对昼夜温差月均值和等温性的需求高于青海-林芝种群。林芝地区位于雅鲁藏布江与尼洋河的河谷地带，而大山包湿地的生境主要是高原草甸沼泽，栖息地环境的不同可能导致两个种群对温度相关的因子需求方面存在差异。在建立模型时，19个生物气候因子间存在较高的相关性，会使预测结果存在冗余信息，影响预测结果的准确性（王茹琳等，2017）。因此，建模前需对环境因子进行筛选，本次研究主要通过对19个生物气候因子进行相关性分析结合黑颈鹤的生物学特征来对因子进行筛选，减少对预测结果的影响。黄建等（2015）、Mi *et al.*（2017）在进行在对黑颈鹤、白枕鹤和白头鹤等鹤类的栖息地进行预测时，除了使用本研究选择的22个环境因子外（表3-1），还使用了距湖泊距离、距河流距离、距海岸线距离、距城镇距离、距道路距离、距铁路距离和土地覆盖因子等地理地形因子和人类活动活动相关因子，得到了很好的预测结果。未来可以基于更多黑颈鹤不同种群的跟踪数据和相关的环境因子，建立更完善的黑颈鹤栖息地预测模型，为黑颈鹤的保护管理提供参考。

4.3 黑颈鹤栖息地的威胁与保护

黑颈鹤近年来的种群数量稳定在10000只左右，但是人为活动干扰、农业发展方式改变、气候变化等，给这一物种带来了巨大的威胁，因此黑颈鹤的科研和保护工作仍十分严峻。若尔盖-大山包种群的度夏地大山包湿地和越冬地若尔盖湿地均在保护区范围内，面临的威胁较小。青海-林芝种群的度夏地金子海湿地需加大关注度。2018年夏季的野外观察中，在金子海湿地9km²的区域发现了10对黑颈鹤（郭玉民，2018，未发表数据）。该种群的另一个度夏地青海湖地区是重要的生态旅游区，同时也是多种野生动物的栖息地，因此需要协调产业发展与自然保护，建议在黑颈鹤的度夏期限制客流量，加强当地的动物保护教育。该种群越冬于林芝地区的雅鲁藏布江与尼洋河汇口，是当地重要的农业区，建议在越冬期给予因黑颈鹤觅食而造成损失的当地农民一些经济补偿，使人鹤和谐共处。两个种群跟踪个体重要的迁徙停歇地白河、巴松措湖和沙珠玉河均不在保护区内，可在迁徙期对这些地点进行巡护以提高保护效率（Mi *et al.*, 2018）。

由于黑颈鹤栖息地周边地区农业的大力发展，一些黑颈鹤的繁殖地有沙漠化的风险（Harris and Mirande, 2013）。在西藏中部，农民大量的种植高产的冬小麦而非传统作物，这导致黑颈鹤在越冬期无法得到充足的食物（IUCN, 2019）。为了更好的对黑颈鹤进行保护，大山包国家级自然保护区的工作人员在保护区范围内退耕还草、还林，但相关的研究表明这对黑颈鹤的保护无益处，因为其在越冬期更偏好于农田（Kong *et al.*, 2011）。高压电线和风力发电机对黑颈鹤也具有潜在的威胁，目前已发现一定数量的鸟类因撞击电线而死（Li *et al.*, 2011）。气候变化对黑颈鹤栖息地的影响也不容忽

视，气候变暖导致的冰川融化和降水量改变等，可能会令黑颈鹤繁殖栖息地的面积大幅减少（Han *et al.*, 2017）。针对黑颈鹤的保护，国内已建立很多以保护黑颈鹤为主的自然保护区，总面积达 89073 km²（Birdlife International, 2020）。在若尔盖湿地，保护人员在度夏期为黑颈鹤建立缓冲区来降低牲畜对其的影响（Wu *et al.*, 2009）。在纳帕海湿地，保护人员限制当地牲畜的数量，并将一定面积的农田列入湿地保护网络中（Liu *et al.*, 2010）。关于黑颈鹤的繁殖、迁徙、越冬生态学的科学的研究近年来已广泛开展。

5 结论

本文以黑颈鹤为研究对象，对若尔盖-大山包和青海-林芝两个种群的黑颈鹤进行卫星跟踪。通过 ArcGIS 和 R 等软件，对两个黑颈鹤种群的迁徙模式和栖息地利用情况进行分析。结合在开放数据平台获取的环境因子数据，使用 MaxEnt 软件对影响黑颈鹤栖息地选择的环境因子进行重要性排序。主要结论如下：

(1) 首次揭示了黑颈鹤青海-林芝迁徙路线，并发现了黑颈鹤的度夏地-金子海湿地。

(2) 分析比较了黑颈鹤若尔盖-大山包种群和青海-林芝种群的迁徙模式，确定了若尔盖-大山包种群的白河和青海-林芝种群的巴松措湖、沙珠玉河这三个迁徙途中的重要停歇地。若尔盖-大山包种群的迁徙时间（春季： 4.2 ± 3.9 d；秋季： 7.0 ± 2.9 d）和迁徙距离（春季： 755.0 ± 64.8 km；秋季： 774.5 ± 48.0 km）均小于青海-林芝种群的迁徙时间（春季： 8.7 ± 4.6 d；秋季： 30.0 ± 10.6 d）和迁徙距离（春季： 1182.5 ± 90.4 km；秋季： 1455.7 ± 138.0 km）。

(3) 确定了每只跟踪个体在度夏地和越冬地的活动区面积（95% KDE）和核域面积（60% KDE）。在夏季，繁殖个体的平均活动区面积（若尔盖-大山包种群： 1.4 km^2 ；青海-林芝种群： 7.7 km^2 ）和平均核域面积（若尔盖-大山包种群： 0.2 km^2 ；青海-林芝种群： 1.8 km^2 ），均远小于非繁殖个体的平均活动区面积（若尔盖-大山包种群： 277.5 km^2 ；青海-林芝种群： 713.4 km^2 ）和平均核域面积（若尔盖-大山包种群： 46.9 km^2 ；青海-林芝种群： 160.5 km^2 ）。在冬季，若尔盖-大山包种群当年繁殖个体的平均活动区面积（ 0.7 km^2 ）和平均核域面积（ 0.2 km^2 ），均小于当年非繁殖个体的平均活动区面积（ 36.3 km^2 ）和平均核域面积（ 4.9 km^2 ）；而青海-林芝种群冬季当年繁殖个体的活动区面积（ 174.9 km^2 ）和核域面积（ 35.0 km^2 ），均大于当年非繁殖个体的平均活动区面积（ 52.1 km^2 ）和平均核域面积（ 7.2 km^2 ）。

(4) 黑颈鹤在生活史的不同时期（度夏期、迁徙期和越冬期），均偏好于湿地与水体类型的栖息地，在度夏地更偏好草地类型的栖息地，在越冬地更偏好于耕地类型的栖息地。

(5) 模型中的刀切法结果显示，海拔在度夏期和越冬期均对黑颈鹤的栖息地选择有较大影响，坡度和降水量相关的因子对度夏期栖息地选择有较大影响，温度相关的因子对越冬期栖息地选择有较大影响。

参考文献

- Archibald G W. 中国鹤类研究：黑颈鹤观察[M]. 云南教育出版社, 2005.
- Bishop M A, 李凤山. 农业耕作活动对西藏越冬黑颈鹤食性及食物可获得性的影响[J]. 生物多样性, 2002, 10(4): 393-398.
- 曹学仁, 陈林, 周益林, 等. 基于 MaxEnt 的麦瘟病在全球及中国的潜在分布区预测[J]. 植物保护, 2011, 37(3): 80-83.
- 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- 楚国忠, 郑光美. 鸟类栖息地研究的取样调查方法[J]. 动物学杂志, 1993, 28(6): 47-52.
- 崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 等. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区[J]. 生物多样性, 2018, 26(2): 171-176.
- 窦亮, 李华, 李凤山, 等. 四川若尔盖湿地国家级自然保护区繁殖期黑颈鹤调查[J]. 四川动物, 2013, 32(5): 770-773.
- 付建明, 卢益民. 运动车辆 GPS 定位系统中通信方案的设计[J]. 无线电通信技术, 2000, 26(1): 62-64.
- 高立波, 钱法文, 杨晓君, 等. 云南大山包越冬黑颈鹤迁徙路线的卫星跟踪[J]. 动物学研究, 2007, 28(4): 353-361.
- 郭杰, 刘小平, 张琴, 等. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 992-1000.
- 郭玉民, 何芬奇. 鄂尔多斯蓑羽鹤迁徙线路初探[J]. 野生动物学报, 2017, 38(1): 141-143.
- 韩雪松, 郭玉民. 西藏林芝黑颈鹤越冬地潜在威胁的模型分析[J]. 野生动物学报, 2018, 39(3): 539-549.
- 贺鹏, 孔德军, 刘强, 等. 云南纳帕海越冬黑颈鹤夜栖地特征[J]. 动物学研究, 2011, 32(2): 150-156.
- 胡秀, 吴福川, 郭微. 基于 MaxEnt 生态学模型的毛姜花潜在园林引种区预测[J]. 中国城市林业, 2013, 11(4): 28-31.
- 黄建, Falk H, 郭玉民. 黑龙江流域白头鹤繁殖栖息地选择模型预测[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 40-47.
- 柯明剑, 汪海波, 杨泽, 等. 用最大熵生态位模型预测入侵媒介生物褐带皮蠣在中国的潜在分布区[J]. 口岸卫生控制, 2017, 22(2): 59-63.
- 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[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- 雷桂林, 桑吉, 郑重. 西藏林周卡孜水库黑颈鹤夜宿特性研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(4): 93-97.
- 李凤山. 贵州草海越冬黑颈鹤觅食栖息地选择的初步研究[J]. 生物多样性, 1999, 7(4): 257-262.
- 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4827-4835.
- 李契, 朱金兆, 朱清科. 生态位理论及其测度研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(1): 100-107.
- 李来兴. 黑颈鹤种群生态及濒危等级评估[J]. 生物多样性, 1997, 5(2): 84-89.
- 李双成, 高江波. 基于 GARP 模型的紫茎泽兰空间分布预测——以云南纵向岭谷为例[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1531-1536.

- 李筑眉, 李凤山. 黑颈鹤研究[M]. 上海科技教育出版社, 2005.
- 刘强. 纳帕海越冬黑颈鹤 (*Grus nigricollis*) 空间生态学研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2010, 北京: 中国科学院研究生院.
- 刘洋, 孙治宇, 赵杰, 等. 四川若尔盖湿地国家级自然保护区兽类资源调查[J]. 四川动物, 2009, 28(5): 768-771.
- 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7243-7249.
- 马志军, 李博, 陈家宽. 迁徙鸟类对中途停歇地的利用及迁徙对策[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1404-1412.
- 马志军. 鸟类迁徙的研究方法和研究进展[J]. 生物学通报, 2009, 44(3): 5-9.
- 马志军. 追踪鸟类的迁徙[J]. 科学, 2013, 65(1): 19-22.
- 戎战磊, 周宏, 韦伟, 等. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(2): 269-273+278.
- 史建全, 祁洪芳, 杨建新. 青海湖自然概况及渔业资源现状[J]. 淡水渔业, 2004, 34(5): 3-5.
- 舒美林. 甘肃盐池湾黑颈鹤繁殖生态学与迁徙研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2017, 兰州: 兰州大学.
- 孙敬松, 周广胜. 利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481-487.
- 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 北京师范大学出版社, 1992.
- 覃建庸, 陈名红, 向左甫. 鸟类的季节性迁徙方式与研究方法[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7278-7281.
- 王凯, 杨晓君, 赵健林, 等. 云南纳帕海越冬黑颈鹤日间行为模式与年龄和集群的关系[J]. 动物学研究, 2009, 30(1): 74-82.
- 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- 王雅男, 万方浩, 沈文君. 外来入侵物种的风险评估定量模型及应用[J]. 昆虫学报, 2007, 50(5): 512-520.
- 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- 温立嘉, 任永奇, 邢小军, 等. 鄂尔多斯蓑羽鹤小群体的 GPS-GSM 跟踪初步分析[J]. 动物学杂志, 2017, 52(2): 210-216.
- 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]. 北京林业大学硕士学位论文, 2017, 北京: 北京林业大学.
- 吴文, 李月辉, 胡远满, 等. 小兴安岭南麓马鹿冬季适宜生境评价[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 20-29.
- 吴至康, 李筑眉, 王有辉, 等. 黑颈鹤迁徙研究初报[J]. 动物学报, 1993, 39(1): 105-106.
- 谢鹏, 董树斌, 朱宝光, 等. 利用无线电跟踪技术对三江平原东方白鹳幼鸟离巢扩散行为初探[J]. 野生动物学报, 2018, 39(3): 600-606.
- 许仲林, 彭焕华, 彭守璋, 等. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- 杨会枫, 郑江华, 吴秀兰, 等. 基于 MaxEnt 模型的西伯利亚蝗虫在新疆潜在分布预测研究[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(1): 43-50.

- 杨倩, 李宁云, 陈丽, 等. 外来物种对云南大山包湿地植物群落物种多样性的影响[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 100-104.
- 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.
- 杨晓君, 钱法文, 李凤山, 等. 中国首次卫星跟踪黑颈鹤研究初报[J]. 动物学研究, 2005, 26(6): 657-658.
- 翟天庆, 李欣海. 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2361-2370.
- 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9-12.
- 张敏. 西藏林芝地区旅游资源评价与 SWOT 分析[J]. 西藏科技, 2006(4): 31-35.
- 郑光美. 鸟类学[M]. 北京师范大学出版社, 2012.
- 周宇, 袁雪颖, 杨子轩, 等. 福寿螺入侵中国的扩散动态及潜在分布[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1379-1387.
- 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.
- 朱井丽, 高忠斯, 邹红菲, 等. 基于 MAXENT 模型的松嫩平原丹顶鹤秋迁期生境适宜性评价[J]. 野生动物学报, 2018, 39(4): 852-857.
- Abrahms B, Seidel D P, Dougherty E, et al. Suite of simple metrics reveals common movement syndromes across vertebrate taxa[J]. Movement Ecology, 2017, 5(1): 12-12.
- Alerstam T, Anders Hedenstrom. The development of bird migration theory[J]. Journal of Avian Biology, 1998, 29(4): 343-369.
- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)[J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(6): 1223-1232.
- Anderson R P, Raza A. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela[J]. Journal of Biogeography, 2010, 37(7): 1378-1393.
- Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modeling[J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2/3): 101-118.
- Barros, Mendes F S, De Siqueira M F, et al. Modeling the potential geographic distribution of five species of *Metzgeria Raddi* in Brazil, aiming at their conservation[J]. Bryologist, 2012, 115(2): 341-349.
- Betts M G, Ganio L M, Huso M M P, et al. Comment on “Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review”[J]. Ecography, 2009, 32(3): 374-378.
- BirdLife International (2020) Species factsheet: *Grus nigricollis*. Downloaded from <http://www.birdlife.org> on 28/04/2020.
- Blair W. Notes on home ranges and populations of the short-tailed shrew[J]. Ecology, 1940, 21(2): 284-288.
- Bodey T W, Cleasby I R, Bell F, et al. A phylogenetically controlled meta-analysis of biologging device effects on birds: deleterious effects and a call for more standardized reporting of study data[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(4): 946-955.
- Bossenbroek J M, Burlakova L E, Crail T C, et al. Modeling habitat of freshwater mussels (Bivalvia:Unionidae) in the lower Great Lakes 25 years after the Dreissena invasion[J]. Freshwater Science, 2018, 37(2): 330-342.
- Buechley E R, Oppel S, Beatty W S, et al. Identifying critical migratory bottlenecks and high-use areas for an endangered migratory soaring bird across three continents[J]. Journal of Avian Biology, 2018,

- 49(7): e01629.
- Busby J R. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system[J]. Plant Protection Quarterly, 1991, 6(1): 8-9.
- Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals[J]. Biodiversity and Conservation, 1993, 2(6): 667-680.
- Chakraborty A, Joshi P K, Sachdeva K. Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 593-609.
- Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales[J]. Educational & Psychological Measurement, 2016, 20(1): 37-46.
- Costa G C, Nogueira C, Machado R B, *et al.* Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot[J]. Biodiversity and Conservation, 2010, 19(3): 883-899.
- Cushman S A, Huettmann F. Spatial complexity, informatics, and wildlife conservation[M]. Springer Japan, 2010.
- El-Hacen E H M, Overdijk O, Lok T, *et al.* Home range, habitat selection, and foraging rhythm in mauritanian spoonbills (*Platalea leucorodia balsaci*): a satellite tracking study[J]. Waterbirds, 2013, 36(3): 277-286.
- Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2009, 40(1): 677-697.
- Elton C S. Animal ecology[M]: University of Chicago Press, 1927.
- Faaborg J, Holmes R T, Anders A D, *et al.* Recent advances in understanding migration systems of new world land birds[J]. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 3-48.
- Farrington, J. D. Impacts of climate change on the Yangtze source region and adjacent areas[M]. Beijing: WWF and the China Meteorological Press, 2009.
- Foody G M, Cutler M E. Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks[J]. Ecological Modelling, 2006, 195(1): 37-42.
- Franklin J. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients[J]. Progress in Physical Geography, 1995, 19(4): 474-499.
- Fronczak D L, Andersen D E, Hanna E E, *et al.* Distribution and migration chronology of Eastern population sandhill cranes[J]. The Journal of Wildlife Management, 2017, 81(6): 1021-1032.
- Fujita G., Guan H.L., Ueta M., *et al.* Comparing areas of suitable habitats along travelled and possible shortest routes in migration of white-naped cranes *Grus vipio* in east Asia[J]. Ibis, 2004, 146(3): 461-474.
- Gao L, Mi C, Guo Y. Expansion of sandhill cranes (*Grus canadensis*) in east Asia during the non-breeding period[J]. PeerJ, 2019, 7: e7545.
- Grinnell J. The niche-relationships of the California thrasher[J]. Auk, 1917, 34(4): 427-433.
- Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- Han X, Guo Y, Mi C, *et al.* Machine learning model analysis of breeding habitats for the black-necked crane in Central Asian Uplands under anthropogenic pressures[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6114-6114.
- Han X, Huettmann F, Guo Y, *et al.* Conservation prioritization with machine learning predictions for the black-necked crane *Grus nigricollis*, a flagship species on the Tibetan Plateau for 2070[J]. Regional Environmental Change, 2018, 18(7): 2173-2182.

- Hanley J A, Mcneil B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve[J]. Radiology, 1982, 143(1): 29-36.
- Harris J, Mirande C. A global overview of cranes: status, threats and conservation priorities[J]. Chinese Birds, 2013, 4(3): 189-209.
- Hernandez P A, Graham C H, Master L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods[J]. Ecography, 2010, 29(5): 773-785.
- Higuchi H, Ozaki K, Fujita G, et al. Satellite tracking of white-naped crane migration and the importance of the Korean Demilitarized Zone[J]. Conservation Biology, 1996, 10(3): 806-812.
- Higuchi H, Pierre J P, Krever V, et al. Using a remote technology in conservation: satellite tracking white-naped cranes in Russia and Asia[J]. Conservation Biology, 2004, 18(1): 136-147.
- Higuchi H, Shibaev Y, Minton J, et al. Satellite tracking of the migration of the red-crowned crane *Grus japonensis*[J]. Ecological Research, 1998, 13(3): 273-282.
- Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, et al. Ecological niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? [J]. Ecology, 2002, 83(7): 2027-2036.
- Hizel AH, Le Lay G. Habitat suitability modeling and niche theory[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 45(5): 1372-1381.
- Hu J, Liu Y, Danilo R. Unveiling the conservation biogeography of a data-deficient endangered bird species under climate change[J]. Plos One, 2014, 9(1): e84529.
- Humphries G R W, Huettmann F. Putting models to a good use: a rapid assessment of Arctic seabird biodiversity indicates potential conflicts with shipping lanes and human activity[J]. Diversity and Distributions, 2014, 20(4): 478-490.
- Hutchinson, M F. Methods of generation of weather sequences[C]. Agricultural Environments Characterization, Classification & Mapping, 1987.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). 2019. The IUCN red List of threatened species. Available at <http://www.iucnredlist.org/> (accessed 24 December 2019).
- Jenni L, Jenni-Eiermann S. Fuel supply and metabolic constraints in migrating birds[J]. Journal of Avian Biology, 1998, 29(4): 521-528.
- Jiguet F, Villarubias S. Satellite tracking of breeding black storks *Ciconia nigra*: new incomes for spatial conservation issues[J]. Biological Conservation, 2004, 120(2): 153-160.
- Johnsgard P A. Cranes of the world[M]: Indiana University Press, 1983.
- Johnson D H. The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference[J]. Ecology, 1980, 61(1): 65-71.
- Jorgensen J G, Dinan L R. Whooping crane (*Grus americana*) behavior, habitat use and wildlife watching visitation during migratory stopover at two wildlife management areas in Nebraska 2015-2016[J]. Nongame Bird Program of the Nebraska Game and Parks Commission. Lincoln, NE, 2016.
- Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, et al. Migration routes and important resting areas of siberian cranes (*Grus leucogeranus*) between northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking[J]. Biological Conservation, 2002, 106(3): 339-346.
- Keating K A, Cherry S. Modeling utilization distributions in space and time[J]. Ecology, 2009, 90(7): 1971-1980.
- Kernohan B J, Gitzen R A, Millspaugh J J. Analysis of animal space use and movements[J]. Radio Tracking and Animal Populations, 2001: 125-166.
- Kölzsch A, Bauer S, de Boer R, et al. Forecasting spring from afar? Timing of migration and predictability of phenology along different migration routes of an avian herbivore[J]. Journal of Animal Ecology,

- 2015, 84(1): 272-283.
- Kong D J, Yang X J, Liu Q, *et al*. Winter habitat selection by the vulnerable black-necked crane *Grus nigricollis* in Yunnan, China: implications for determining effective conservation actions[J]. Oryx, 2011, 45(2): 258-264.
- Kong D, Luo W, Liu Q, *et al*. Habitat use, preference, and utilization distribution of two crane species (Genus: *Grus*) in Huize National Nature Reserve, Yunnan-Guizhou Plateau, China[J]. PeerJ, 2018, 6: e5105.
- Laver P N, Kelly M J. A critical review of home range studies[J]. Journal of Wildlife Management, 2008, 72(1): 290-298.
- Lehikoinen E, Sparks T H. Changes in migration[M]. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction [J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2): 189-207.
- Li F, Bishop M A, Drolma T. Power line strikes by black-necked cranes and bar-headed geese in Tibet Autonomous Region[J]. Chinese Birds, 2011, 2(4): 167-173.
- Li F. IUCN black-necked crane (*Grus nigricollis*) conservation plan[J]. Zoological Research, 2014, 35(S1): 3-9.
- Liu D, Zhang G, Jiang H, *et al*. Detours in long-distance migration across the Qinghai-Tibetan Plateau: individual consistency and habitat associations[J]. PeerJ, 2018, 6: e4304.
- Liu Q, Li F, Buzzard P, *et al*. Migration routes and new breeding areas of black-necked cranes[J]. The Wilson Journal of Ornithology, 2012, 124(4): 704-712.
- Liu Q, Yang J, Yang X, *et al*. Foraging habitats and utilization distributions of black-necked cranes wintering at the Napahai Wetland, China[J]. Journal of Field Ornithology, 2010, 81(1): 21-30.
- Metz C E. Basic principles of ROC analysis[J]. Seminars in Nuclear Medicine, 1978, 8(4): 283-298.
- Mi C, Huettmann F, Guo Y, *et al*. Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence[J]. PeerJ, 2017, 5: e2849.
- Mi C, Möller AP, Guo Y. Annual spatio-temporal migration patterns of hooded cranes wintering in Izumi based on satellite tracking and their implications for conservation[J]. Avian Research, 2018, 9(3): 264-272.
- Ministry of Environmental Protection of P. R. China. 2010. List of China Nature Reserves (up to end of 2009). http://sts.mee.gov.cn/zrbhq/zrbhq/index_1.htm.
- Minton J S, Higuchi H, Halls J N. Integration of satellite telemetry data and land cover imagery: a study of migratory cranes in northeast Asia[J]. Transactions in Gis, 2003, 7(4): 505-528.
- Morrison M L, Marcot B G, Mannan R W. Wildlife-habitat relationships: concepts and applications[M]. University of Wisconsin Press, Madison, 1992.
- Newton I. The migration ecology of birds[M]. Oxford: Elsevier's Science and Technology, 2008.
- Oliveira M L D, Couto H T Z D, Duarte J M B. Distribution of the elusive and threatened Brazilian dwarf brocket deer refined by non-invasive genetic sampling and distribution modelling[J]. European Journal of Wildlife Research, 2019, 65(2): 1-9.
- Pearse A T, Rabbe M, Juliussen L M, *et al*. Delineating and identifying long-term changes in the whooping crane (*Grus americana*) migration corridor[J]. Plos One, 2018, 13(2): 1-15.
- Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distribution[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3): 231-259.
- Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling[C]. International Conference on Machine Learning, 2004.

- Pickens B A, King S L, Vasseur P L, *et al.* Seasonal movements and multiscale habitat selection of whooping crane (*Grus americana*) in natural and agricultural wetlands[J]. *Waterbirds*, 2017, 40(4): 322-333.
- Pirotta E, Katzner T, Miller T A, *et al.* State-space modelling of the flight behaviour of a soaring bird provides new insights to migratory strategies[J]. *Functional Ecology*, 2018, 32(9): 2205-2215.
- Powell R A. Animal home ranges and territories and home range estimators[M]. New York: Columbia University Press, 2000.
- Qian F, Wu H, Gao L, *et al.* Migration routes and stopover sites of black-necked cranes determined by satellite tracking[J]. *Journal of Field Ornithology*, 2009, 80(1): 19-26.
- Rappole J H. The avian migrant: The biology of bird migration[M]. New York: Columbia University Press, 2013.
- Soberón J, Peterson A T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas[J]. *Biodiversity Informatics*, 2005, 2: 1-10.
- Stockwell D R, Peterson A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 148(1): 1-13.
- Vayssières M P, Plant R E, Allen D B H. Classification trees: An alternative non-parametric approach for predicting species distributions[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11(5): 679-694.
- Wang Z, Dou Z, Se Y, *et al.* Autumn migration route and stopover sites of black-necked crane breeding in Yanchiwan Nature Reserve, China[J]. *Waterbirds*, 2020, 43(1): 93-99.
- Worton B J. Optimal smoothing parameters for multivariate fized and adaptive kernel methods[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 1989, 32: 45-57.
- Wu H, Zha K, Zhang M, *et al.* Nest site selection by black-necked crane *Grus nigricollis* in the Ruoergai Wetland, China[J]. *Bird Conservation International*, 2009, 19(03): 277-286.
- Xu Z, Zhao C, Feng Z. Species distribution models to estimate the deforested area of *Picea crassifolia* in arid region recently protected: Qilian Mts. national nature reserve (China)[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2012, 60(3): 515-524.
- ZaLakevicius M. Global climate change, bird migration and bird strike problems[J]. *International Bird Strike Committee IBSC25/WP-RS10*, 2000:509525.
- Zhang L, An B, Shu M, *et al.* Nest-site selection, reproductive ecology and shifts within core-use areas of black-necked cranes at the northern limit of the Tibetan Plateau[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e2939.
- Zhao M, Christie M, Coleman J, *et al.* Time versus energy minimization migration strategy varies with body size and season in long-distance migratory shorebirds[J]. *Movement Ecology*, 2017, 5(1): 1-12.
- Zweig M H, Campbell G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine[J]. *Clinical Chemistry*, 1993, 39(4): 561-577.

个人简介

王野，男，1994年6月28日出生，黑龙江省绥化市人。2013年至2017年就读于东北林业大学野生动物资源学院野生动物与自然保护区管理专业。2017年获得农学学士学位。2017年至2020年就读于北京林业大学生态与自然保护学院野生动植物保护与利用专业，导师为郭玉民教授，研究方向为鸟类生态学和保护生物学。

导师简介

郭玉民，男，满族，1964年9月生人，教授，博士生导师。1984-1988年就读于哈尔滨师范大学生物学系，获理学学士学位。2000-2005年就读于东北林业大学野生动物资源学院，获理学硕士和理学博士学位。2005-2008年在首都师范大学生命科学学院完成博士后经历。2008年4月至今在北京林业大学生态与自然保护学院从事教学与科研工作。

研究方向为鸟类生态学。2002年以来一致致力于白头鹤的研究与保护工作。目前研究对象已经拓展到亚洲九种鹤和一种鸨。2009年以来，在主管部门的支持下，组织协调“中国大鸨保护与监测网络”工作。2014年以来，与俄罗斯、蒙古、尼泊尔等周边国家共同开展了鹤类迁徙研究，并签署了十余个双边及多边合作协议，针对鹤类和大鸨等物种的跨国科研合作正在有序进行中。近期正将卫星跟踪等新方法应用于鸟类迁徙与栖息地选择等研究，并获得了国家自然基金的持续支持。曾主持和正在主持国家自然科学基金项目、国家林业和草原局野生动物保护与管理项目和科技部战略科技发展类（丝路上的鹤类迁徙研究及中国鹤文化传播）项目。

主要科研成绩包括：（1）2002-2010年，在中国小兴安岭发现并持续研究了2个白头鹤繁殖种群。协助地方主管部门建立了大沾河湿地和新青白头鹤两个以护繁殖白头鹤为主的自然保护区，并帮助保护区晋升为国家级。（2）2009-2015年，通过环志和卫星跟踪，揭示并掌握了白头鹤的迁徙节律，为该物种的保护或由其引发的禽流感等疫源疫病防控提供了依据。（3）通过国际交流与合作，进行了东亚地区7种鹤类的迁徙研究。（4）通过卫星跟踪确认了黑颈鹤“青海湖-林芝”、“盐池湾-拉萨”迁徙路线。同时发现了拉萨周边越冬的黑颈鹤种群面临着大量一龄幼鸟撞击输电线导致伤亡的严重问题。（5）通过200余万条自产跟踪数据，发现了长寿命物种亚成体与成体之间的诸多差异。提出了《亚成体生态学》理论框架，并正在实践中不断完善。在国内外已发表论文50余篇，拥有专利6项。

2007年获英国惠特利自然保护奖，2011-2013年获得惠特利继续资助奖。现任中国动物学会鸟类学分会理事。

获得成果目录

论文题目：

Satellite tracking reveals a new migration route of black-necked cranes (*Grus nigricollis*) in Qinghai-Tibet Plateau

状态：在投

投稿期刊：PeerJ

致谢

非常感谢郭玉民老师在硕士期间对我的指导。在学习工作中郭老师是良师，传道授业解惑。无论是野外工作还是日常学习，他悉心教导。工作方法、工作技能、野外经验，倾囊相授。认真、严谨的科研及教学态度为学生树立了良好的榜样，让我们深知作为科研工作者何为该做，何为不能做。在日常生活中郭老师是慈父，帮我们排忧解难，遇到的困难都能找到良好的解决办法。郭老师还时刻注意着我们的日常行为礼仪，事无巨细，帮助我们不断提高个人品性，改掉自身不足。刚开始与郭老师接触，可能并不会感受到郭老师的良苦用心，或苦、或累、或有情绪。时间久了，便会发现，付出的辛苦，所做的一切工作都不是白做的，最终受益者都将是自己。

感谢中国科学院昆明动物所伍和启老师，本课题组内郭玉民老师、韩雪松师兄在云南昭通大山包湿地所做的野外工作。本研究是在国家自然科学基金项目（No. 31770573）资助下完成的。

感谢中国科学院动物研究所的李欣海老师在论文数据分析上的指导。感谢于凤琴老师在野外工作上的帮助和指导。感谢刘小龙老师讲授的生态学知识，让我加深了对生态学的理解。

感谢吉林龙凤湖省级自然保护区、甘肃盐池湾国家级自然保护区管理局、青海省雪联青藏高原自然保护中心等单位在野外工作提供的帮助。感谢宁佐梅、郝燚、色拥军、杨巨才等兄长和老师于我研究生期间在野外工作中给予的支持与帮助。

感谢叶元兴老师对论文格式的修改。感谢宓春荣师兄对数据分析的指导，在论文写作上也得到了无私的帮助。每当我遇到困难向他求助时，他总是悉心传授经验，不断答疑解惑。感谢李显达师兄、韩雪松师兄、温立嘉师兄和高林强师姐在科研和学习上的帮助，感谢课题组内的高铭、郎雪敏、程楚钰、李雪竹、王博驰等同学的帮助。感谢同级的王子建、马兵、孙亚宽和李洪磊在平时学习生活上的帮助。

在研究生三年期间感谢学院老师的帮助，感谢914宿舍全体成员三年来的鼓励和支持。感谢父母的养育之恩，感谢家人的陪伴和支持。感谢我的朋友和同学们三年来对我的帮助和鼓励。