DOI: 10.5846/stxb202202100329
李显达,郭玉民.基于卫星定位跟踪数据解读白头鹤的性别、年龄、繁殖及领域回归.生态学报,2023,43(8):3137-3149.
Li X D, Guo Y M.Interpretation of sex, age, breeding and territory retention of Hooded Crane based on satellite tracking data.Acta Ecologica Sinica,2023,43(8):3137-3149.

基于卫星定位跟踪数据解读白头鹤的性别、年龄、繁殖及领域回归

李显达[1,2],郭玉民[1,*]
1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083
2 黑龙江中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区服务中心, 嫩江 161499

摘要:2014—2021 年,在中国东北、长江中下游以及蒙古国和俄罗斯,通过救助和野外捕捉共计为 33 只白头鹤(*Grus monacha*)安装了卫星定位跟踪器,同时佩戴了金属环和彩色塑料环。根据卫星定位信息,找到繁殖巢后,在其周边布设红外照相机。利用卫星跟踪 6 年以上的 6 只白头鹤个体以及在小兴安岭北部度夏、繁殖的 7 只白头鹤个体的定位跟踪数据,将 5 月 15 日零时位点为基准点,利用设置的位移-时间计算公式将定位坐标转为位移-时间曲线,使获得的定位数据图形化,结合野外行为观察,获得判别指标:繁殖地或度夏地夜间位移-时间曲线的平直度,反映了白头鹤夜栖点的位置变化;根据曲线平直度判断:曲线平直的是雌性,曲线呈锯齿状的是雄性;距离繁殖区较近、曲线变化幅度非常大的是亚成体,在繁殖区域、曲线近乎平直达 1 个月左右的是成鸟;根据平直曲线长度,确认是否繁殖成功及初始繁殖年龄;4 月初至 6 月末期间的不同跟踪个体的位移-时间曲线重合的,可以认定为配对关系;重合部分的长短,则反映出配对关系的稳定性;巢址的位移-时间曲线间距,反映出巢址的变化。不同年份的巢址间距离,可以展示白头鹤具有很规则的领域回归行为。依据这些指标对跟踪的全部 33 只白头鹤的性别、年龄进行了判别。解读跟踪个体的配对、繁殖状况以及领域回归等。结果表明,基于卫星定位跟踪数据的位移-时间曲线与野外观察获得的信息相结合,为进一步挖掘卫星定位跟踪数据,推进被跟踪物种的深入分析提供了新的方法。

关键词:白头鹤;卫星跟踪;位移-时间曲线;性别;年龄;繁殖;领域回归

Interpretation of sex, age, breeding and territory retention of Hooded Crane based on satellite tracking data

LI Xianda[1,2], GUO Yumin[1,*]
1 *School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
2 *Heilongjiang Zhongyangzhan Black-Billed Capercaillie National Nature Reserve Service Center, Nenjiang* 161499, *China*

Abstract: From 2014 to 2021, a total of 33 Hooded Cranes (*Grus monacha*) that came from rescue and field-capture were tracked and banded by satellite trackers, metal rings and colored plastic rings in Northeast China, the middle and lower reaches of the Yangtze River, Mongolia and Russia. After finding the breeding nests based on the tracking data, we arranged the infrared cameras around these nests. Our satellite tracking data came from 6 Hooded Cranes that were tracked more than 6 years and 7 Hooded Cranes summering and breeding in the north of Lesser Khingan Mountains. We took the zero point on May 15 as the reference point and used the set displacement-time calculation formula to convert the positioning coordinates into displacement-time curve which makes the obtained positioning data graphical. Then by combining the displacement-time curve and field behavior observation, we obtained discriminant indexes as follows: (a) Nocturnal roost

基金项目:国家自然基金项目(31570532)
收稿日期:2022-02-10; **网络出版日期**:2022-12-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: bird168@126.com

site: the straightness of the nocturnal displacement-time curve in breeding or summering area reflects the change of the nocturnal roost site of the Hooded Crane; (b) Sex: judging from the straightness of the curve, the female is straight curve while the male is serrated curve; (c) Age: the sub adults are close to the breeding area and the curve changes greatly; within the breeding area, the curve of adults is almost flat for about 1 month; (d) Breeding: confirming whether the breeding is successful and the initial breeding age according to the length of the straight curve; (e) Pairing: if the displacement-time curves of different tracked individuals coincide from the beginning of April to the end of June, it can be recognized as a pairing relationship; the length of the coincidence part reflects the stability of the pairing relationship; (f) Nest sites and territory retention: the displacement-time curves of nest sites reflect the change of nest sites; the distance between nest sites in different years reveals that the Hooded Crane shows a very regular breeding territory retention. Overall, we identify the sex and age of the whole 33 tracked Hooded Cranes through the indexes above. Furthermore, we can interpret their status of pairing, breeding, territory retention and so on. The results of this study show that the combination of the displacement-time curve based on the satellite tracking data and field observation information provides a new method for further mining of satellite tracking data and further analysis of the tracked species.

Key Words: Hooded Crane; satellite tracking; displacement-time curve; sex; age; breeding; territory retention

性别和年龄鉴定是鸟类学研究的内容之一[1]。只有在准确判别鸟类的性别、年龄之后,才能进一步进行种群动态研究中的年龄结构、性别比例等相关研究[2]。一直以来,鸟类的性别和年龄鉴定主要依据形态特征。如通过体色、喉斑边缘锐度等可区分太平鸟(*Bombycilla garrulus*)的性别;根据虹膜的颜色、换羽、羽缘的磨损程度和尾羽生长线等特征能有效识别柳莺等雀形目鸟类的年龄[3]。然而,对于诸如鹤类等雌雄同形的鸟类而言,应用传统的形态学方法难以实现对其性别和年龄的鉴定,这给相关研究造成一定困惑。因此,寻找一些行之有效的性别和年龄鉴定方法尤为重要。近年来,利用聚合酶链式反应(PCR)技术进行性别鉴定已在鸟类中得到了成功的应用,但因其受到野外取样困难和专业化实验操作等条件的限制,这种分子生物学鉴定方法也很难得到广泛应用[4]。

鸟类繁殖时的配对、孵化等活动节律是鸟类学研究的基础[5]。目前多数采用实地观察、红外相机监测等方法获得某一物种繁殖的日活动节律[6—10]。这些方法在其野外观察和监测的时间和范围等方面有很大的局限性。

领域回归行为是指成鸟在下一年度回到先前的繁殖地,再次建立领域用以繁殖的行为[1]。鸟类的领域回归行为属于印记行为,是鸟类对领域的依恋[11]。大型鸟类的飞行需要消耗更多的能量,所以体型较大的鸟类觅食范围更小,表现出更强的领域忠诚性[12]。

以往领域回归行为的研究结果主要是基于环志回收信息得到的[13]。环志回收的概率低、偶然性较大[14],能够获得的信息量非常有限。

自卫星定位跟踪技术应用于鸟类生态学等相关领域的研究以来,已成为备受关注的热点。尤其在鸟类迁徙[15—22]、栖息地利用[23—30]等方面取得了很大进展。基于大量的动态定位跟踪数据,如何深入开展鸟类行为生态学研究,进一步挖掘、利用和提高跟踪数据的使用效率,是鸟类学研究人员进一步思考的问题。

白头鹤(*Grus monacha*)是国家Ⅰ级重点保护野生动物,被世界自然保护联盟(IUCN)红色名录列为易危物种,全球数量约为 16000 只左右[31]。由于白头鹤为雌雄同形,对白头鹤的野外性别鉴定多以个体大小、行为差异等[32]进行大致区分,难以精准鉴定。白头鹤长成亚成体后,从个体大小和体色上都难以区分。为此,本研究拟基于白头鹤的卫星定位跟踪数据,绘制度夏或繁殖时段的位移-时间曲线,结合野外行为观察,对白头鹤的性别、年龄进行判定;同时对跟踪个体之间的婚配情况、繁殖区域变化情况进行解读,为进一步挖掘利用鸟类跟踪数据,特别是对生物样本采集有缺失的被跟踪个体,提高跟踪数据使用效率,更好开展珍稀濒危鸟类保护提供参考。

1　材料与方法

1.1　数据采集

2014—2021 年,在中国东北、长江中下游以及蒙古国和俄罗斯,对野外白头鹤使用翻弓法和地套法进行无害捕捉,并收集伤病后体质恢复的救助个体,累计获得 33 只个体,为它们安装了卫星定位跟踪器。本研究使用的是中国湖南生产的 HQBP3622 型背负式跟踪器和 HQLN0421 型腿环式跟踪器。两种型号的跟踪器均采用卫星定位,全球移动通信系统(GSM)传输信号,太阳能供电,每 1 h 定位 1 次。

1.2　方法

在为白头鹤加装卫星定位跟踪器时,同时佩戴全国鸟类环志中心提供的唯一编码的金属环和彩色塑料环。根据羽色、虹膜色彩、行为特征对每只白头鹤的性别和年龄进行初步判别[32—35]。

在繁殖区及度夏区进行野外行为观察。根据卫星定位信息,找到繁殖巢后,在其周边布设红外相机。

根据 2002—2005 年的野外观察和 2021 年红外相机监测发现,在繁殖地,参与繁殖的白头鹤 5 月中旬处于坐巢阶段,夜间雌性坐巢,直到次日黎明之前,没有异常情况下,几乎不离开巢位(图 1,没戴跟踪器的雌鸟);其间在没有异常情况下,雄性在巢附近警戒[33](图 1,已佩戴跟踪器的雄鸟)。

图 1　白头鹤(编号 G32)巢

Fig.1　The nest of Hooded Crane (No.G32)

基于卫星定位跟踪数据的位移-时间曲线法是以一运动物体某一时间的位点定位坐标为基准点,将其它时间各位点与基准点的距离绘制成曲线。通过同一基准点或不同基准点获得的位移-时间曲线之间的比较,分析曲线之间的关系。

据此,本文利用 EXCEL 坐标距离算法求出不同时间各位点与基准点的距离[36],做出位移-时间曲线图:

S=6371004×COS(1-(POWER((SIN((90-E2)×PI()/180)×COS(D2×PI()/180)-SIN((90-G2)×PI()/180)×COS(F2×PI()/180)),2)+POWER((SIN((90-E2)×PI()/180)×SIN(D2×PI()/180)-SIN((90-G2)×PI()/180)×SIN(F2×PI()/180)),2)+POWER((COS((90-E2)×PI()/180)-COS((90-G2)×PI()/180)),2))/2)/1000

式中:S 为基准点与任意点的距离;E2 为任意点纬度坐标;D2 为任意点经度坐标;G2 为基准点纬度坐标;F2 为基准点经度坐标。

将白头鹤个体卫星定位有效信息最后一个年度的 5 月 15 日 0:00 位置坐标为基准,测算出自佩戴跟踪器以来每天 0:00 其它各定位点与基准点的距离,以此绘制出位移-时间曲线。

本文将跟踪 6 年以上的 6 只白头鹤个体和在小兴安岭北部度夏、繁殖的其它 7 只白头鹤个体的定位跟踪数据转为位移-时间曲线,将获得的定位数据图形化,结合野外行为观察,获得判别指标(表 1)。

本文将出生至当年年末定为 1 龄,次年为 2 龄,依此类推。

2　结果与分析

本研究跟踪 33 只白头鹤共获取 49.6 万条定位信息。其中有效跟踪期限 $n<1$ 年的为 10 只,有效跟踪期

限 1≤n<2 年的为 8 只,有效跟踪期限 2≤n<3 年的为 8 只,有效跟踪期限 3≤n<6 年的为 1 只,有效跟踪期限 6≤n 年的为 6 只。另外,这 33 只中有 8 只白头鹤的跟踪信号中断后,野外观察到白头鹤依然存活(见表 2),说明跟踪器出现了故障。

表 1 白头鹤性别、年龄判别

Table 1 Sex and age discrimination of Hooded Crane

判别依据 Discrimination basis	性别 Gender		年龄 Age			
				亚成体 Subadult		
	雌性 Female	雄性 Male	幼鸟 Juvenile	早期 Early stage	后期 Later stage	成鸟 Adult
观察判别要点 Distinguishing points of observation	夜间雌性坐巢,直到次日黎明之前,没有异常情况下,几乎不离开巢位;对鸣时,头朝前上方鸣叫	夜间在巢附近警戒;对鸣时,仰头朝天鸣叫	头部土黄色,虹膜棕色	嘴端部灰青色,头、颈沾有黄棕色,游荡	游荡,占区,交配不繁殖	虹膜橙红色,嘴端部暗灰绿色,头顶具红色裸皮,头、颈白色。
位移-时间曲线变化幅度 Change amplitude of displacement time curve	近于平直	锯齿状	与父母的位移曲线几乎重合(与父母离散的除外)	接近繁殖区,曲线变化幅度大	先期变化幅度大,后期趋于平缓	总体平缓

2.1 位移-时间曲线图

将跟踪 6 年以上的 6 只白头鹤(编号为 G03、G09、G10、G11、G12 和 G19)个体卫星定位有效信息最后一个年度的 5 月 15 日 0:00 位置的坐标为基准,测算出自佩戴跟踪器以来每天 0:00 其它各定位点与基准点的距离,得出白头鹤不同年度位移-时间曲线图(图 2)。同时,截取白头鹤抵达繁殖地,直至离开繁殖地这个时段的位移-时间曲线图放大、比较、分析(图 3)。

2.2 解读位移-时间曲线

2.2.1 性别判别

根据已知性别白头鹤繁殖时的行为,结合 0:00 时位移-时间曲线(表 1),发现繁殖期间的雌性白头鹤因为坐巢孵卵,位点不变,曲线是平直的(见图 3 中的 G03、G12);雄性白头鹤虽然夜间在巢址附近警戒,但每天的位置各不相同,曲线呈锯齿状(图 3 中的 G09、G10、G11 和 G19)。

基于白头鹤 G03、G09、G10、G11、G12 和 G19 这 6 只个体 6 年以上的跟踪数据获得的不同年度位移-时间曲线及野外观察得出的判别指标,对其余跟踪的 27 只白头鹤个体性别、年龄全部进行了判别。

从表 2 可以看出,在给白头鹤佩戴跟踪器时,依据当时的判别能力,仅判别出 12 只个体的性别,其中有 3 只存疑。

依据位移-时间曲线和野外行为观察判别的结果与佩戴跟踪器时的初步判别相比,有 4 只判别不一致。

2.2.2 年龄判别

佩戴卫星定位跟踪器时,对能明显判别的幼鸟、亚成体进行判别。野外观察发现,白头鹤春季从越冬地迁徙至松嫩平原停歇时,亚成体(脱离了成鸟直至长到参与繁殖年龄之前)没有繁殖需求、没有领域行为或领域行为不强,它们迁徙到度夏地较晚,之后开始在度夏地游荡,直至秋季迁徙。依据这一现象,可以通过位移-时间曲线变化判断成体和亚成体,再结合体羽和虹膜颜色判断亚成体的具体年龄。图 2 中 G10、G12 的 2015 年曲线、G19 的 2016 年曲线显示白头鹤在游荡。图 2 中 G10 和 G12 的 2016 年曲线、G19 的 2017 年曲线表示亚成体白头鹤前期寻找繁殖地、后期有领域行为。

2.2.3 跟踪个体的家庭组合解读

通过 4 月下旬至 6 月中旬的位移-时间曲线变化幅度判断白头鹤繁殖与否、通过位移-时间曲线的间距判断繁殖区的忠诚度,以及位移-时间曲线的重合情况判断跟踪个体之间的家庭组合情况(见表 3)。

表 2　白头鹤跟踪个体的性别、年龄判定

Table 2　Sex and age determination of Hooded Crane tracked individuals

编号 No.	佩戴跟踪器时的信息 Information when wearing the tracker			依据位移-时间曲线和行为判别 Discrimination according to position control curve and behavior				跟踪年数/a Years	备注 Remarks
	性别 Gender	年龄 Age	佩戴日期 Date	性别 Gender	出生年度 Year of birth	佩戴跟踪器时的年龄 Age when wearing the tracker	最终有效监测时的年龄 Age at final effective monitoring		
G01	U	3?	2014-4-7	雄	2012 年	2	7	2.0	2018 年、2019 年在韩国发现。
G02	雄	U	2014-4-7	雄	2012 年	2	9	2.0	2020 年、2021 年在韩国发现。跟踪器脱落。
G03	U	U	2014-4-7	雌	2012 年	2	9	6.1	2019 年 12 月,在日本以三口之家的家庭群形式活动;2021 年在韩国发现。跟踪器脱落。
G04	U	U	2014-4-9	雄	2013 年	1	9	0.7	2020 年、2021 年在韩国发现。跟踪器脱落。
G05	U	U	2014-10-4	雄	2013 年	2 年以下	6	0.5	2018 年、2019 年在韩国发现。
G06	U	U	2014-10-4	雄	2014 年	1 年以下	7	2.6	2020 年、2021 年繁殖。
G07	U	U	2014-10-22	雄	2013 年	2 年以下	2 年以下	0.1	
G08	U	U	2015-4-4	雄	2013 年	2	6	0.0	2018 年、2019 年在韩国发现。
G09	雄	U	2015-4-4	雄	2011 年以前?	4 年以上	10 年以上	6.1	2021 年在韩国发现。
G10	雄	2 年以下	2015-4-13	雌	2014 年	1	7	6.5	
G11	雄?	U	2015-4-13	雄	2011 年以前?	4 年以上	10 年以上	6.6	
G12	雌	2	2015-4-16	雌	2014 年	1	7	6.6	
G13	雄	2	2015-4-18	雄	2014 年	1	6	1.0	2019 年、2020 年在韩国发现。
G14	雌?	2-	2015-4-19	雄	2013 年	2	4 年以下	1.3	
G15	U	2 年以下	2015-4-20	雄	2013 年	2	3 年以下	1.1	
G16	U	2 年以下	2015-4-26	雄	2013 年	2	3	1.0	
G17	U	2 年以下	2015-9-6	雄	2014 年	2 年以下	3	1.6	
G18	U	3 年以下	2015-9-6	雌	2013 年	3 年以下	3	0.5	
G19	U	1	2015-12-17	雄	2015 年	1 年以下	6 年以上	6.0	
G20	U	U	2015-12-25	雄	2015 年	1 年以下	5	0.3	2019 年、2020 年在韩国发现。
G21	U	U	2015-12-31	雄	2015 年	1 年以下	1	0.3	
G22	U	2 年以上	2017-10-15	雄	2016 年	2 年以下	4	2.5	
G23	U	2 年以上	2017-10-15	雄	2015 年	3 年以下	3	1.0	
G24	雌	U	2017-10-20	雄	2015 年	3 年以下	3	1.0	
G25	U	U	2017-10-23	雌	2014 年	3 年以上	6 年以上	3.5	2021 年 11 月 19 日在日本出水发现该白头鹤和另 1 只成鸟、1 只幼鸟一起活动。

http://www.ecologica.cn

续表

编号 No.	佩戴跟踪器时的信息 Information when wearing the tracker			依据位移-时间曲线和行为判别 Discrimination according to position control curve and behavior				跟踪年数/a Years	备注 Remarks
	性别 Gender	年龄 Age	佩戴日期 Date	性别 Gender	出生年度 Year of birth	佩戴跟踪器时的年龄 Age when wearing the tracker	最终有效监测时的年龄 Age at final effective monitoring		
G26	雌?	2	2018-6-1	雄	2016 年	2	3	1.1	
G27	雄	2	2019-5-5	雄	2017 年	2	4	2.5	2022 年 2 月 21 日在韩国发现
G28	U	2	2019-5-5	雄	2018 年	1	3	2.5	
G29	雄	U	2019-5-9	雄	2017 年	2	4	2.5	
G30	雌	U	2019-6-17	雌	2017 年	2	4	2.4	
G31	U	U	2020-6-2	雄	2017 年	3	4	0.9	2021 年 7—8 月份在黑龙江大沾河观察到该白头鹤佩戴的啄跟踪器已破损。
G32	U	3 年以上	2021-5-5	雄	2011 年以前?	10 年以上	10 年以上	0.5	2021 年 10 月 24 日在日本出水、2022 年 3 月 12 日在韩国浅水湾分别发现该白头鹤和另 1 只成鸟、两只幼鸟一起活动。在其巢南部 500 m 处 2013 年发现一巢址。
G33	U	U	2021-5-5	雌	2017 年	4	4	0.5	

U 表示未判别;? 表示不确定

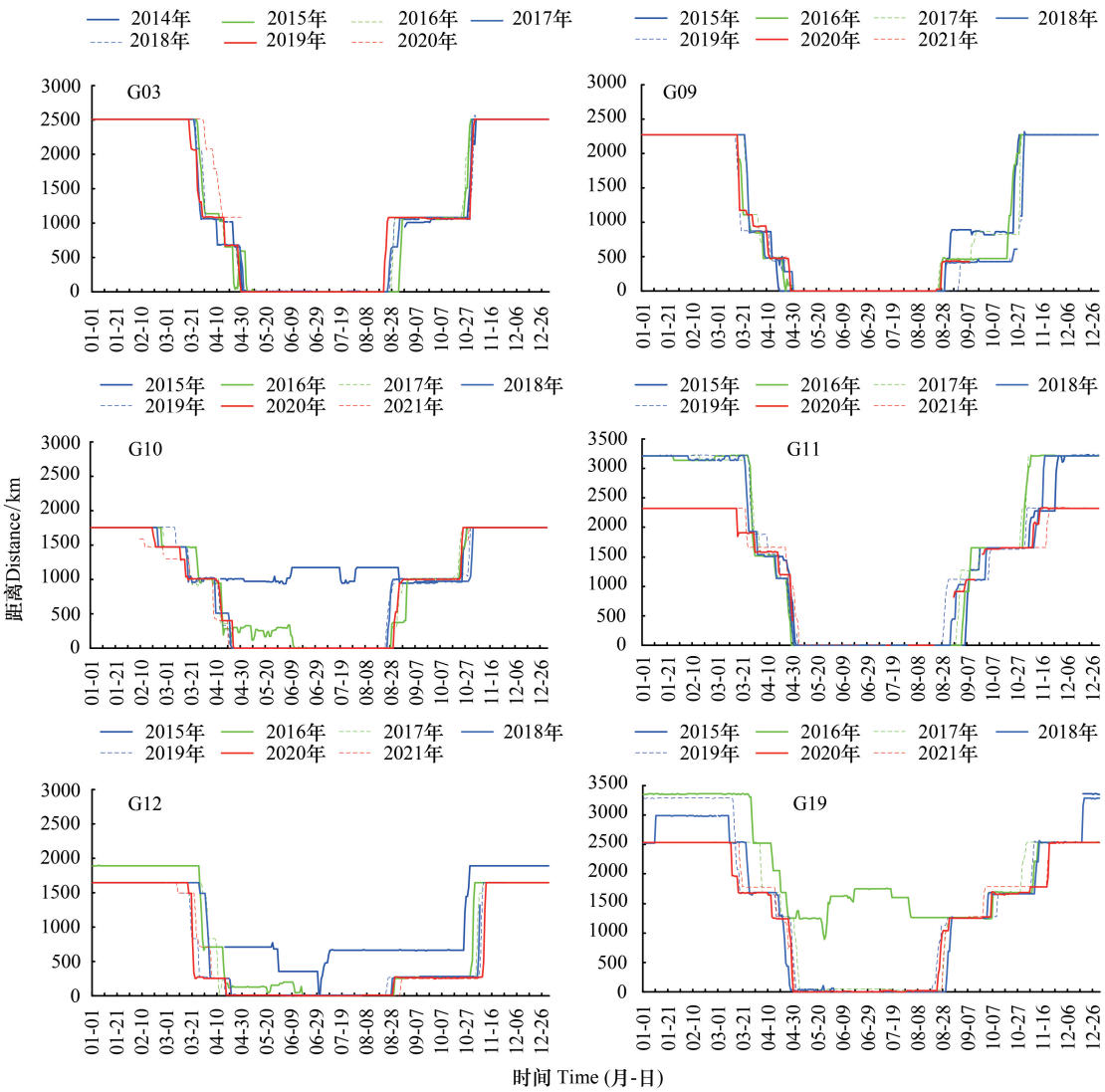

图 2　以繁殖地为基准的白头鹤个体不同年度位移-时间曲线图

Fig.2　Position control curve of individual Hooded Crane in different years based on breeding site

表 3　应用位移-时间曲线变化幅度对白头鹤行为的判别

Table 3　Discrimination of behavior of Hooded Crane by variation amplitude of position control curve

判别内容 Content	繁殖 Breeding				
	繁殖与否 Whether to reproduce	繁殖期 Breeding period	巢址忠诚度 Nest site loyalty	繁殖 干扰 disturb	后期活动范围 Scope of later activities
判别要点 Main points	繁殖期曲线总体趋势平缓	繁殖期曲线前后错位越小,繁殖期越趋于一致	繁殖期曲线差距越小,忠诚度越高	偶有跳幅	曲线幅度逐渐增大

判别内容 Content	家庭 Family		栖息地 Habitat			
	组合 Marry	离散 Divorce	越冬地 Wintering area	中途停歇地 Stopover sites	度夏地 Spend summer	繁殖地 Breeding ground
判别要点 Main points	重合度高	重合线离散	不同年度的越冬期曲线差距越小,对越冬地忠诚度越高	平直曲线越长,停留时间越长	曲线变幅越大,活动范围越大	繁殖期曲线平缓

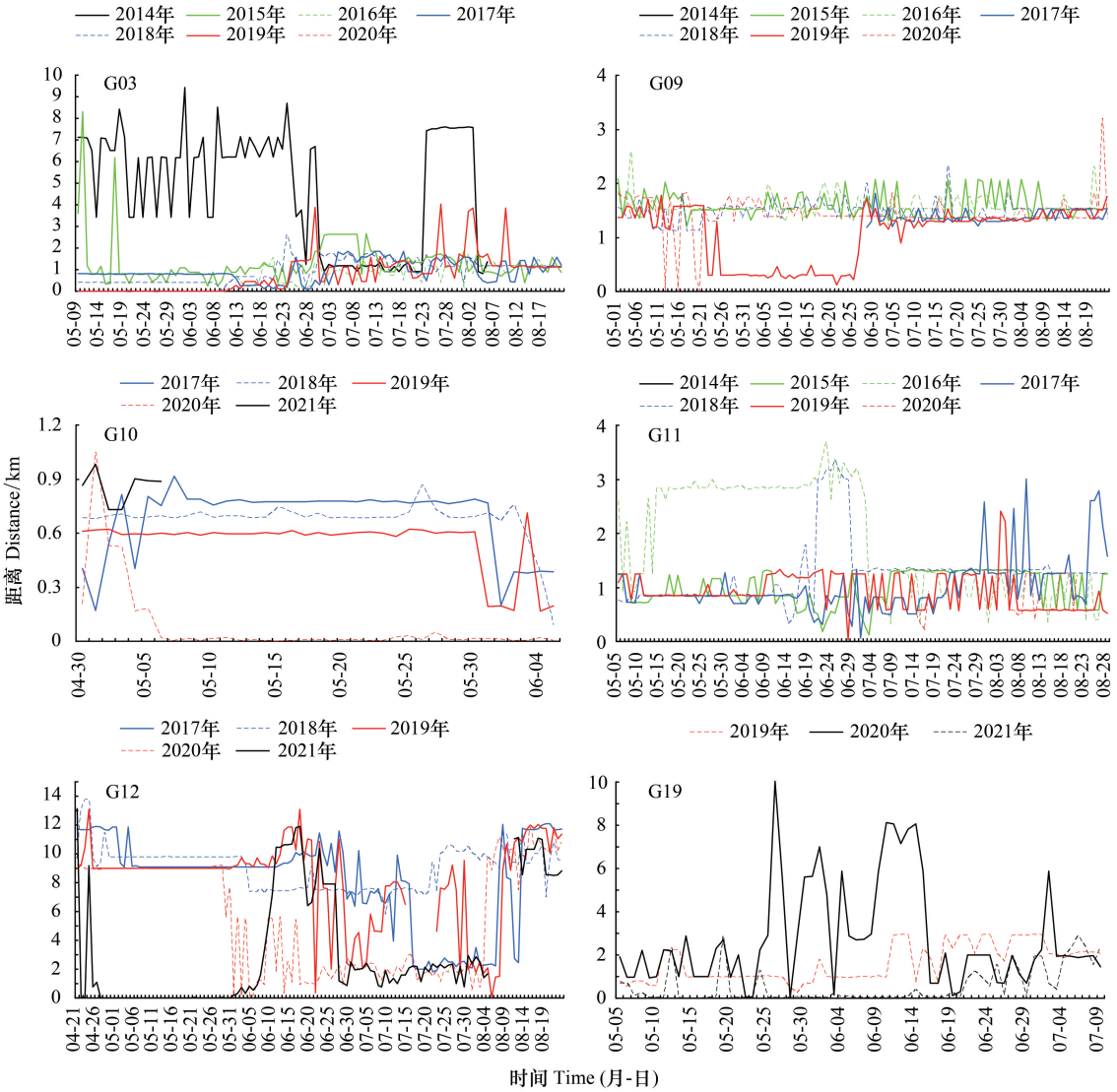

图 3 繁殖阶段的白头鹤个体不同年度位移-时间曲线图

Fig.3 Displacement time curve of individual Hooded Crane in different years at breeding stage

从图 4 的曲线变化发现,2019 年 7 月 2—11 日白头鹤 G27、G30 号曲线重合,同时在野外观察到白头鹤 G27、G30 号个体曾一起活动,有交配行为。12 日之后,分开之后再无交集。2020 年 5 月 13—22 日 G29、G30 号曲线重合,野外也观察到 G29、G30 号个体相伴活动,有交配行为。23 日之后,这两只白头鹤分开,直至 2021 年 4 月 10 日 6:00 再次相遇后,结合成为一个家庭。从位移-时间曲线的变动幅度看,平直曲线仅为 6 天(6 月 11—16 日),表明繁殖不成功。8 月 8 日 9:00 一起离开繁殖地。11 月 5 日 22:00 一同抵达越冬地——日本出水。图 4 位移-时间曲线反映出白头鹤 G27、G29、G30 家庭组合、分离情况。

2.2.4 解读领域回归及巢址忠诚度

通过 4 月下旬至 6 月中旬的位移-时间曲线变化幅度判断白头鹤繁殖与否、通过曲线的间距判断繁殖区、越冬区、中途停歇地的忠诚度,以及曲线的重合情况判断跟踪个体之间的家庭组合情况(见表 3)。

跟踪信息显示,白头鹤 G12 个体 2017 年开始繁殖后,2018—2020 年的繁殖巢与之相距 800 m 左右,2018—2020 年的繁殖巢则几乎为一个位置。2021 年 4 月 19 日 14:00 返回往年的繁殖巢区(海拔 54.4—55.6 m),可能是该区域水位过高,无法继续坐巢繁殖,逗留至 21 日 4:00 后只好到附近其它地方寻找新的巢址。21 日 5:00—23 日 17:00 之间发现了新的适宜巢址。23 日 18:00—24 日 6:01 再次飞到原巢址,两天后,在

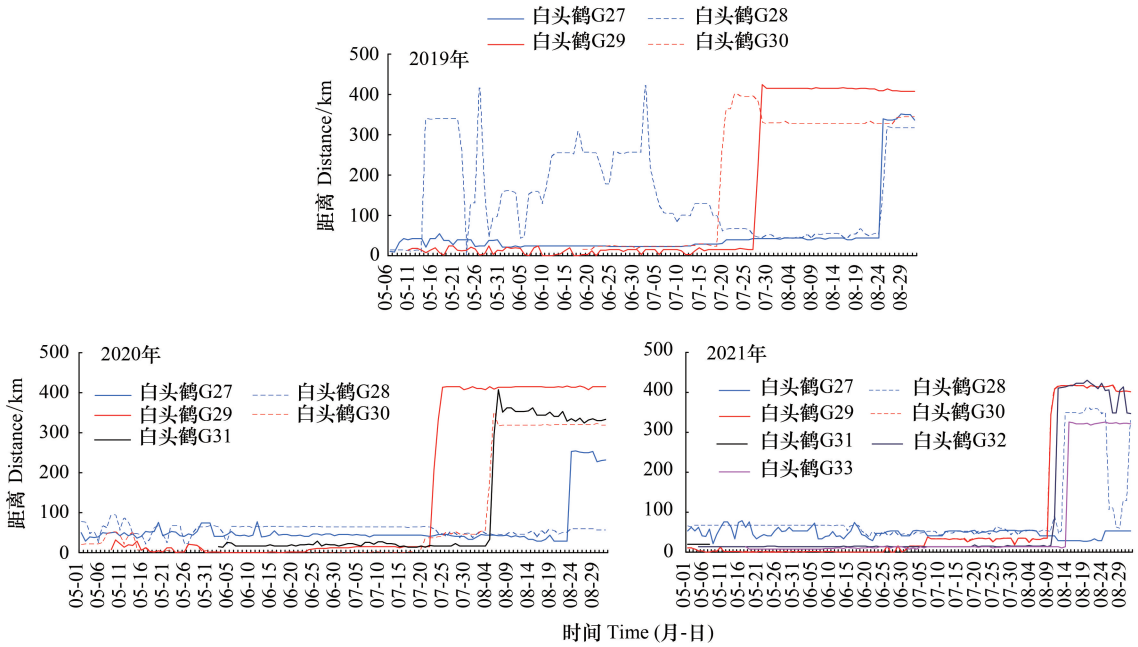

图 4　同一年度不同白头鹤(G27—G33 号)个体度夏期间位移-时间曲线图

Fig.4　Position control curve of individual Hooded Crane (No.G27—G33) during summer in the same year

2017 年巢址的西北部 12 km 左右处确定了新的巢址(海拔 58.7 m),图 3、图 5 反映出白头鹤 G12 的 2017—2021 年巢址变化情况。

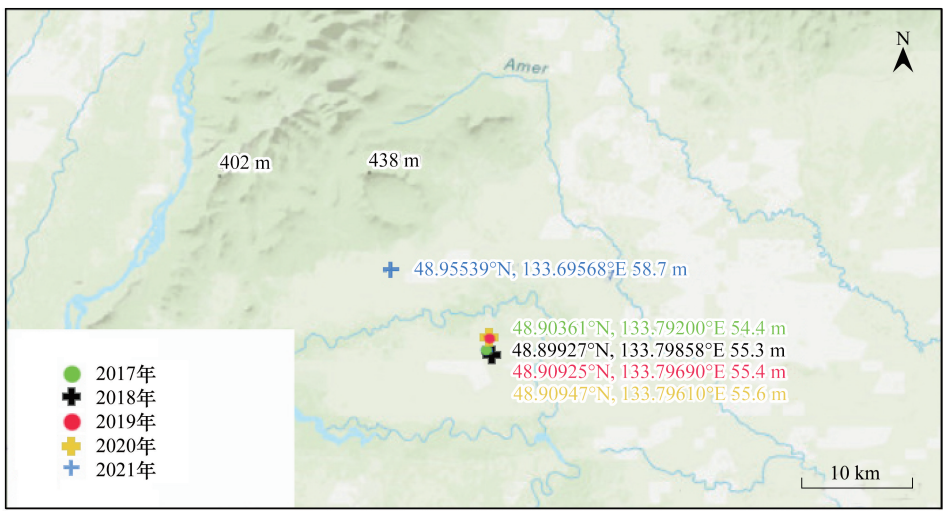

图 5　白头鹤(G12)2017—2021 年繁殖巢区位置图

Fig.5　Location map of breeding nest area of Hooded Crane (G12) from 2017 to 2021

2.2.5　解读白头鹤是否繁殖

通过 4 月下旬至 8 月中旬的位移-时间曲线变化幅度(图 3、图 4)对白头鹤繁殖情况进行判别(见表 3)。

从图 2、图 3 的观察来看,白头鹤 G03 个体 2016—2019 年 5 月初至 6 月中旬的位移-时间曲线平直,可以判断,白头鹤 G03 个体从 2016 年开始繁殖(2019 年 12 月,在日本出水野外观察到 G03 个体以三口之家的家庭群形式活动)。

从图 2、图 3 的观察来看,白头鹤 G12 个体 2017—2021 年 5 月初至 6 月中旬的位移-时间曲线平直,可以

判断,白头鹤 G12 个体从 2017 年开始繁殖。

对 33 只白头鹤不同年度的位移-时间曲线进行判读,发现 G01、G02、G03、G06、G09、G10、G11、G12、G19、G22、G23、G25、G32 共计 13 只个体进行了繁殖,G27、G28、G29、G30、G31 尚未繁殖,其余个体由于有效跟踪数据较少,无法确认是否繁殖。其中 G02、G06、G19 初始繁殖年龄为第 3 年,占确认繁殖的 23.1%;G01、G03、G09、G10、G11、G22、G23 初始繁殖年龄为第 4 年,占确认繁殖的 53.8%;G12、G25 初始繁殖年龄为第 5 年,占确认繁殖的 15.4%;G32 佩戴跟踪器时已是繁殖的成鸟,初始繁殖年龄无法判别,占确认繁殖的 7.7%。

3 讨论

3.1 位移-时间曲线

位移-时间曲线被应用于建筑[37]、医学[38]和制造[39]等领域,有人应用移动位置方法分析了基于移动用户的协同过滤位置推荐模型,分别计算任意两个位置之间的分析移动用户签到行为在时间、空间和社交维度上的分布特征[40]。也有人应用与位移-时间曲线类似的净平方位移(NSD)的时间序列拟合来研究鸟类的运动策略,即迁移、游荡、居留等,并通过运动曲线区分鸟类的休息与觅食[41],Batbayar 等利用维度位置移动示意图对白枕鹤的迁徙、停歇状况进行了分析[15]。

本文将白头鹤个体卫星定位有效信息最后一个年度的 5 月中旬零时位置坐标为基准,测算出自佩戴跟踪器以来每天 0:00 其它各定位点与基准点的距离,绘制出的位移-时间曲线,结合野外行为观察,能够用于性别、年龄的判别,解读白头鹤的繁殖、领域回归、迁徙停歇等。

根据不同的研究目的,设定不同位点、不同时段为基准点。应用不同位点、不同时段为基准点的位移-时间曲线可能还可以进一步解读更多的信息。

3.2 性别判别

白头鹤雌雄同形,其性别从外部形态上很难区分,这给相关研究带来不便。在野外,白头鹤的雌雄多以个体大小、行为差异等进行区分。

应用 PCR 技术检测白头鹤性别虽然已经成熟[33],仍不能满足科研需求。基于卫星定位数据的位移-时间曲线法判别白头鹤性别,为鹤类性别判别又提供了一种有效方法。

在繁殖地或度夏地夜间位移-时间曲线的平直度,反映了白头鹤夜栖点的位置变化。结合白头鹤繁殖期间雌雄行为差异,判断跟踪个体性别应该是可行的。

本研究中,利用卫星跟踪 6 年以上的 6 只白头鹤个体的定位跟踪数据,通过位移-时间曲线和野外行为观察获得判别指标后,对其余 27 只个体的性别、年龄全部进行了判别,判别率为 100%。判别结果与佩戴跟踪器时的初步判别除去 22 只未判别的以外,有 5 只判别不一致。其原因可能是初步判别时的判别指标不充分的缘故。判别精度有待在进一步的研究中确认。

3.3 年龄

观察发现,白头鹤春季从越冬地迁徙至松嫩平原停歇时,成年鹤离开停歇地较早,到繁殖地进行占区、繁殖,而亚成体(脱离了成鸟直至长到参与繁殖年龄之前)没有繁殖需求、没有领域行为或领域行为不强,它们迁徙时离开中间停歇地较晚,之后开始在度夏区游荡,直至秋季迁徙。依据这一现象,可以通过位移-时间曲线变化判别成体和亚成体,再结合体羽和虹膜颜色判断亚成体的具体年龄。白头鹤长成亚成体后,从体色上已经难以区分。

通过春、夏季位移-时间曲线变化幅度分析发现,没进行繁殖的白头鹤夜间位移-时间曲线变化幅度非常大。坐巢繁殖的一个月期间的夜间位移-时间曲线近乎平直。

从表 2 可以看出,在为白头鹤佩戴跟踪器时,依据当时的判别能力,仅对 33 只中的 11 只进行了性别判别,其中还有 3 只存疑不确定;对 16 只进行了年龄判别,其中 1 只存疑。

本文依据位移-时间曲线和行为,对年龄全部进行了判别,其中 3 只跟踪时已进入成鸟的白头鹤判定为

2011 年或 2011 年以前出生(具体时间不确定)(见表 2),其余判别到具体年龄。

通过比对,依据位移-时间曲线和行为判别结果与佩戴跟踪器时的初步判别除去 22 只未判别的以外,有 5 只判别不一致。导致不一致原因可能是初始可依据的判别指标较少且不完全可靠的缘故。

3.4　是否繁殖及初始繁殖年龄的判别

通过位移-时间曲线变化,不仅能判断年龄,还能判断繁殖成功与否以及开始繁殖的年龄。白头鹤孵化期平均为 30.5 d,雏鸟都出壳的第二天,成鸟便带着雏鸟渐渐远离巢址,不再回巢过夜[33]。结合秋季中途停歇地和越冬地的野外观察是否携带幼鸟,可以印证:在 5 月上旬至 6 月中旬这一段时间内,位移-时间曲线没出现相对平直曲线的,表明没繁殖;平直曲线长度达到 30 d 以上的,可以确认为繁殖成功;反之,平直曲线长度不足 30 d 的则可以判定为繁殖不成功。

Kiyoaki 曾利用彩环标记法研究了白头鹤的初次繁殖年龄,雌性白头鹤首次繁殖年龄 2—6 岁(n=2),雄性 3—8 岁(n=6)[42]。这个结果是基于观察到环志个体与幼鸟共同活动即认定繁殖成功得出的。通过野外观察,在临近繁殖地的度夏地中,2 岁雌性白头鹤就有交配行为,但未发现筑巢繁殖。

本文从位移-时间曲线判断,确认繁殖的白头鹤中,雌性白头鹤初始繁殖年龄为 3—5 岁(n=4);雄性白头鹤的初始繁殖年龄为 3—4 岁(n=9)。初始繁殖年龄为 4 岁(n=7)的占 53.8%。样本量上大于前人、判别依据为是否孵卵,而非在越冬地是否携带幼鸟(幼鸟有夭折的可能性)。这进一步细化了白头鹤繁殖方面的研究成果。

3.5　跟踪个体的家庭组合解读

将 4 月初至 6 月末这一期间的不同跟踪个体位移-时间曲线在同一图内观察,重合部分,应该是同栖同宿,可以认定为配偶关系。重合部分的长短,则反映出配偶关系的稳定性。

通过定位跟踪和位移-时间曲线观察发现,白头鹤在配偶选择时,即便有了交配行为之后,也不一定从一而终。但有交配行为之后,开始有领域行为了。

3.6　解读领域回归

Gurarie 等通过建立模型的方式将海狗的定位信息绘制成运动轨迹,揭示海狗的日行为特征[43]。

通过环志回收信息发现,许多鸟类年复一年地在相同的地方建立领域,进行繁殖。以往的研究发现,不同年龄、性别的鸟类,领域回归能力不同。年龄方面,成鸟强于幼鸟;性别方面,有的雄鸟强于雌鸟,有的雌鸟强于雄鸟;领域回归与出生印记密切相关[1]。

北美的笛鸻(*Charadrius melodus*)是否回到与前一年相同的繁殖地点,与种内的社会关系以及气候的稳定性有关[44]。在不稳定的繁殖地上繁殖的成年环颈鸻的扩散运动与栖息地质量显著相关[45]。

有研究表明,越冬白头鹤的领域行为与栖息地的食物资源有关,维持稳定的领域有利于幼鸟的生存[46]。

本文通过对不同年度的位移-时间曲线观察发现,巢区的位移-时间曲线距离远近,反映出巢址的变化。

从白头鹤 G12 个体的巢址来看,与 2017 年的巢址相比,2018—2020 年的巢址距其不足 1 km,高度差 0.9—1.2 m;距离 2021 年的巢址 12 km,高度差为 4.3 m。这种变化应该与坐巢初期的水位高度相关,需要进一步研究。

白头鹤会返回前一年的繁殖地进行繁殖,对其繁殖领域是忠诚的。但不稳定的繁殖栖息地质量不仅影响白头鹤巢址的选择,也有可能影响成年白头鹤繁殖后的扩散运动。

4　结论

本研究结果表明,基于卫星定位跟踪数据的位移-时间曲线与野外观察获得的信息相结合获得判别指标后,根据曲线平直度判断:曲线平直的是雌性,曲线呈锯齿状的是雄性;距离繁殖区较近、曲线变化幅度非常大的是亚成体,在繁殖区域、曲线近乎平直达 1 个月左右的是繁殖的成鸟;根据平直曲线长度,确认是否繁殖成功及初始繁殖年龄;4 月初至 6 月末期间的不同跟踪个体的位移-时间曲线重合的,可以认定为配对关系;重合

部分的长短,则反映出配对关系的稳定性;巢址的位移-时间曲线间距,反映出巢址的变化不同年份的巢址间距离,可以展示白头鹤具有很规则的领域回归行为。从而利用曲线的平直度对白头鹤的性别、年龄进行判别,利用平直曲线的长度解读婚配、繁殖状况、曲线之间的距离判别扩散、栖息地利用等信息。通过这种方法,也首次揭示了白头鹤婚配的变化。

通过已经获得的卫星定位跟踪数据,应用位移-时间曲线法结合野外观察获得的信息融合分析,为进一步挖掘卫星定位跟踪数据,推进跟踪物种的深入分析提供了新的方法。

致谢:谷彦昌先生、Gankhuyag Purev-Ochir 和 Baasansuren Erdenechimeg(蒙古国),Oleg Goroshko 和 Andrey Averin(俄罗斯)参加了部分野外工作;Yuko Haraguchi 和 Satoshi Nishida(日本),Kisup Lee(韩国)提供白头鹤越冬观察信息;陈承彦先生协助提供了日文文献,虎贵琳帮助写作,特此一并致谢。

参考文献(References):

[1] 郑光美. 鸟类学. 2 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2012: 236-237.

[2] 孙儒泳, 王德华, 牛翠娟. 动物生态学原理. 4 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2019.

[3] 黑龙江中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区管理局. 嫩江常见雀形目鸟类性别和年龄简易判别手册. 哈尔滨: 东北林业大学出版社: 1-133.

[4] 袁梦. 鹈鹕的性别鉴定方法建立及其遗传聚类分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 1-40.

[5] 尚玉昌. 动物的行为节律. 生物学通报, 2006, 41(10): 8-10.

[6] 李天韵, 刘依明, 王德利, 钟志伟. 动物个性研究进展. 生态学报, 2022, 42(1): 37-44.

[7] 马强. 中国东部沿海湿地越冬白头鹤栖息地选择和行为时间分配. 湿地科学与管理, 2017, 13(4): 48-52.

[8] 陈智强, 赵增辉, 王远飞, 韦力, 丁国骅, 林植华. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麂(*Muntiacus crinifrons*)活动节律分析和潜在适生区预测. 生态学报, 2021, 41(9): 3535-3547.

[9] 贾晓东, 刘雪华, 杨兴中, 武鹏峰, Melissa Songer, 蔡琼, 何祥博, 朱云. 利用红外相机技术分析秦岭有蹄类动物活动节律的季节性差异. 生物多样性, 2014, 22(6): 737-745.

[10] 李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云. 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 2014, 22(6): 685-695.

[11] 曲金柱, 巴明廷, 李晶, 李学德. 郑州城区鸦科 Corvidae 混群鸟冬季集群栖宿调查. 河南教育学院学报: 自然科学版, 2004, 13(2): 51-53.

[12] Ivey G L, Dugger B D, Herziger C P, Casazza M L, Fleskes J P. Wintering ecology of sympatric subspecies of Sandhill Crane: correlations between body size, site fidelity, and movement patterns. The Condor, 2015, 117(4): 518-529.

[13] 赵欣如, 宋杰. 北京小龙门鸟类环志初报. 动物学杂志, 1988, 23(4): 39.

[14] 张孚允, 杨若莉. 中国鸟类迁徙研究. 北京: 中国林业出版社, 1997: 1—364.

[15] Batbayar N, Yi K P, Zhang J J, Natsagdorj T, Damba I, Cao L, Fox A D. Combining tracking and remote sensing to identify critical year-round site, habitat use and migratory connectivity of a threatened waterbird species. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4049.

[16] Exo K, Hillig F, Bairlein F. Migration routes and strategies of Grey Plovers (*Pluvialis squatarola*) on the East Atlantic Flyway as revealed by satellite tracking. Avian Research, 2019, 10(3): 305-318.

[17] Kjellén N, Hake M, Alerstam T. Timing and speed of migration in male, female and juvenile Ospreys Pandion haliaetus between Sweden and Africa as revealed by field observations, radar and satellite tracking. Journal of Avian Biology, 2001, 32(1): 57-67.

[18] López-López P. Individual-based tracking systems in ornithology: welcome to the era of big data. Ardeola, 2016, 63(1): 103.

[19] Javed S, Takekawa J, Douglas D. Tracking the spring migration of a bar-headed goose (*Anser indicus*) across the Himalaya with satellite telemetry. Global Environmental Research, 2000

[20] Kanai Y. Migration of demoiselle cranes in Asia based on satellite tracking and fieldwork. Global Environmental Research, 2000

[21] Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, Nagendran M, Mita N, Higuchi H. Migration routes and important resting areas of Siberian cranes (*Grus leucogeranus*) between northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking. Biological Conservation, 2002, 106(3): 339-346.

[22] Ueta M, Higuchi H. Difference in migration pattern between adult and immature birds using satellites. The Auk, 2002, 119(3): 832-835.

[23] Roughgarden J, Running S W, Matson P A. What does remote sensing do for ecology? Ecology, 1991, 72(6): 1918-1922.

[24] Higuchi H. Migration and habitat use of Oriental White Storks from satellite tracking studies. Global Environmental Research, 2000

[25] Sader S A, Powell G V N, Rappole J H. Migratory bird habitat monitoring through remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(3): 363-372.

[26] Higuchi H. The migration routes and important restsites of cranes satellite tracked from south-central Russia. Proc Int Symp the Future of Cranes and Wetlands, 1994.

[27] Cai T L, Huettmann F, Guo Y M. Using stochastic gradient boosting to infer stopover habitat selection and distribution of Hooded Cranes *Grus monacha* during spring migration in Lindian, Northeast China. PLoS One, 2014, 9(2): e89913.

[28] Jiao S W, Guo Y M, Huettmann F, Lei G C. Nest-site selection analysis of hooded crane (*Grus monacha*) in Northeastern China based on a multivariate ensemble model. Zoological Science, 2014, 31(7): 430-437.

[29] Chong J, Higuchi H, Pak U. The migration routes and important rest-sites of cranes on the Korean Peninsula. The Future of Cranes and Wetlands: Proceedings of the International Symposium. Wild Bird Society of Japan,Tokyo, 1994

[30] Mi C R, Møller A P, Guo Y M. Annual spatio-temporal migration patterns of Hooded Cranes wintering in Izumi based on satellite tracking and their implications for conservation. Avian Research, 2018, 9(1): 23.

[31] BirdLife International. 2016. Grus monacha. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22692151A93337861. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22692151A93337861.en. Accessed on 01 August 2022.

[32] 赵正阶. 中国鸟类志. 长春:吉林科学技术出版社,2001:412-413.

[33] 郭玉民. 小兴安岭白头鹤(*Grus monacha*)繁殖行为生态学研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005: 1-86.

[34] 郭玉民, 钱法文, 刘相林, 徐纯柱, 马建章. 小兴安岭白头鹤繁殖习性初报. 动物学报, 2005, 51(5): 903-908.

[35] 张海, 孟德荣. 河北水鸟. 北京: 中国林业出版社, 2018: 180-181.

[36] 黎珍惜, 黎家勋. 基于经纬度快速计算两点间距离及测量误差. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(11): 235-237.

[37] 张东明. 边坡监测技术与数据处理方法的研究. 科学技术与工程, 2010, 10(22): 5539-5543, 5559.

[38] 叶振盛,郭薇,陈斌. 全方向 M 型超声的位移-时间曲线评价心力衰竭患者左心室收缩的同步性//第十届全国超声心动图学术会议论文., 2010:74-75.

[39] 朱鹤, 高晓东. 基于 DSP 与光栅的步进电机速度与位置复合控制. 微电机, 2011, 44(9): 79-81, 102.

[40] 章松. 面向移动行为的数据分析与建模方法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016: 1-45.

[41] Bastille-Rousseau G, Potts J R, Yackulic C B, Frair J L, Ellington E H, Blake S. Flexible characterization of animal movement pattern using net squared displacement and a latent state model. Movement Ecology, 2016, 4: 15.

[42] Kiyoaki Ozaki. 应用彩环标记法研究白头鹤和白枕鹤的首次繁殖年龄//国际鹤类学术研讨会论文摘要集.2002:70.

[43] Gurarie E, Andrews R D, Laidre K L. A novel method for identifying behavioural changes in animal movement data. Ecology Letters, 2009, 12(5): 395-408.

[44] Haig S M, Oring L W. Mate, site, and territory fidelity in piping plovers. The Auk, 1988, 105(2): 268-277.

[45] Jackson D B. Breeding dispersal and site-fidelity in three monogamous wader species in the Western Isles, U.K. Ibis, 2008, 136(4): 463-473.

[46] Ohsako Y. Flock organization, dispersion and territorial behaviour of wintering hooded cranes *Grus monacha* in izumi and akune, Kyushu. Japanese Journal of Ornithology, 1989, 38(1): 15-29.