



•研究报告•

基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状

王昱熙¹ 谢彦波¹ Nyambayar Batbayar⁵ 朱宝光⁴ 董树斌⁴ Anna Barma⁷
Anton Sasin⁶ 曹 垒^{2,3*}

1 (中国科学技术大学, 合肥 230026) 2 (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

3 (中国科学院大学, 北京 100049) 4 (洪河国家级自然保护区, 建三江, 黑龙江 156332)

5 (蒙古野生动物科学与保护中心, 蒙古乌兰巴托市苏赫巴托尔区 14210)

6 (俄罗斯阿穆尔社会生态联盟公共环境组织, 俄罗斯布拉戈维申斯克 675000)

7 (世界自然基金会俄罗斯阿穆尔分会, 俄罗斯符拉迪沃斯托克 690003)

摘要: 自然保护区是生物多样性保护的重要形式, 对于迁徙水鸟而言, 它的规划尤为重要。本研究于2016–2018年间在中国、蒙古国和俄罗斯捕捉6只斑头雁(*Anser indicus*)、5只白琵鹭(*Platalea leucorodia*)和10只东方白鹳(*Ciconia boyciana*)进行卫星追踪, 探讨了黄河流域自然保护区对它们栖息地的保护现状。基于4年累积获取的844,592条高频数据, 分析了这21只水鸟在黄河流域活动的时间和利用的土地类型, 并使用核密度法拟合了3种鸟类的家域。结果表明: 3种鸟类均利用黄河流域湿地作为迁徙途中的停歇地, 其中一部分白琵鹭幼鸟利用黄河流域湿地作为度夏地, 一部分东方白鹳利用黄河三角洲湿地作为越冬地; 3种水鸟在黄河流域内的土地利用情况存在差异, 斑头雁对草地(49.0%)、裸地(26.2%)与水体(22.5%)的利用率较高, 白琵鹭对农田(42.1%)、草地(19.8%)和湿地(19.6%)的利用率较高, 东方白鹳对湿地(49.8%)、农田(34.5%)和水体(4.6%)的利用率较高; 斑头雁核心的50%家域被现有保护区完全覆盖, 而白琵鹭和东方白鹳核心的50%家域被现有保护区的覆盖度分别为1.6%和0, 表明后2种水鸟的栖息地极大可能存在保护空缺; 同时对覆盖范围内土地类型自身占比进行分析, 发现3种鸟类对于裸地、草地和农田的利用偏向于被动选择, 而对于湿地和水体的利用表现为主动选择。基于卫星追踪获得的高频数据可以准确反映3种水鸟在黄河流域的停歇情况、土地利用情况及潜在栖息位点。在黄河流域自然保护区的进一步规划中, 应关注白琵鹭和东方白鹳适宜生境的保护状况, 并建立覆盖全面的保护区。

关键词: 斑头雁; 白琵鹭; 东方白鹳; 卫星遥测追踪; 黄河自然保护区; 保护现状

Discussion of existing protection for three waterbirds' habitats in the Yellow River basin nature reserves, based on satellite tracking

Yuxi Wang¹, Yanbo Xie¹, Nyambayar Batbayar⁵, Baoguang Zhu⁴, Shubin Dong⁴, Anna Barma⁷, Anton Sasin⁶, Lei Cao^{2,3*}

1 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Honghe National Nature Reserve, Jiansanjiang, Heilongjiang 156332, China

5 Wildlife Science and Conservation Center of Mongolia, Sukhbaatar District 14210, Mongolia

6 Public Environmental Organization "AmurSEU", Blagoveshchensk 675000, Russia

7 WWF-Russia, Amur Branch, Vladivostok 690003, Russia

Abstract: Nature reserves represent an important form of biodiversity conservation, and their presence is particularly crucial for migratory waterbirds. From 2016–2018, six Bar-headed Geese (*Anser indicus*), five Eurasian Spoonbills (*Platalea leucorodia*) and ten Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) were captured in

收稿日期: 2020-08-16; 接受日期: 2021-01-18

基金项目: 中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: caolei@ustc.edu.cn

China, Mongolia and Russia. During the tracking period, 844,592 pieces of high-frequency GPS tracking data were obtained, we analyzed the duration that these birds spent in the Yellow River basin and, the land cover types during their stay. Then we simulated the home range of the three species using kernel density estimation. The results showed that the Yellow River basin wetlands are used as a stopover site during the migration of these three waterbirds. Some juveniles of the Eurasian Spoonbills use the land as a summering area, and some of the Oriental Storks use it as a wintering area. There are differences in land cover of three waterfowl in the Yellow River basin. The Bar-headed Goose used the grassland (49.0%), bare land (26.2%) and water (22.5%). The Eurasian Spoonbill used the cropland (42.1%), grassland (19.8%) and wetland (19.6%). The Oriental Stork used the wetland (49.8%), cropland (34.5%) and water (4.6%). Our study found that 50% of the home range of the Bar-headed Goose overlaps with the existing nature reserves, while the home range of the Eurasian Spoonbill and the Oriental Stork only overlap 1.6% and 0 with existing nature reserves, respectively. The habitats of these latter two species are in need of greater protection. At the same time, by analyzing the proportion of land types in the coverage area, we found that the birds' utilization of bare land, grassland and cropland is more passive, while the utilization of wetland and water is active. The results detail the movement and living characteristics of three waterfowl in the Yellow River. Given the lack of overlap between their habitats and existing nature reserves, it will be important to establish comprehensive protected areas for Eurasian Spoonbills and Oriental Storks as part of further development of the Yellow River nature reserves.

Key words: Bar-headed Goose; Eurasian Spoonbill; Oriental Stork; satellite telemetry; Yellow River nature reserve; protection status

湿地作为国际上备受关注的重要生态系统,为众多濒危、易危或受威胁物种提供了适宜栖息地(IUCN, 2010)。零度等温线以北的黄河流域湿地覆盖率低于全国平均水平,但以自然湿地为主(崔丽娟, 2019)。这些湿地是东亚-澳大利西亚迁徙路线(East Asian-Australasian Flyway)、中亚迁徙路线(Central Asian Flyway)与西太平洋迁徙路线(West Pacific Flyway)的一部分(Wetlands International, 2013)。作为迁徙水鸟重要的停歇地、繁殖地和越冬地,黄河流域湿地为丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白鹤(*G. leucogeranus*)、白枕鹤(*G. vipio*)、白头鹤(*G. monacha*)与东方白鹳(*Ciconia boyciana*)等许多濒危鸟类提供了适宜生境(李淑红等, 2017; 何冰等, 2018; 黄子强等, 2018; 连海燕等, 2018; 张国钢等, 2018)。

迁徙水鸟作为国际重要湿地的表征参数(Volker et al, 2015),与湿地生态系统保护息息相关(IUCN, 2010)。而了解水鸟与环境之间关系最紧迫的任务是明确水鸟在繁殖地、停歇地和越冬地的生态需求(Berthold & Terrill, 1991),但想要准确获取这些信息,必须依赖于科学有效的技术。

卫星追踪在研究候鸟运动和环境选择方面,尤其是在识别繁殖地、停歇地和越冬地上取得了良好

效果。例如前人通过追踪识别了白鹤、白枕鹤和东方白鹳的重要越冬地鄱阳湖(Kanai et al, 2002; Higuchi et al, 2004; Shimazaki et al, 2004); Ueta等(2003)结合遥感影像研究了虎头海雕(*Haliaeetus pelagicus*)从春季迁徙到繁殖结束其栖息地的变化; Bishop等(2015)使用该技术进行了鸟类运动的研究,通过追踪斑头雁(*Anser indicus*)提出了鸟类飞越喜马拉雅山脉的“过山车理论”。

目前,设立自然保护区并扩大保护面积仍是生物多样性保护行动计划和保护公约的主要措施和目的(Joppa et al, 2008; Juffe-Bignoli et al, 2014)。我国的自然保护地主要分为3种类型:国家公园、自然保护区和自然公园(余莉等, 2020)。截至2017年,我国已经建立各类自然保护区2,750个,总面积1,470,000 km²,约占全部国土面积的14.9%,居世界第2位(NBS, 2017)。在黄河流域内,自然保护区从国家级到县级共有157个,主要集中分布在黄河源头扎陵湖-鄂陵湖、青海湖和祁连山脉。随着自然保护区的不断建成,评估其保护区网络对生态系统和指示物种的保护状况,是优化保护区网络的重要措施之一。而目前利用卫星追踪技术来评估黄河自然保护区对湿地和水鸟保护效力的研究鲜有报道。

我国基于野外实地调查鸟类数量和分布已在

黄河流域设立了众多自然保护区(Wang et al, 2012; Zhang et al, 2017)。但迁徙鸟类作为湿地的指示类群之一, 其运动时空跨度大且年际变化多, 这样仅基于野外实地调查数据规划保护区可能会遗漏一些潜在重要栖息地。卫星追踪技术能够为追踪个体和群体的保护提供有效的手段(Beatty et al, 2014)。例如: 杨秀林等(2020)通过卫星追踪白鹤迁徙, 识别了黄河三角洲自然保护区周边有1个重要的白鹤停歇地未被保护。因此将卫星追踪与野外实地调查结合, 能够为未来保护区科学规划提供新的途径。

本研究以在黄河流域栖息的3种重要水鸟为研究对象, 使用卫星追踪和卫星遥测技术, 监测分析它们在黄河流域内的活动时长、停歇和土地利用情况, 以期了解这3种水鸟与黄河流域湿地之间的依赖关系, 同时评估黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状, 以期为未来黄河流域自然保护区的进一步规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 卫星遥测追踪技术

卫星遥测追踪技术具有追踪范围广、时间跨度长、定位信息准确、数据多样化的优点(薛亚东等, 2020)。通过定时回传数据, 研究人员不仅能够获得个体精确的位置数据, 还可以获得海拔、温度、光照等环境信息, 以及三轴加速度等行为信息。

现行的发射器终端有Argos系统和GPS/GSM系统两种。Argos系统是一套集定位和数据传输于一体的卫星网络, 由6颗极轨卫星组成, 通过卫星绕地球运转, 接收追踪器的信号, 并将信号传回地面接收站, 同时通过使用多普勒定位技术实现对追踪个体的定位(Douglas et al, 2012)。GPS/GSM系统使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)进行定位, 使用全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)进行数据传输(Kays et al, 2015)。相对于Argos系统, GPS/GSM系统定位精度和频率更高, 可为迁徙研究提供大量的优质数据。

1.2 3种水鸟及捕捉追踪情况

鸟类群落的多样性与其依赖的栖息地密切相关。根据生态习性以及对栖息地的选择偏好(Grant et al, 2012), 水鸟通常分为8个相对稳定的生态类群: 鸬鹚类、雁鸭类、秧鸡类、鸨鹬类、鸥类、鹭类、

鹤类和鹳类(Li et al, 2013)。水鸟形态决定了其食性, 例如雁鸭类大多杂食, 鹭类和鹳类则多以鱼类为主。在斑块尺度和区域尺度下, 栖息地水深、盐分、植被类型、植被覆盖度、植被高度等因子对于水鸟的分布起着关键作用(Tavares et al, 2014)。邵明勤等(2016)研究发现浅水河漫滩能够为小天鹅(*Cygnus columbianus*)提供重要的栖息地。为了全面地探讨不同类群水鸟栖息地的保护现状, 本研究选择了不同食性和不同形态的3种水鸟——斑头雁、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)和东方白鹳进行追踪研究。

(1)斑头雁隶属鸭科雁属(*Anser*), 其繁殖地在中亚地区、蒙古国和中国(青海、西藏、新疆)的湖泊, 越冬地位于印度和缅甸北部、中国西南部高原地区与长江中下游流域(Carboneras et al, 2016)。迁徙路线主要是中亚迁徙路线, 广泛利用我国西部包括黄河流域在内的大量湿地, 包括扎陵湖、鄂陵湖、冬给错那湖、尕拉拉错、玛多黄河、木里、当曲、玛曲黄河、羊卓雍错等(Takekawa et al, 2009; 刘冬平, 2010)。本课题组于2018年7月8日在蒙古国捕捉了6只斑头雁, 均为成鸟, 包括1只雌鸟和5只雄鸟, 安装Ornitela公司背包式追踪器后放飞(附录1)。Ornitela公司的背包式追踪器是一种防水的太阳能式GPS发射器, 设备按照固定时间间隔记录带时间戳的经纬度, 并以固定时长通过手机网络进行数据传输。安装的追踪器重量小于捕捉个体体重的3%, 不会干扰其飞行与生存(Bodey et al, 2018)。追踪的6只斑头雁共完成8次完整的秋季迁徙与2次完整的春季迁徙。为了保证数据的完整性, 未死亡个体的数据截止时间选取到2019年12月31日。除了个体BHG002与BHG005各有2次完整的秋季迁徙与1次完整的春季迁徙外, 其余个体都仅有1次完整秋季迁徙; 除个体BHG001与BHG006是在迁徙过程中死亡导致数据缺失外, 其余4只个体迁徙数据缺失是由于设备电量耗尽导致的。绑定斑头雁的设备在2016–2017年的定位频率为2 h, 2018年设备升级后, 定位频率优化为10 min, 回传频率均为12 h, 累计获得288,770条追踪数据。

(2)东方白鹳是一种大型涉禽, 国家一级保护动物, 同时也是IUCN濒危动物(IUCN, 2010)。东方白鹳繁殖于俄罗斯远东西伯利亚东南部以及我国东北地区(Carboneras et al, 2016)。黄河三角洲是它的主要停歇地, 而且近年来逐渐有个体在此繁殖和

越冬(薛委委等, 2010; 陈军林, 2011^①; 程磊和周立志, 2017)。本课题组2016年、2018年与2019年在其繁殖期间于中国洪河国家级自然保护区(47°47' N, 133°40' E)、俄罗斯阿穆尔河区域和Bastak地区共捕捉东方白鹳幼鸟10只, 分别安装HQXS和Ornitela公司的背包式追踪器(附录1)。HQXS设备与Ornitela设备相同, 也是一种防水的太阳能电池供电的背包式GPS发射器。研究期间共计获得10次完整的秋季迁徙, 每只个体1次。为保证数据完整性, 对未死亡个体结束时间选取到2020年6月1日。除个体OS001和OS008因死亡导致数据缺失外, 其余8只个体迁徙数据缺失是长期失联导致。Ornitela设备的定位频率为10 min, 回传频率为12 h; HQXS设备的定位频率为1 h, 回传频率为24 h, 累计追踪数据304,592条。

(3) 白琵鹭是一种鹳科琵鹭属(*Platalea*)的鸟类, 其分布范围广, 在欧洲、西亚和东亚繁殖, 在非洲、地中海区域、印度、斯里兰卡区域、中国东南部和日本越冬(Carboneras et al, 2016)。在黄河流域, 白琵鹭的栖息地包括黄河三角洲湿地、河南黄河湿地和山西运城湿地等(马朝红等, 2008; 赵文强, 2016^②; 黄子强等, 2018)。研究所追踪的5只白琵鹭是2018年7月16–17日于蒙古国的Jiree River捕捉, 包括4只幼鸟和1只成鸟, 同样安装Ornitela公司的背包式追踪器(附录1)。为保证数据完整性, 未死亡个体的结束时间选取到2019年12月31日。其中2只个体仅完成1次秋季迁徙, 其余3只拥有2次完整的秋季迁徙和1次完整的春季迁徙。除个体ES005因死亡导致数据缺失外, 其余4只迁徙数据缺失是长期失联导致的。设备的定位频率为10 min, 回传频率为12 h, 共计获得追踪数据251,230条。

1.3 定位数据处理及行为划分

对获得的位点数据集进行筛选, 去除无效和定位精度过低的数据。对于每个设备数据集进行去重处理, 并按照时间顺序重排。将数据集转为kml文件导入谷歌地球。为研究各物种在黄河流域的运动, 我们将个体迁徙轨迹与黄河流域边界(黄河流域基础数据集, 2002)进行叠加, 使用R语言的data.table包对黄河流域边界内的位点进行提取。共得到6只

斑头雁个体的35,171条数据, 5只白琵鹭个体的75,643条数据, 10只东方白鹳个体的91,577条数据。

参照Wang等(2018)将水鸟迁徙过程划分为“飞行”和“非飞行”两种状态。使用“首次通过时间”划分为高迁徙段与低迁徙段, 从而识别长距离迁徙途中的出发时间、到达时间与迁徙范围(Wang et al, 2018)。而“非飞行”状态指不满足净平方位移(NSD)与阶段持续时长之比大于150 km/d与NSD大于150 km, 或者不满足NSD与持续时间之比大于75 km/d与NSD大于300 km的阶段, NSD即为位点间的最小距离。将两种状态的位点标记为不同的颜色, 导入谷歌地球判断每只个体每种状态维持的时间段, 即开始的时间节点与结束的时间节点。如果非飞行的状态持续时间大于48 h, 则该范围被视为1个停歇地。按照这样的划分标准, 将每只追踪个体的春季迁徙或秋季迁徙过程划分为飞行和停歇状态不断变换的连续过程, 并获得每种状态对应的时间段。

使用R语言的dplyr包计算斑头雁、白琵鹭和东方白鹳个体的迁徙参数。其中迁徙距离是指从迁徙开始到迁徙完成累积的飞行距离, 不包括个体在停歇地的活动。迁徙持续时间是从繁殖/越冬区域出发到达越冬/繁殖区域之间的时间。通过提取每只个体迁徙途中停歇地的数量, 计算1次迁徙期间在所有停歇地花费的累积时间作为中途停歇时间。飞行时长是迁徙持续时间减去中途停歇时间, 迁徙距离除以飞行时间得到飞行速度。黄河流域内停歇、度夏或越冬的时长是指追踪个体进入黄河流域第一个位点至离开黄河流域第一个位点之间的时长, 并计算它们在黄河流域的活动时间在迁徙中的占比。

1.4 位点密度分析

使用ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013)导入追踪个体在黄河流域的所有数据, 通过渔网分析将黄河流域划分为10 km × 10 km网格, 统计每只追踪个体回传位点落在单元网格内的数量, 删去没有位点分布的网格。

为了分析追踪物种在黄河流域活动期间对不同区域利用的差异, 我们将位点分布最多的网格定义为100%, 从而排除设备追踪时间长短不一致和数据量不一致所产生的分析差异。对于追踪个体而言, 此网格即是追踪物种活动热度最高的区域。按照每个网格中位点数除以100%网格中的位点数, 得到网格的位点密度值, 使用不同色阶表示不同的位点密度。其中小于3%的网格设置为蓝色,

① 陈军林 (2011) 黄河三角洲繁殖东方白鹳生境选择和环境容纳量分析. 硕士学位论文, 安徽大学, 合肥.

② 赵文强 (2016) 山西运城湿地省级自然保护区鸟类多样性研究. 硕士学位论文, 山西大学, 太原.

3%–10%为绿色, 10%–20%为黄色, 20%–50%为橙色, 50%–100%为红色。

1.5 家域分析与栖息地划分

核密度估计法(Kie et al, 2010)是通过假设动物运动符合某种特定的概率分布, 从而模拟所研究物种的家域范围。概率模型能够较好地地区分动物对不同空间的利用强度, 目前核密度估计法被认为是最适合的家域估算模型。使用R语言的adehabitatHR包(Calenge, 2006)中镶嵌的核密度估计法对追踪物种在黄河流域活动的位点进行家域模拟。为更好地了解其物种家域的核心区, 对于每个物种分别绘制90%、75%和50%三种类型的家域。

另外, 在拟合中我们并没有删除黄河流域内被划定为飞行状态的位点, 因为有研究提到长距离迁徙水鸟在迁徙过程中对飞行路径上的生境具有选择倾向性(Alerstam, 2011), 我们尝试将这部分数据也纳入分析, 以期识别重要迁徙路径和栖息地。

将拟合的家域导入ArcGIS 10.2中, 分别计算不同范围家域的面积值。其中50%家域是追踪物种活动的核心区域, 随着家域拟合范围的增大, 物种活动的范围也会更发散, 并尽可能多地覆盖追踪个体活动的区域。通过3种追踪水鸟在黄河流域活动家域模拟, 我们获得了水鸟栖息地划分的数据基础, 将3种水鸟核心家域进行叠加, 获得适宜栖息地的划分范围。

1.6 土地覆被数据和计算

使用精度为10 m的FROM-GLC10 (Gong et al, 2019)土地覆被数据, 利用R语言中的raster包提取黄河流域内各物种追踪位点的土地类型, 使用Excel 2016计算重要栖息地内的土地利用类型占比。结合家域分析结果, 利用ArcGIS 10.2提取黄河流域内各物种三类家域内的土地类型, 使用Excel 2016计算土地类型占比。同时, 利用ArcGIS 10.2提取位点密度分析结果中的核心网格(即橙色和红色网格), 并对网格中土地类型占比进行分析。

2 结果

2.1 黄河流域湿地对3种迁徙水鸟的重要性

斑头雁在迁徙中在黄河流域停歇(图1)。根据Zhang等(2020)的研究, 本研究追踪的6只斑头雁按照迁徙路径可划分为蒙古国–中国日喀则(MtoT)种群和蒙古国–印度/孟加拉国(MtoA)种群。MtoT迁徙

路线的2只个体(BHG003和BHGO05)的繁殖地在蒙古国, 越冬地位于中国西藏日喀则, 每次迁徙均在黄河流域停歇。它们秋季迁徙总时长为149 d, 而在黄河流域内的活动时长为111.2 d, 占秋季迁徙总时长的75.3%; 春季迁徙的总时长为62.2 d, 黄河流域活动时长为25.3 d, 占比40.7% (表1), 因此MtoT种群的春秋迁徙均高度依赖黄河流域的湿地。MtoA迁徙路线的4只个体(BHG001、BHGO02、BHGO04和BHGO06)的繁殖地在蒙古国, 越冬地在印度/孟加拉国。它们的秋季迁徙总时长为401.9 d, 而黄河流域内总时长为109.8 d, 占总时长的27.3%; 春季迁徙总时长为40.7 d, 未在黄河流域内停歇(表1)。相比MtoT种群, MtoA种群春、秋季迁徙对黄河流域的依赖性较弱(附录2)。在迁徙中, 斑头雁的停歇地位于扎陵湖–鄂陵湖及其周边区域和青海省北部的木里镇(图2)。

追踪的5只白琵鹭均在蒙古国繁殖, 在中国长江中下游流域越冬, 黄河流域是其迁徙途中重要的停歇地和度夏区(图1)。当作为停歇地时, 秋季迁徙的总时间为466.2 d, 在黄河流域内活动的时长为172.9 d, 占比为37.1% (表1)。春季迁徙总时间为39.1 d, 在黄河流域内活动的时长为32.9 d, 占比达到84.1% (表1)。而且有2只幼鸟(ES001、ES003)第2年于黄河流域河套平原一带度夏。这表明白琵鹭在迁徙中极其依赖黄河流域湿地, 尤其是河套平原一带的湿地还是幼鸟重要的度夏区。白琵鹭在迁徙过程中, 还会集中利用宁夏平原–陕西黄河沿岸地区和山西中西部地区进行停歇(图2)。

东方白鹳黑龙江繁殖种群的越冬地在黄河三角洲或长江中下游。追踪的10只幼鸟在捕捉当年均在黄河三角洲越冬, 其中3只个体(OS002、OS003、OS007)拥有第2年完整迁徙, 但它们第2年成年后选择到长江中下游流域越冬(表1)。目前, 东方白鹳在黄河流域内的重要栖息地集中在黄河三角洲(图2)。

综上所述, 3种水鸟在迁徙途中, 虽然在黄河流域的活动类型有所差异, 但其停歇地、度夏地或越冬地均高度依赖黄河流域湿地。尤其是扎陵湖–鄂陵湖、青海省北部木里镇、宁夏平原–陕西黄河沿岸、河套平原、山西中西部和黄河三角洲高度支持了3种水鸟的迁徙与生存。

2.2 3种水鸟在黄河流域的家域和土地利用

家域和土地利用联合分析反映了物种活动的

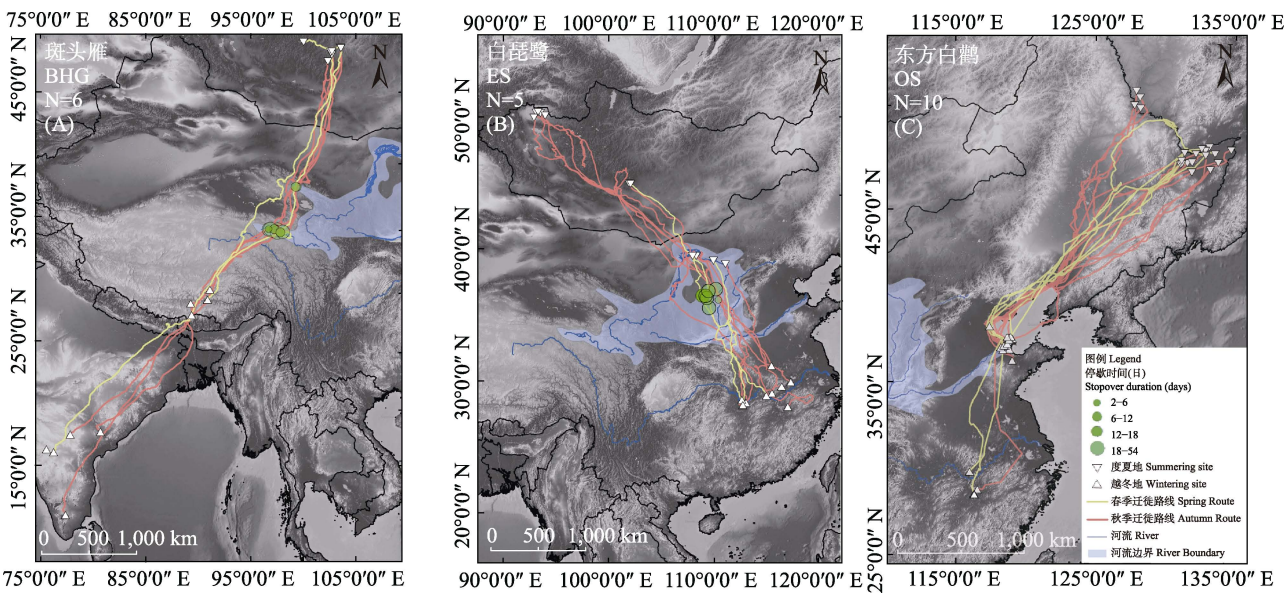


图1 追踪的3种水鸟的迁徙路线图。(A) 6只斑头雁的春秋迁徙路线: 繁殖地位于蒙古国, 越冬地在中国西藏日喀则与印度/孟加拉国, 迁徙过程中主要在黄河流域停歇。(B) 5只白琵鹭的春秋迁徙路线: 繁殖地在蒙古国, 越冬地在长江中下游流域, 迁徙中在黄河流域停歇或度夏。(C) 10只东方白鹳的春秋迁徙路线: 在黄河流域越冬。红线代表秋季迁徙路线, 黄线代表春季迁徙路线, 倒三角表示度夏位点, 正三角表示越冬位点, 绿色圆圈代表迁徙过程在黄河流域的停歇地与停歇时长, 蓝线代表黄河与长江, 浅蓝色阴影代表黄河流域(Jiang, 2015)。

Fig. 1 The map of the migration route of three waterbirds by tracking their life history. (A) The spring and autumn migration routes of 6 Bar-headed Geese. The breeding area is Mongolia, and the wintering areas are Shigatse of Tibet of China and India/Bangladesh. The Species mainly stops in the Yellow River basin. (B) The spring and autumn migration routes of 5 Eurasian Spoonbills. The breeding area is Mongolia, the wintering area is the middle and lower reaches of the Yangtze River, and it stops or spends summer in the Yellow River basin during migration. (C) The spring and autumn migration routes of 10 Oriental Storks, overwintering in the Yellow River basin. The red line represents the autumn migration route, the yellow line represents the spring migration route, the inverted triangle represents the summering sites, the forward triangle represents the wintering sites, the green circle represents the location and period of the stopover in the Yellow River basin, the blue line represents the Yellow River and the Yangtze River and the light blue shadow represents the Yellow River basin (Jiang, 2015).

表 1 三种迁徙水鸟在黄河流域内活动情况与利用类型
Table 1 Activities and utilization types of three migratory waterbirds in the Yellow River basin (YRB)

物种 Species	种群 Population	季节 Season	黄河流域内时长 Staging in YRB (d)	迁徙时长 Migration duration (d)	时间占比 Percentage	利用类型 Utilization type
斑头雁 Bar-headed Goose	蒙古国—中国日喀则 MtoT	秋季 Autumn	111.2	149	75.3%	停歇地 Stopover site
		春季 Spring	25.3	62.2	40.7%	
	蒙古国—印度/孟加拉国 MtoA	秋季 Autumn	109.8	401.9	27.3%	停歇地 Stopover site
		春季 Spring	0	40.7	0.0%	
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	蒙古国—长江 Mongolia-Yangtze River	秋季 Autumn	172.9	466.2	37.1%	停歇地 Stopover site
		春季 Spring	32.9	39.1	84.1%	
	—	—	321.4	—	100.0%	度夏地 Summering site
东方白鹳 Oriental Stork	黑龙江繁殖种群 Heilongjiang breeding population	—	1351.7	—	100.0%	越冬地 Wintering site

范围(图3)与生境选择偏好(附录3)。通过核密度法对斑头雁2个重要栖息地的拟合计算表明, 在扎陵湖—鄂陵湖区拟合的3种家域面积分别为3,332.8 km² (90%)、1,399.8 km² (75%)和367.4 km² (50%) (表3);

斑头雁在该区域内利用的土地类型为草地(50.9%)、裸地(28.0%)、水体(14.7%)和湿地(6.4%)。斑头雁在青海省木里镇的家域面积为61.8 km² (90%)、27.3 km² (75%)和3.5 km² (50%) (表3), 主要利用的土地

编者按

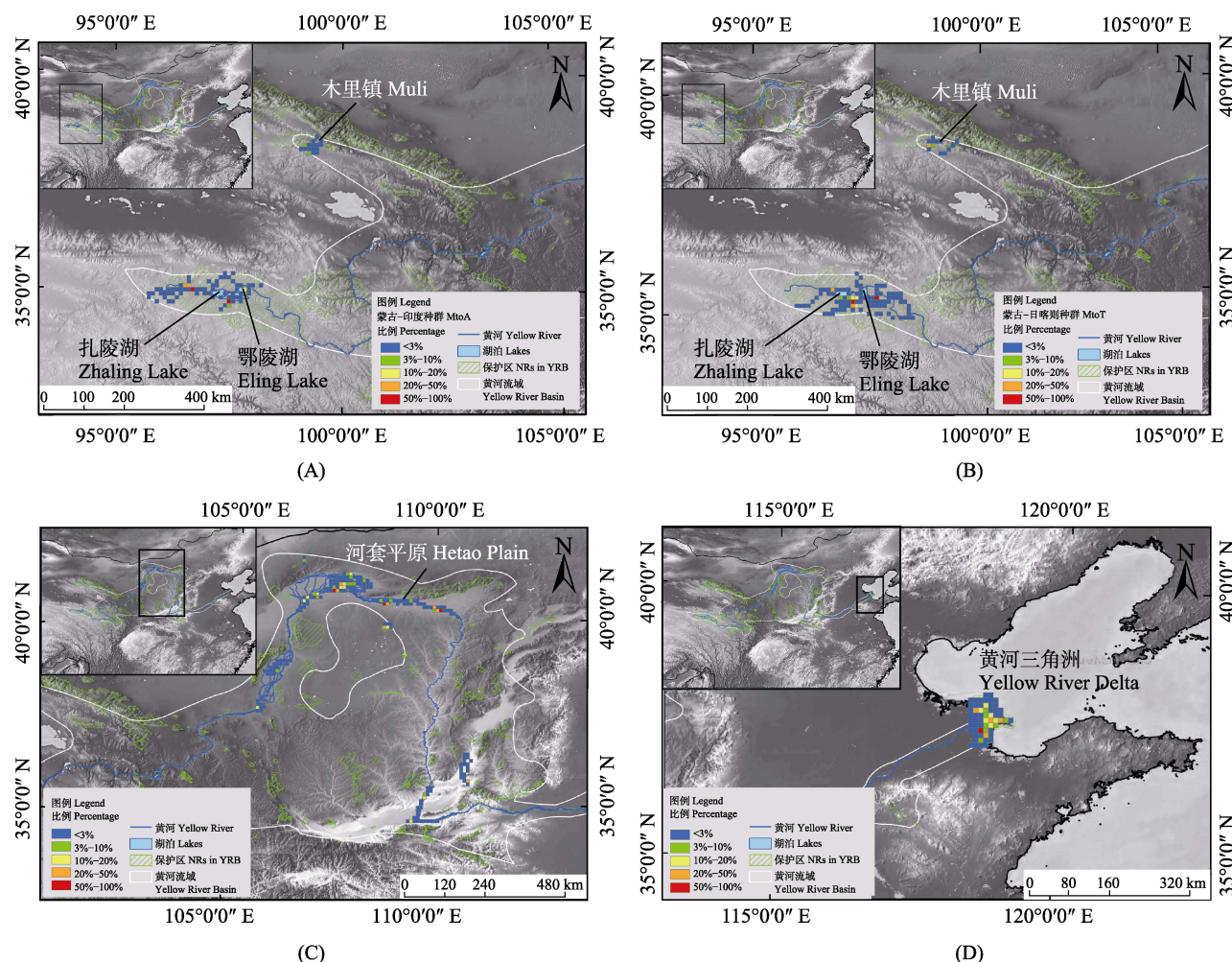


图2 3种水鸟在黄河流域活动位点的密度分析图。(A)和(B)分别为斑头雁MtoT (蒙古国—中国日喀则)种群和MtoA (蒙古国—印度/孟加拉国)种群在黄河流域内的重要栖息地;(C)白琵鹭蒙古—长江种群在黄河流域内的重要栖息地;(D)东方白鹳黑龙江繁殖种群在黄河流域的重要栖息地。蓝线为黄河,白线为黄河流域边界,绿色网格阴影区域为黄河流域自然保护区范围。黄河流域的位点密度使用3% (蓝)、3%—10% (绿)、10%—20% (黄)、20%—50% (橙)与50—100% (红)进行分级标注(Jiang, 2015)。

Fig. 2 Density diagram of the sites of three waterbirds in the Yellow River basin. (A) and (B) showed the important habitats of the MtoT population and the MtoA population of the Bar-headed Goose; (C) showed the important habitat of the Eurasian Spoonbill; (D) showed the important habitat of the Oriental Stork. The blue line is the Yellow River, the white line is the boundary of the Yellow River basin, and the area shaded by the green grid is the Yellow River basin nature reserves. The site density of the Yellow River basin is marked with 3% (blue), 3%—10% (green), 10%—20% (yellow), 20%—50% (orange) and 50%—100% (red) (Jiang, 2015).

类型是草地(49.0%)、裸地(26.2%)、水体(22.5%)和湿地(2.3%)。对斑头雁2个重要栖息地的3种家域自身的土地类型进行占比计算,发现50%的核心区湿地与水体占比极低,分别为0.5%与1.2%,而与之相反的是斑头雁对水体和湿地利用较高(表2),利用比达到8.7倍和16.9倍,这表明斑头雁对于水体和湿地的利用更偏向主动选择,而对于栖息地本身高度分布的草地与裸地则可能偏向于被动选择。

白琵鹭重要栖息地的家域面积为63,064.6 km² (90%)、31,660.7 km² (75%)和6,428.4 km² (50%) (表3)。所利用的土地类型为农田(42.1%)、草地 (19.8%)、

湿地(19.6%)和水体(11.1%) (表2)。同时,50%核心区的湿地和水体占比极低,分别为1.1%和1.6%,但利用比达17.8倍和6.9倍。白琵鹭对占比较高的裸地(28.5%)的利用率极低(3.4%),表明在重要栖息地内白琵鹭仍然偏好选择湿地和水体,且较少利用裸地(表2)。

东方白鹳的重要栖息地集中在黄河流域三角洲地区,拟合家域的面积分别为330.6 km² (90%)、91.7 km² (75%)和8.1 km² (50%) (表3)。由于分布集中,因此主要利用2种土地类型:湿地(49.8%)和农田(34.5%) (表2)。对50%家域范围内的土地类型进

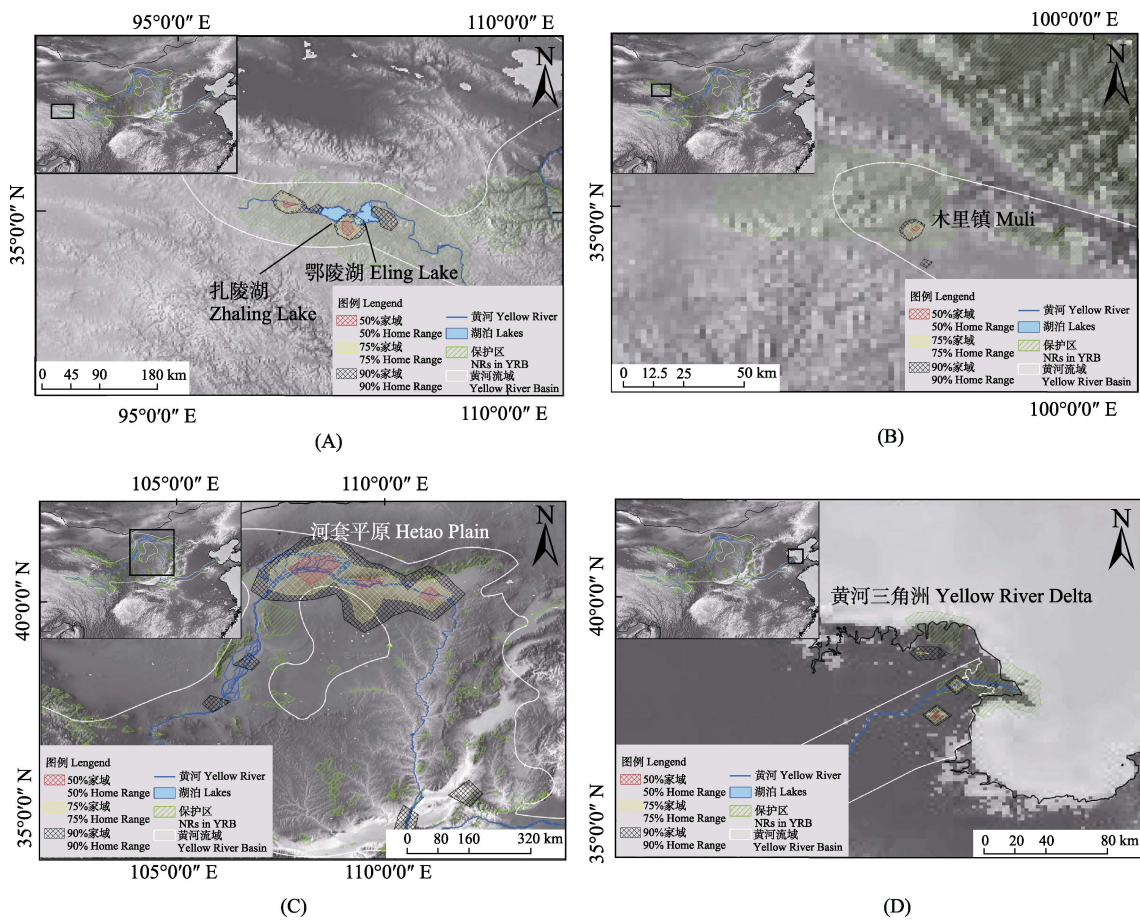


图3 3种水鸟在扎陵湖-鄂陵湖(A)、木里镇(B)、河套平原(C)和黄河三角洲(D)的家域范围。黑色网格、黄色网格、红色网格分别为90%、75%和50%活动区域拟合的家域范围。蓝线为黄河,绿色网格阴影区域为黄河流域自然保护区,白色区域为黄河流域边界,蓝色区域为湖泊范围。

Fig. 3 The home range of three waterbirds in the Zhaling-eling lake (A), Muli Town (B), Hetao Plain (C), and the Yellow River Delta (D). The black shade, the yellow shade and the red shade are 90%, 75%, and 50% of the home range fitted. The blue line is the Yellow River, the green grid shaded area is the Yellow River basin nature reserves, the white line area is the boundary of the Yellow River basin, and the blue area is the lakes.

表 2 黄河流域 3 种水鸟重要栖息地与家域的土地利用情况

Table 2 Three important habitats of waterbirds in the Yellow River basin and land use in their home ranges

物种 Species	栖息地 Habitat	农田 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	灌丛 Shrubland	湿地 Wetland	水体 Water	人工地表 Artificial surface	裸地 Bare land
斑头雁 Bar-headed Goose	木里镇 Muli Town	0.0%	0.0%	49.0%	0.0%	2.3%	22.5%	0.0%	26.2%
	扎陵湖-鄂陵湖 Zhaling-eling lake	0.0%	0.0%	50.9%	0.0%	6.4%	14.7%	0.0%	28.0%
	50%家域 Home range-50%	0.0%	0.0%	84.9%	0.0%	0.5%	1.2%	0.0%	13.4%
	75%家域 Home range-75%	0.0%	0.0%	74.4%	0.0%	0.3%	5.7%	0.0%	19.6%
	90%家域 Home range-90%	0.0%	0.0%	66.8%	0.0%	0.6%	7.7%	0.0%	24.9%
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	河套平原 Hetao Plain	42.1%	0.7%	19.8%	0.0%	19.6%	11.1%	3.3%	3.4%
	50%家域 Home range-50%	55.2%	0.1%	7.4%	2.2%	1.1%	1.6%	3.9%	28.5%
	75%家域 Home range-75%	34.5%	1.5%	13.9%	1.3%	0.8%	1.5%	2.5%	44.0%
	90%家域 Home range-90%	31.7%	2.7%	27.7%	0.4%	0.5%	0.9%	3.8%	32.3%
东方白鹳 Oriental Stork	黄河三角洲 Yellow River Delta	34.5%	0.0%	4.5%	0.0%	49.8%	4.60%	6.6%	0.0%
	50%家域 Home range-50%	69.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	14.3%	15.7%	0.0%
	75%家域 Home range-75%	61.0%	0.0%	0.6%	0.0%	0.6%	24.0%	13.7%	0.1%
	90%家域 Home range-90%	64.5%	0.0%	3.3%	0.0%	2.7%	19.1%	8.1%	2.3%

表 3 黄河流域 3 种水鸟家域与自然保护区重叠情况
Table 3 Overlapping in the Yellow River basin nature reserves and home ranges of three waterfowl

	家域范围 Home range	面积 Area (km ²)	重叠面积 Overlapping area (km ²)	重叠率 Overlapping rate
斑头雁 Bar-headed Goose	50%	370.9	370.9	100.0%
	75%	1,427.1	1,427.1	100.0%
	90%	3,394.6	3,386.1	99.8%
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	50%	6,428.4	105.2	1.6%
	75%	31,660.7	951.6	3.0%
	90%	63,064.6	3,090.4	4.9%
东方白鹳 Oriental Stork	50%	8.1	0.0	0.0%
	75%	91.7	27.2	29.6%
	90%	330.6	76.6	23.2%

行统计分析, 结果表明湿地仅占0.1%, 因此东方白鹳对于湿地的利用表现出强选择, 而对于农田生境的利用偏向于弱选择(表2)。

综合考虑3种水鸟的家域与土地利用联合分析结果, 我们发现: 在黄河流域内扎陵湖-鄂陵湖、青海省木里镇、宁夏平原与陕西黄河沿岸、内蒙古河套平原、山西中西部和黄河三角洲对于长距离迁徙水鸟的生存可能起着至关重要的作用, 因此需要提高对这些区域的关注。同时, 在这些重要栖息地内需提高对水鸟高度依赖的湿地与水体生境的关注。

2.3 黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状

将斑头雁家域与黄河流域自然保护区进行叠加, 计算得到90%家域、75%家域、50%家域的重叠面积分别为3,386.1 km²(重叠率99.8%)、1,427.1 km²(重叠率100.0%)和370.9 km²(重叠率100.0%), 表明黄河流域内斑头雁的两个重要栖息地得到了现有保护区的有效保护(表3)。而白琵鹭90%家域的重叠面积为3,090.4 km²(重叠率4.9%), 75%家域的重叠面积为951.6 km²(重叠率3.0%), 50%家域重叠面积为105.2 km²(重叠率1.6%)。东方白鹳90%家域、75%家域的重叠面积分别为76.6 km²(重叠率23.2%)和27.2 km²(重叠率29.6%), 50%家域的重叠面积为0。目前, 白琵鹭和东方白鹳的重要栖息地被保护比例较低, 表明一些可能的重要栖息地存在保护空缺。

综上所述, 斑头雁由于重要栖息地位于扎陵湖-鄂陵湖和青海湖与祁连山脉区域, 已受到现有自然保护区的高度保护。然而主要利用河套平原与黄河三角洲的其他两种水鸟, 其潜在的栖息地受保护比例较低, 因此需要结合野外实地调查数据来印证潜在栖息地的存在, 并优化目前自然保护区的范围,

以便更好保护这些生境与鸟类。

3 讨论

3.1 3种水鸟对黄河流域的依赖性

黄河流域内的湿地位于东亚-澳大利西亚、中亚和西太平洋迁徙路线上, 是众多迁徙水鸟的停歇地、繁殖地和越冬地(张孚允和杨若莉, 1997)。本研究结果证明了不论是斑头雁蒙古国-中国日喀则种群还是蒙古国-印度/孟加拉国种群, 黄河湿地都是水鸟迁徙中依赖的重要湿地。两个种群在黄河的平均活动时长都达到了一个月以上。我们的调查发现, 斑头雁在黄河流域内共有2个重要栖息地, 即黄河源头姊妹湖——扎陵湖、鄂陵湖和青海省北部木里镇, 主要停歇在扎陵湖-鄂陵湖区域。这些湿地可以为斑头雁提供能量补给和休息场所, 结合西藏东部斑头雁种群的庞大数量(约80,000只, Zhang et al, 2020)推测, 很可能有大量个体在迁徙过程中会利用黄河流域。因此黄河流域的停歇地对该物种的迁徙起到了不可或缺的作用。

在蒙古国繁殖的白琵鹭种群不仅利用河套平原进行停歇, 而且少数幼鸟还会出现度夏的情况, 实地调查证明了河套平原是白琵鹭重要的栖息地场所(高敏等, 2018)。追踪发现原本在蒙古国繁殖的白琵鹭幼鸟在次年春季迁徙并未返回繁殖地, 而是在河套平原度夏。据此我们提出如下假设: 相比经验丰富的成鸟, 第1年幼鸟的经验和飞行能力均较弱, 在长距离迁徙过程中会面临更多的风险, 再加上到达繁殖地会面临强烈的竞争, 因此迁徙途中选择了更短距离且能够支持度夏的黄河流域湿地。

黄河三角洲是东方白鹳重要的越冬地, 该物种在此地的越冬平均时长达到4个月以上。我们研究

编者按

中的10只幼鸟在第1年越冬时均利用了该地区,利用率极高。其中有次年完整迁徙数据的个体,它们在第2年到达长江中下游流域越冬。这与白琵鹭幼鸟迁徙现象一致。因此未来需要详细对比成鸟与幼鸟在第1年迁徙中的迁徙策略,并结合遥感数据和气象数据,来验证我们的假设是否成立。

3.2 3种水鸟对黄河流域栖息地的利用

不同类群的水鸟由于形态特征和生活习性等的差异,会选择不同的湿地栖息。同时,湿地生态系统中的植被、水体状况和食物丰度等因素,也会影响水鸟的选择利用。斑头雁是鸭科雁属的典型物种之一,在繁殖期间主要取食11科19种植物,莎草科植物是其主要取食对象,中后期也会采食小眼子菜(*Potamogeton pusillus*)、海韭菜(*Triglochin maritimum*)等水生植物(马映荣等, 2020)。东方白鹳与白琵鹭均为食鱼的水鸟,它们对觅食地的水深具专一性,而且东方白鹳觅食地和休息地的水深都显著大于白琵鹭,这与2种水鸟觅食的行为密切相关(张笑辰等, 2014)。黄河流域湿地拥有丰富的动植物资源,例如扎陵湖-鄂陵湖区域拥有467种植物,共有苔草属(*Carex*)、眼子菜属(*Potamogeton*)等154个植物属(蔡延玲, 2016),能够为迁徙水鸟提供优良的食物资源。

本研究结果表明,斑头雁、白琵鹭和东方白鹳表现出对水体和湿地的选择倾向性,而对生境中占比较高的草地、农田和人工地表没有表现出选择倾向性。正因为迁徙水鸟均偏好在湿地和水体觅食、休憩和睡眠,对水体和湿地的高度依赖是符合预期的。虽然3种水鸟对占比极高的生境没有表现出强选择性,但仍然需要结合野外实地调查数据来研究这些生境与其利用之间的关系。

3.3 黄河自然保护区的保护现状及卫星追踪对保护区规划的意义

中国地大物博,在黄河流域栖息的鸟类数量众多,建设保护区不仅是为了保护生态环境,更重要的是保护生物多样性。黄河流域面积大、湿地类型广泛、横跨多个候鸟迁徙的重要路线,其生态价值不言而喻。保护黄河湿地要从保护植被、维持水分、减少人类干扰等多个方面综合考虑。2019年,习近平总书记在河南主持召开了黄河流域生态保护和高质量发展座谈会,他强调要共同抓好大保护,协同推进大治理,让黄河成为造福人民的幸福河。保

护黄河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计。国家对于环境保护要立足于长远利益,“绿水青山就是金山银山”。必须维持好工业发展导致的人类社会扩张与生态环境建设之间的平衡。根据生态环境部2019年5月发布的《全国自然保护区名录》,国内2000年新增保护区307个。从2000–2010年,中国109个国家级自然保护区的核心区、缓冲区和试验区的人为干扰分别减少了7%、4%和5% (Xu et al, 2016),表明建立自然保护区能够有效减少人为干扰。虽然保护区建设逐年加强,但根据杨秀林等(2020)的研究结果,现在的保护区规划并没有很好地保护鸟类在迁徙过程中的重要位点,很多重要的位点仍有保护空缺。特别是黄河流域自然保护区集中分布在水资源丰富的上游地区,在中下游地区分布松散,因此更需要评估保护区网络对于水鸟的保护效力。

本研究发现,家域集中在黄河源头扎陵湖和鄂陵湖的斑头雁,其活动范围已被保护区完全覆盖,而,白琵鹭和东方白鹳在黄河中下游的栖息地被保护比例较低,但考虑到这些数据来源于少量追踪个体,再加上个体差异,本研究发现的潜在栖息地是否是这2种水鸟的重要栖息地,仍然需要结合野外实地调查数据进行佐证。但从分析结果中可以看出,其栖息地确实存在保护空缺,因此有必要对黄河自然保护区网络进行优化与扩展。

这3种水鸟在栖息地中高度依赖于湿地和水体。虽然黄河流域陆表水域从2000–2019年呈现上升趋势,但水域面积扩大主要集中在黄河上游流域,黄河中游区域,尤其是河套平原的湖库面积仍在缩小(Gao et al, 2020)。近年研究发现丹顶鹤等水鸟在黄河三角洲地区的综合生境格局在1986–2007年间发生了明显变化,不适宜生境面积由1986年的48.64%增加到2007年的64.73%;适宜生境面积减少,由1986年的51.39%减至2007年的35.04% (张婷婷等, 2019)。伴随着淡水资源短缺、水污染和人类活动的影响,在1999–2015年,经过黄河三角洲的鸕鹚类水鸟从187,296只减少到了74,412只(张晓龙等, 2009)。这些现象反映出黄河流域水鸟栖息地面临严重威胁,因而在自然保护区的进一步规划中,不仅需要关注可能存在的潜在栖息地,也需要对湿地和水体进行针对性的保护,避免湿地退化和生物多样性降低。

通过卫星追踪,能够有效获得停歇地的候鸟数据。停歇地相比繁殖地和越冬地,受到环境的影响更大,同时不同候鸟对于停歇地的选择不同,即使是同一个种群的个体,在不同年份也会出现停歇地选择上的差异。卫星追踪的方法从原先的定性分析转变为一种半定量的分析方式,可与野外实地鸟类调查数据方法相结合来发掘潜在重要栖息地,并探讨栖息地保护现状。这种方法可以推广至许多珍贵鸟类,尤其是大型鸟类的保护工作上,使得栖息地规划更加科学、合理。

致谢: 感谢野外捕捉团队的贡献。另外,中国洪河国家级自然保护区、俄罗斯阿穆尔河地区和 Bastak 保护区对野外捕捉工作提供支持;刘彩莲同学对数据分析提供帮助;本文责任编辑及中国科学院生态环境研究中心郑桂梅老师和匿名审稿专家对本文提供诸多建设性意见,在此一并感谢。

参考文献

- Alerstam T (2011) Optimal bird migration revisited. *Journal of Ornithology*, 152, 5–23.
- Basic Dataset of the Yellow River Basin (2002) National Data Center for Glacier, Permafrost and Desert Science (www.ncdc.ac.cn). (in Chinese) [黄河流域基础数据集 (2002) 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (www.ncdc.ac.cn).] (accessed on 2020-08-01)
- Beatty WS, Kesler DC, Webb EB, Raedeke AH, Naylor LW, Humburg DD (2014) The role of protected area wetlands in waterfowl habitat conservation: Implications for protected area network design. *Biological Conservation*, 176, 144–152.
- Berthold P, Terrill SB (1991) Recent advances in studies of bird migration. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 22, 357–378.
- Bishop CM, Spivey RJ, Hawkes LA, Batbayar N, Chua B, Frappell PB, Milsom WK, Natsagdorj T, Newman SH, Scott GR, Takekawa JY, Wikelski M, Butler PJ (2015) The roller coaster flight strategy of bar-headed geese conserves energy during Himalayan migrations. *Science*, 347, 250–254.
- Bodey TW, Cleasby IR, Bell F, Parr N, Schultz A, Votier SC, Bearhop S (2018) A phylogenetically controlled meta-analysis of biologging device effects on birds: Deleterious effects and a call for more standardized reporting of study data. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 946–955.
- Cai YL (2016) Investigation of wild plants in Zhaling Lake-Eling Lake Protection Zone. *Beijing Agriculture*, (3), 109–111. (in Chinese) [蔡延玲 (2016) 扎陵湖-鄂陵湖保护分区野生植物调查. *北京农业*, (3), 109–111.]
- Calenge C (2006) The package “adehabitat” for the R software: A tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecological Modelling*, 197, 516–519.
- Carboneras C, Jutglar F, Kirwan GM, Christie DA, Sharpe CJ (2016) *Handbook of the Birds of the World Alive*. Lynx Edicions, Barcelona.
- Cheng L, Zhou LZ (2017) Nest Site Selection of the Oriental Stork in the Yellow River Delta. The Thirteenth National Symposium on Wildlife Ecology and Resource Protection and the 6th Western China Zoology Symposium. (in Chinese) [程磊, 周立志 (2017) 黄河三角洲繁殖东方白鹳巢址选择的研究. 第十三届全国野生动物生态与资源保护学术研讨会暨第六届中国西部动物学学术研讨会.]
- Cui LJ (2019) Protection and management of wetlands in the Yellow River basin. *Democracy & Science*, (1), 5356. (in Chinese) [崔丽娟 (2019) 黄河流域湿地的保护与管理. *民主与科学*, (1), 53–56.]
- Douglas DC, Weinzierl R, Davidson SC, Kays S, Wikelski M, Bohrer G (2012) Moderating Argos location errors in animal tracking data. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 999–1007.
- ESRI (2013) ArcGIS Desktop: Release 10.2. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Gao JX, Wang YC, Hou P, Wan HW, Zhang WG (2020) Temporal and spatial variation characteristics of land surface water area in the Yellow River basin in recent 20 years. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51, 1157–1164.
- Gao M, Ling Y, Zhao G (2018) Study on the ecological distribution and dynamics of Ciconiiformes in Wuliangshuai. *Journal of Inner Mongolia Normal University*, 47, 141–145. (in Chinese) [高敏, 灵燕, 赵格日乐图 (2018) 乌梁素海鸕形目鸟类生态分布和动态变化研究. *内蒙古师范大学学报*, 47, 141–145.]
- Gong P, Liu H, Zhang MN, Li CC, Wang J, Huang HB, Clinton N, Ji LY, Li WY, Bai YQ, Chen B, Xu B, Zhu ZL, Yuan C, Suen HP, Guo J, Xu N, Li WJ, Zhao YY, Yang J, Yu CQ, Wang X, Fu HH, Yu L, Dronova I, Hui FM, Cheng X, Shi XL, Xiao FJ, Liu QF, Song LC (2019) Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 64, 370–373.
- Grant SB, Saphores JD, Feldman DL, Hamilton AJ, Fletcher TD, Cook PLM, Stewardson M, Sanders BF, Levin LA, Ambrose RF, Deletic A, Brown R, Jiang SC, Rosso D, Cooper WJ, Marusic I (2012) Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 337, 681–686.
- He B, Wang BX (2018) The value of wetland ecosystem services in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 46(6), 104–109. (in Chinese with English abstract) [何冰, 王保星 (2018) 陕西黄河湿地省级自然保护区湿地生态系统服务价值研究. *陕西林业科技*, 46(6), 104–109.]
- Higuchi H, Pierre JP, Krever V, Andronov V, Fujita G, 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.

Huang ZQ, Che CG, Tan HT, Bi ZG, Liu WH, Zhang XT, Zhang SY, Li DL (2018) Investigation on the diversity and population of waterbird in the Yellow River Delta Nature Reserve. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 48, 41–45, 48. (in Chinese with English abstract) [黄子强, 车纯广, 谭海涛, 毕正刚, 刘伟华, 张希涛, 张树岩, 李东来 (2018) 黄河三角洲水鸟多样性调查及种群数量监测. *山东林业科技*, 48, 41–45, 48.]

IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2010) The Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands, 4th edn. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.

Jiang H (2015) Global administrative boundary data. National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China. <http://www.geodata.cn>, accessed on 2020-08-01.

Joppa LN, Loarie SR, Pimm SL (2008) On the protection of “protected areas”. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 6673–6678.

Juffe-Bignoli D, Burgess ND, Bingham H, Belle EMS, de Lima MG, Deguignet M, Bertzky B, Milam AN, Martinez-Lopez J, Lewis E (2014) Protected Planet Report 2014. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.

Kanai Y, Nagendran M, Ueta M, Markin Y, Rinne J, Sorokin AG, Higuchi H, Archibald GW (2002) Discovery of breeding grounds of a Siberian Crane *Grus leucogeranus* flock that winters in Iran, via satellite telemetry. *Bird Conservation International*, 12, 327–333.

Kays R, Crofoot MC, Jetz W, Wikelski M (2015) Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348(6240).

Kie JG, Matthiopoulos J, Fieberg J, Powell RA, Cagnacci F, Mitchell MS, Gaillard JM, Moorcroft PR (2010) The home-range concept: Are traditional estimators still relevant with modern telemetry technology? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 2221–2231.

Li DL, Chen SH, Lloyd H, Zhu SY, Shan K, Zhang ZW (2013) The importance of artificial habitats to migratory waterbirds within a natural/artificial wetland mosaic, Yellow River Delta, China. *Bird Conservation International*, 23, 184–198.

Li SH, Meng WY, Chen LX, Li YF, Gao RY, Ru WD, Sun MH, Dai Q, Zhang GG, Lu J (2017) The spring waterbird community and home range of the Whooper Swan *Cygnus cygnus* at the upper and middle reaches of Yellow River in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1910–1916. (in Chinese with English abstract) [李淑红, 孟维悦, 陈丽霞, 李云锋, 高如意, 茹文东, 孙孟和, 戴强, 张国钢, 陆军 (2017) 黄河中上游春季迁徙期水鸟群落及大天鹅活动特征. *生态学杂志*, 36, 1910–1916.]

Lian HY, Wu LX, Cao AL, Zhang XS (2018) Bird Diversity in Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve.

Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 48(4), 44–46, 62. (in Chinese) [连海燕, 吴立新, 曹爱兰, 张孝帅 (2018) 山东黄河三角洲国家级自然保护区鸟类多样性. *山东林业科技*, 48(4), 44–46, 62.]

Liu DP (2010) Breeding Movement and Migration of Bar-headed Goose (*Anser indicus*) at Qinghai Lake and Spatial-temporal Relationship with HPAI Outbreaks. PhD dissertation. Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing. (in Chinese) [刘冬平 (2010) 青海湖斑头雁(*Anser indicus*)的繁殖期活动性、迁徙路线及其与禽流感暴发的时空关系. 博士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京.]

Ma CH, Ma SZ, Wei XY, Wang WL (2008) Waterbird resources in Yellow River Wetland National Nature Reserve in Mengjin, Henan. *Sichuan Journal of Zoology*, 27, 902–904. (in Chinese with English abstract) [马朝红, 马书钊, 韦晓彦, 王文林 (2008) 河南黄河湿地国家级自然保护区孟津段水鸟资源调查. *四川动物*, 27, 902–904.]

Ma YR, Wan LX, Luo HD, Jia YY (2020) Analysis of dietary of bar-headed geese inhabited in Gansu Yanchiwan National Nature Reserve in breeding period. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34, 166–171. (in Chinese with English abstract) [马映荣, 万丽霞, 罗宏德, 贾阳阳 (2020) 甘肃盐池湾国家级自然保护区斑头雁繁殖期食性分析. *干旱区资源与环境*, 34, 166–171.]

NBS (National Bureau of Statistics) (2017) China Statistical Yearbook. China Statistics Press, Beijing.

Shao MQ, Jiang JH, Dai NH (2016) Micro-habitat use of water birds in Poyang Lake and its response to water level during non-breeding period. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 2759–2767. (in Chinese with English abstract) [邵明勤, 蒋剑虹, 戴年华 (2016) 鄱阳湖非繁殖期水鸟的微生境利用及对水位的响应. *生态学杂志*, 35, 2759–2767.]

Shimazaki H, Tamura M, Higuchi H (2004) Migration routes and important stopover sites of endangered Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) as revealed by satellite tracking. *Memoirs of the National Institute of Polar Research Special Issue*, 58, 162–178.

Takekawa JY, Heath SR, Douglas DC, Perry WM, Javed S, Newman SH, Suwal RN, Rahmani AR, Choudhury BC, Prosser DJ, Yan B, Hou Y, Batbayar N, Natsagdorj T, Bishop CM, Butler PJ, Frepell PB, Milson WK, Scott GR, Hawkes LA, Wikelski M (2009) Geographic variation in Bar-headed Geese *Anser indicus*: Connectivity of wintering areas and breeding grounds across a broad front. *Wildfowl*, 59, 100–123.

Tavarez DC, Guadagnin DL, de Moura JF, Siciliano S, Merico A (2015) Environmental and anthropogenic factors structuring waterbird habitats of tropical coastal lagoons: Implications for management. *Biological Conservation*, 186, 12–21.

Ueta M, Mcgrady MJ, Nakagawa H, Sato F, Masterov VN (2003) Seasonal change in habitat use in Steller's Sea Eagles (*Haliaeetus pelagicus*). *Oryx*, 37, 110–114.

Volker M, Rakhyun EK, Casey S (2015) When implementation works: A comparison of Ramsar Convention

- implementation in different continents. *Environmental Science and Policy*, 51, 95–105.
- Wang X, Barter M, Cao L, Lei JY, Fox AD (2012) Changes in the distribution and abundance of wintering Lesser White-fronted Geese *Anser erythropus* in eastern China. *Bird Conservation International*, 22(2), 128.
- Wang X, Cao L, Byskatova I, Xu ZG, Fox AD (2018) The Far East taiga forest: Unrecognized inhospitable terrain for migrating Arctic-nesting waterbirds? *PeerJ*, 6, e4353.
- Wetlands International (2013) *Waterbird Population Estimates*, 5th edn. Wetlands International, Wageningen.
- Xu W, Li X, Pimm SL, Hull V, Zhang JJ, Zhang L, Xiao Y, Zheng H, Ouyang ZY (2016) The effectiveness of the zoning of China's protected areas. *Biological Conservation*, 204, 231–236.
- Xue WW, Zhou LZ, Zhu SY, Shan K, Wang LD, Xu RX (2010) Breeding ecology of oriental white stork (*Ciconia boyciana*) in the migratory stopover site. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 16, 832–838 (in Chinese with English abstract) [薛委委, 周立志, 朱书玉, 单凯, 王立东, 许仁鑫 (2010) 迁徙停歇地东方白鹳繁殖生态研究. *应用与环境生物学报*, 16, 828–832.]
- Xue YD, Li DQ, Li J (2020) Habitat selection and migration pattern of wild Bactrian camel (*Camelus ferus*) in the Kumtag Desert, China based on satellite tracking and positioning technology. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(10), 192–198. (in Chinese with English abstract) [薛亚东, 李迪强, 李佳 (2020) 基于卫星追踪定位技术的库姆塔格沙漠野骆驼生境利用和迁移规律. *林业科学*, 56(10), 192–198.]
- Yang XL, Jiang HX, Zou CL, Wang Y, Lin BQ, Li LS (2020) Changes in migration pattern and important stopover sites of the eastern population of Siberian cranes. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(2), 123–133. (in Chinese with English abstract) [杨秀林, 江红星, 邹畅林, 王永, 林宝庆, 李连山 (2020) 白鹤东部种群迁徙模式与重要中途停歇地的变化. *林业科学*, 56(2), 123–133.]
- Zhang FY, Yang RL (1997) *Bird Migration Research of China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张孚允, 杨若莉 (1997) 中国鸟类迁徙研究. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhang JJ, Xie YB, Li LX, Batbayar N, Deng XQ, Damba I, Meng FJ, Cao L, Fox AD (2020) Assessing site-safeguard effectiveness and habitat preferences of Bar-headed Geese (*Anser indicus*) at their stopover sites within the Qinghai-Tibet Plateau using GPS/GSM telemetry. *Avian Research*, 11, 1–13.
- Zhang L, Wang X, Zhang J, Ouyang ZY, Chan S, Crosby M, Watkins D, Martinez J, Su LY, Yu Y, Szabo J, Cao L, Fox AD (2017) Formulating a list of sites of waterbird conservation significance to contribute to China's Ecological Protection Red Line. *Bird Conservation International*, 27, 153–166.
- Zhang TT, Peng ZJ, Zhou DQ, Lu CH (2019) Research progress on habitat selection of red-crowned crane (*Grus japonensis*) in China. *Chinese Journal of Zoology*, 54, 134–144. (in Chinese with English abstract) [张婷婷, 彭昭杰, 周大庆, 鲁长虎 (2019) 我国丹顶鹤栖息地选择研究进展. *动物学杂志*, 54, 134–144.]
- Zhang XC, Jin BS, Chen JK, Wu JD, Liu GH, Ma ZJ (2014) Relationship between habitat use of four waterbird species and water depth and food resource in Poyang Lake. *Chinese Journal of Zoology*, 49, 657–665. (in Chinese with English abstract) [张笑辰, 金斌松, 陈家宽, 吴建东, 刘观华, 马志军 (2014) 鄱阳湖四种水鸟的栖息地利用与水深和食物的关系. *动物学杂志*, 49, 657–665.]
- Zhang XL, Li P, Liu LJ, Li PY, Shan K (2009) Biodiversity and its protection in the Yellow River Delta wetland. *Coastal Engineering*, 28, 3339. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李萍, 刘乐军, 李培英, 单凯 (2009) 黄河三角洲湿地生物多样性及其保护. *海岸工程*, 28, 33–39.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 追踪物种个体信息

Appendix 1 Tracking individual information of species studied
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-1.pdf>

附录2 黄河流域内追踪物种停歇信息

Appendix 2 Tracking species stopover information in the Yellow River basin
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-2.pdf>

附录3 黄河流域内3种水鸟土地利用补充结果

Appendix 3 Supplementary results of land use of three waterfowl in the Yellow River basin
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-3.pdf>

附录 1 追踪物种个体信息

Appendix 1 Tracking individual information of species studied

我们所追踪的 6 只斑头雁个体均为 2018 年 7 月 8 日在蒙古国西部捕捉, 追踪器设备厂商为 Ornitela, 产品型号为 OT-E25-3G, 产品类型 of 背包式, 产品重量为 25 克。

表 A1 追踪器绑定斑头雁个体信息总表

Table A1 Summary table of Bar-headed Geese (*Anser indicus*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	种群 Population	性别 Sex	年龄 Age	体重 Weight (g)	迁徙时间 Migration time	迁徙开始 Departure time	迁徙结束 Arrival time	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
BHG001	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,950	Autumn, 2018	2018/9/11	2018/11/20	2018/9/12	2018/10/1
BHG002	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,350	Autumn, 2018	2018/9/13	2018/11/20	2018/9/9/20	2018/10/10
					Spring, 2019	2019/3/7	2019/4/17	—	—
					Autumn, 2019	2019/9/11	2019/11/24	2019/9/14	2019/10/28
BHG003	MtoT	雄性 Male	成鸟 Adult	2,360	Autumn, 2018	2018/9/19	2018/10/28	2018/9/21	2018/10/25
BHG004	MtoA	雌性 Female	成鸟 Adult	2,200	Autumn, 2018	2018/8/26	2018/12/25	2018/9/30	2018/10/24
BHG005	MtoT	雄性 Male	成鸟 Adult	2,500	Autumn, 2018	2018/9/13	2018/10/29	2018/9/19	2018/10/25
					Spring, 2019	2019/4/4	2019/6/6	2019/4/11	2019/5/8
					Autumn, 2019	2019/9/12	2019/11/14	2019/9/13	2019/10/28
BHG006	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,500	Autumn, 2018	2018/9/11	2018/11/20	2018/9/30	2018/10/3

我们所追踪的 5 只白琵鹭个体均为 2018 年 7 月 16–17 日在蒙古国 Jiree River 捕捉, 追踪器设备厂商为 Ornitela, 产品型号为 OT-E25-3G, 产品类型 of 背包式, 产品重量为 25 克。

表 A2 追踪器绑定白琵鹭个体信息总表

Table A2 Summary table of Eurasian Spoonbills (*Platalea leucorodia*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	年龄 Age	体重 Weight (g)	迁徙时间 Migration time	迁徙开始 Departure time	迁徙结束 Arrival time	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
ES001	幼鸟 Juvenile	1,860	Autumn, 2018	2018/8/5	2018/11/19	2018/10/5	2018/11/9
			Spring, 2019	2019/5/1	2019/5/16	2019/5/2	—
			Autumn, 2019	2019/10/10	2019/10/29	—	2019/10/12
ES002	幼鸟 Juvenile	1,910	Autumn, 2018	2018/8/22	2018/10/29	2018/9/19	2018/10/26
			Spring, 2019	2019/5/17	2019/6/8	2019/5/17	2019/6/5
			Autumn, 2019	2019/9/26	2019/10/20	2019/9/27	2019/10/19
ES003	幼鸟 Juvenile	2,170	Autumn, 2018	2018/9/2	2018/11/19	2018/9/28	2018/9/29
			Spring, 2019	2019/5/1	2019/5/2	2019/5/2	—
			Autumn, 2019	2019/10/24	2019/10/30	—	2019/10/27
ES004	成鸟 Adult	2,320	Autumn, 2018	2018/8/7	2018/10/30	2018/9/27	2018/10/21
ES005	幼鸟 Juvenile	1,830	Autumn, 2018	2018/8/26	2018/11/15	2018/9/2	2018/10/22

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

我们所追踪的 10 只东方白鹳个体在中国洪河国家级自然保护区、俄罗斯阿穆尔河地区和 Bastak 地区捕捉，均为幼鸟，性别未知。追踪器设备厂商为 Ornitela 和 HQXS，产品类型
为背包式。

表 A3 追踪器绑定东方白鹳个体信息总表

Table A3 Summary table of Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	体重 Weight (g)	捕捉时间 Capture Time	越冬年份 Year	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
OS001	4,005	2018/6/11	Winter, 2018	2018/11/8	2019/4/17
OS002	3,950	2016/7/1	Winter, 2016	2016/12/14	2017/5/8
OS003	3,650	2016/7/1	Winter, 2016	2016/11/14	2017/4/22
OS004	3,760	2019/7/2	Winter, 2019	2019/11/13	2020/5/6
OS005	4,875	2019/7/2	Winter, 2019	2019/11/18	2020/3/2
OS006	5,135	2019/6/29	Winter, 2019	2019/11/18	2020/3/8
OS007	4,425	2018/6/18	Winter, 2018	2018/12/6	2019/4/5
OS008	4,690	2019/7/3	Winter, 2019	2019/11/28	2020/3/2
OS009	3,805	2019/6/30	Winter, 2019	2019/11/4	2020/2/10
OS010	3,955	2019/6/29	Winter, 2019	2019/11/1	2020/5/2

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

附录 2 黄河流域内追踪物种停歇信息

Appendix 2 Tracking species stopover information in the Yellow River basin (YRB)

表 A1 黄河流域斑头雁停歇信息表

Table A1 Staging and migration duration of Bar-headed Geese (<i>Anser indicus</i>)									
种群	季节	年份	编号	黄河流域内时长	迁徙时长	时间占比	位点数		
Population	Season	Year	Bird ID	Staging in YRB (d)	Migration duration (d)	Percentage	GPS fixes number		
MtoT 蒙古-日喀则	秋季 Autumn	2018	BHG003	34.5	38.9	88.7%	4,983		
			BHG005	35.9	46.8	76.7%	5,175		
			BHG005	40.8	63.3	64.5%	5,866		
	平均值 ± 标准差			37.1 ± 3.3	49.7 ± 12.5	74.6%			
	春季 Spring	2019	BHG005	25.3	62.2	40.7%	3,652		
			平均值 ± 标准差			25.3	62.2	40.7%	
			总计 Total			136.5	211.2	64.6%	19,676
MtoA 蒙古-印度/ 孟加拉国	秋季 Autumn	2018	BHG001	17.9	70.0	25.6%	2,268		
			BHG002	20.1	67.5	29.8%	2,901		
			BHG004	24.1	120.3	20.0%	3,493		
			BHG006	3.5	70.8	4.9%	531		
			BHG002	44.2	73.3	60.3%	6,302		
	平均值±标准差			22.0 ± 14.7	80.4 ± 22.4	27.4%			
	春季 Spring	2019	BHG002	0.0	40.7	0.0%	0		
			平均值 ± 标准差			0.0	40.7	0.0%	
			总计 Total			109.8	442.6	24.8%	15,495

表 A2 白琵鹭迁徙及黄河流域内时长信息表

Table A2 Staging and migration duration of Eurasian Spoonbill (<i>Platalea leucorodia</i>)							
种群	季节	年份	编号	黄河流域内时	迁徙时长	时间占比	位点数
Population	Season	Year	BirdID	长 Staging in YRB (d)	Migration duration (d)	Percentage	GPS fixes number
蒙古国-长江 Mongolia-The Yangtze River	秋季 Autumn	2018	ES001	34.8	106.0	32.8%	5,007
			ES002	37.0	68.0	54.4%	5,324
			ES003	1.3	78.3	1.6%	177
			ES004	23.9	83.9	28.5%	3,446
			ES005	50.2	81.2	61.7%	7,136
		2019	ES001	2.2	19.0	11.6%	321
			ES002	22.8	24.2	94.2%	3,248
			ES003	0.8	5.7	14.8%	92
	平均值 ± 标准差			21.6 ± 18.7	58.3 ± 36.7	37.1%	
	总计 Total			172.9	466.2	37.1%	24,751
	春季 Spring	2019	ES001	13.7	15.3	90.1%	1,979
			ES002	18.6	22.2	83.9%	2,671
			ES003	0.6	1.7	33.3%	80
	平均值 ± 标准差			11.0 ± 9.3	13.0 ± 10.4	84.1%	
总计 Total			32.9	39.1	84.1%	4,730	
总计 Total				205.8	505.3	40.7%	29,481

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

附录 3 黄河流域内 3 种水鸟土地利用补充结果

Appendix 3 Supplementary results of land use of three waterfowl species in the Yellow River basin

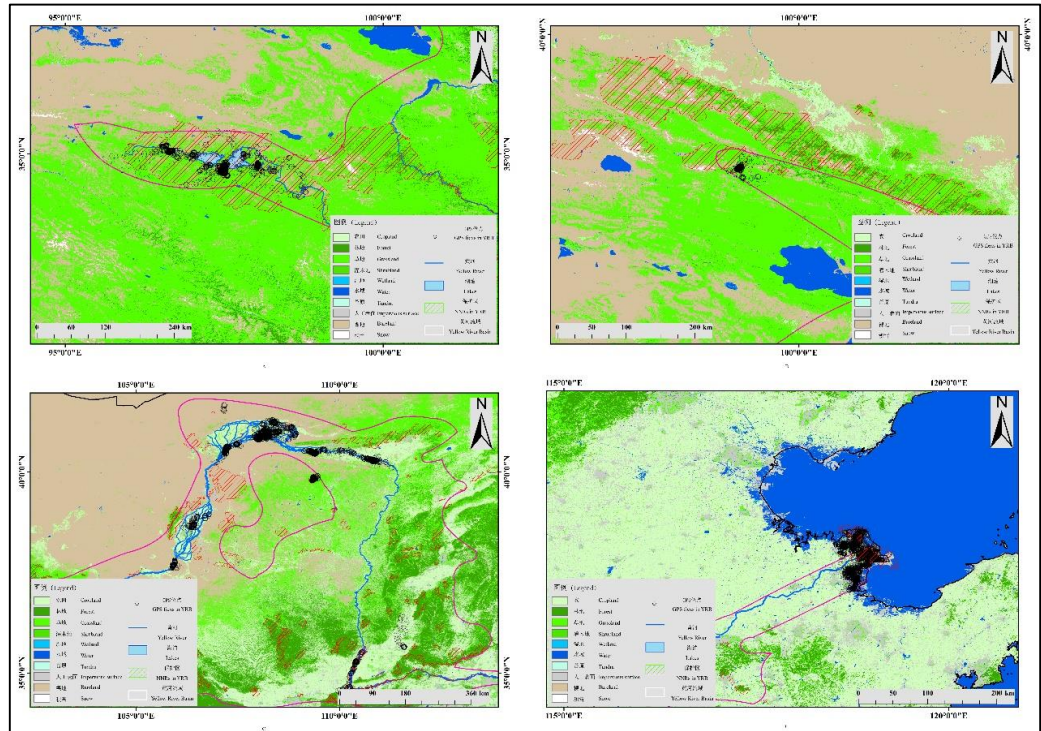


图 A1 三种水鸟在黄河流域内位点的分布情况与土地覆被利用情况。(A) 斑头雁在青海省木里镇区域的位点分布和土地利用情况；(B) 斑头雁在扎陵湖和鄂陵湖区域位点分布和土地利用情况；(C) 白琵鹭在黄河流域位点分布和土地利用情况；(D) 东方白鹳在黄河流域位点分布和土地利用情况。黑圈表示利用位点，蓝线表示黄河，紫线表示黄河流域边界，多彩阴影区表示不同的土地覆被类型（农田、森林、草地、灌木地、湿地、水体、人工地表、裸地、冰雪覆被）。

Fig. A1 Land use of the three waterbirds in Yellow River basin. (A) Points distribution and land use of Bar-headed Goose in Muli, Qinghai province; (B) Points distribution and land use of Bar-headed Goose in Zhaling Lake and Eling Lake; (C) Points distribution and land use of Eurasian Spoonbill in Yellow River basin; (D) Points distribution and land use of Oriental Stork in Yellow River Basin. The black circle indicates utilization points, the blue line indicates the Yellow River, the purple line indicates the boundary of the Yellow River basin, and the colorful shaded areas indicate different land cover types (cropland, forest, grassland, shrubland, wetland, water, impervious surface, bareland, snow).

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

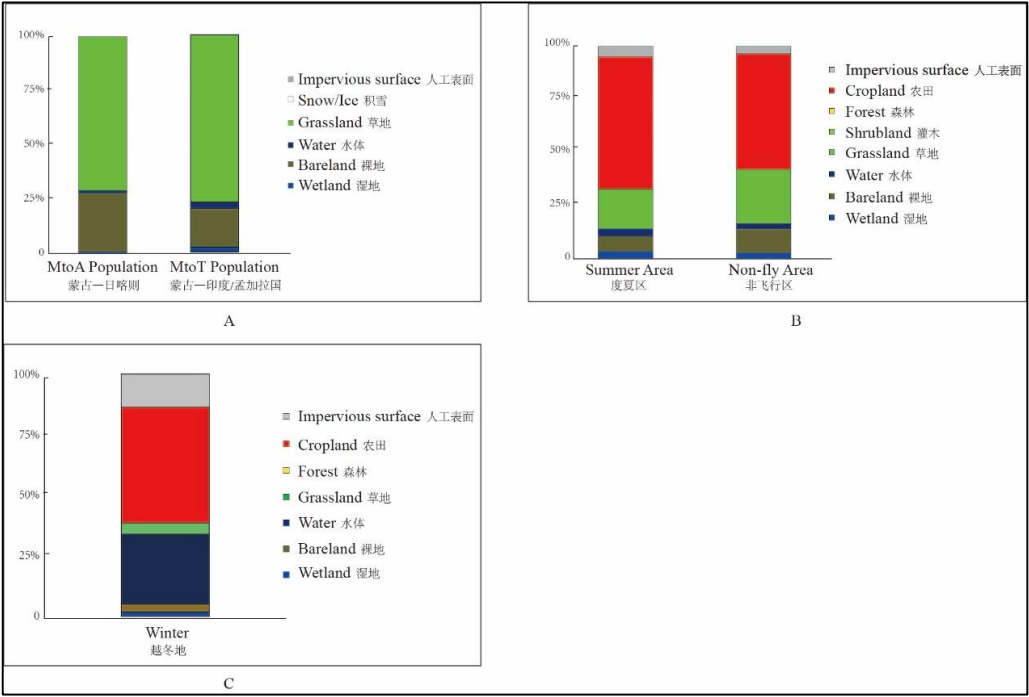


图 A2 三种水鸟在黄河流域内位点密度图中高利用率(红色与橙色)的土地利用情况。(A) 斑头雁两个种群在核心密度区的土地覆被类型;(B) 白琵鹭在核心密度区的土地覆被类型;(C) 东方白鹳在核心密度区的土地覆被类型。

Fig. A2 Land use of the three waterbirds in high utilization rates grids (red & orange grids). (A) The land cover types of the two populations of the Bar-headed Goose in the core density area; (B) The land cover types of the Eurasian Spoonbill in the density area; (C) The land cover types of the two populations of the Oriental Stork in the core density area.