

DOI: 10.20103/j.stxb.202309051916

王颖君,李显达,谷彦昌,郭玉民.基于四种方法比较判断鸟类繁殖与否——以白头鹤为例.生态学报,2025,45(12):6047-6055.

Wang Y J, Li X D, Gu Y C, Guo Y M. Testing four methods for estimation of birds breeding or not, taking Hooded Crane (*Grus monacha*) as an example. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12):6047-6055.

# 基于四种方法比较判断鸟类繁殖与否 ——以白头鹤为例

王颖君<sup>1</sup>, 李显达<sup>1,2</sup>, 谷彦昌<sup>3</sup>, 郭玉民<sup>1,\*</sup>

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 国家公园学院, 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

3 大沽河湿地国家级自然保护区管理局, 黑河 164133

**摘要:** 繁殖期是鸟类生活史的一个重要阶段。探究鸟类繁殖状态及繁殖巢位置能够为珍稀濒危动物种群的保护提供基础数据。大型水禽的繁殖地隐蔽且位于偏远地区, 难以通过实地观察进行识别。近年来, 卫星追踪系统和数据分析技术的进步极大地改进了识别鸟类运动模式和繁殖状态的方法, 通过将运动模型拟合到轨迹数据来分类运动模式, 从而识别其运动状态。以白头鹤 (*Grus monacha*) 为例, 通过比较基于卫星跟踪数据的三种分析方法以及野外监测方法, 旨在探究安全且便捷的方法判别鸟类是否繁殖并获取巢址的相关信息。结果表明, 白头鹤从五月初至六月初利用巢址繁殖, 持续天数约为 31d, 且对繁殖巢址的位置具有忠诚度。四种判别鸟类繁殖与否的方法各有利弊。卫星跟踪数据三种分析方法所得到的结果具有一定的一致性 ( $Kappa = 0.685$ ), 但实际观测的结果与另外三种方法差异较大。其中有 10 条数据通过实际观测的方法判断该年白头鹤未繁殖, 而另外三种统计分析方法均判断为繁殖。三种方法计算的筑巢开始时间、孵化结束时间、繁殖时长以及巢址经纬度均无显著差异。巢址利用天数的一致性一般, 而筑巢开始和结束时间的一致性较高。三种方法确定的白头鹤巢址位置基本一致, 主要分布于黑龙江省、俄罗斯哈巴洛夫斯克边疆区、阿穆尔州和犹太自治州。同一只白头鹤夏季繁殖位置较为固定。利用 nestR 包的分析方法最为便利, 结果直观, 但准确性还需提高。实际观测虽能准确判断当年个体是否繁殖成功, 但费时费力, 结果不够充分。因此建议主要利用 nestR 包判断水鸟繁殖位点及时间, 辅以 recurse 包以及位移-时间曲线方法, 并结合野外调查的方法进一步调整参数, 以增加结果准确性并进行验证。该研究将为判断珍稀濒危物种的繁殖状态并进一步提供保护策略提供方法支撑。

**关键词:** 白头鹤; 卫星跟踪; 巢址; 繁殖; nestR; recurse

## Testing four methods for estimation of birds breeding or not, taking Hooded Crane (*Grus monacha*) as an example

WANG Yingjun<sup>1</sup>, LI Xianda<sup>1,2</sup>, GU Yanchang<sup>3</sup>, GUO Yumin<sup>1,\*</sup>

1 School of Ecology and Nature conservation (School of national park), Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Heilongjiang Zhongyangzhan Black-Billed Capercaillie National Nature Reserve Service Center, Nenjiang 161499, China

3 Dazhanhe Wetland National Nature Reserve Administration, Heihe 164133, China

**Abstract:** Breeding represents a crucial phase in avian life cycles, and understanding their breeding status and nest site locations is essential for conserving endangered species. However, for those large waterbirds, their breeding sites are often hidden and located in remote areas, making them difficult to identify through field observations. Recent advancements in satellite tracking systems and data analysis have significantly improved methods for identifying bird movement patterns and breeding status, which classify movement patterns by fitting movement models to trajectory data, enabling the identification

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31770573, 31570532)

收稿日期: 2023-09-05; 网络出版日期: 2025-04-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bird168@126.com

of bird movement states. In this study, we compared the accuracy in determining breeding status and identify nesting sites of three safe and convenient satellite tracking-based methods (displacement-time curve method, nestR package and recurse package in R program) using Hooded Crane (*Grus monacha*) as a case study. Our aim is to provide an efficient and accurate method for identifying bird nesting sites. The results showed that Hooded Cranes utilized nest sites for breeding from early May to early June, with a duration of approximately 31 days. They exhibited site fidelity to their breeding nest locations. Each method exhibited unique advantages and limitations. The three satellite tracking-based methods produced consistent results ( $Kappa = 0.685$ ), while field observations yielded significantly different outcomes. Regarding Hooded Crane breeding data, 10 cases classified as non-breeding through field observations were identified as breeding by all three satellite tracking-based methods. No significant differences were found in nesting start date, hatching end date, breeding duration, or nest site locations across methods. The consistency of nest site usage days was moderate, while the consistency of nesting start and end dates was high. The locations of White-naped Crane nest sites identified by the three methods were largely consistent, mainly distributed in Heilongjiang Province, Russia's Khabarovsk Krai, Amur Oblast, and the Jewish Autonomous Oblast. The summer breeding locations of individual White-naped Cranes were relatively fixed. The nestR package emerged as the most user-friendly tool among tested methods, providing intuitive results despite requiring accuracy enhancements. Among the methods tested, the nestR package proved to be the most convenient, with intuitive results, though its accuracy requires further improvement. We recommend primarily employing the nestR package for assessing waterbird breeding sites and timing, supplemented by the recurse package and displacement-time curve method. Parameter adjustments should be implemented to enhance accuracy, with results validated through integration with field survey methods. This study provides methodological support for determining the reproductive status of rare and endangered species and further providing conservation strategies.

**Key Words:** Hooded Crane; satellite tracking; nest site; breeding; nestR; recurse

探究动物的行为和运动模式能够揭示个体、种群的生命过程及其与环境变量的相互作用,从而为保护珍稀濒危动物提供见解和思路<sup>[1]</sup>。随着遥测技术的发展,动物传感器和卫星跟踪设备逐渐被应用于动物行为的研究中,为科研人员获得更精准的动物运动数据以分析动物行为模式和栖息地利用等方面提供了更简单、便利的方法<sup>[2-4]</sup>。与此同时,不同的数据处理工具和方法也相应产生以便分析和解释动物的运动模式。目前有 58 个 R 包可以处理跟踪数据,其中有 11 个可以识别行为模式,根据基本数学模型可以分为聚类分析、分割方法和隐马尔科夫模型(HMM)三大类<sup>[5]</sup>。这些方法根据运动轨迹,通过拟合运动模型或轨迹分割,如隐马尔科夫模型、随机游走模型(Random Walk)、高斯过程,以获得模拟和修正的路径<sup>[6-9]</sup>,然后通过步长或角度来划分运动模式,最后对跟踪数据进行分类<sup>[10]</sup>。这些方法被广泛用于处理海洋哺乳动物和爬行动物的跟踪数据<sup>[11-13]</sup>。而另一些 R 包则通过识别移动状态的改变解释动物的行为运动<sup>[14]</sup>,如 EMbC 包可采用无监督的、多变量的、基于速度和转角的二元聚类方法来识别鸟类的日常活动,如休息、迁徙等<sup>[15]</sup>。

繁殖期是鸟类生活史的一个重要阶段,繁殖成功与否直接影响整个种群的数量。获得珍稀濒危物种繁殖时间,判断巢址位置、繁殖成功与否等相关数据,并探究繁殖成功与失败的原因,可以为珍稀濒危动物种群的保护提供依据。目前现有两个 R 包 nestR<sup>[16]</sup>和 recurse<sup>[17]</sup>可以仅通过卫星跟踪数据识别鸟类巢址及开始繁殖与结束繁殖的时间,并已应用于麻鹑(*Numenius arquata*)、林鹑(*Mycteria americana*)、粉足雁(*Anser brachyrhynchus*)等水鸟中<sup>[16,18-19]</sup>。该方法既可以仅根据跟踪数据识别巢址位置及繁殖期,也能够结合实际野外观测的数据通过监督训练减少识别错误率。此外也有科研人员利用独创的方式结合野外数据识别繁殖期,取得了可观的结果<sup>[19-20]</sup>。监督训练模型需要跟踪数据和已知行为的数据集<sup>[21]</sup>,一般而言,大型水鸟繁殖期占域面积大,分布较为分散,难以定位个体位置;且多于复杂湿地生境筑巢,植被密布难以接近,在实际考察时科研人员的安全很难保证,因此难以获取其巢址的准确位置。

白头鹤是国家一级重点保护野生动物,被世界自然保护联盟红色名录列为易危物种,全球数量约为 16000 只左右<sup>[22]</sup>。Vorob'ev(沃罗布耶夫)于 1961 年报告了第一个确定的白头鹤筑巢地点——勒拿河(Lena)流域托科河沿岸<sup>[23]</sup>,在 1960—1970 年代,在维柳伊河(Vilyui)流域(勒拿河的一条支流)和比金河(Bikin)流域(阿穆尔河的一条支流)记录了两个旧巢<sup>[24—27]</sup>,随后在比金河流域发现白头鹤 80 巢,伊曼河(Iman)流域发现 35 巢<sup>[28]</sup>。在阿尔丹河(Aldan)流域中部发现了白头鹤繁殖地,密度较大,马亚河(Maya)下游白头鹤繁殖密度最大<sup>[29]</sup>。在勒拿河上游和奥列尼奥克河(Olenok)、哈坦加河(Khataga)、叶尼塞河(Yenisei)流域以及维柳伊河流域上游以及相邻的莫罗河(Moreau)和科图伊河(Kotuy)流域也有白头鹤繁殖分布<sup>[25,29]</sup>。

1993 年李林在中国小兴安岭的林间湿地发现了第一个白头鹤繁殖巢<sup>[30]</sup>,之后郭玉民等人也相继在小兴安岭的大沾河、新青等地发现了白头鹤繁殖巢<sup>[31—32]</sup>。由于白头鹤繁殖于森林沼泽地带,位置隐蔽,较为偏远<sup>[31]</sup>,目前有关其繁殖期研究,特别是筑巢时间、巢址位置尚不充分<sup>[32]</sup>。截至 2014 年,研究人员仅寻找到 30 个白头鹤的巢<sup>[30,32—33]</sup>,此后有关白头鹤繁殖期的研究甚少<sup>[20]</sup>。因此,仅基于经度、纬度和时间数据,我们利用不同数据处理方法判断白头鹤是否繁殖以及探究寻找白头鹤巢址的可能性,旨在 1) 提供更方便的方法来跟踪数据,并确定白头鹤繁殖时间、巢址等;2) 与实际调查数据结果相比较,判断不同数据分析方法的准确性;3) 在野外工作难以开展的情况下,提供最佳寻找巢址和判断白头鹤繁殖与否的方法。

## 1 研究方法

### 1.1 卫星跟踪

2014—2023 年于中国东北、长江中下游以及蒙古国和俄罗斯使用翻弓法和地套法对野外白头鹤进行无害捕捉,同时收集伤病后体质恢复的救助个体,使用湖南环球信士科技有限公司生产的 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进行卫星跟踪,共环志跟踪 36 只个体。跟踪器重量小于白头鹤体重的 3%,整个环志时间不超过 10 分钟,环志完毕后立即放生并目视其走远。跟踪器每小时采用 GPS 进行一次定位,全球移动通信系统(GSM)进行信号传输,并记录位点于跟踪平台 Tracker Client。数据包括跟踪鸟类的经纬度位点、时间、瞬时速度、航向和高度等信息,以及气温、电池电压和测量精度的附加数据。

### 1.2 数据处理及分析

数据被分为五个等级,包括 A(5m 以内的精度),B(5—10m),C(10—20m),D(20—100m)和无效数据。本研究仅保留精度为 A、B 和 C 的数据作进一步分析。根据白头鹤繁殖大致时间,选取 4—7 月跟踪位点进一步分析,共获得 34 只白头鹤个体数据共计 188474 条用作后续分析。

#### 1.2.1 位移-时间曲线法

根据位移-时间曲线法<sup>[20]</sup>绘制白头鹤运动曲线,通过目测的方法判断繁殖状态并整理开始繁殖、结束繁殖时间,再在曲线中选靠后一些的某一日(鸟类孵卵后期更恋巢)的坐标确定为巢址。

#### 1.2.2 根据 nestR 包分析数据

利用 R 语言 nestR 包<sup>[16]</sup>中 find\_nests 函数判断繁殖开始、结束时间和巢址位置。根据白头鹤繁殖期大致范围<sup>[34]</sup>及实际观测经验设定函数参数,筑巢孵化时间设置为 4 月 10 日到 7 月 20 日之间,孵化周期保守设置为 30d。最后筛选连续访问天数大于 20d 的结果作为最终数据。

#### 1.2.3 根据 recurse 包分析数据

利用 recurse 包<sup>[17]</sup>中 getRecursions 函数判断多次访问的位置,筛选每只个体每年最可能为巢址的数据(第一行结果),并根据白头鹤繁殖习性进一步清洗数据,筛选访问次数最多且连续天数大于 20 d 的数据作为巢址位点。

#### 1.2.4 实际调查

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,记录白

头鹤繁殖情况;并于 2015—2022 年冬季在日本、韩国有针对性地观察、拍摄被环志跟踪的越冬白头鹤及其群体,根据家庭组成(有无幼鸟)判断繁殖成功与否。根据卫星跟踪数据信息,筛除由于信号丢失或跟踪器脱落导致未能判断出该个体该年是否繁殖的结果。

### 1.2.5 统计分析比较

利用 R 语言 irr 包<sup>[35]</sup>对四种方法判断白头鹤繁殖与否的结果进行 Fleiss's Kappa 分析。由于实际观测结果只能根据冬季野外调查确定,无法判断巢址的位置及繁殖时间,因此利用 R 语言 ICC 包<sup>[36]</sup>计算另外三种方法所得到的筑巢开始时间、结束利用巢址时间,以及利用巢址繁殖的天数的组内相关系数(Interclass Correlation Coefficient, ICC)进行一致性分析。利用广义线性混合模型比较是否繁殖、巢址位点、繁殖开始时间、繁殖结束时间,所有分析在 R 4.3.0<sup>[37]</sup>中进行。

## 2 结果与分析

利用 nestR 包确定了 14 只白头鹤 37 个巢址,利用 recurse 包得到 15 只个体 38 个巢址,利用位移-时间曲线方法得到 18 只白头鹤共计 46 个巢址。通过红外相机法拍摄到 2 只白头鹤巢址,且冬季野外调查获取了 26 只白头鹤 40 次繁殖情况。

Fleiss's Kappa 分析结果表明,四种方法判断白头鹤繁殖与否的结果的一致性较低(Kappa = 0.363),而 nestR, recurse 和位移-时间曲线三种方法所得到的结果具有一定的一致性(Kappa = 0.685),其中 nestR 包和 recurse 包的结果的一致性最高(Kappa = 0.907)。

四种方法判断白头鹤的 66 条结果中有 23 条(34.85%)数据一致,位移-时间曲线法与 nestR 包和 recurse 包判别一致的结果 51 条,占 77.27%。仅 2 号个体 2014 年、3 号个体 2017 年—2019 年、10 号个体 2018 年 25 号个体 2018 年用四种方法均判断出繁殖(表 1)。10 条结果通过实际观测的方法判断该年白头鹤并未繁殖,而另外三种统计分析方法均判断为繁殖(表 1)。26 条(39.39%)数据由于野外调查未能观测到白头鹤,不能与另外三种数据分析方法的结果比较,其中 18 条数据通过三种数据分析方法判断结果一致(表 1)。

12 条位移-时间曲线法与 nestR 包和 recurse 包都不一致的结果中,位移-时间曲线法分析 1 号个体 2015 年、9 号个体 2015 年、28 号个体 2021 年的平直曲线不足 30 d,判定为繁殖失败;32 号个体在 2021 年被环志时已进入繁殖阶段,卧巢时间不足 30 d,红外相机监测

为繁殖成功;2022 年 34、36 号个体为同一家庭成鹤,位移-时间曲线法通过其平直曲线不足 30 d,判定其繁殖失败,红外相机监测到繁殖巢被黑熊破坏导致繁殖失败,而其他方法仅判断出该年未能繁殖(图 1)。

不同方法计算出的筑巢开始时间、孵化结束时间、繁殖时长以及巢址经纬度均无显著差异( $P > 0.05$ )。结果表明,不同方法计算出白头鹤利用巢址繁殖的天数的一致性一般(ICC = 0.726),而筑巢开始时间以及结束利用巢址的时间具有较高的一致性(ICC = 0.913; ICC = 0.905)。通过位移-时间曲线法得到的白头鹤利用巢址繁殖的天数为(29.22±8.74) d, nestR 包为(31.32±6.83) d, recurse 包为(33.19±4.95) d(图 2)。通过位移-时间曲线法得到的白头鹤开始筑巢的时间为(127±5.59) d(5 月 7 日), nestR 包为(126±10.53) d(5 月 6 日), recurse 包为(122±7.83) d(5 月 2 日)(图 2)。通过位移-时间曲线法得到的白头鹤结束利用巢址的时间为(156±12.86) d(6 月 5 日), nestR 包为(154±9.91) d(6 月 3 日), recurse 包为(155±7.34) d(6 月 4 日)(图 2)。



图 1 34、36 号白头鹤个体 2022 年巢址正在被黑熊 (*Ursus thibetanus*) 破坏(图正中巨大黑点即正在巢上破坏的黑熊)

Fig.1 34, 36 Hooded Crane Individual 2022 nest site was destroying by a black bear (*Ursus thibetanus*) (Large black dot in the middle of the picture is the black bear)

表 1 四种方法判断白头鹤繁殖成功与否的结果比较  
Table 1 Comparison of the results of four methods for determining whether Hooded Crane breed or not

编号 ID	年份 Year	nestR	recurse	位移-时 间曲线 Displacement- time curve	实际观测 Field research	编号 ID	年份 Year	nestR	recurse	位移-时 间曲线 Displacement- time curve	实际观测 Field research
1	2014	否	否	否	否	12	2018	是	是	是	未知
1	2015	否	否	是	否	12	2019	是	是	是	未知
2	2014	是	是	是	是	12	2020	是	是	是	未知
2	2015	是	是	是	否	12	2021	是	是	是	否
3	2014	否	否	否	否	14	2015	否	否	否	否
3	2015	否	否	是	否	14	2016	否	否	否	否
3	2016	是	是	是	否	15	2015	否	否	否	否
3	2017	是	是	是	是	16	2015	否	否	否	否
3	2018	是	是	是	是	19	2019	是	是	是	未知
3	2019	是	是	是	是	19	2020	否	否	是	未知
4	2014	否	否	否	否	19	2021	是	是	是	未知
6	2015	否	否	否	否	22	2018	否	否	是	否
6	2016	否	否	否	未知	22	2019	否	否	是	未知
9	2015	否	否	是	否	23	2018	否	否	否	否
9	2016	是	是	是	否	24	2018	否	是	否	未知
9	2017	否	否	否	否	25	2018	是	是	是	是
9	2018	否	是	是	否	25	2019	是	是	是	未知
9	2019	是	是	是	未知	25	2020	是	是	是	否
10	2015	否	否	否	否	27	2021	否	否	否	否
10	2016	否	否	否	否	27	2022	是	是	否	未知
10	2017	是	是	是	否	28	2021	否	否	是	否
10	2018	是	是	是	是	28	2022	是	是	是	未知
10	2019	是	是	是	未知	29	2021	是	是	是	否
10	2020	是	是	是	否	29	2022	是	是	是	未知
11	2015	是	是	是	未知	30	2020	是	否	否	未知
11	2016	是	是	是	未知	30	2021	是	是	是	否
11	2017	是	是	是	未知	30	2022	是	是	是	未知
11	2018	是	是	是	未知	31	2022	否	否	是	未知
11	2019	是	是	是	未知	31	2023	是	是	否	未知
11	2021	是	是	否	未知	32	2021	否	否	是	是
12	2015	否	否	否	否	33	2022	是	是	是	未知
12	2016	否	否	否	否	34	2022	否	否	否	否
12	2017	是	是	是	否	36	2022	否	否	否	否

由图 3 可知,三种方法判断出的白头鹤巢址位点基本一致,白头鹤巢址位置主要分布于中国黑龙江省和俄罗斯哈巴洛夫斯克边疆区与阿穆尔州交接一带以及犹太自治州东北(图 3),利用位移-时间曲线判断的白头鹤巢址位置较多于其他两种方法(图 3)。

同一只白头鹤夏季繁殖位置较为固定,如 12 号个体 2017—2021 年连续五年均在哈巴洛夫斯克边疆区南部繁殖,且巢址直线距离不超过 10 km;10 号个体 2017 年—2020 年连续四年在滨海边疆区东北部繁殖,每年巢址直线距离不超过 2 km(图 4)。

### 3 讨论

不同判断白头鹤繁殖的方法各有利弊。红外相机能够监测白头鹤孵化过程、孵化时间、出雏时间和幼鸟

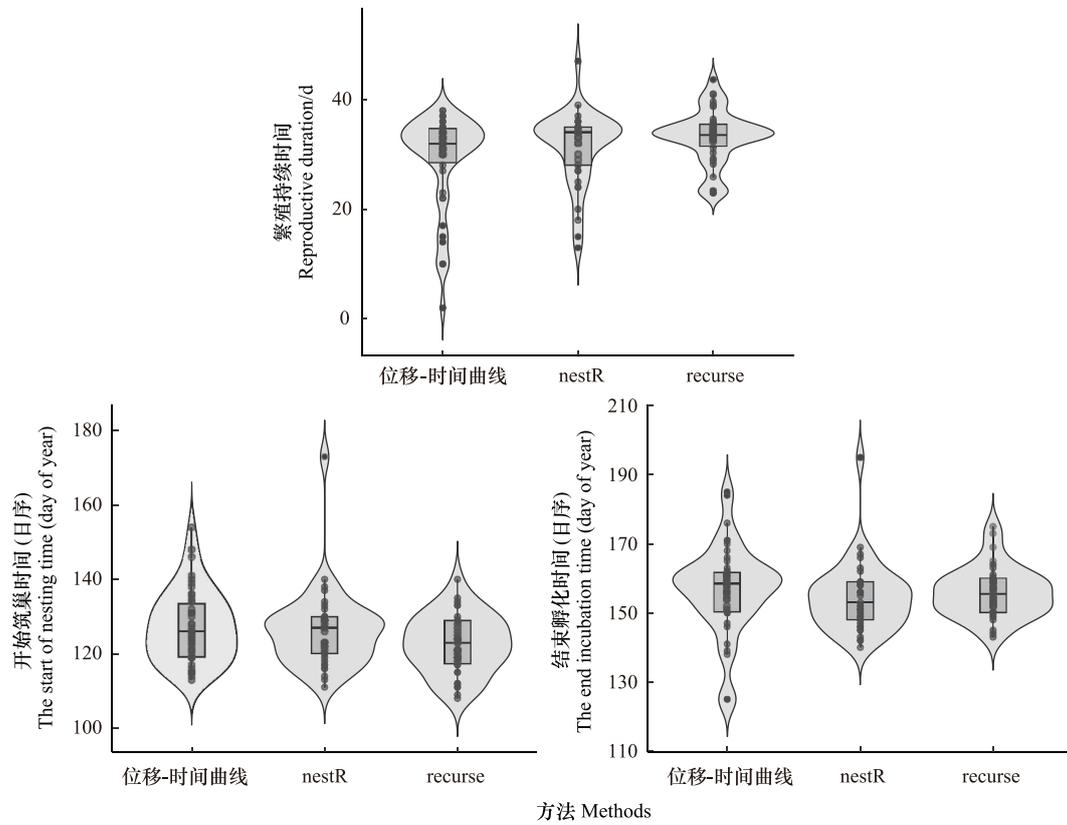


图2 利用位移-时间曲线、nestR 以及 recurse 三种方法判断白头鹤开始筑巢时间、结束孵化时间以及利用巢址持续时间的差异  
 Fig.2 Differences in the time to start nesting, the time to end incubation, and the duration of nest site utilisation by Hooded Crane using three methods: displacement-time curve, nestR, and recurse



图3 不同方法判断白头鹤巢址位置  
 Fig.3 Different methods to determine the nest location of Hooded Crane

出巢时间等,也能够监测孵化过程中受到的干扰和天敌等细致信息,但是该方法费时费力,在布置和回收相机时具有一定危险性;而冬季野外调查时间集中、位置受限,仅能够确定少量跟踪的白头鹤当年是否繁殖成功。

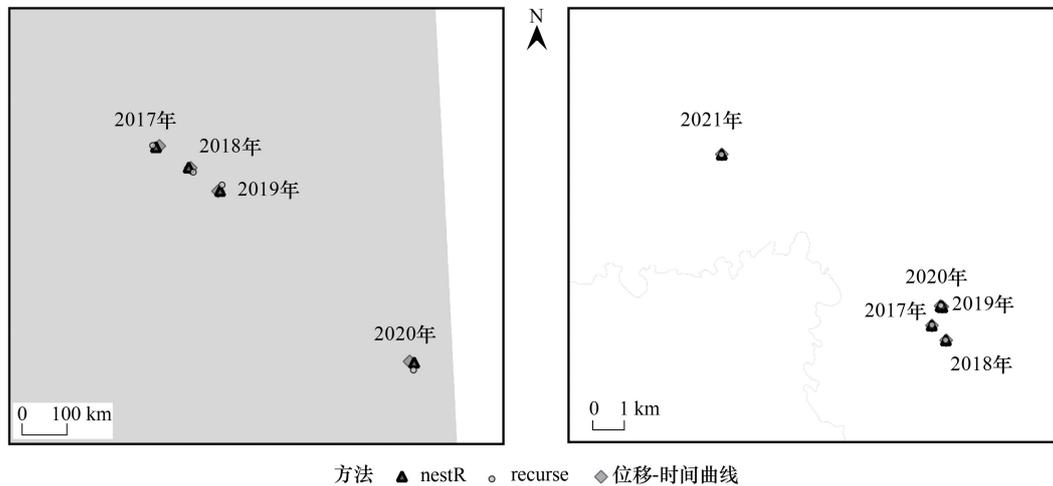


图 4 白头鹤 12 号个体连续 5 年巢址位置以及 10 号个体连续 4 年巢址位置

Fig. 4 Nest site locations of individual 12 for 5 consecutive years and individual 10 for 4 consecutive years of the Hooded Crane

同时繁殖后期和迁徙期幼鸟损失,或幼鸟冬季与成鸟分离的情况也会对调查结果造成影响<sup>[38]</sup>。然而该方法可确保获取繁殖成功的白头鹤数据的准确性,且能够获取白头鹤繁殖细节信息。例如,通过冬季实际观测确定白头鹤繁殖的数据中,有 10 条在越冬时候没有观测到白头鹤携带幼鸟,从而判断白头鹤并未繁殖,而其余三种方法均判断为繁殖成功;通过红外相机记录发现 34 号与 36 号个体 2022 年的繁殖巢被黑熊破坏导致繁殖失败,而 nestR 包、recurse 包这两种数据分析方法以及冬季调查仅能判断最终两个体没有繁殖,且均无法确定当年未能繁殖成功的原因。

结果表明,虽然 nestR 包、recurse 包与位移-时间曲线三种方法判断白头鹤是否繁殖具有一些误差,但总体而言一致性较高,具有一定可信度,然而最终结果也同样需斟酌考虑。位移-时间曲线法将跟踪数据可视化,结合经验数据,不仅能够判断白头鹤繁殖成功与否、繁殖时间,还能判断其年龄以及开始繁殖的年龄<sup>[18]</sup>。此外该方法判断出白头鹤进行繁殖但繁殖失败的 5 条结果中,经实际考察验证结果正确并找到了巢址位置,而另外 nestR 包和 recurse 包均直接判断为未繁殖,表明位移-时间曲线法的结果判断更为细致,在数据分析方法中具有一定的优势。而该方法虽免于野外调查,大大提高了判断白头鹤是否繁殖的效率,但对于数据的处理还处于初级阶段,不能直接得出是否繁殖与利用巢址时间的结果,而需要人工目视图像判断且手动整理数据,较为费时费力,且不能保证结果完全正确。nestR 包与 recurse 包虽也不能完全保证结果的准确性,但极大提高了判断繁殖成功与否、巢址位置以及利用巢址时间的速度。recurse 包仅根据卫星跟踪数据以及设定好参数的代码能够获得访问次数最多的位点信息,以及进出该位点的时间和本次进入与上一次进入时间差。但是结果冗余,仍需进一步筛选数据以判断位点是否为巢址;nestR 包则根据卫星跟踪数据以及设定好参数的代码,除能获得巢址经纬度、筑巢开始、结束、持续时间外,还能获得第一次和最后一次进入巢址位点的时间、访问巢址的次数、百分比等数据,简单快捷且能够获取更多的信息以进一步分析;该 R 包同时提供了监督分类方法,能够结合确切巢址位置对数据进行监督分类,以提高结果的准确性。然而两种 R 包分析均需考虑取值的问题,如设定大致繁殖时间、繁殖时长以及巢址位置的缓冲区等参数。不同的参数设定可能导致结果产生细微差异,因此需要研究人员具有丰富的野外经验斟酌参数数值的设定。本研究用两种 R 包方法得出的结果筛选了繁殖时长小于 20 d 的数据,可能导致不能识别出参与繁殖但繁殖失败的结果,但也排除了部分将夜宿地判断为巢址的误差。

#### 4 结论

综上所述,四种判断繁殖与否的方法各有优劣,在实际应用时可以互补。繁殖地外业考察费时费力,且部

分区域以人力无法到达;越冬地野外观察是否携带幼鸟来确认是否繁殖可以作为依据之一,但无法确认繁殖失败、幼鸟丢失或夭折,以及繁殖成功但是与成鸟分离的情况;数据分析方法较野外考察而言省时省力,但需要依据野外经验设定参数判断,不能完全保证结果的准确性,且无法得到繁殖期间细节信息。因此建议主要利用 nestR 包判断水鸟繁殖位点及时间,辅以 recurse 包以及位移-时间曲线方法,并结合野外调查的方法进一步调整参数并补充结果和繁殖细节信息以增加结果准确性。未来也可以进一步根据需要通过改变参数和筛选数据来甄别繁殖失败的结果。该研究通过比较分析卫星定位跟踪数据与野外观察获得的信息,为进一步推进跟踪物种的深入分析及繁殖与否的判断提供了安全高效的方法。

**致谢:** Gankhuyag Purev-Ochir 和 Baasansuren Erdenechimeg(蒙古国), Oleg Goroshko 和 Andrey Averin(俄罗斯)对野外工作的帮助, Yuko Haraguchi 和 Satoshih Nishida(日本), Kisup Lee(韩国)提供白头鹤越冬观察信息,国家林草局、蒙古东方省自然保护区、俄罗斯达乌尔斯基自然保护区和俄罗斯巴斯达克自然保护区给予政策上的支持和野外工作的保障,特此致谢。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Barnard C J. Animal behaviour: mechanism, development, function and evolution. Pearson Education, 2004.
- [ 2 ] Hooten M B, Johnson D S, McClintock B T, Morales J M. Animal movement: statistical models for telemetry data.
- [ 3 ] Bouten W, Baaij E W, Shamoun-Baranes J, Camphuysen K C J. A flexible GPS tracking system for studying bird behaviour at multiple scales. *Journal of Ornithology*, 2012, 154(2): 571-580.
- [ 4 ] Thomas B, Holland J D, Minot E O. Wildlife tracking technology options and cost considerations. *Wildlife Research*, 2011, 38(8): 653-663.
- [ 5 ] Joo R, Boone M E, Clay T A, Patrick S C, Clusella-Trullas S, Basille M. Navigating through the r packages for movement. *The Journal of Animal Ecology*, 2020, 89(1): 248-267.
- [ 6 ] Jonsen I D, Myers R A, Flemming J M. Meta-analysis of animal movement using state-space models. *Ecology*, 2003, 84(11): 3055-3063.
- [ 7 ] Jonsen I D, Flemming J M, Myers R A. Robust state - space modeling of animal movement data. *Ecology*, 2005, 86(11): 2874-2880.
- [ 8 ] Codling E A, Plank M J, Benhamou S. Random walk models in biology. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2008, 5(25): 813-834.
- [ 9 ] Torney C J, Morales J M, Husmeier D. A hierarchical machine learning framework for the analysis of large scale animal movement data. *Movement Ecology*, 2021, 9(1): 6.
- [ 10 ] Patterson T A, Thomas L, Wilcox C, Ovaskainen O, Matthiopoulos J. State - space models of individual animal movement. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(2): 87-94.
- [ 11 ] Breed G A, Bowen W D, McMillan J I, Leonard M L. Sexual segregation of seasonal foraging habitats in a non-migratory marine mammal. *Proceedings Biological Sciences*, 2006, 273(1599): 2319-2326.
- [ 12 ] Bailey H, Mate B R, Palacios D M, Irvine L, Bograd S J, Costa D P. Behavioural estimation of blue whale movements in the Northeast Pacific from state-space model analysis of satellite tracks. *Endangered Species Research*, 2009, 10: 93-106.
- [ 13 ] Gredzens C, Shaver D J. Satellite tracking can inform population-level dispersal to foraging grounds of post-nesting Kemp's ridley sea turtles. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 559.
- [ 14 ] Edelhoff H, Signer J, Balkenhol N. Path segmentation for beginners: an overview of current methods for detecting changes in animal movement patterns. *Movement Ecology*, 2016, 4(1): 21.
- [ 15 ] Garriga J, Palmer J R B, Oltra A, Bartumeus F. Expectation-maximization binary clustering for behavioural annotation. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0151984.
- [ 16 ] Picardi S, Smith B J, Boone M E, Frederick P C, Cecere J G, Rubolini D, Serra L, Pirello S, Borkhataria R R, Basille M. Analysis of movement recursions to detect reproductive events and estimate their fate in central place foragers. *Movement Ecology*, 2020, 8: 24.
- [ 17 ] Bracis C, Bildstein K L, Mueller T. Revisitation analysis uncovers spatio-temporal patterns in animal movement data. *Ecography*, 2018, 41(11): 1801-1811.
- [ 18 ] Bowgen K M, Dodd S G, Lindley P, Burton N H K, Taylor R C. Curves for Curlew: Identifying Curlew breeding status from GPS tracking data. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(12): e9509.
- [ 19 ] Schreven K H T, Stolz C, Madsen J, Nolet B A. Nesting attempts and success of Arctic-breeding geese can be derived with high precision from accelerometry and GPS-tracking. *Animal Biotelemetry*, 2021, 9(1): 25.

- [20] 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.
- [21] Valletta J J, Torney C, Kings M, Thornton A, Madden J. Applications of machine learning in animal behaviour studies. *Animal Behaviour*, 2017, 124: 203-220.
- [22] 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>.
- [23] Vorob'ev K A. Ptitsy Yakutii (The birds of Yakutia). Moscow: AS USSR Published, 1963.
- [24] Pukinsky Y, Ilyinsky I. Biology and behavior of *Grus monacha* Temm. during the nesting period. *Otdelenie Biologicheskii*, 1977, 82(1): 5-17.
- [25] Andreev B N. Chernyii zhuravl' v Yakutii. (Hooded Crane in Yakutia). *Proceedings of the Oka State Biosphere Nature Reserve*, 1976, 13: 124-129.
- [26] Andreev B N. Ptitsy Vilyuiskogo basseina (Birds of the Vilyui River Basin). Yak Book Publ, Yakutsk (in Russian). 1974.
- [27] Pukinsky Y B. Gnezdvaya zhizn' ptits basseina reki Bikin (Nesting life of birds of the Bikin River). *Proceedings of Saint Petersburg University*, 2003.
- [28] Surmach S G, Shibaev Y V. Cranes of Eurasia (Biology, Distribution, Captive Breeding). 2015: 255-257.
- [29] Degtyarev V G. Identification of the breeding range of the hooded crane. *Ornithological Science*, 2020, 19(1): 15-27.
- [30] 李林. 我国首次发现白头鹤繁殖地. 野生动物, 1993(5): 16.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 黄建, Falk Huettmann, 郭玉民. 黑龙江流域白头鹤繁殖栖息地选择模型预测. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 40-47.
- [34] Johnsgard P. (1983). Cranes of the World: Hooded Crane (*Grus monacha*) <https://digitalcommons.unl.edu/bioscicranes/18>.
- [35] Gamer M, Lemon J. irr: Various Coefficients of Interrater Reliability and Agreement. Version 0.84.1. [2023-08-10]. <https://CRAN.R-project.org/package=irr>.
- [36] Wolak M E, Fairbairn D J, Paulsen Y R. Guidelines for Estimating Repeatability. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(1): 129-137.
- [37] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [2023-06-15]. <https://www.R-project.org/>.
- [38] Dybala K, Gardali T, Eadie J M. Dependent vs. independent juvenile survival: Contrasting drivers of variation and the buffering effect of parental care. *Ecology*, 2013, 94(7): 1584-1593.