



•研究报告•

滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地

郎雪敏¹ Gankhuyag Purev-Ochir² Oyunchimeg Terbish³ Dashdorj Khurelbaatar³
Baasansuren Erdenechimeg¹ Amarkhuu Gungaa² 宓春荣⁴ 郭玉民^{1*}

1 (北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083, 中国)

2 (蒙古鸟类保护中心, 乌兰巴托 14201, 蒙古)

3 (蒙古东方省保护区管理局, 乔巴山 21060, 蒙古)

4 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学国家重点实验室, 北京 100101, 中国)

摘要: 白枕鹤(*Grus vipio*)为国家Ⅱ级重点保护野生动物, 被IUCN列为易危(VU)物种。白枕鹤西部种群繁殖于中蒙俄交界处的达乌尔地区, 数量呈下降趋势。我们于2017–2018年在蒙古国东部给白枕鹤西部种群的50只个体佩戴了GPS-GSM跟踪设备。截至2019年5月, 获得春季和秋季迁徙路径各48条。分析结果显示: 春季91.67%和秋季72.91%的跟踪个体在滦河上游(河北省沽源–内蒙古正蓝旗–多伦区域)停歇, 春季停留时间 36.16 ± 15.00 天、秋季 20.26 ± 11.08 天, 分别占春季和秋季迁徙时间的75%和67%, 确定了这一区域是西部种群迁徙途中最重要的停歇地。迁徙路线栖息地选择模型结果显示, 白枕鹤常在距离湖泊较近(< 210 km)、海拔1,200–1,500 m, 且坡度小($< 1^\circ$)的区域停歇。而滦河上游和整条迁徙路线停歇位点比较的模型结果显示, 滦河上游停歇地的海拔1,200–1,500 m与整条迁徙路线栖息地选择模型的结果一致; 此外这个区域离河流更近(< 70 km), 不仅有湿地和水体的栖息环境, 还有草地和农田可供觅食和栖息。保护空缺分析发现滦河上游现有四处保护地, 但在保护地内的迁徙停歇点不超过总位点的1.63%。综上, 我们建议将滦河上游整体纳入保护地体系进行管理, 为这一受胁物种及其栖息地管理和保护提供可靠保障。

关键词: 白枕鹤; 迁徙停歇地; 滦河上游; 卫星跟踪; 保护空缺

Luan River upper reaches: The important stopover site of the white-naped crane (*Grus vipio*) western population

Xuemin Lang¹, Gankhuyag Purev-Ochir², Oyunchimeg Terbish³, Dashdorj Khurelbaatar³, Baasansuren Erdenechimeg¹, Amarkhuu Gungaa², Chunrong Mi⁴, Yumin Guo^{1*}

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

2 Mongolian Bird Conservation Center, Ulaanbaatar 14201, Mongolia

3 Eastern Mongolia Protected Areas Administration, Choibalsan 21060, Mongolia

4 Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The white-naped crane (*Grus vipio*) is listed as a vulnerable species by the IUCN. The western population of white-naped cranes continues to decline. In 2017 and 2018, we fitted 50 individuals from the western population with GPS-GSM satellite transmitters in eastern Mongolia. From July 2017 to May 2019, we obtained 48 migration routes in spring and autumn, respectively. We found that during migrations, 91.67% (spring) and 72.91% (autumn) of tracked individuals chose the Luan River upper reaches (Guyuan–Zhenglanqi–Duolun) as their stopover site, where they stayed for 36.16 ± 15.00 days (75%) in the spring, and 20.26 ± 11.08 days (67%) in the autumn. Habitat selection model showed that water (specifically distance to lake) was the main environmental variable which affects the migration route choice for white-naped cranes. The cranes preferred the stopover site that was close to lake (< 210 km) and had gentle slopes ($< 1^\circ$) at an altitude between 1,200–1,500 m. The Luan River upper reaches was close to river (< 70

收稿日期: 2020-03-17; 接受日期: 2020-08-15

基金项目: 北京市科学技术委员会资助项目(D171100007217002)和科学技术部战略科技发展类引智项目(G20190001114)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: guoyumin@bjfu.edu.cn

km) and the altitude at 1,200–1,500 m is consistent with preferred migration routes. Additionally, there are large areas of grassland and farmland for foraging and roosting. We found that there were protected areas in the Luan River upper reaches, while no more than 1.63% of the migration stopover points were within these protected areas. From our results, we argue that Luan River upper reaches was the most important stopover site for the western population of white-naped crane. Unfortunately, the cranes in this area are not well protected based on their stopover points. Therefore, we highly recommend that the Luan River upper reaches should be included as part of a conservation management system. This will be beneficial for this threatened species.

Key words: white-naped crane; migratory stopover site; the Luan River upper reaches; satellite tracking; conservation gap

迁徙是候鸟生命周期的一个显著特征,通过追踪鸟类的迁徙活动可以认识其完整生活史(Newton, 2008; Fiedler, 2009)。研究鸟类迁徙的传统方法主要包括野外观察和环志,这两种方法的局限在于只能在有限的活动区域开展调查,无法准确描述鸟类的整个迁徙过程(伍和启等, 2008; 马志军, 2009)。近20年来,随着卫星跟踪、无线电跟踪和雷达跟踪技术的发展,越来越多的候鸟迁徙活动被追踪,使得观测数据的数量和类型不断增加,实现了在大的空间尺度上精确描述鸟类的全年迁徙轨迹(Bridge et al, 2011; Dokter et al, 2018; Panuccio et al, 2019)。在鸟类迁徙研究中,卫星跟踪已成为研究迁徙鸟类如鹤类、雁类等水鸟以及猛禽的时空变化规律、种群动态、迁徙机制的有效途径(Si et al, 2015; 郭玉民和何芬奇, 2017; Mi et al, 2018; Sergio et al, 2019)。

白枕鹤(*Grus vipio*)是国家Ⅱ级重点保护野生动物,被IUCN列为易危(VU)物种。白枕鹤全球种群数量为6,250–6,750只(BirdLife, 2020, <http://datazone.birdlife.org/>),分为东部和西部种群:东部种群繁殖于中俄交界处的黑龙江流域、我国三江平原和松嫩平原,迁徙经过朝鲜半岛,越冬于朝韩非军事管理区和日本南部九州岛出水市(钱法文, 2005);西部种群在中蒙俄交界处的达乌尔地区繁殖,迁徙途经我国渤海湾、华北平原,最终在长江中下游地区越冬。在中国长江中下游地区越冬的白枕鹤西部种群数量为500–1,000只(8%–14.8%)(BirdLife, 2020, <http://datazone.birdlife.org/>),且呈下降的趋势(Gilbert et al, 2016; International Crane Foundation, 2019, <https://www.savingcranes.org/>),需要更多的研究和保护。

Higuchi等(1996)对白枕鹤的东部种群进行卫星跟踪研究,分析了白枕鹤东部种群迁徙停歇的重要

区域和停留时间并提出了重要区域的保护问题;随后,研究确定了在俄罗斯东部繁殖的白枕鹤越冬地以及中途停歇地的位置(Higuchi et al, 2004)。Harris等(2000)和Fujita等(2004)研究了白枕鹤西部种群的迁徙路径、重要停歇地、越冬地位置以及路线选择与适宜栖息地分布间的关系。目前基于卫星跟踪的白枕鹤迁徙研究尚有空白,且以往的研究中跟踪个体样本量小,获得的数据有限。近年来,对白枕鹤西部种群的研究主要集中于越冬期活动区分析、越冬地生境选择、繁殖栖息地分布模型预测及验证等(程雅畅, 2015^①; 温立嘉, 2017^②; 吴海峰等, 2018),而迁徙停歇地的研究较少。为了解白枕鹤迁徙停歇状况及停歇地保护现状,本研究于2017–2018年在蒙古国东部完成了50只白枕鹤的跟踪工作,获得春秋两季各48条迁徙路径,旨在分析以下问题:(1)白枕鹤西部种群的重要停歇地和迁徙时空规律;(2)迁徙路线选择和重要栖息地选择的原因;(3)迁徙停歇地保护空缺,以期为保护和管理栖息地提供科学建议。

1 研究方法

1.1 数据来源

我们于2017–2018年夏季在蒙古国东部的克鲁伦河(Kerulen River)和乌勒兹河(Ulz River)的沿河湿地开展白枕鹤跟踪工作。使用抄网捕捉,佩戴跟踪器后在原地释放。采用的腿环式跟踪器由湖南环球信士科技有限公司生产,型号为HQLG4021S。跟踪器和卡扣合计重量为44 g,不超过个体体重(2–5 kg)的1%,低于动物遥测技术中跟踪器重量不超过

①程雅畅 (2015) 基于GPS遥测的江西鄱阳湖越冬白枕鹤(*Grus vipio*)活动区和栖息地选择研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

②温立嘉 (2017) 白枕鹤繁殖栖息地分布模型及GPS-GSM跟踪数据验证. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

体重3%–5%的经验值(Barron et al, 2010)。所用跟踪器采用GPS进行卫星定位, 利用全球移动通讯系统(global system for mobile communications, GSM)传输信息, 数据包括每个位点的时间、经度、纬度、瞬时速度和定位精度等。共给50只白枕鹤佩戴了GPS-GSM跟踪设备, 2017年夏天跟踪了10只白枕鹤幼鸟, 有1只个体没有数据传回; 2018年共跟踪个体40只(成鸟21只, 幼鸟19只), 有3只个体没有数据传回; 其余46只均从蒙古国东部繁殖地飞到中国境内。

1.2 数据处理

每只跟踪个体的数据收集时间为开始跟踪之日起至2019年5月12日, 46只跟踪个体的总数据集包含了265,411个GPS位点。数据采集频率多数为每小时1个位点, 详细信息见附录1。数据定位精确度分为6个等级: A (± 5 m)、B (± 10 m)、C (± 20 m)、D (± 100 m)、E ($\pm 2,000$ m)和无效位点。为确保迁徙轨迹的准确性, 在本研究中只使用等级为A、B、C的位点信息, 合计占总数据量的98.7%。将筛选后的数据导入ArcGIS 10.2, 绘制迁徙路线及热力图(heat map)。

1.3 迁徙状态判定

在迁徙期间, 当跟踪位点的瞬时速度为0时, 识别为迁徙停歇位点; 当瞬时速度大于10 km/h时, 判定为迁徙飞行状态(Mi et al, 2018)。将停歇48 h以上且活动半径在30 km范围内的区域定义为迁徙停歇地(Kölzsch et al, 2016)。本研究中的白枕鹤都在蒙古东部的繁殖地进行跟踪, 迁徙轨迹显示这些跟踪个体均迁往鄱阳湖地区越冬。我们通过跟踪位点的瞬时速度和纬度变化来判断迁徙开始和结束日期。在春季2–3月和秋季9–11月, 当跟踪个体某天内突然出现瞬时速度连续大于10 km/h的位点, 同时迁徙移动纬度大于 1° (约100 km), 而之前1个月内未出现连续几小时瞬时速度大于10 km/h的跟踪位点, 则确定该日期为个体迁徙开始日期; 在春季5–6月和秋季11–12月, 当跟踪个体某天内连续出现瞬时速度小于10 km/h的跟踪位点、移动纬度小于 1° , 且之后1个月内不再出现连续几小时瞬时速度大于10 km/h的位点, 则确定该日期为个体迁徙结束日期。滦河上游停歇时间由到达滦河上游区域第1个瞬时速度为0的位点与离开该区域第1个瞬时速度大于10 km/h的位点所对应的日期确定。迁徙时间指

迁徙持续时间, 由迁徙开始日期与结束日期确定。其他停歇地时间指在除滦河上游区域外的其他停歇地停留的总时间。

1.4 统计分析

为了分析白枕鹤迁徙路线选择的潜在原因和重要停歇地的特征, 我们利用Salford Predictive Modeler (SPM) v8.0中的random forest (随机森林)和TreeNet两种机器学习模型, 选取了水源(距河流距离、距湖泊距离)、地形(海拔、坡度、坡向)、干扰因子(人为干扰、距道路距离)和土地覆盖8个环境因子(图层来源见附录2), 建立了迁徙路线环境因子选择偏好和比较迁徙路线和滦河上游区域环境因子的统计模型。选取这些环境因子是因为水源、食物和隐蔽场所是野生动物生存的基本要素(魏辅文等, 1998)。

本研究共有46只跟踪个体, 样本量较大, 数据采集频率多数为每小时1个位点, 独立性较好, 共获得迁徙位点76,888个。在这些位点中, 随机选择了1,000个, 以简化运算。根据所有的迁徙位点在ArcGIS中绘制一个最小凸多边形, 在这个区域内生成1,000个随机点, 与上述1,000个迁徙位点比较, 以此建立白枕鹤迁徙路线环境选择偏好模型。跟踪个体在滦河上游区域内迁徙位点共41,796个, 约占所有迁徙位点的一半。在这些位点中随机选择500个, 与上述1,000个迁徙位点进行比较, 以此建立滦河上游和整条迁徙路线环境因子比较的模型。

为了了解重要停歇地保护现状, 统计了滦河上游区域白枕鹤迁徙停歇点在保护地内的比例, 分析该区域的保护现状。由于没有滦河源国家森林公园和蔡木山省级自然保护区的边界矢量图层, 我们依据文献提供的经纬度绘制了这两处保护地的矢量范围(邓立斌, 2012; 王献溥等, 2012)。

2 结果

2.1 迁徙概况

2017–2019年间, 获得白枕鹤西部种群春季迁徙路线48条(图1A)。跟踪个体均稳定往返于蒙古国东部的繁殖地(度夏)和我国江西鄱阳湖越冬地之间, 且成功跟踪一年的白枕鹤在翌年春季会回到前一年的繁殖地或距前一年繁殖地较近的地方。跟踪记录显示春季迁徙于3月4–13日开始, 4月20日至5月25日结束, 持续 52.52 ± 18.60 天。获得秋季迁徙路线

48条(图1B),发现秋季迁徙于9月23日至10月9日开始,10月30日至11月20日结束,持续 31.79 ± 14.68 天(表1)。

2.2 迁徙停歇

白枕鹤在春季迁徙过程中有3处停歇地,分别是天津北大港、北京野鸭湖和滦河上游区域。秋季迁徙有5处停歇地,分别为锡林浩特市、克什克腾旗、滦河上游区域、天津北大港、黄河三角洲(图1)。根据停歇位点确定了白枕鹤沿滦河上游的停歇区域(图2)。91.67%的春季迁徙个体(48只次)和72.91%的秋季迁徙个体(48只次)选择在滦河上游区域停歇。春季于3月8–28日迁到,4月7–25日迁离($36.16 \pm$

15.00天),停留时间占春季迁徙期的75%;成鸟停留 24.58 ± 8.31 天,亚成体停留 37.83 ± 19.34 天。秋季9月25日至10月24日迁到,10月25日至11月8日迁离(20.26 ± 11.08 天),停留时间占秋季迁徙期的67%,成鸟和亚成体分别停留 22.45 ± 11.60 天和 18.50 ± 10.34 天。在滦河上游区域停歇时间长于其他停歇地停留时间(表1)。以上结果说明滦河上游区域是白枕鹤西部种群最重要的迁徙停歇地。

2.3 白枕鹤迁徙路线和停歇地选择

白枕鹤迁徙路线选择模型的结果显示, random forest和TreeNet模型准确性值(area under the curve of receiver operator characteristic (ROC) curves,

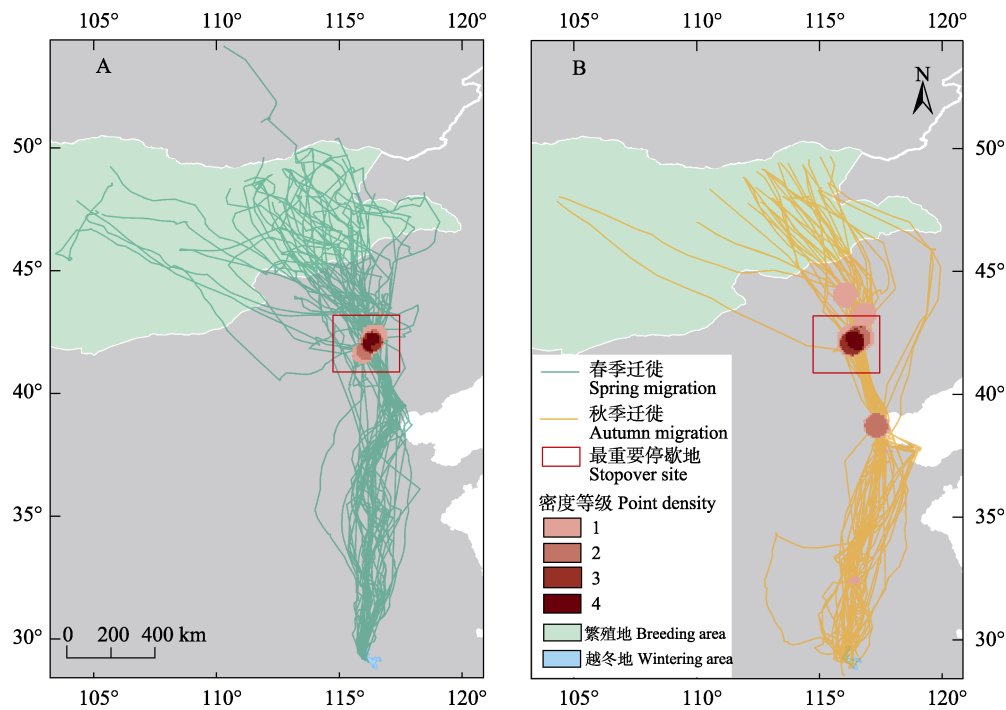


图1 白枕鹤迁徙路线和迁徙停歇地(A为春季迁徙,B为秋季迁徙)
Fig. 1 Migration routes and stopover sites of white-naped crane. A shows spring migration; B shows autumn migration.

表1 白枕鹤迁徙持续时间和停歇地停留时间

Table 1 Duration of migration and staging time at stopover sites of white-naped crane

序号 Number	迁徙参数 Parameter	春季迁徙 Spring migration (n = 48)	标准差 SD	秋季迁徙 Autumn migration (n = 48)	标准差 SD
1	迁徙开始日期 Start date of migration	03-10	3.8	10-05	10.95
2	迁徙结束日期 End date of migration	05-01	18.07	11-01	11.75
3	迁徙时间 Duration of migration (d)	52.52	18.60	31.79	14.68
4	滦河上游停留时间 Staging time at Luan River upper reaches (d)	36.16	15.00	20.26	11.08
5	其他停歇地停留时间 Staging time at other stopover sites (d)	6.43	6.43	7.20	10.72

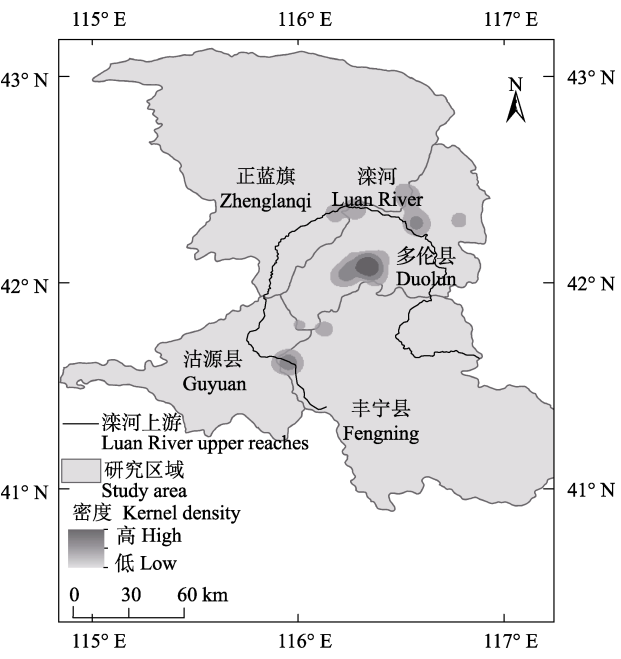


图2 滦河上游区域白枕鹤停歇位点核密度分析结果
Fig. 2 Kernel density result of white-naped crane in the Luan River upper reaches staging area

AUC)分别为0.94和0.96, 模型准确性为优。两种模型结果的环境因子重要值排序显示(附录3), 距湖泊距离、海拔和坡度是影响白枕鹤迁徙路线选择的三个主要环境因子, 其中距湖泊距离是最重要的环境因子。环境因子响应曲线显示, 白枕鹤在迁徙途中偏好距湖泊近(< 210 km, 图3A)、海拔在1,200–1,500 m之间(图3B)且坡度小(< 1°, 图3C)的区域。

我们对滦河上游区域和整条迁徙路线的栖息地选择进行了比较。random forest和TreeNet模型的准确性AUC值分别为0.72和0.73。两种模型结果的环境因子重要值排序显示(附录3, 附录4), 海拔、距河流距离和距湖泊距离是影响白枕鹤滦河上游区域停歇地选择的三个主要环境因子, 其中海拔是最重要的环境因子。响应曲线显示白枕鹤所选择的滦河上游停歇地海拔为1,200–1,500 m (图3D), 与白枕鹤在整个迁徙途中偏好1,200–1,500 m的地方(图3B)一致; 这个区域距河流的距离更近(< 70 km, 图3E), 距湖泊距离也更近(100–175 km, 图3F)。

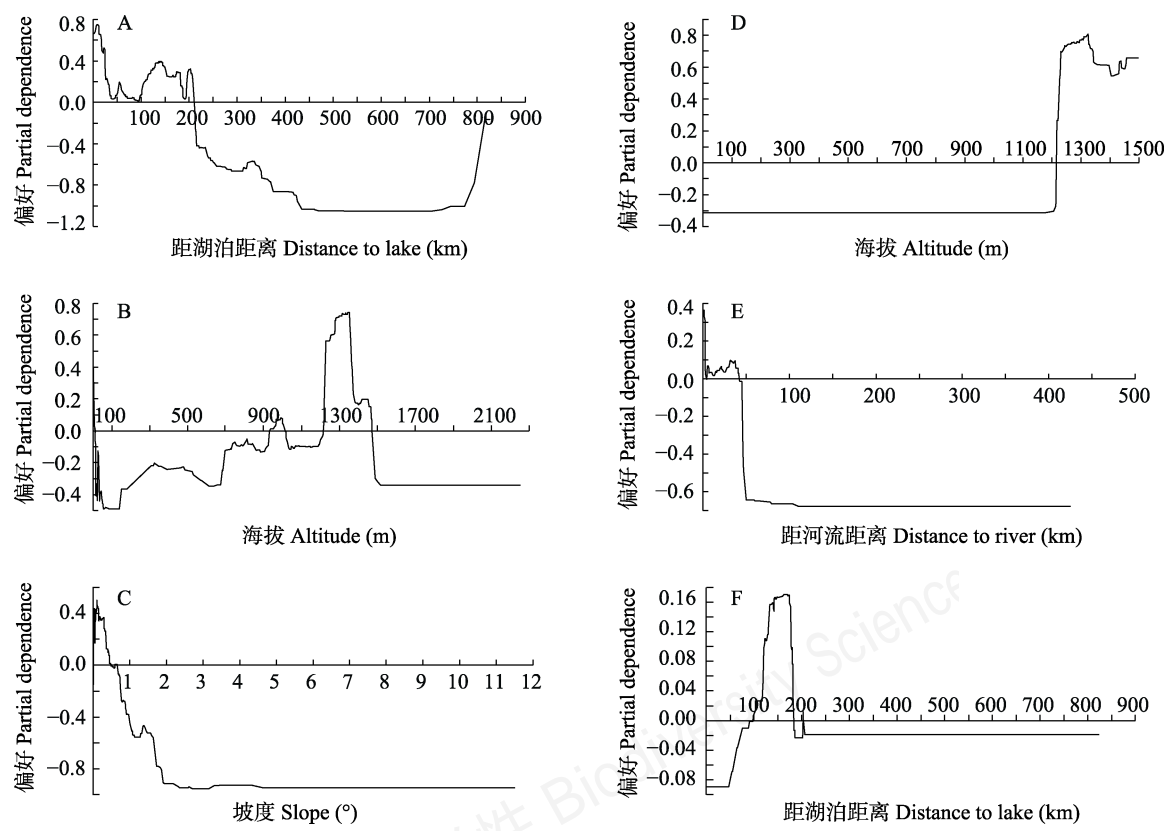


图3 白枕鹤整条迁徙路线(A–C)和滦河上游区域(D–F)最重要迁徙停歇地选择的主要环境因子响应曲线
Fig. 3 Environmental factor response curves for the selection of migration route (A–C) and the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane

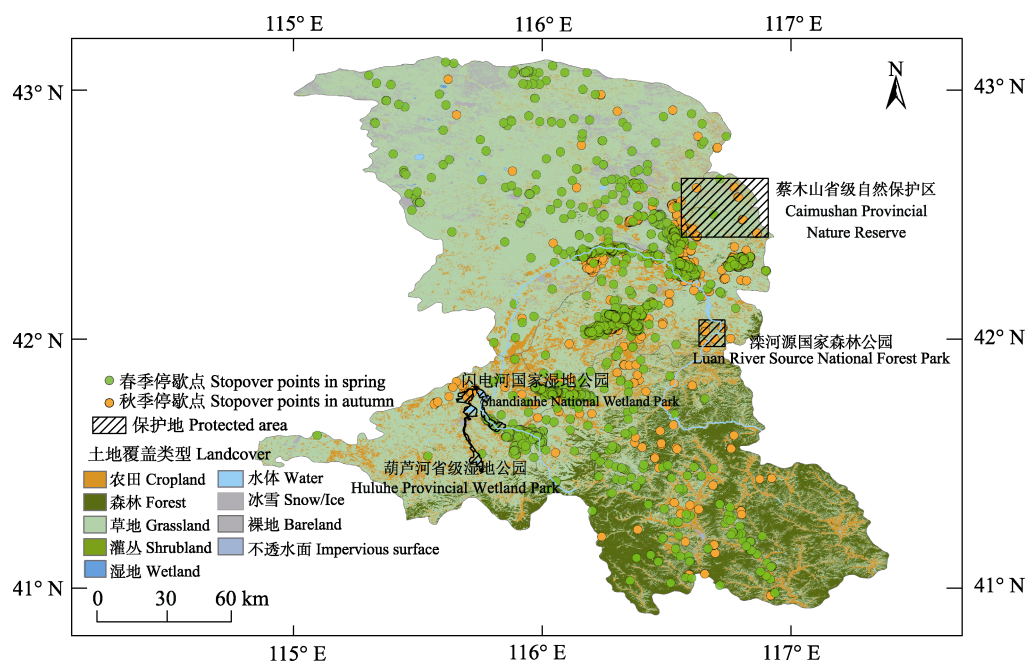


图4 滦河上游区域白枕鹤停歇点分布和现有保护地

Fig. 4 Distribution of staging points of white-naped crane and protected area at the Luan River upper reaches staging area

2.4 保护空缺

滦河上游(沽源-正蓝旗-多伦)区域内现有四处保护地(图4), 分别是闪电河国家湿地公园、滦河源国家森林公园、葫芦河省级湿地公园、蔡木山省级自然保护区。白枕鹤春季迁徙在此处的停歇位点共有 34,227 个, 而在保护区内的位点只有 196 个 (0.57%); 秋季迁徙在此处的停歇位点有 12,653 个, 在保护区内的位点只有 207 个 (1.63%) (图4)。

3 讨论

3.1 春秋迁徙时间差异

我们的研究结果表明白枕鹤春季迁徙持续时间平均 52 天、秋季迁徙平均 32 天, 春季迁徙时间长于秋季。这与 Kölzsch 等 (2016)、Deng 等 (2019) 的研究结果一致。他们发现一些长距离迁徙水鸟春季迁徙时间长于秋季, 甚至是秋季迁徙持续时间的两倍, 主要是因为在中途停歇地停留的时间不同。白枕鹤西部种群在春季迁徙途中停歇时间约 42 天, 秋季约 27 天。在春季迁徙时途中选择的停歇地较少, 有些个体只选择滦河上游区域长时间停留。滦河上游是白枕鹤西部种群停留时间最长的迁徙停歇地。白枕鹤在此区域春季停留 36 天左右 (图2), 比秋季停留时间长约 16 天, 与春秋迁徙时间差异一致。因此我

们推断可能是春季在滦河上游区域停留时间长造成了春秋迁徙时间的差异。此外, 不同年龄阶段的个体在迁徙表现上存在一定差异, 如幼鸟的迁徙停歇时间比成鸟长 (Monti et al, 2018)。白枕鹤亚成体春季迁徙在滦河上游区域停歇时间约 42 天, 因此我们推测白枕鹤春季在滦河上游区域停留时间长可能是受亚成体的影响, 亚成体因没有繁殖任务, 春季迁徙时间拖延, 迁徙停歇时间比成鸟更长。

3.2 重要迁徙停歇地的选择

对于多数迁徙鸟类来说, 其大部分迁徙时间实际上都花费在中途停歇地, 以获得后续飞行所需能量 (Newton, 2008)。此外, 鸟类在进入繁殖地前期会进行能量积累, 以增加进入繁殖地后的繁殖成功率 (Prop et al, 2003; Kölzsch et al, 2016)。迁徙停歇地的可利用性对于确定沿迁徙路线分布的停歇地的地理位置以及理解鸟类迁徙策略有重要意义 (Giunchi et al, 2019)。本研究发现白枕鹤迁徙期选择滦河上游区域作为其最重要的迁徙停歇地 (图1, 图2, 图4), 也是迁徙路径经过滦河上游区域的成鸟进入繁殖地前的最后一个停歇地。

Harris 等 (2000) 对繁殖于俄罗斯达乌尔斯基自然保护区 (Daurski Nature Reserve) 的白枕鹤进行了卫星跟踪, 发现白枕鹤飞往我国江西鄱阳湖地区越

冬,并且在迁徙途中选择山东省黄河入海口地区、天津与河北交界处以及渤海附近停歇。其中4只在渤海附近停歇时间约占迁徙期时长的70%,仅有1只没有在渤海附近停歇,表明天津东部与渤海相邻区域和黄河三角洲地区是白枕鹤最重要的迁徙停歇地。本研究中的跟踪个体均繁殖于蒙古东部沿河湿地,在迁徙途中也会在天津东部渤海附近和黄河三角洲短时间停留(2–5天),而在滦河上游区域停留时间最长。由此推测白枕鹤的繁殖地不同可能造成迁徙途中最重要停歇地的差异。此外迁徙途中停歇地的质量也会影响鸟类的迁徙停歇地选择和停留时间(Nilsson et al, 2013),停歇地植被类型、农业种植结构、湿地湖泊水位这些环境因素变化都可能导致栖息地质量改变(Orellana-Macías et al, 2020)。由此我们推测滦河上游区域是白枕鹤西部种群受停歇地质量影响而选择的一处更适宜的停歇地。

白枕鹤迁徙途中适宜的栖息地数量和类型影响其迁徙路线的选择(Fujita et al, 2004)。栖息地选择模型结果显示白枕鹤选择滦河上游作为其停歇地,并且是最重要停歇地,可能是该区域距河流较近(< 70 km, 图3E),满足白枕鹤对栖息地水源条件的需求,同时也为其提供了夜栖地。白枕鹤在迁徙途中偏好选择的海拔在1,200–1,500 m的区域(图3B)就是滦河上游停歇地(图3D),说明了滦河上游区域在整条迁徙路线上的重要性。此外这一区域不仅拥有较多湿地和水体,还有大量的草地和部分农田(附录5),属于典型的农牧交错带(翟夏杰, 2018)。草地和农田可以给白枕鹤提供丰富的食物资源。通过实地调查发现沽源–正蓝旗–多伦县主要种植燕麦(*Avena sativa*)、玉米(*Zea mays*)和莜麦(*Avena chinensis*),农田和草地为白枕鹤提供了日间活动和觅食地,河湖边湿地为夜栖地。

3.3 重要停歇地保护建议

当前滦河上游(沽源–正蓝旗–多伦县境内)虽已有四处保护地(图4),但是46,000多个停歇位点中超过98%的位点不在保护地内,说明这些保护地未能覆盖白枕鹤在此区域停歇的主要范围,存在区域重要性和现有保护地设置状况不匹配的问题。候鸟集中分布区域如果保护力度不够更易出现盗猎现象。对于白枕鹤西部种群来说,在滦河上游区域停歇同时也存在一定风险。候鸟依赖繁殖地、迁徙停歇地和越冬地维持其完整生活史,任何一个区域的栖息

地丧失或退化都可能对迁徙活动带来致命影响,维持迁徙停歇地栖息环境质量是维持种群稳定的关键(Hostetler et al, 2015; Xu et al, 2019)。因此,我们建议将滦河上游作为一个整体,作为重要生态区域加强保护和监管力度,维护白枕鹤栖息地质量,并作为重要保护地纳入保护管理体系,在各地生态红线的划定上予以充分考虑。如能规划建立跨省区的滦河上游国家公园,实现内蒙古和河北省的保护地跨省区管理或为更好的选择。

致谢: 感谢国家林业和草原局、Whitley Fund for Nature给予的资助,感谢北京林业大学研究生王子建和蒙古鸟类保护中心Bundaa先生参与部分野外工作,感谢中国科学院动物研究所李欣海老师在数据分析上予以的指点。

参考文献

- Barron DG, Brawn JD, Weatherhead PJ (2010) Meta-analysis of transmitter effects on avian behaviour and ecology. *Methods in Ecology & Evolution*, 1, 180–187.
- Bridge SE, Thorup K, Bowlin SM, Chilson BP, Diehl HR, Fléron WR, Hartl P, Kays R, Kelly FJ, Robinson DW, Wikelski M (2011) Technology on the move: Recent and forthcoming innovations for tracking migratory birds. *BioScience*, 61, 689–698.
- Deng LB (2012) Research on forest park tourism development based on SWOT analysis: A case study of Luanheyuan National Forest Park in Inner Mongolia. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 6(3), 16–19. (in Chinese) [邓立斌 (2012) 基于SWOT分析的森林公园旅游开发研究——以内蒙古滦河源国家森林公园为例. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 6(3), 16–19.]
- Deng XQ, Zhao QS, Fang L, Xu ZG, Wang X, He HR, Cao L, Fox AD (2019) Spring migration duration exceeds that of autumn migration in Far East Asian greater white-fronted geese (*Anser albifrons*). *Avian Research*, 10, 19.
- Dokter AM, Farnsworth A, Fink D, Ruiz-Gutierrez V, Hochachka WM, La Sorte FA, Robinson OJ, Rosenberg KV, Kelling S (2018) Seasonal abundance and survival of North America's migratory avifauna determined by weather radar. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1603–1609.
- Fiedler W (2009) New technologies for monitoring bird migration and behaviour. *Ringed & Migration*, 24, 175–179.
- Fujita GO, Guan HL, Ueta M, Goroshko O, Krever V, Ozaki K, Mita N, Higuchi H (2004) Comparing areas of suitable habitats along travelled and possible shortest routes in

migration of white-naped cranes *Grus vipio* in East Asia. *Ibis*, 146, 461–474.

- Gilbert M, Buuveibaatar B, Fine AE, Jambal L, Strindberg S (2016) Declining breeding populations of white-naped cranes in Eastern Mongolia, a ten-year update. *Bird Conservation International*, 26, 490–504.
- Giunchi D, Baldaccini NE, Lenzoni A, Luschi P, Sorrenti M, Cerritelli G, Vanni L (2019) Spring migratory routes and stopover duration of satellite-tracked Eurasian teals *Anas crecca* wintering in Italy. *Ibis*, 161, 117–130.
- Guo YM, He FQ (2017) Preliminary results of satellite tracking on Ordos demoiselle cranes. *Chinese Journal of Wildlife*, 38, 141–143. (in Chinese with English abstract) [郭玉民, 何芬奇 (2017) 鄂尔多斯蓑羽鹤迁徙线路初探. *野生动物学报*, 38, 141–143.]
- Harris J, Su LY, Higuchi H, Ueta M, Zhang ZW, Zhang YY, Ni XJ (2000) Migratory stopover and wintering locations in eastern China used by white-naped cranes *Grus vipio* and hooded cranes *G. monacha* as determined by satellite tracking. *Forktail*, 16, 93–99.
- Higuchi H, Ozaki K, Fujita GO, Minton J, Ueta M, Soma M, Mita N (1996) Satellite tracking of white-naped crane migration and the importance of the Korean demilitarized zone. *Conservation Biology*, 10, 806–812.
- Higuchi H, Pierre JP, Krever V, Andronov V, Fujita GO, Ozaki K, Goroshko O, Ueta M, Smirensky S, Mita N (2004) Using a remote technology in conservation: Satellite tracking white-naped cranes in Russia and Asia. *Conservation Biology*, 18, 136–147.
- Hostetler JA, Sillett TS, Marra PP (2015) Full-annual-cycle population models for migratory birds. *The Auk*, 132, 433–449.
- Kölzsch A, Müskens GJDM, Kruckenberg H, Glazov P, Weinzierl R, Nolet BA, Wikelski M (2016) Towards a new understanding of migration timing: Slower spring than autumn migration in geese reflects different decision rules for stopover use and departure. *Oikos*, 125, 1496–1507.
- Ma ZJ (2009) Research methods and progress of bird migration. *Bulletin of Biology*, 44(3), 5–9. (in Chinese) [马志军 (2009) 鸟类迁徙的研究方法和研究进展. *生物学通报*, 44(3), 5–9.]
- Mi CR, Møller AP, Guo YM (2018) Annual spatio-temporal migration patterns of hooded cranes wintering in Izumi based on satellite tracking and their implications for conservation. *Avian Research*, 9, 23.
- Monti F, Grémillet D, Sforzi A, Dominici JM, Bagur RT, Navarro AM, Fusani L, Klaassen RHG, Alerstam T, Duriez O (2018) Migration distance affects stopover use but not travel speed: Contrasting patterns between long- and short-distance migrating ospreys. *Journal of Avian Biology*, 49, e01839.
- Newton I (2008) *Migration Ecology of Birds*. Academic Press, London.
- Nilsson C, Klaassen RH, Alerstam T (2013) Differences in speed and duration of bird migration between spring and autumn. *The American Naturalist*, 181, 837–845.
- Orellana-Macías JM, Bautista LM, Merchán D, Causapé J, Alonso JC (2020) Shifts in crane migration phenology associated with climate change in southwestern Europe. *Avian Conservation and Ecology*, 15, 16.
- Panuccio M, Dell’Omo G, Bogliani G, Catoni C, Sapir N (2019) Migrating birds avoid flying through fog and low clouds. *International Journal of Biometeorology*, 63, 231–239.
- Prop J, Black JM, Shimmings P (2003) Travel schedules to the high arctic: Barnacle geese trade-off the timing of migration with accumulation of fat deposits. *Oikos*, 103, 403–414.
- Qian FW (2005) Investigation on the status of crane conservation in China. *Forest & Humankind*, (5), 31–38. (in Chinese) [钱法文 (2005) 中国鹤类保护现状调查. *森林与人类*, (5), 31–38.]
- Sergio F, Tavecchia G, Tanferna A, Blas J, Blanco G, Hiraldo F (2019) When and where mortality occurs throughout the annual cycle changes with age in a migratory bird: Individual vs population implications. *Scientific Reports*, 9, 17352.
- Si YL, Xin QC, Prins HHT, de Boer WF, Gong P (2015) Improving the quantification of waterfowl migration with remote sensing and bird tracking. *Science Bulletin*, 60, 1984–1993.
- Wang XP, Yu SL, Fang WW (2012) The protected values and effective managed approach for Caimushan Reserve in Duolun County, Inner Mongolia Autonomous Region. *Beijing Agriculture*, 27, 109–111. (in Chinese with English abstract) [王献溥, 于顺利, 方伟伟 (2012) 内蒙古多伦县蔡木山保护区的保护价值和有效管理途径. *北京农业*, 27, 109–111.]
- Wei FW, Feng ZJ, Wang ZW (1998) Review of habitat selection by wildlife. *Chinese Journal of Zoology*, 33(4), 48–52. (in Chinese) [魏辅文, 冯祚建, 王祖望 (1998) 野生动物对生境选择的研究概况. *动物学杂志*, 33(4), 48–52.]
- Wu HF, Jin JF, Batbayar N, Li FS, Ding CQ (2018) Wintering home range variation of white-naped cranes *Grus vipio* and its correlation with water level and temperature in Poyang Lake. *Chinese Journal of Zoology*, 53, 497–506. (in Chinese with English abstract) [吴海峰, 金杰峰, Nyambayar Batbayar, 李凤山, 丁长青 (2018) 鄱阳湖越冬白枕鹤活动区面积与水位和气温的关系. *动物学杂志*, 53, 497–506.]
- Wu HQ, Yang XJ, Yang JX (2008) Review of satellite tracking in bird migratory studies. *Zoological Research*, 29, 346–352. (in Chinese with English abstract) [伍和启, 杨晓君, 杨君兴 (2008) 卫星跟踪技术在候鸟迁徙研究中的应用. *动物学研究*, 29, 346–352.]
- Xu YJ, Si YL, Takekawa J, Liu Q, Prins HHT, Yin SL, Prosser

DJ, Gong P, De Boer WF (2019) A network approach to prioritize conservation efforts for migratory birds. *Conservation Biology*, 34, 416–426.

Zhai XJ (2018) Study on the Functional Characteristics and Evolution of the Main Ecosystems in the Agro-pastoral Ecotone. PhD dissertation, China Agricultural University,

Beijing. (in Chinese with English abstract) [翟夏杰 (2018) 农牧交错带主要生态系统的功能特征及演变研究. 博士学位论文, 中国农业大学, 北京.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 白枕鹤GPS-GSM跟踪数据信息

Appendix 1 The GPS-GSM tracking data information of white-naped crane
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020100-1.pdf>

附录2 白枕鹤迁徙路线和滦河上游停歇地选择模型所选环境变量的描述

Appendix 2 Description of environmental variables used in the selection model of migration route and the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020100-2.pdf>

附录3 白枕鹤迁徙路线选择模型的环境因子重要值排序(random forest和TreeNet模型的均值)

Appendix 3 Permutation importance of environmental variables in the selection model of migration route of white-naped crane (Mean of random forest and TreeNet models)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020100-3.pdf>

附录4 白枕鹤滦河上游区域停歇地选择模型的环境因子重要值排序(random forest和TreeNet模型的均值)

Appendix 4 Permutation importance of environmental variables in the selection model of the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane (Mean of random forest and TreeNet models)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020100-4.pdf>

附录5 白枕鹤迁徙路线选择模型和滦河上游停歇地选择模型的环境因子响应曲线

Appendix 5 Environmental factor response curves for the selection of migration route and the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020100-5.pdf>

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

附录1 白枕鹤GPS-GSM跟踪数据信息

Appendix 1 The GPS-GSM tracking data information of white-naped crane

个体编号 ID	跟踪起始时间 Start date	数据截止时间 End date	年龄 Age	捕捉位置(纬度\经度) Location (Latitude\Longitude)	采集频率 Frequency	位点数 Points	2017秋季 2017 Autumn	2018春季 2018 Spring	2018秋季 2018 Autumn	2019春季 2019 Spring
23	2017/7/19	2019/5/12	幼	49.42° N 113.25° E	*	4,147	+	—	+	—
24	2017/7/22	2018/4/11	幼	49.16° N 112.79° E	1 h	3,872	+	—	—	—
25	2017/7/22	2019/5/12	幼	49.16° N 112.79° E	*	7,834	+	+	+	+
26	2017/7/22	2019/5/12	幼	49.34° N 113.63° E	*	6,862	+	+	—	+
27	2017/7/24	2019/4/20	幼	49.52° N 114.65° E	*	6,368	+	+	—	+
29	2017/7/28	2019/5/12	幼	48.27° N 114.95° E	*	6,387	+	+	+	+
30	2017/7/29	2019/5/12	幼	48.02° N 114.29° E	*	7,671	+	+	+	+
31	2017/7/29	2017/11/24	幼	48.01° N 114.20° E	1 h	2,315	+	—	—	—
32	2017/7/29	2019/5/12	幼	48.01° N 114.20° E	*	5,395	+	+	+	+
36	2018/7/10	2019/5/9	成	47.78° N 112.63° E	*	4,091	—	—	+	+
37	2018/7/10	2019/5/12	幼	48.25° N 113.21° E	*	4,889	—	—	+	+
38	2018/7/11	2019/5/12	成	49.17° N 112.75° E	*	3,661	—	—	+	+
39	2018/7/11	2019/5/12	成	49.17° N 112.75° E	1 h	6,982	—	—	+	+
40	2018/7/11	2019/5/12	成	49.10° N 112.77° E	1 h	7,835	—	—	+	+
41	2018/7/11	2019/5/12	幼	49.10° N 112.77° E	1 h	7,844	—	—	+	+
42	2018/7/11	2019/5/12	成	49.39° N 112.26° E	1 h	6,861	—	—	+	+
44	2018/7/13	2019/5/12	成	49.10° N 112.51° E	1 h	7,304	—	—	+	+
45	2018/7/13	2019/5/12	成	49.10° N 112.77° E	1 h	7,040	—	—	+	+

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

个体编号 ID	跟踪起始时间 Start date	数据截止时间 End date	年龄 Age	捕捉位置(纬度\经度) Location (Latitude\Longitude)	采集频率 Frequency	位点数 Points	2017秋季 2017 Autumn	2018春季 2018 Spring	2018秋季 2018 Autumn	2019春季 2019 Spring
46	2018/7/17	2019/5/12	幼	49.51° N 114.62° E	1 h	6,838	—	—	+	+
47	2018/7/17	2019/5/12	幼	49.51° N 114.62° E	1 h	7,113	—	—	+	+
48	2018/7/18	2019/5/12	成	49.49° N 114.64° E	1 h	6,601	—	—	+	+
49	2018/7/19	2019/5/12	成	49.55° N 114.66° E	*	6,222	—	—	+	+
50	2018/7/20	2019/5/12	成	49.56° N 114.60° E	1 h	6,744	—	—	+	+
51	2018/7/20	2019/5/12	成	49.56° N 114.60° E	1 h	6,667	—	—	+	+
52	2018/7/21	2019/5/12	成	49.55° N 114.51° E	1 h	6,608	—	—	+	+
53	2018/7/23	2019/5/12	幼	49.40° N 114.43° E	*	6,000	—	—	+	+
54	2018/7/23	2019/5/12	成	49.17° N 112.75° E	1 h	7,199	—	—	+	+
55	2018/7/24	2019/5/12	幼	48.72° N 111.98° E	1 h	6,903	—	—	+	+
56	2018/7/24	2019/5/12	成	48.71° N 111.94° E	1 h	6,428	—	—	+	+
57	2018/7/24	2019/4/25	成	48.71° N 111.94° E	*	5,706	—	—	+	+
58	2018/7/24	2019/5/12	成	48.71° N 111.94° E	1 h	7,214	—	—	+	+
59	2018/7/24	2019/5/12	成	48.71° N 111.94° E	*	5,874	—	—	+	+
61	2018/7/24	2018/11/16	成	48.71° N 111.94° E	1 h	2,969	—	—	—	+
62	2018/7/24	2019/5/12	幼	47.79° N 112.33° E	1 h	7,127	—	—	+	+
63	2018/7/26	2019/5/12	幼	47.80° N 112.70° E	1 h	7,170	—	—	+	+
64	2018/7/25	2019/5/12	幼	47.80° N 112.70° E	1 h	7,130	—	—	+	+
65	2018/7/27	2019/5/12	幼	48.01° N 113.38° E	1 h	6,996	—	—	+	+
66	2018/7/27	2019/5/12	幼	48.01° N 113.38° E	*	5,918	—	—	+	+

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

个体编号 ID	跟踪起始时间 Start date	数据截止时间 End date	年龄 Age	捕捉位置(纬度\经度) Location (Latitude\Longitude)	采集频率 Frequency	位点数 Points	2017秋季 2017 Autumn	2018春季 2018 Spring	2018秋季 2018 Autumn	2019春季 2019 Spring
67	2018/7/27	2019/5/12	幼	48.03° N 113.67° E	1 h	6,964	–	–	+	+
68	2018/7/31	2019/5/12	幼	48.01° N 114.29° E	1 h	2,524	–	–	–	+
69	2018/7/31	2019/5/12	幼	48.01° N 114.29° E	1 h	2,023	–	–	–	+
70	2018/8/3	2019/5/12	幼	47.00° N 110.01° E	1 h	6,678	–	–	+	+
71	2018/8/3	2019/5/12	幼	47.00° N 110.01° E	1 h	6,774	–	–	+	+
72	2018/8/3	2019/5/12	幼	47.00° N 110.01° E	1 h	6,784	–	–	+	+
73	2018/8/9	2019/5/12	幼	47.84° N 104.30° E	*	5,541	–	–	+	+
74	2018/8/9	2019/5/5	幼	47.84° N 104.33° E	*	6,277	–	–	+	+

“+”代表当年数据完整, “–”代表当年没有数据或数据缺失、不完整。少数个体的跟踪数据在一段时间内采集频率为2、3、6、12 h一个位点, 用“*”表示, 不代表迁徙数据缺失。

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

附录2 白枕鹤迁徙路线和滦河上游停歇地选择模型所选环境变量的描述
Appendix 2 Description of environmental variables used in the selection model of migration route and the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane

环境图层 Environmental layers	描述 Description	年份 Year	数据来源 Data sources
Landcover	土地覆盖	2017	http://data.ess.tsinghua.edu.cn/
Distance to river	距河流的距离(m)	2018	http://www.naturalearthdata.com/
Distance to lake	距湖泊的距离(m)	2018	http://www.naturalearthdata.com/
HII	人为干扰	2005	https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/
Altitude	海拔(m)	2000	http://www.worldclim.org
Slope	坡度(°)	2000	http://www.worldclim.org
Aspect	坡向	2000	http://www.worldclim.org
Distance to road	距公路距离(m)	2018	http://www.naturalearthdata.com

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

附录3 白枕鹤迁徙路线选择模型的环境因子重要值排序(random forest和TreeNet模型的均值)
Appendix 3 Permutation importance of environmental variables in the selection model of migration route of white-naped crane (Mean of random forest and TreeNet models)

环境因子 Variable	相对重要值 Score
距湖泊距离 Distance to lake	100
海拔 Altitude	71.58
坡度 Slope	56.1
距河流距离 Distance to river	50.18
土地覆盖 Landcover	34.58
距公路距离 Distance to road	23.49
人为干扰 Human influence index (HII)	22.73
坡向 Aspect	15.82

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

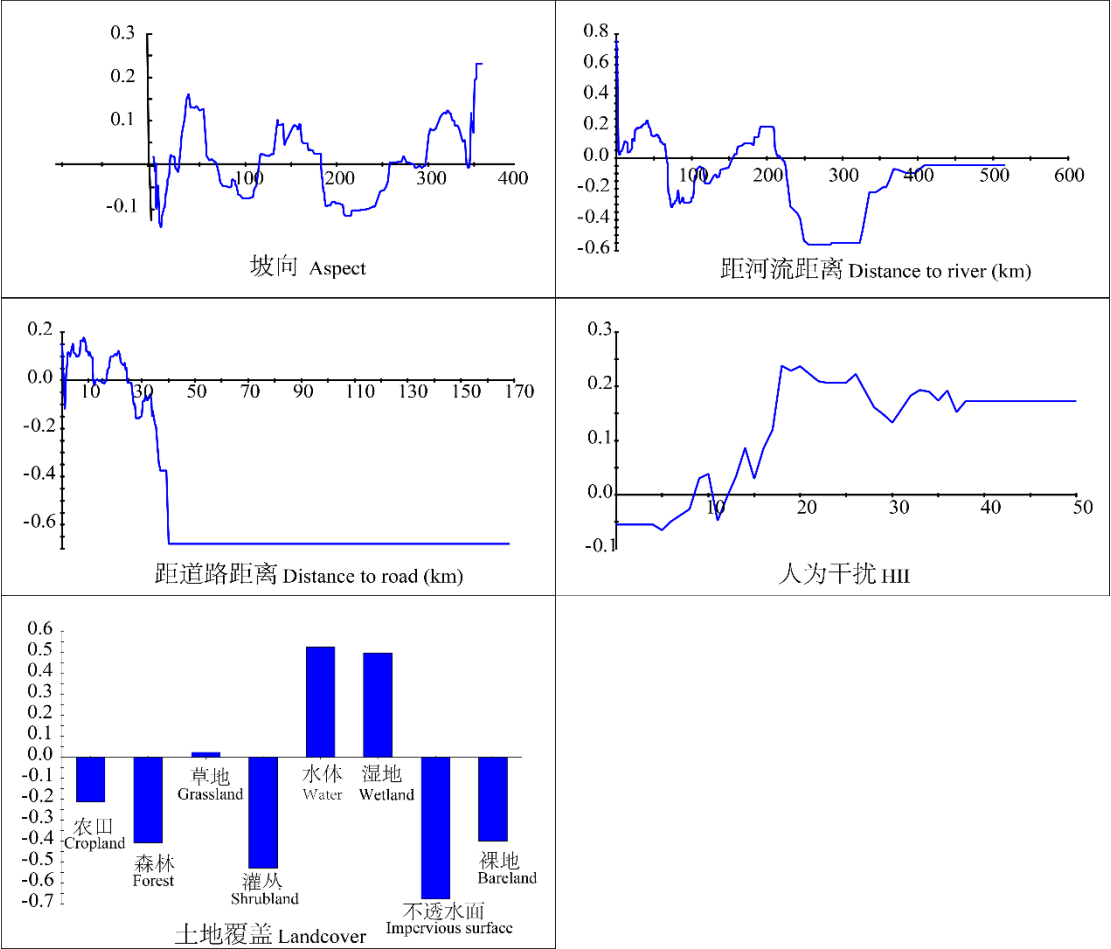
附录4 白枕鹤滦河上游区域停歇地选择模型的环境因子重要值排序(random forest和TreeNet模型的均值)
Appendix 4 Permutation importance of environmental variables in the selection model of the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane (Mean of random forest and TreeNet models)

环境因子 Variable	相对重要值 Score
海拔 Altitude	100
距河流距离 Distance to river	68.73
距湖泊距离 Distance to lake	40.70
坡度 Slope	29.27
坡向 Aspect	16.42
土地覆盖 Landcover	16.42
距公路距离 Distance to road	15.22
人为干扰 Human influence index (HII)	7.35

郎雪敏, Gankhuyag Purev-Ochir, Oyunchimeg Terbish, Dashdorj Khurelbaatar, Baasansuren Erdenechimeg, Amarkhuu Gungaa, 宓春荣, 郭玉民 (2020) 滦河上游——白枕鹤西部种群的重要停歇地. 生物多样性, 28, 1213–1221. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020100>

附录5 白枕鹤迁徙路线选择模型和滦河上游停歇地选择模型的环境因子响应曲线
Appendix 5 Environmental factor response curves for the selection of migration route and the Luan River upper reaches staging area of white-naped crane

A 迁徙路线选择模型环境因子响应曲线



B 滦河上游停歇地选择模型的环境因子响应曲线

