

中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

硕士学位论文



论文题目 基于卫星追踪研究东方白鹳
(*Ciconia boyciana*)的迁徙生态学

作者姓名 樊淑娟

学科专业 生态学

导师姓名 曹垒 教授

完成时间 二〇二〇年六月

中国科学技术大学 硕士学位论文



基于卫星追踪研究东方白鹳 (*Ciconia boyciana*) 的 迁徙生态学

作者姓名： 樊淑娟
学科专业： 生态学
导师姓名： 曹垒 教授
完成时间： 二〇二〇年六月

University of Science and Technology of China
A dissertation for master's degree



Telemetry study on migration
ecology of Oriental Stork
(*Ciconia boyciana*)

Author: Fan Shujuan

Speciality: Ecology

Supervisors: Prof. Cao Lei

Finished time: June, 2020

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 樊淑娟

签字日期: 2020.6.26

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

☒公开 ☐保密 (____年)

作者签名: 樊淑娟

导师签名: 曹垒

签字日期: 2020.6.26

签字日期: 2020.6.26

摘要

在生物众多的运动现象中, 鸟类的季节性迁徙景象, 备受世人瞩目。同时, 鸟类在迁徙过程中也为当地生态系统提供多种服务功能, 如种子传播、虫害控制等, 对人类的生活产生重要影响。因此, 研究鸟类的迁徙结构、栖息地利用以及与环境因子的相互作用至关重要, 是保护迁徙鸟类的关键。东方白鹳的野生种群数量约为 3000 只, 是国家 I 级重点保护动物, IUCN 红色物种名录中的濒危物种。主要在俄罗斯远东和中国东北繁殖, 越冬于中国东部和东南部。基于卫星追踪研究了东方白鹳的迁徙生态学, 其主要结论如下:

2015-2018 年, 利用 GPS/GSM 卫星追踪器, 获得了 18 只东方白鹳幼鸟的完整迁徙数据。比较了春季和秋季迁徙模式的差异, 结合卫星遥感数据和美国国家环境预测再分析中心的数据, 解释了 850 毫巴的季节性顺风差异对东方白鹳飞行速度的影响。结果表明, 季节性顺风的差异导致了东方白鹳飞行速度的季节性差异 (春季: 258.11 ± 64.8 千米/天, 秋季: 172.23 ± 49.7 千米/天, $p < 0.001$)。东方白鹳在秋季的停歇次数明显多于春季 (1.78 ± 1.1 与 1.06 ± 0.9 , $p < 0.05$), 但停歇时间 (15.52 ± 12.4 天与 16.30 ± 15.1 天, $p = 0.3$) 没有显著差异。850 毫巴气压水平的顺风 (美国国家环境预测中心再分析数据档案) 显著影响春秋迁徙的平均日飞行速度。春季的顺风条件 (4.40 ± 5.6 米/秒) 明显优于秋季 (0.48 ± 5.6 米/秒), $p < 0.001$ 。尽管春季迁徙的持续时间少于秋季 (27.52 ± 15.9 天与 32.77 ± 13.4 天, $p = 0.17$), 但是由于个体差异较大, 所以春季和秋季迁徙的持续时间没有显著差异。因此东方白鹳在迁徙过程中春季的顺风条件优于秋季, 导致春季迁徙的飞行速度快于秋季。

2015-2018 年, 通过卫星遥测技术获得的 39 只东方白鹳幼鸟的完整迁徙数据, 获得了东方白鹳长距离 (黑龙江-长江) 和短距离 (黑龙江-渤海湾) 迁徙种群完整的春、秋迁徙路线, 并使用统计分析方法比较了长、短距离迁徙策略的异同。结果表明, 黑龙江-渤海湾种群的春季迁徙比秋季迁徙更快 (迁徙速度 211.13 ± 118.16 千米/天与 92.41 ± 61.69 千米/天, $p < 0.05$), 且春季迁徙持续时间更短 (11.22 ± 8.72 天与 28.00 ± 21.20 天, $p < 0.05$)。春季迁徙的飞行速度也快于秋季 (280.40 ± 61.95 千米/天与 185.49 ± 71.95 千米/天, $p < 0.05$), 飞行时间短于秋季 (5.85 ± 2.47 天与 10.25 ± 6.46 天, $p < 0.05$), 符合传统迁徙理论。长距离和短距离秋季迁徙持续时间差异不大, 但是长距离迁徙的春季迁徙持续时间是短距离的 3 倍多, 可能是由于短距离迁徙的种群活动范围较小。

通过东方白鹳繁殖期、停歇期和越冬期的卫星追踪数据分别与全球地表覆被数据、国家级自然保护的叠加计算, 分析了东方白鹳黑龙江-长江种群和黑龙江-

渤海湾种群在年生活周期不同阶段的栖息地利用和保护现状。结果表明,黑龙江-长江和黑龙江-渤海湾种群在年生活周期中的不同阶段主要利用水体、农田和草地。黑龙江-长江种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 29.4%、34.9% 和 50.5%, 黑龙江-渤海湾种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 25.4%、15.1%和 10.9%。相比而言,黑龙江-渤海湾种群在停歇期和越冬期受保护比例较低,应增设黑龙江-松花江流域交汇处以及永定新河和潮白河的入海口为保护区。

本文基于卫星追踪数据研究了东方白鹳的迁徙生态学,阐明了长距离(黑龙江-长江)和短距离(黑龙江-渤海湾)迁徙策略的异同,揭示了顺风对东方白鹳长距离迁徙过程中飞行速度的影响,同时揭示了年生活周期不同阶段的栖息地利用和保护现状,并提出了相关保护建议。研究结果为物种保护提供了科学依据。

关键词: 东方白鹳; 卫星追踪; 迁徙策略; 顺风; 栖息地利用

ABSTRACT

In the movement of many biological phenomena, the seasonal migration of birds has attracted the attention of the world. At the same time, birds also provide a variety of services for the ecosystem, such as seed transmission, pest control and so on, which have an important impact on human life. Therefore, it is very important to study the migration routes, stopover sites and the interaction with environmental factors, which is the key to protect migratory birds. The Oriental Stork is a national animal protection in China, and is listed as “endangered” in the IUCN red list. The number in the world is about 3000. They mainly breed in the Far East of Russia and the northeast of China, winter mainly in the East and southeast of China. Based on satellite tracking, the migration ecology of Oriental Storks is studied. The main conclusions are as follows:

Using GPS/GSM transmitters, we tracked the full migrations of 18 juvenile Oriental Storks during 2015–2018 to compare differences in autumn and spring migration patterns, and combined the satellite telemetry data with the National Center for Environmental Prediction Reanalysis data to explain the relationship between 850 mbar wind vectors and seasonal differences in travel speed. Differences in tailwinds contributed to significant differences in daily average Oriental Storks travel speed in spring (258.11 ± 64.8 km/day) compared to autumn (172.23 ± 49.7 km/day, $p < 0.001$). Storks stopped significantly more often in autumn than spring (1.78 ± 1.1 versus 1.06 ± 0.9 , $p < 0.05$), but stopover duration (15.52 ± 12.4 versus 16.30 ± 15.1 days, respectively, $p = 0.3$) did not differ significantly. Tailwinds at 850 mbar pressure level (extracted from the National Center of Environmental Prediction Reanalysis data archive) significantly affected daily flying speed during spring and autumn migration. Tailwind conditions in spring (mean 4.40 ± 5.6 m/s) were always more favourable than in autumn when they received no net benefit (0.48 ± 5.6 m/s, $p < 0.001$). Despite mean spring migration duration being less than autumn (27.52 ± 15.9 versus 32.77 ± 13.4 days, $p = 0.17$), large individual variation meant that this duration did not differ significantly from each other.

In this study, we used the complete migration data of 39 juvenile Oriental Storks obtained by satellite telemetry technology, and obtained the complete migration routes of Heilong River-Yangtze River and Heilong River-Bohai Bay population. We used statistical analysis method to compare the migration strategies. The results showed that

the migration speed of Heilong River-Bohai Bay population in spring was faster than that autumn (211.13 ± 118.16 km / day and 92.41 ± 61.69 km/day, $P < 0.05$), and the migration duration in spring was shorter (11.22 ± 8.72 days and 28.00 ± 21.20 days, $P < 0.05$). The travel speed of spring migration was faster than autumn (280.40 ± 61.95 km/day and 185.49 ± 71.95 km/day, $P < 0.05$), and the travel time was shorter than autumn (5.85 ± 2.47 days and 10.25 ± 6.46 days, $P < 0.05$), which was consistent with the traditional migration theory. There is little difference between the long-distance and short-distance migration duration in autumn, but the spring migration duration of long-distance migration is more three times than short-distance migration, which may be due to the small range of activity of short-distance migration.

In this study, we combined the satellite tracking data of Oriental Storks in breeding, stopover and wintering period with the global surface cover data and national natural reserve respectively. The results showed that Heilong River-Yangtze River population and Heilong River-Bohai Bay population used water body, farmland and grassland. During breeding, stopover and wintering period, the protected proportion of Heilong River-Yangtze River population are 29.4%, 34.9% and 50.5%, and the protected proportion of Heilong River-Bohai Bay population are 25.4%, 15.1% and 10.9%. It is suggested that Heilong River-Songhua River Basin and Yongdingxin River-Chaobai River Basin should be added as new reserve.

Based on the satellite tracking data, this paper studies the migration ecology of Oriental Storks, reveals the migration pattern of long-distance and short-distance migration, analyzes the influence of tailwind on travel speed of long-distance migration, studies the habitat use and protection status in different stages of annual life cycle, and puts forward protection suggestions. The results provide a scientific basis for species protection.

Key Words: Oriental Stork, satellite tracking, migration strategy, tailwind, habitat use

目 录

第一章 引言	1
1.1 候鸟迁徙生态学	1
1.1.1 候鸟的迁徙特征	1
1.1.2 扑翼飞行和翱翔-滑翔飞行	1
1.1.3 迁徙速度和持续时间	3
1.1.4 天气及其他影响因素	4
1.1.5 日间迁徙和夜间迁徙	5
1.1.6 迁徙生态学研究的重要性	6
1.2 东方白鹳物种综述	6
1.2.1 形态学特征	6
1.2.2 物种分布和数量	6
1.2.3 习性	7
1.2.4 食性	7
1.2.5 栖息地	8
1.2.6 繁殖生态学	8
1.2.7 越冬生态学	9
1.2.8 保护与威胁	9
1.3 国内外相关研究	10
1.4 研究目的和意义	11
第二章 周期性援助：季节性顺风影响东方白鹳的飞行速度	12
2.1 研究背景	12
2.2 研究方法	13

2.2.1 卫星追踪	13
2.2.2 识别迁徙时间、停歇时间和停歇地	13
2.2.3 气象学数据及计算	14
2.2.4 统计分析	16
2.3 研究结果	16
2.4 讨论	22
2.5 小结	24
第三章 东方白鹳的长、短距离迁徙路线和策略比较	25
3.1 研究背景	25
3.2.1 卫星追踪	26
3.2.2 迁徙参数定义	28
3.2.3 识别迁徙时间、停歇时间和停歇地	28
3.2.4 统计分析	28
3.3 研究结果	29
3.4 讨论	36
3.5 小结	37
第四章 东方白鹳的栖息地利用和保护现状	38
4.1 研究背景	38
4.2 研究方法	39
4.2.1 栖息地利用计算	39
4.2.2 保护现状计算	39
4.3 研究结果	40
4.3.1 黑龙江-长江种群栖息地利用	40

4.3.2 黑龙江-渤海湾种群栖息地利用	40
4.3.3 黑龙江-长江种群保护现状	41
4.3.4 黑龙江-渤海湾种群保护现状	44
4.4 讨论	47
4.5 小结	49
第五章 总结与展望	50
5.1 总结	50
5.2 展望	50
参考文献	51
附录 A 追踪个体迁徙参数表	60
附录 B 佩戴追踪器的东方白鹳照片	72
致谢	74
在读期间发表的学术论文与取得的其他研究成果	75

第一章 引言

1.1 候鸟迁徙生态学

1.1.1 候鸟的迁徙特征

鸟类最明显的特征是能够飞行，大多数鸟类都能迅速地进行长距离迁徙，它们拥有很好的方向感和导航能力，可以在不同的季节年复一年地返回相同的地点^[1]。

鸟类的迁徙路线几乎遍布整个地球。由于迁徙，鸟类的分布在不断地变化。鸟类的迁徙可以发生在任何时间或地点，但主要在春季和秋季时最为明显^[2]。

相比于其它运动模式，飞行的主要优点之一是速度更快。虽然飞行在单位时间内需要更多的能量，但是由于单位时间内覆盖的距离也更远，所以飞行是最省力的运动方式之一。虽然大多数鸟类是靠飞行来迁徙的，但是企鹅和其他一些海鸟是靠游泳来迁徙的，而有些陆鸟是靠步行来完成部分或全部的迁徙^[3]。

有些候鸟在繁殖地和越冬地之间的迁徙距离相对较短，只有几十公里，但另一些候鸟则飞行数百公里或数千公里，有时会穿越漫长的海洋、沙漠或高山，在那里它们无法休息或觅食，所以它们为迁徙积累了大量的脂肪。已知的全世界有超过一半的鸟类属于迁徙物种^[1]。

1.1.2 扑翼飞行和翱翔-滑翔飞行

鸟类在迁徙过程中主要利用两种飞行方式：扑翼飞行和翱翔-滑翔飞行。在扑翼飞行中，鸟类必须产生支撑其重量以抵抗重力的升力，以及克服摩擦力和其他阻力的向前推力。升力和向前推力的动力都由胸部肌肉提供，而方向主要由尾部控制。由于有足够的能量储备，一些通过扑翼飞行的鸟类可以连续飞行数小时或数天。它们可以穿越水体或其他障碍地形，白天和晚上都能飞行^[3]。因此，在繁殖地和越冬地之间迁徙时，扑翼飞行的鸟类通常选择距离最短的迁徙路线。然而，由于扑翼飞行能耗较大，靠扑翼飞行迁徙的物种通常需要大量的能量储备，特别是飞越大面积的海洋或其他不适宜觅食休息的地方。持续的扑翼飞行也会产生热量，使鸟类能够在高纬度和高海拔飞行，而不必使用额外的能量来保暖。然而，在高温条件下，热量的产生会导致较多的蒸发冷却（喘气），增加失水和脱水风险^[4]。

还有一些鸟类主要靠翱翔-滑翔飞行，尤其是猛禽、鹞类和鹈鹕类，它们可以从周围的大气中获取飞行所需的大部分能量^[5]。通常，这些物种在热气流中向上盘旋爬升获得高度，然后在失去高度的情况下滑翔到下一个热气流区域，接着再次爬升；沿着迁徙路线一次又一次地重复这个过程，在理想的条件下，翱翔鸟类在长距离迁徙中几乎不需要扑翼飞行^[6]（图 1.1）。由于升力主要来自上升的热气流，向前的运动部分来自重力，这种飞行模式比连续的扑翼飞行需要的能量要少得多。许多翱翔鸟类会同时使用翱翔-滑翔和扑翼飞行，在滑翔过程中的扑翼飞行（“动力滑翔”）可以提供额外的升力和速度，但需要消耗能量。因此，翱翔鸟类主要依靠自身外部的能量来源，与扑翼飞行鸟类不同的是，翱翔鸟类可以不断地纠正侧风的影响，而不会浪费能量。

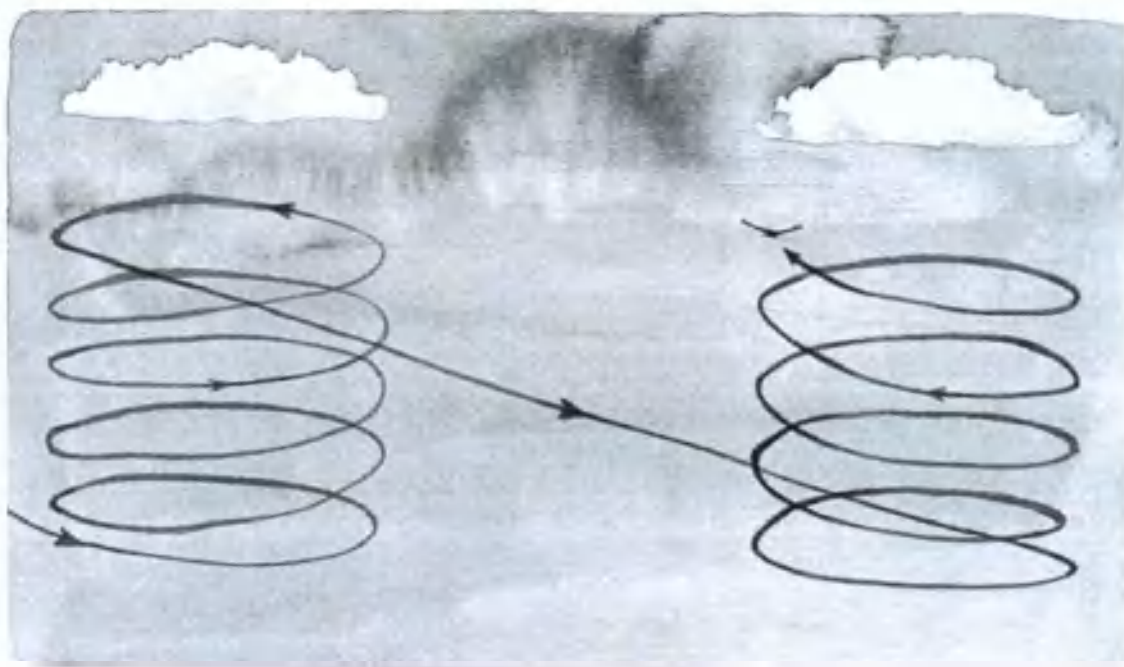


图 1.1 翱翔-滑翔鸟类的迁徙

Figure 1.1 Migration of soaring-gliding birds

图注：在热气流内翱翔，获得高度，在热气流之间滑翔。热气流顶部通常有积云。图片来源于网络于《The Migration Ecology of Birds》

翱翔-滑翔飞行也会带来其他后果。因为翱翔鸟类在飞行时翅膀大多是静止、向外伸展的，所以飞行产生的热量比扑翼飞行产生的热量要少。在寒冷的气候下，这可能会增加保暖所需的能量，但在炎热的气候下，这会降低体温高的可能性，从而减少冷却身体所需的水分。此外，由于翱翔鸟类对热上升气流的依赖，翱翔的鸟类主要在陆地上空迁徙，因为太阳加热地表，产生上升气流，所以翱翔鸟类主要也在白天迁徙。迁徙通常在每天热活动最强烈时达到峰值，并以最快的速度

飞行。因为热气流强的时候,鸟类才能爬升达到最大高度,并进行滑翔达到最快飞行速度^[7]。

通过这种方式,在陆地上翱翔的鸟类经常在繁殖地和越冬地之间绕行很长的路线,以便尽可能多地在陆地上空飞行,并尽量减少能耗高的扑翼飞行。尽管迁徙距离更远,但总能耗却大大降低^[4]。

依靠热气流翱翔的迁徙类似于通过中途停歇的扑翼飞行迁徙,只是鸟类通过在热气流中爬升来补充潜在能量,而不是在中途停歇地通过觅食来积累能量。爬升速率越快,获得高度的时间越短,翱翔鸟类的平均飞行速度(cross-country speed)也越快^[8]。在热气流中的爬升速度主要取决于热气流的强度,大多数情况下,体型较小的鸟类优势也较小。平均每秒钟爬升 0.5 米代表着微弱的翱翔状态,每秒爬升 2-3 米是良好的翱翔状态,而每秒 5 米的爬升速度只存在于个别热气流中并不罕见^[3]。

1.1.3 迁徙速度和持续时间

鸟类的迁徙包括飞行期和停歇期。在计算迁徙速度和迁徙持续时间时,需要同时考虑这两部分。尽快完成迁徙的好处有:降低在陌生区域飞行的成本和风险;提前到达目的地,选择最佳栖息地;尽快完成迁徙还可以增加其他活动的可用时间,例如繁殖和换羽^[9]。

不同物种的迁徙持续时间变化很大,部分取决于鸟类自身的特征(如体型、翅膀形状和飞行速度),但主要取决于迁徙距离和途中遇到的情况。无论快速迁徙有多大的优势,外部条件都提供了严格的限制,特别是食物(可以转化为体内能量储备并加快飞行的速度),以及天气(可以加速或延迟迁徙进程)^[3]。

迁徙速度的计算主要依据鸟类离开一个区域和到达另一个区域的时间。严格来说,这一阶段鸟类离开繁殖地或越冬地之前储存能量也是迁徙的一部分,但只能通过单独的研究来确定^[10]。根据记录的体重增加率判断,小型雀形目在迁徙前需要几天到三周的时间来积累所需的身体储备,而长距离迁徙的水鸟可能需要两个月或更长时间,具体时间取决于后续的迁徙距离^[3]。

从理论上讲,扑翼飞行的大型鸟类的迁徙速度比小鸟慢,因为飞行消耗的能量随着体重的增加而增加,能量消耗速度大于能量储存速度。所以相同的迁徙距离,大型鸟类比小型鸟类需要更长的时间来储存能量。但是,大型鸟类的飞行速度快于小型鸟类,因此可以部分弥补其较低的能量储存率和最大能量负荷^[11]。

与扑翼飞行的鸟类形成鲜明对比的是,翱翔-滑翔飞行的鸟类花费很少的时间来积累能量,因为它们飞行的大部分能量来自热气流。由于翱翔-滑翔鸟类的飞行速度随着体重的增加而增加,翱翔-滑翔飞行的鸟类的迁徙速度也可能随着

体重的增加而增加，这与扑翼飞行的鸟类情况相反。然而，依靠热气流飞行的鸟类的迁徙速度也受到每天能迁徙的时间段的影响，对于较小的物种而言，每天能迁徙的时间段较长，因为较小的物种可以使用较弱的热气流^[11]。所以对于翱翔-滑翔飞行的鸟类来说，热气流的条件可能比身体储备更具限制性。

扑翼飞行和翱翔-滑翔飞行的鸟类的迁徙速度有所不同，对于通过扑翼飞行迁徙的鸟类，如小天鹅 *Cygnus columbianus bewickii* 在俄罗斯北部和荷兰之间迁徙。春季，追踪的两只个体完成部分路线的平均迁徙速度仅为 28 千米/天和 39 千米/天。秋季，完成 3200 公里的迁徙需要 41-78 天，平均迁徙速度为 44-72 千米/天 (N=5)^[12]。黑雁 *Branta bernicla* 在瓦登海和泰米尔半岛之间迁徙，平均迁徙距离为 5004 公里，平均耗时 42 天 (34-52 天)，平均迁徙速度为 118 千米/天 (97-148 千米/天)^[13]。对于通过翱翔-滑翔飞行迁徙的鸟类，如灰头信天翁 *Thalassarche chrystostoma* 从南乔治亚到印度洋西南部的迁徙耗时 6.2 天，迁徙速度为 950 千米/天；然后迁徙到太平洋西南部耗时 13.2 天，迁徙速度为 950 千米/天，返回南乔治亚州以每天 750 公里的速度迁徙，耗时 10.3 天。在没有停歇的情况下，理论上可以在 30 天内完成对南大洋的环行^[14]。翱翔-滑翔飞行的信天翁显然是所有长途迁徙物种中速度最快的。翱翔-滑翔飞行的大型鸟类在迁徙上具有的优势（需要较少的停歇时间），使得翱翔-滑翔鸟类的迁徙速度快于通过扑翼飞行迁徙的鸟类^[11]。

1.1.4 天气及其他影响因素

天气对鸟类的迁徙有明显的影响，但是量化天气对迁徙的影响是很困难的。因为迁徙更多依赖于鸟类自身的状态，而不是天气主导的。天气情况仅在春季和秋季影响鸟类的迁徙。在正常迁徙季，如果由于不稳定天气出现迁徙延误，在之后的有利天气中将引发鸟类集中迁徙。若长时间滞留或者已经到了迁徙后期，鸟类可能在恶劣条件下开始迁徙。一些特定区域的个体并不是一起迁徙的，而是有着几天或几周的间隔。因此，迁徙的潜在控制因素是个体的状态。它与天气等其他外部条件相互作用，影响迁徙的时间^[3]。

另外，迁徙鸟类的数量不仅仅取决于当时的天气。还取决于：前几天天气；迁徙进度；完成迁徙准备的鸟的数量；物种的体型；飞行模式等^[15,16]。不同的天气因素往往相互关联，迁徙鸟类对天气中的一个或多个因素做出反应，比如风和雨。即使有多变量分析的帮助，也很难判断哪些天气因素是关键的，哪些是巧合的^[3]。

实际上，在春季和秋季，鸟类都喜欢在晴朗的天空中随风迁徙。晴朗的天空有助于鸟类导航，特别是在夜晚，因为晴朗的夜晚使天空的信号更加明显，而顺

风可以减少迁徙途中的能量消耗,以及被风吹离迁徙航线的风险。相反,鸟类很少在强烈的逆风、浓密的云、雾和雨中起飞迁徙。因为逆风使飞行变得困难或不可能,浓密的云会阻碍鸟类飞行,而雾或雨会降低鸟类的飞行高度^[17,18]。

一般来说,中午的风速比晚上或早晨要大,从地面开始到几千米的高空,摩擦会逐渐减缓风速。此外,迁徙鸟类为了节省迁徙能耗需要跟随气团飞行,气团的速度和方向是不断变化的,所以需要不断调整迁徙行为^[19]。例如鸟类多倾向于在顺风条件下起飞^[20-22]。有几项研究表明,在顺风条件下,扑翼和翱翔鸟类的飞行速度都明显加快,并受到逆风和侧风的阻碍^[7,23]。此外,在顺风情况下,鸟的相对空气的速度也有所下降^[11,24]。逆风时,鸟类会进行适当的改变,比如选择延后迁徙。例如无线电追踪的白颊黑雁 *Branta leucopsis* 在斯瓦尔巴特群岛和苏格兰之间迁徙:1994 年花费 5-15 天完成迁徙;1995 年,风向大部分时间都是不利于迁徙的,花费 9-36 天完成迁徙;其中,3 只个体比前一年晚了 10 天完成迁徙,2 只个体相比其他个体晚了 24 天^[25]。

1.1.5 日间迁徙和夜间迁徙

有些鸟主要在日间迁徙,有些则主要在夜间迁徙。许多白天活动的物种也在夜间迁徙:虽然受到夜间视力的影响,但在开阔的天空中能够安全飞行,并透过星空和地貌特征确定方向^[26]。比较不同的科,迁徙的昼夜选择与迁徙难度、生境、饮食和其它生态方面没有明显一致的联系。在亲缘关系密切的科之间,迁徙的昼夜选择也存在着一些显著差异:相比鹬科,鸻科更多在白天迁徙。虽然一个科中的大多数物种在迁徙行为上是一致的,但偶尔也会出现例外,夜间迁徙的趋势随着迁徙距离的增加而增加^[27]。

鸟类在夜间迁徙的好处可以概括为节省能量、节省时间和降低被捕食风险。鸟类在白天有更多的时间用来觅食,整个迁徙过程可以更快完成。夜间的温度比白天低,这有助于防止温暖地区的迁徙鸟类出现过热和脱水。湿度通常在夜间和清晨较高,可以进一步降低脱水风险。能量需求更低,因为在夜间较冷的密集空气中飞行比在白天较暖的稀薄空气中飞行成本更低。夜间风速一般较低,因此减少了逆风或侧风的影响;而垂直气流较少,进一步降低了飞行的总能量消耗,特别是小型鸟类^[28]。此外,夜间迁徙还可以降低在飞行过程中被捕食的可能性^[1]。

由于热气流在白天产生,所以翱翔飞行的鸟类通常在白天迁徙。除去翱翔飞行的物种,白天迁徙的鸟类通常都是短距离飞行,并且只在短暂的有利时期飞行。从雷达研究中发现,日间迁徙通常开始于日出前一小时(当彩色视野恢复时),在日出后两小时达到峰值,然后在上午早些时候到下午早些时候下降,但偶尔在下午早些时候略有回升^[29]。即使是白天迁徙的鸟类,也会集中在日间的头几个小

时和最后几个小时迁徙^[30]。

1.1.6 迁徙生态学研究的重要性

在生物众多的运动现象中，鸟类的季节性迁徙景象，备受世人瞩目。同时，鸟类也为生态系统提供多种服务功能^[31]，如种子传播、虫害控制等，对人类的生活产生重要影响。因此，鸟类是被研究最多的生物类群之一，已有大量关于鸟类行为、生态和迁徙过程的基础研究工作^[32]。

传统的研究方法通过观察、环志回收和雷达研究鸟类的迁徙活动，都有一定的局限性，如观察法看不到鸟类在高空的迁徙；环志回收可以明确识别个体，但是研究主要集中在人们感兴趣的区域；雷达研究可以在任何天气下进行，但是却很少能识别出具体的物种类别^[3]。

近些年来，卫星追踪技术逐渐成熟，使我们能够了解鸟类的迁徙活动，卫星追踪技术越来越多地应用于研究鸟类的迁徙，使用卫星追踪器可以精确地追踪个体的行为和路线，进而研究种群的迁徙动态。通过将卫星追踪数据与环境数据结合，不仅可以了解鸟类的迁徙模式和行为模式，也推进了鸟类迁徙与环境因子相关性的研究。

1.2 东方白鹳物种综述

1.2.1 形态学特征

东方白鹳，一种大型涉禽，体型比黑鹳稍大，体长 110~115cm。雄性重量为 4500~5500 克，雌性重 3700~5000 克^[33]，全身大部分为白色，两翼黑色并有紫铜色金属光泽；眼淡粉红色或近红，周围具有一小圈红色裸皮；下颈部羽毛较长，呈长矛状；内侧初级飞羽及次级飞羽外有银白色羽缘；嘴黑色，长而直；腿长，红色。雄性的平均体型略大，雄性与雌性的区别在于从喙尖到颈背的距离以及从喙尖到连合点的距离^[34]。飞行时，头、颈和腿均伸直，可以看到黑色的初级飞羽及次级飞羽与纯白色的体羽，姿态十分优美。亚成鸟的羽色和成鸟相似，但飞羽呈褐色，嘴污黄色。在繁殖地发出喧闹的嘈杂声之前，发出微弱的“shuu”或“hyuu”的声音^[33]。

1.2.2 物种分布和数量

主要在俄罗斯远东和中国东北繁殖，越冬主要在中国东部和东南部，少数个

体在日本、韩国和台湾越冬。日本在 20 世纪 60 年代以前也有东方白鹳的繁殖种群，韩国北部在 1977 年或更晚之前有繁殖种群，韩国南部在 1971 年前有繁殖种群^[35]。

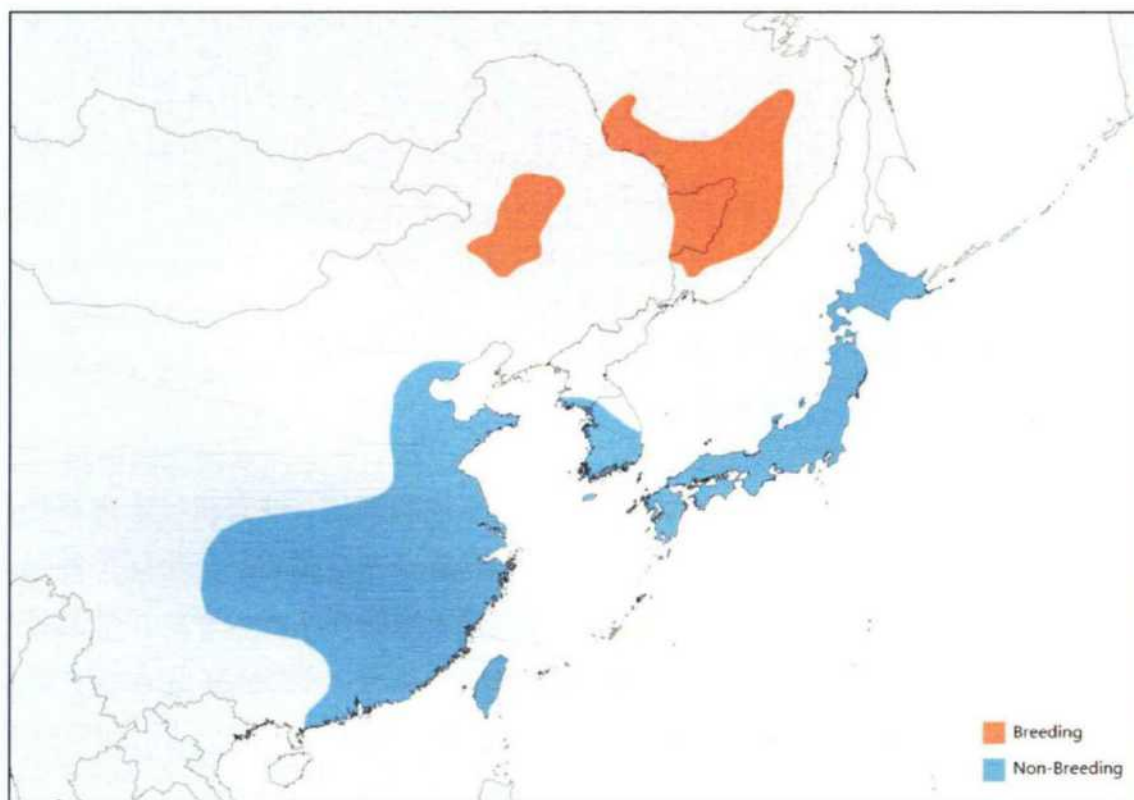


图 1.2 东方白鹳分布图

Figure 1.2 Distribution of Oriental Stork

图注 橙色：繁殖区，蓝色：越冬区。图片来源：Birds of the world

<https://birdsoftheworld.org/bow/species/oristol/cur/introduction>

1.2.3 习性

繁殖季节之外经常成群活动，特别是在迁徙季节，形成数十只甚至上百只的种群成群迁徙。东方白鹳大多数时间在地面活动，也会在栖息地上空翱翔盘旋。行动缓慢，通常避开人类持高度警戒，受到惊吓会高飞^[36]。

东方白鹳是迁徙鸟类，在俄罗斯远东和中国东北繁殖的东方白鹳于每年 9 月末~10 月初开始离开繁殖地向南迁徙。迁徙途中需要不断停歇，停歇地通常位于开阔的湖泊和芦苇沼泽地，分批次地成群迁徙。

1.2.4 食性

东方白鹳每天摄取量约为 1500~3000g。在陆地上，通过视觉定位猎物。在

水中,通过触觉觅食;通常在水中或者草地缓慢行走觅食。主要以鱼类为食,也会取食任何能捕获到的小动物,包括软体动物、环节动物、节肢动物(甲壳类、昆虫及其幼虫)、蛙类、蛇类、蜥蜴、雏鸟和小型啮齿类等。动物性食物不足时,也会取食苔藓、植物叶片和种子等植物性食物,有时植物性食物甚至可多达食物总量的80%。繁殖期主要集中在芦苇沼泽和明水面等鱼类生活的环境中觅食,很少在相对干旱的草地和农田(旱田)。觅食时,东方白鹳会在开阔地或浅水中缓慢移动,或在水中定点静立等待猎物接近时出击。以喙前端夹取或刺杀猎物后吞食。觅食活动主要在白天,而且集中在每天6:00~7:00和16:00~18:00的晨昏时段,中午休息或在巢上空盘旋滑翔^[37]。

1.2.5 栖息地

主要栖息于有零星树木的沼泽地、潮湿的草地和河岸。过去在日本主要是在农田中活动,特别是在附近有树林的水稻田。通常在湿地觅食;在中国黄河三角洲繁殖的种群,主要利用芦苇沼泽地和20-30厘米深的开阔水域^[38]。可能是被迫害的原因,东方白鹳不像白鹳(*Ciconia ciconia*)那样与人类相处,但是前苏联的证据表明,它正在适应更多的人为区域。

1.2.6 繁殖生态学

2000年以前,繁殖种群主要分布于俄罗斯和中国交界的黑龙江和乌苏里江流域,也出现在蒙古以及中国内蒙古自治区东部。近年来,少量东方白鹳在中国的越冬地和迁徙停歇地营巢繁殖,包括山东东营的黄河三角洲,江苏高邮和大丰,安徽安庆地区和江西鄱阳湖。山东黄河三角洲是东方白鹳筑巢最为密集的一个繁殖亚区,并且具有相当高的繁殖成功率。这些新的繁殖地对于东方白鹳的保护同样重要。至于东方白鹳繁殖地南移的原因,至今仍没有明确解释^[39,40]。

东方白鹳到达中国东北繁殖地的时间为每年的3月初~3月中下旬。在中国东北和俄罗斯远东地区,东方白鹳的繁殖期为每年4月~6月,而在越冬地和迁徙停歇地的繁殖期要提前1个月左右。北方繁殖地的巢区多选择在没有干扰或干扰较小、食物丰富且具有稀疏乔木或小块丛林的开阔草原和农田沼泽地带,有时也选择距水域、沼泽等觅食地数千米至上万米的林带^[41]。在越冬地和迁徙停歇地,由于缺乏合适的天然巢址,东方白鹳多把巢建在高压电塔上^[42,43]。2005年以来,先后在黑龙江洪河保护区和山东黄河三角洲保护区等地通过搭建人工巢架招引东方白鹳营巢繁殖,取得明显效果^[44,45]。东方白鹳的雌雄亲鸟共同筑巢,通常由雄鸟外出寻找并运输巢材,雌鸟留在巢址搭建。常使用旧巢,整个繁殖季都要不

断对巢进行修补、增高和加宽^[37]。或者使用替代巢，其中一对成鸟在十年内使用三个不同的巢^[46]。

在中国东北的繁殖地，产卵时间最早在3月末~4月初，多数在4月中旬产卵。窝卵数2~6枚，一般3~4枚，卵白色。孵卵由雌雄亲鸟共同承担，多以雌鸟为主，孵化期31~35天。雏鸟刚孵出时覆盖有白色绒羽。雌雄亲鸟共同育雏，至55日龄时雏鸟即可在巢附近来回短距离飞翔，63~70日龄后随亲鸟飞离巢区觅食，不再回巢。成鸟寿命可达48岁以上。卫星跟踪显示，幼鸟的死亡率在秋季和冬季较高^[47]。

1.2.7 越冬生态学

以中国鄱阳湖的东方白鹳为研究对象，通过对越冬东方白鹳地栖息地利用地调查，结果发现，东方白鹳在越冬时主要选择水深较浅、植被稀疏、远离人类活动区的浅水滩或沼泽地。越冬地的栖息地选择主要取决于水深，因为水深会影响食物丰度和捕食成功率^[48]。笼养的东方白鹳越冬行为具有一定的日节律，觅食行为发生在8:30-9:30和14:30-15:30，觅食高峰在14:30-15:30，行为的时间分配上，静栖行为的占比较大^[49]。

1.2.8 保护与威胁

东方白鹳是国家Ⅰ级重点保护动物，IUCN红色名录的濒危物种。全球种群数量约为3000。随着枪支的扩散，日本和韩国的东方白鹳在19世纪后期种群数量急剧下降，于20世纪60年代繁殖种群灭绝^[37]。但是，韩国和日本正在实施重新引进计划。日本重新引入来自俄罗斯的幼鸟后，2008年已有100只东方白鹳个体。尽管中国种群的体型较小，但其遗传筛选表明种群中遗传多样性较高^[50]。

俄罗斯远东地区的种群数量估计为700对。布列亚河和阿穆尔河交汇处的湿地受到排水和农业发展的威胁，例如在20世纪80年代初，有61对成鸟在俄罗斯Primorskii地区筑巢，其中乌苏里河谷38对，但是到20世纪90年代后期，由于农药，人为干扰（例如，渔民和鹿类盗猎者）的影响，强风和砍伐树木导致的巢穴丧失，这一总数可能大大减少了。而春季有意和无意燃烧草丛都会导致无脊椎动物和两栖动物的数量减少，从而导致东方白鹳食物的减少^[49]。

在中国的越冬地中也普遍存在着同样的威胁，包括不受控制的捕鱼，觅食区域严重的人为干扰，非法狩猎和偷猎，野禽中毒以及造纸厂和其他工厂的水污染等。俄罗斯阿穆尔河的水坝和中国长江的三峡大坝也可能对这一物种产生不利影响。但是，中国种群显然比以前想象的要多，一些繁殖地，越冬地和停歇地都位

于保护区之内,例如黑龙江省的三江自然保护区^[51]、洪河、扎龙湖和兴凯湖国家级自然保护区,吉林省的莫莫格和向海国家级自然保护区,安徽省的升金湖自然保护区,江西省的鄱阳湖国家级自然保护区:自2002年以来已有超过1600只个体在此越冬^[52],江苏省的盐城自然保护区和湖南省的东洞庭湖国家级自然保护区^[53];在河北省的北戴河,1986年秋季迁徙时观察到2729只迁徙个体,此后几年记录较少^[54],1999年3月在天津,观察到有800只迁徙个体。在长江流域的大型保护区内或附近,冬季多达900只个体,但据报道尽管处于保护区,在1980年至1988年间仍有309只个体被射杀。2004年1月到2月,在长江中下游流域的越冬种群总共有1697只,其中江西省有1491只,安徽省有162只^[52]。

数量下降的原因包括狩猎,中毒和因农业转产,泥炭开采和砍伐树木造成的栖息地丧失。1987年首次成功进行圈养繁殖,当时有38只被圈养的个体;之后在其他公园和动物园中建立了一批繁殖个体,以期在日本和韩国重新引入;圈养繁殖计划和再引入计划于1965年在日本开始。1998年,在15个不同的动物园中饲养了120只个体,其中有一些出口到韩国,而在中国的22个动物园中也有类似数量的个体^[37]。目前仍需要更多的调查和生态研究,以及有效的保护,建造人工巢和开展公众宣传运动,例如1987年在中国发行的海报和1990年由布雷姆基金会发行的苏联海报。现已发现吉林莫莫格、辽宁辽河口、天津北大港和山东黄河三角洲保护区等地是东方白鹳秋季南迁时最主要的停歇地。卫星跟踪研究显示,位于辽东湾、莱州湾和渤海湾的停歇地对东方白鹳的迁徙过程非常重要,有些个体途径渤海湾后直接飞到长江中下游的越冬地,中间不再停歇。因此,渤海湾附近的海岸是东方白鹳迁徙过程中最重要的停歇地,一旦丧失,将使繁殖地与长江中下游的越冬区隔离,导致迁徙无法完成。迁徙停歇地的保护状况是东方白鹳能否完成整个迁徙过程的关键,也会影响到这一物种的生存^[55]。最近的研究表明,至少在中国,种群数量减少主要是由于栖息地丧失而造成的,物种的保护取决于对足够大面积的适宜栖息地的有效保护,特别是繁殖地^[56]。尽管中国种群的体型较小,但遗传筛选显示该种群的遗传多样性相对较高^[50]。

1.3 国内外相关研究

东方白鹳的迁徙路线属于东亚-澳大利西亚迁徙路径,迁徙生态学的研究主要集中在描述秋季迁徙模式,对于环境因素与季节性迁徙的关系尚不明确。1998-2000年,Shimazaki等人第一次使用卫星追踪技术追踪了13只东方白鹳幼鸟的秋季迁徙,描述了该物种的秋季迁徙模式,包括迁徙路线、迁徙时间、停歇位点和越冬地。使用网络建模分析发现,位于渤海湾的停歇地对于东方白鹳完成迁徙

非常重要，同时也应重点保护该物种的迁徙停歇地^[55]。Bossche 等人 1998-2000 年在俄罗斯的兴安国家自然保护区追踪了 6 只东方白鹳，并描述了它们的迁徙路线和越冬地，越冬地为江西省鄱阳湖，江苏省洪泽湖和安徽巢湖^[57]。彭文等人使用 2015 年追踪的 8 只东方白鹳幼鸟的追踪数据，总结了东方白鹳的秋季迁徙路线、停歇地、越冬地以及迁徙参数，结果发现，东方白鹳在迁徙过程中，穿越渤海湾可以缩短迁徙持续时间^[58]。

1.4 研究目的和意义

东方白鹳是世界濒危的大型涉禽，国家 I 级重点保护动物，IUCN 红色物种名录的濒危物种，目前全球范围内的野生种群数量约为 3000 只，且种群数量呈下降趋势^[59]。随着卫星追踪技术的发展，方便了研究东方白鹳这一物种的迁徙生态学。东方白鹳原是从黑龙江流域迁徙至中国长江流域越冬的迁徙物种，但是我们根据对东方白鹳的卫星追踪数据发现，一部分个体正在缩短它们的迁徙距离，在渤海湾出现了新的越冬行为，导致东方白鹳出现了长距离和短距离两种迁徙模式。但是目前对于东方白鹳的迁徙研究主要集中在对于秋季迁徙模式的描述，还未有人比较该物种长距离和短距离迁徙的季节性差异。

欧洲白鹳是东方白鹳的近缘物种，与东方白鹳有很多相似之处。但是欧洲白鹳从欧洲繁殖，迁徙至非洲越冬。欧洲学者对于欧洲白鹳的研究已经很成熟，

我们的研究使用通过卫星遥测技术获得的东方白鹳的完整迁徙数据，来探究东方白鹳的两种迁徙模式是否符合传统迁徙理论，以及风对东方白鹳迁徙的影响。

综上，本次研究将更加深入地了解东方白鹳的迁徙生态学，揭示完整的迁徙路径，弥补环境因子对东方白鹳迁徙影响的空白，并分析年生活周期不同区域的栖息地利用和保护现状，为预测环境变化对种群迁徙的影响，东方白鹳的保护提供参考。

第二章 周期性援助：季节性顺风影响东方白鹳的飞行速度

2.1 研究背景

众所周知，天气条件会影响长距离迁徙鸟类的迁徙时间和飞行行为^[60,61]。例如，大型陆地翱翔鸟类的迁徙可能会受到当地大气条件的影响，因为通常它们在迁徙时倾向于先利用热气流达到一定的高度，然后通过滑翔到达目的地^[6]。然而，在所有大气条件中，风对鸟类的迁徙影响最大^[62-66]。例如，Becciu 等人（2018）研究发现翱翔鸟类在顺风条件飞行速度更快^[22]。Shamoun-Baranes（2003 年）等人发现，在白鹳的迁徙过程中，飞行速度在春季和秋季均随顺风的增强而加快，但在逆风中则会减慢^[67]。此外，在顺风条件下，鸟类迁徙密度也会增加^[20,21,61]，即使在同一地点同一季节，鸟类对不同的风向响应也不同^[68]。

多项研究试图分析固定位置（例如气象站）的天气因素与大型翱翔鸟类迁徙之间的关系。然而并非所有研究都揭示了风对迁徙的影响，例如，有研究发现风对渔鹰 *Pandion haliaetus* 的迁徙没有影响^[69]，但许多研究表明，大型鸟类在迁徙过程中或即将进行迁徙时会考虑盛行风的条件^[7,70-72]。鹳类作为大型翱翔鸟类在迁徙中会利用顺风来完成长距离迁徙^[22]。尽管一些物种迁徙与风的关系已经被很好地研究过了^[23,67,73]，但东方白鹳作为濒危物种，目前尚无研究比较东方白鹳春季和秋季迁徙模式的差异，以及迁徙与风的关系。尽管已经有大量关于春季和秋季迁徙速度的研究^[11,74]，但关于季风对春季和秋季迁徙的速度和时间的的影响研究仍然相对较少。因此，为了弥补这一研究空白，我们的研究比较了东方白鹳春季和秋季迁徙模式的差异，并探究了顺风对春秋迁徙的影响。

东方白鹳全球种群数量估计约 3,000 只，沿中俄边境的黑龙江和乌苏里江流域繁殖，越冬于中国长江中下游^[59]。Shimazaki 等人（2004 年）基于 1998-2000 年期间使用卫星遥测技术追踪的 13 只东方白鹳幼鸟数据，第一次描述了东方白鹳的秋季模式，包括迁徙时间、迁徙路线，繁殖地，停歇地和越冬地^[55]。我们的研究将从卫星遥测技术追踪的东方白鹳获得的追踪数据与多年宏观尺度模式的风的数据相结合，通过比较春季和秋季迁徙的差异来了解东方白鹳迁徙策略的季节性差异，并尝试用季节性顺风的差异解释春秋迁徙过程中飞行速度的差异。

2.2 研究方法

2.2.1 卫星追踪

2015 年至 2018 年期间，我们在中国黑龙江省的洪河国家级自然保护区（133°40'E, 47°47'N）追踪了 18 只东方白鹳幼鸟（表 2.1），并安装了有防水功能的太阳能电池供电的背包式 GPS 追踪器。设备每 60-180 分钟记录一次纬度和经度（在野外测试中，水平精度为 9.6 ± 5.6 米），每 8 到 24 小时通过移动设备传输一次数据，用于数据分析。所有个体都完成了一次秋季迁徙和一次春季迁徙，共获得了 36 条完整的迁徙路线。

表 2.1 2015-2018 年使用 GPS/GSM 追踪器在中国追踪的 18 只东方白鹳的个体信息表

Table 2.1. Summary table of details of 18 first year Oriental Storks fitted with solar-powered GPS/GSM telemetry devices attached with backpacks in China 2015–2018

编号	体重 (千克)	捕捉时间	追踪器厂家	设备型号	设备重量 (克)	秋季 迁徙 年份	春季 迁徙 年份
os001	4.42	2017/6/27	德鲁伊	Debut15	19	2017	2018
os002	4.73	2017/7/5	环球信士	HQBG2715S	17	2017	2018
os003	5.52	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	2017	2018
os004	4.51	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	2017	2018
os005	4.64	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	2017	2018
os006	5.73	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os007	4.48	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os008	4.78	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os009	3.93	2016/6/24	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os010	3.55	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os011	3.85	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os012	3.65	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	2016	2017
os013	4.19	2017/7/6	环球信士	HQBG3621S	24	2017	2018
os014	未知	2015/6/20	环球信士	HQBP3527	27	2015	2016
os015	未知	2015/6/20	环球信士	HQBP3527	27	2015	2016
os016	未知	2015/7/5	环球信士	HQBP3527	27	2015	2016
os017	未知	2015/7/5	环球信士	HQBP3527	27	2015	2016
os018	3.71	2018/6/14	环球信士	HQBG3621S	24	2018	2019

2.2.2 识别迁徙时间、停歇时间和停歇地

我们使用了 Wang 等人 (2018) 描述的方法。将运动轨迹分为“飞行”和“非飞

行”段^[75]，然后使用谷歌地球使迁徙路径可视化，以确认每个位点的到达和离开时间。我们将停留时间超过 48 小时定义为中途停歇地。基于这些阶段划分，可以确定繁殖地、越冬地以及停歇地的到达和离开时间。将迁徙距离定义为每个个体从繁殖地/越冬地到越冬地/繁殖地之间的累积飞行距离，其中不包括中途停歇地的局部运动。我们将迁徙持续时间定义为从繁殖地/越冬地到越冬地/繁殖地之间的时间。我们提取了每只个体的中途停歇次数，并计算了在停歇地停留的累积时间，作为中途停歇时间。最后，我们用迁徙持续时间减去中途停歇时间获得飞行时间，然后将迁徙距离除以飞行时间得出飞行速度。

在每个飞行阶段中，计算个体从一个点到下一个点的飞行距离（公里）。由于连续的位置之间的时间有所不同，因此我们将连续点之间的距离除以它们之间的时间间隔，以计算每个点的飞行速度。

2.2.3 气象学数据及计算

为了计算东方白鹳在迁徙过程中的顺风 and 逆风，我们采用 Shamoun-Baranes 等人的方法^[67]。使用 850 毫巴压力水平的风的数据，该数据是从美国国家环境预测中心（NCEP）再分析数据档案中获得的。这些数据的优点是可以基于实际的实时观测在整个地球上以高时空分辨率进行建模，因此，根据观测值或模型的相对影响程度，可以将数据值分为四个质量等级^[76]。这里使用的 850 毫巴的 U 和 V 风分量（即分别沿纬度和经度方向的瞬时风速）是最可靠的 A 类变量。尽管数据可以在指定的时空尺度上访问，但我们将这些数据插值到空间和时间上的点，以与东方白鹳的移动相一致。我们使用 R 包“RNCEP”^[77]提取数据，该包包含从 NCEP/NCAR 再分析和 NCEP/DOE 再分析 II 数据集中检索，组织和可视化天气数据的功能。

对东方白鹳瞬时飞行速度昼夜分布的研究表明，东方白鹳主要在白天飞行，夜晚休息，而飞行速度在当地时间 14:00 达到峰值（比世界标准时间早 8 个小时，图 2.1）。因此，我们的分析数据仅使用东方白鹳在当地时间 09:00 至 18:00（UTC 时间 01:00 至 09:00）之间且飞行速度超过 4 米/秒的数据^[78]。估算了 09:00 至 18:00（当地时间）之间的平均日飞行速度。平均日飞行速度是每天从 09:00 至 18:00（当地时间）的所有飞行速度的平均值。这个变量被定义为“每日飞行速度”（千米/小时）。每日飞行速度是与风（850 毫巴）进行关联分析的参数。飞行方向定义为每个飞行阶段的起点和终点之间的矢量方向。

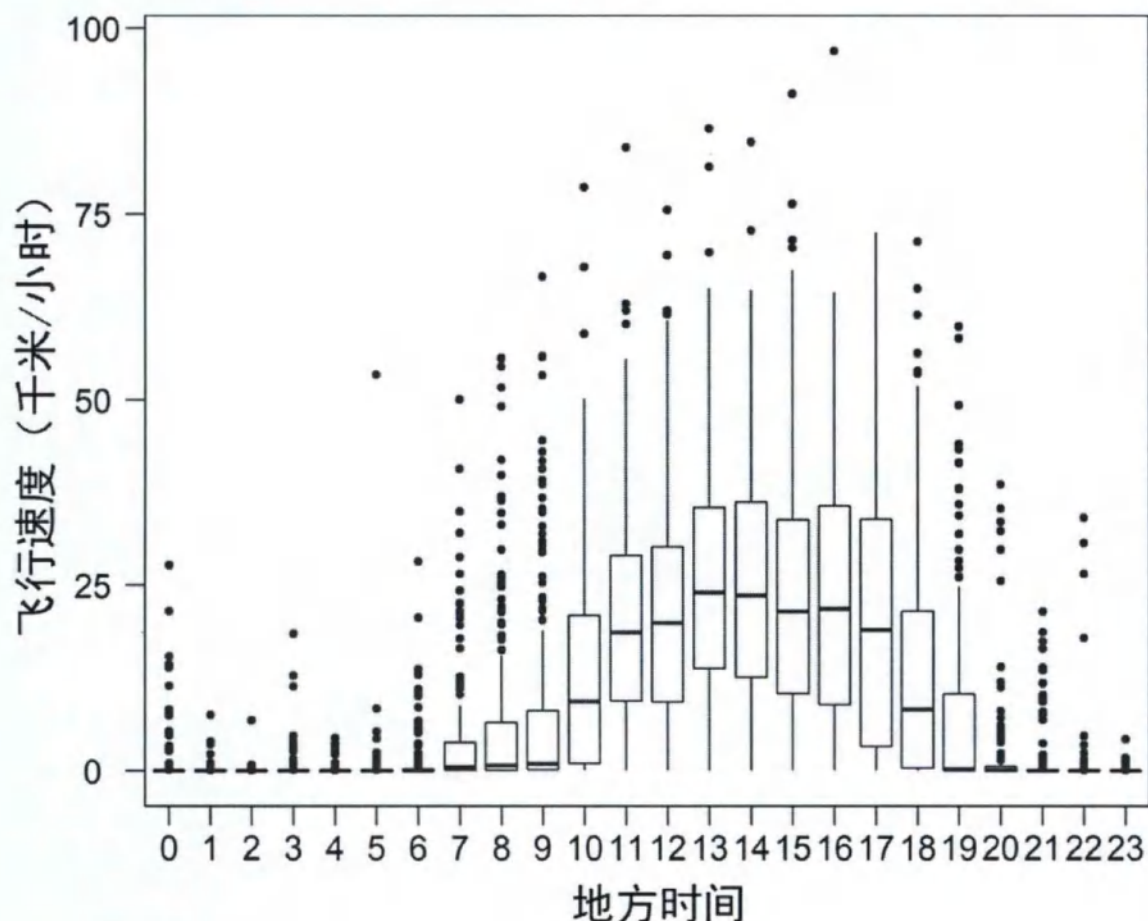


图 2.1 卫星追踪的东方白鹳每日飞行速度分布图（当地时间）

Figure 2.1 Boxplot showing instantaneous flying speeds of telemetry tracked Oriental Storks presented by each hour of the day, local time

在地理和时间上最接近每个 GPS 点的 U 和 V 风变量被用来计算顺/逆风分量（和鸟类飞行方向一致/相反）^[79]。飞行方向是每天的第一个点到最后一个点的矢量方向。虽然 850 毫巴风的数据与海拔 1500 米处的风向和风速有关，但与较低海拔处的风速仍存在可预测的幂律关系^[80]，通常距地面第一个 1000 米，海拔每增加 100 米风速增加 0.1 米/秒^[81]。因此，用于建模的 850 毫巴风的强度和方向很好地表明了东方白鹳在地面以上 350-960 米处的顺风/逆风的强度和方向，并且非常有力地表明了春、秋迁徙中顺风的相对收益。顺风为正值，逆风为负值。侧风是与迁徙方向垂直的风，其中正值表示来自迁徙方向左边的风，负值表示来自迁徙方向右边的风。

2.2.4 统计分析

对于每个迁徙参数（迁徙开始和结束时间除外），我们使用配对 t 检验和威尔科克森符号秩检验来检验秋季和春季迁徙参数之间的显著差异。满足正态分布和方差齐性的迁徙参数使用配对 t 检验，不满足正态分布或方差齐性的迁徙参数使用威尔科克森符号秩检验。同时用独立样本 t 检验分析了季节性顺风的差异，威尔科克森符号秩检验分析了顺风 and 逆风条件下每日飞行速度的差异。用广义加性模型（GAM）检验了日飞行速度与风的关系，并检验顺风的差异是否可以解释春季和秋季迁徙日飞行速度的差异。所有建模和统计分析均使用 R 软件进行。

2.3 研究结果

在繁殖地追踪的 18 只东方白鹳都在长江流域越冬，并于次年春季至夏季返回黑龙江流域（图 2.2，图 2.3）。大多数个体在 10 月下旬离开繁殖地，在 11 月下旬到达越冬地，在 3 月下旬开始春季迁徙，并在 4 月下旬返回繁殖地（表 2.2 中，图 2.4 a-f）。以下所有统计量均以平均值 $\pm$ 标准差表示。春季和秋季之间的迁徙距离（ 2634.61 ± 380.1 千米与 2637.90 ± 340.9 千米）、迁徙时间（ 27.52 ± 15.9 天与 32.77 ± 13.4 天）和中途停歇时间（ 16.30 ± 15.1 天与 15.52 ± 12.4 天）之间没有显著差异。然而，东方白鹳在春季的飞行速度显著快于秋季（ 258.11 ± 64.8 千米/天与 172.23 ± 49.7 千米/天），春季的飞行时间明显少于秋季（ 10.99 ± 4.7 天与 16.85 ± 7.9 天）。中途停歇的次数差异较大（ 1.06 ± 0.9 比 1.78 ± 1.1 ），但是由于大多数个体在春季和秋季都停留 1 次，因此这种差异在生态上可能并没有意义。

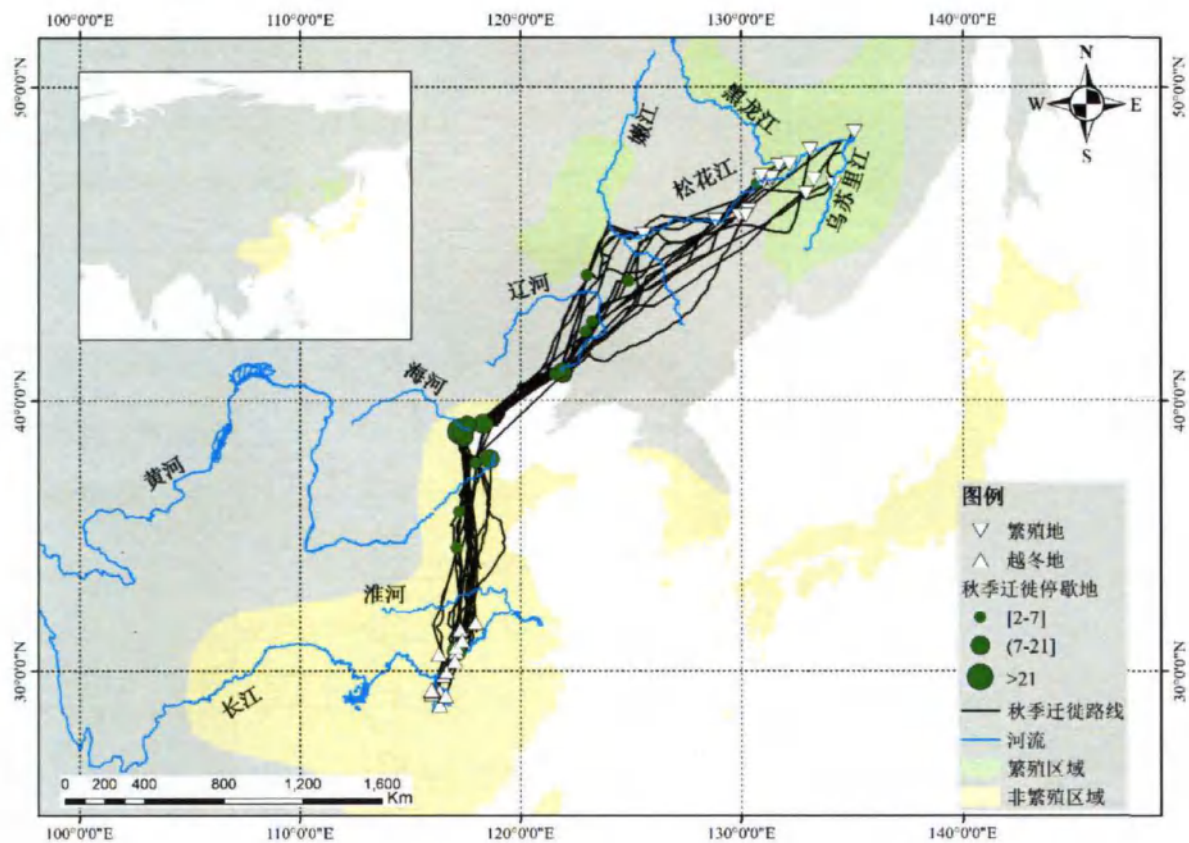


图 2.2 18 只东方白鹳的秋季迁徙路线和停歇位点

Fig. 2.2 Individual autumn migration routes and stopover sites of 18 Oriental Storks

图注：繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

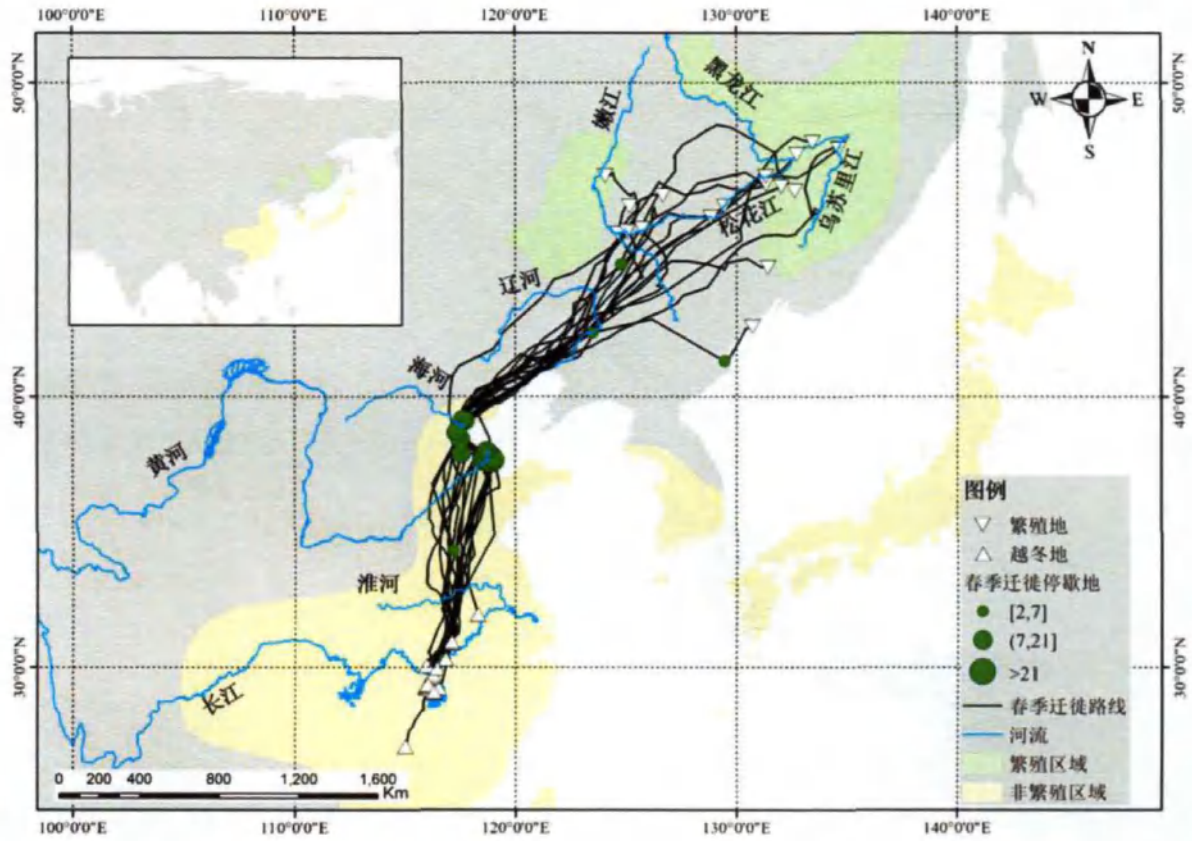


图 2.3 18 只东方白鹳的春季迁徙路线和停歇位点

Fig. 2.3 Individual spring migration routes and stopover sites of 18 Oriental Storks

图注：繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

表 2.2 2015-2018 年在中国追踪的 18 只东方白鹳春季和秋季迁徙参数统计表

Table 2.2 Summary table comparing the mean values of autumn and spring migration parameters generated from tagged 18 Oriental Storks tracked in China 2015–2018

迁徙参数	秋季（平均值±标准差）	春季（平均值±标准差）	p 值
迁徙开始时间	18 October ± 8	23 March ± 14	
迁徙结束时间	20 November ± 15	19 April ± 22	
迁徙持续时间（天）	32.77 ± 13.4	27.52 ± 15.9	0.17
迁徙距离（千米）	2637.90 ± 340.9	2634.61 ± 380.1	0.49
迁徙速度（千米/天）	93.22 ± 37.4	139.36 ± 91.4	0.09
飞行速度（千米/天）	172.23 ± 49.7	258.11 ± 64.8	< 0.001
飞行时间（天）	16.85 ± 7.9	10.99 ± 4.7	< 0.05
停歇时间（天）	15.52 ± 12.4	16.30 ± 15.1	0.30
停歇位点数	1.78 ± 1.1	1.06 ± 0.9	< 0.05
相对飞行高度（米）*	348.70 ± 330.7	510.60 ± 447.1	< 0.001

p 值表示根据配对 t 检验和威尔科克森符号秩检验得出的概率值，该检验比较了秋季和春季迁徙参数平均值之间的显著差异。

*请注意，由于 HQXS 设备偶尔会丢失定位信息，并且每 60 到 180 分钟仅记录一次经纬度，因此在此表中，我们引用了由 10 个 Ornitela 设备得到的飞行高度数据。

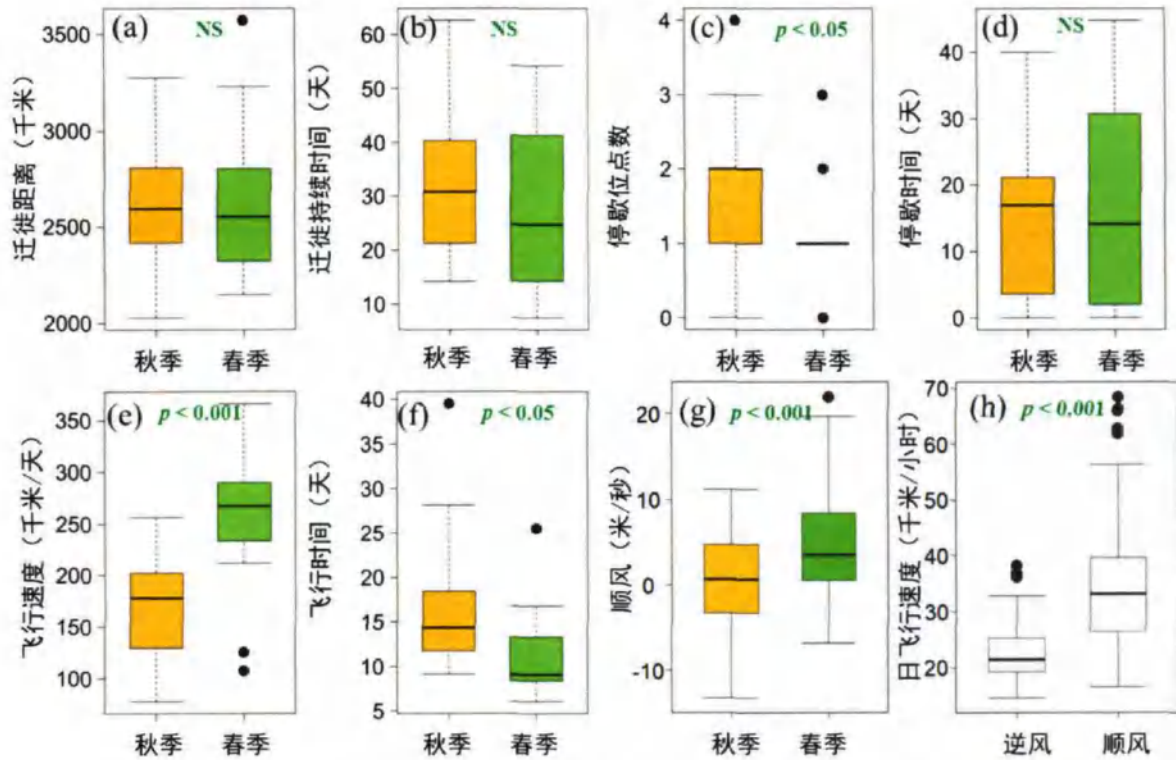


图 2.4 18 只东方白鹳春季（绿色）和秋季（橙色）迁徙参数箱线图

Fig 2.4 Box plot summaries of migration parameters of tagged 18 Oriental Storks

图注：(a) 迁徙距离（千米），(b) 迁徙持续时间（天），(c) 停歇位点数，(d) 停歇时间（天），(e) 飞行速度（千米/天），(f) 飞行时间（天），以及 (g) 秋季和春季经历的顺风条件比较和 (h) 逆风/顺风条件下的日飞行速度比较。基于配对 t 检验和威尔科克森符号秩检验，显示了秋季和春季迁徙参数之间显著差异的概率水平，“NS”表示不显著

日飞行速度与 850 毫巴的顺风呈显著正相关关系 (GAM: $df=1.925$, $F=115.7$, $r^2=0.399$, $p<0.001$, 图 2.5)。季节性顺风的差异与不同季节日飞行速度的差异也呈显著正相关 (GAM: $df=8.899$, $F=21$, $r^2=0.928$, $p<0.001$, 图 2.6)。顺风强度的差异可以解释春季和秋季迁徙之间每日飞行速度的差异。顺风条件下的日飞行速度 (34.28 ± 10.3 千米/小时) 和逆风时 (22.74 ± 5.0 千米/小时, 威尔科克森符号秩检验, $p<0.001$, 图 2.4h) 相比存在显著差异。秋季的平均顺风速度 (0.48 ± 5.6 米/秒, 独立样本 t 检验, $p<0.001$,) 与春季的平均顺风速度存在显著差异 (4.40 ± 5.6 米/秒, 显著大于零, 基于单一样本 t 检验 $p<0.001$ 见图 2.4g。注: 基于单一样本 t 检验的结果, 秋季的顺风值 0.48 米/秒与零值没有显著差异 $p=0.15$)。

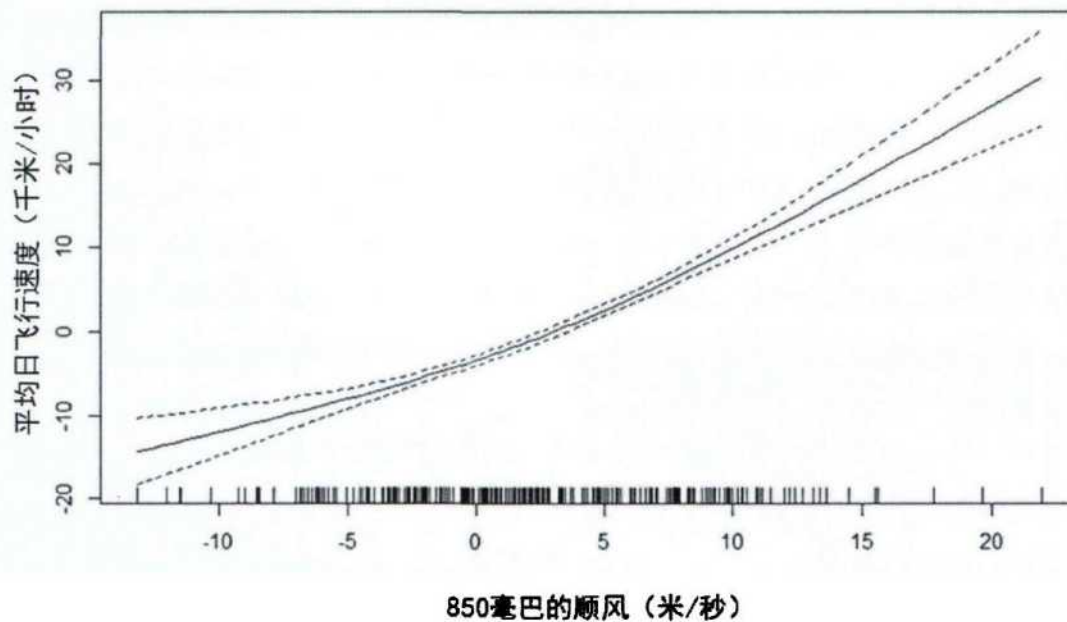


图 2.5 850 毫巴的顺风 (X 轴) 与平均日飞行速度 (Y 轴) 的最佳拟合函数图

Figure 2.5 GAM plot from the best fitting function of tailwind at 850 mbar (X-axis) on the daily flying speed (Y-axis)

图注：虚线表示协变量周围的两个标准误差边界。沿 X 轴的垂直线表示分析中使用的数据点，用于显示 850 毫巴顺风数据点的分布

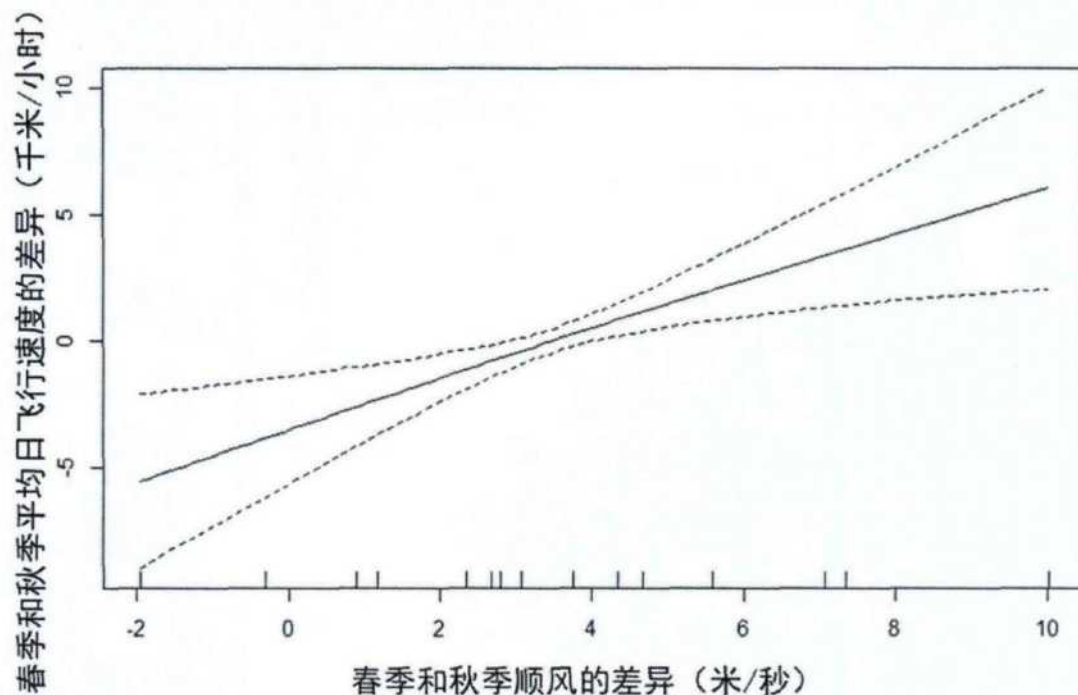


图 2.6 季节性顺风差异 (X 轴) 与季节性平均日飞行速度差异 (Y 轴) 的最佳函数拟合图

Fig 2.6 GAM plot from the best fitting function of the difference in seasonal tailwind (X-axis) on the difference in seasonal average daily flying speed (Y-axis)

图注：虚线表示协变量周围的两个标准误差边界。沿 X 轴的垂直线表示分析中使用的数据点，用于显示季节性顺风差异数据点的分布

2.4 讨论

尽管风和迁徙的关系很复杂，但是有研究指出顺风会对一些大型鸟类（如风头蜂鹰，白鹳和金雕等）的迁徙带来好处^[23,67,73]。然而，直接比较是很困难的，因为对于利用热气流进行日间迁徙的物种而言，日长也会极大地影响迁徙持续时间和速度^[63]。我们的研究第一次揭示了东方白鹳在迁徙过程中的飞行速度受季节性顺风的影响，而春季和秋季之间的差异是可预见的。需要强调的是，我们的发现来自东方白鹳幼鸟（第一年没有繁殖），成鸟的行为可能与第一年的幼鸟不同。在其他物种中，已经证明了迁徙模式具有特定的年龄差异，通常随着年龄的增长幼鸟与成鸟的迁徙模式会越来越相似^[82-84]。通常，在大型鸟类中，雄性比雌性更早到达繁殖地，这可能是由于雄鸟需要提前占领繁殖领地^[85]，但是在我们的研究中无法区分幼鸟性别，所以我们的研究无法比较不同性别迁徙模式的差异。

顺风辅助可以解释东方白鹳日飞行速度的季节性差异。在春季和秋季迁徙中，顺风强度（850 毫巴）与平均日飞行速度呈显著正相关关系，但是由于春季的顺

风 (4.40 ± 5.6 米/秒) 条件明显优于秋季 (0.48 ± 5.6 米/秒), 东方白鹳在整个秋季迁徙过程中实际上没有从顺风中获得任何净收益, 所以春季的日飞行速度比秋季快。Liechti 等人 (1996 年) 发现, 由于盛行风的差异, 以色列南部的白鹳迁徙时的平均地面速度秋季快于春季^[24]。Shamoun-Baranes 等人 (2003) 还发现顺风对白鹳春季和秋季的平均迁徙速度有显著影响, 研究中发现, 秋季迁徙的持续时间 (26.1 ± 4.9 天) 比春季 (49.1 ± 15.0 天) 短^[67], 而东方白鹳分别为: 秋季迁徙持续 32.77 ± 13.4 天, 春季迁徙持续 27.52 ± 15.9 天。由于东方白鹳不同个体之间的迁徙持续时间差异很大, 因此这五天的差异不具有统计学意义。Shamoun-Baranes 等人 (2003) 还推测, 风力辅助可以部分解释欧洲白鹳平均迁徙速度的季节性差异, 在欧洲秋季的顺风条件优于春季^[67]。

对翱翔鸟类的大量研究表明, 顺风强度与候鸟的速度之间相关。例如, 候鸟的运动在有利的顺风出现时会达到高峰期^[70]。以色列南部的草原雕 *Aquila nipalensis* 的飞行速度随着顺风强度的增加而增加^[7]。因此, 风向和风速可能极大地影响日飞行速度^[23]。

东方白鹳比欧洲白鹳重约 40%^[86], 但两个物种在结构和生态上非常相似。因此, 这两个物种的春季和秋季迁徙持续时间相反很有可能与不同的迁徙廊道上的顺风的不同有关。

竞争有限的繁殖资源是候鸟提早到达繁殖地的一个主要因素^[87]。东方白鹳和白鹳都倾向于利用旧巢, 旧巢的数量在繁殖地是有限的^[88], 因此东方白鹳春季飞行速度更快或许是为了竞争传统巢以及高质量的觅食地^[74]。许多物种到达繁殖地的时间也与繁殖成功率呈负相关, 因此, 鸟类早日到达繁殖地可获得高质量的栖息地和巢, 提高繁殖成功率^[3,89-92]。

因此, 我们认为, 春季和秋季迁徙的持续时间比较与尽早到达繁殖地竞争筑巢资源的理论相关。毫无疑问, 东方白鹳和白鹳都必须尽早到达繁殖地, 以占领和保卫传统巢, 但是东方白鹳在秋季和春季的迁徙时间没有显著差异, 而白鹳春季迁徙时间更长。这项研究和 Shamoun-Baranes 等的研究 (2003 年) 表明, 这两个物种的迁徙都依赖顺风的辅助来提高飞行速度^[67], 并且两个研究都强烈揭示了东方白鹳和白鹳的春季和秋季迁徙的持续时间都会被季节性的顺风所影响。

因此, 我们认为东方白鹳在迁徙途中飞行速度的季节性差异与它们所遇到的自然环境条件有关, 春季和秋季之间的自然环境条件存在差异。春季迁徙时的飞行速度更快, 可以用春季的顺风条件优于秋季来解释, 但秋季和春季迁徙的总体持续时间没有显著差异。原因可能是飞行时间仅是迁徙时间的一小部分, 而春季的停歇时间与秋季相比, 个体差异更大。这与白鹳相反, 白鹳在春季迁徙持续时

间长于秋季，可能是因为秋季的顺风优于春季^[67]。这证实了长距离迁徙的翱翔鸟类在春季迁徙时会尽量缩短迁徙持续时间，以确保尽早到达繁殖地。但是，同时也要考虑春季的气候条件，这取决于当地不同的气候模式，不同的物种之间可能会有根本性的差异。这一发现还证实了，如果当前的盛行风在发生变化，则根据当前的气候变化预测种群很容易受到气候变化的影响^[93]。

2.5 小结

东方白鹳在西伯利亚东南部和中国东北部分地区繁殖，冬季主要在中国东南部越冬。虽然已有学者描述了东方白鹳的秋季迁徙模式，但春季和秋季迁徙的飞行速度的差异以及与风的关系尚不清楚。本研究 2015-2018 年利用 GPS/GSM 卫星追踪器追踪了 18 只东方白鹳幼鸟的全年迁徙，比较春季和秋季迁徙模式的差异，结合卫星遥感数据和美国国家环境预测再分析中心的数据，解释了 850 毫巴的风与飞行速度的季节性差异的关系。结果显示，季节性顺风的差异导致了东方白鹳飞行速度的季节性差异（春季： 258.11 ± 64.8 千米/天，秋季： 172.23 ± 49.7 千米/天， $p < 0.001$ ）。东方白鹳在秋季的停歇次数明显多于春季（ 1.78 ± 1.1 与 1.06 ± 0.9 ， $p < 0.05$ ），但停歇时间（ 15.52 ± 12.4 天与 16.30 ± 15.1 天， $p = 0.3$ ）没有显著差异。850 毫巴气压水平的顺风（来自国家环境预测中心再分析数据档案）显著影响春秋迁徙的平均日飞行速度。春季的顺风条件（ 4.40 ± 5.6 米/秒）明显优于秋季（ 0.48 ± 5.6 米/秒）， $p < 0.001$ 。尽管春季迁徙的平均持续时间小于秋季（ 27.52 ± 15.9 天与 32.77 ± 13.4 天， $p = 0.17$ ），由于个体差异较大，所以春季和秋季迁徙的持续时间没有显著差异。因此对于长距离迁徙的翱翔鸟类（如东方白鹳），春季和秋季迁徙的相对持续时间可能与尽早到达繁殖地的必要性和途中经历的季节性气象条件之间的相互作用有关。

第三章 东方白鹳的长、短距离迁徙路线和策略比较

3.1 研究背景

传统迁徙理论预测,长距离迁徙的候鸟会尽量缩短春季迁徙的持续时间,以尽早到达繁殖地占领高质量的栖息地^[87,90]。因为尽早筑巢可以增加卵的大小和幼鸟的生长时间^[94],从而提高在第一次迁徙中的存活率^[95,96],还有利于雌鸟调整繁殖投入,以达到最大适合度^[97]。因此,传统的迁徙理论认为春季迁徙快于秋季迁徙。许多迁徙物种表现出春季迁徙快于秋季迁徙^[74],与传统理论相符。但是也有物种的迁徙理论与传统理论相悖,例如欧洲白鹳秋季迁徙快于春季迁徙^[67]。研究发现,长距离迁徙的物种(如白额雁和小天鹅)秋季迁徙快于春季^[98,99],短距离迁徙的物种(如鸿雁和灰雁)春季迁徙快于秋季^[100,101]。

鸟类的迁徙通常追踪季节性丰富的食物资源,同时要避免繁殖地在冬季的恶劣条件^[102,103]。然而随着人类粮食资源的增加^[104]、全球气候变暖等环境条件发生的变化,鸟类迁徙的可塑性使得物种可以通过改变迁徙时间和路线来适应这种变化。在许多北极鸟类中,迁徙物候学正在调整,以适应早春的到来^[3,105-107]。在过去的三十年中有研究发现,欧洲白鹳在中欧、伊比利亚和西非之间的西部迁徙路线上迁徙的亚种群正在缩短迁徙距离。伊比利亚半岛出现了新的越冬和定居行为^[108],导致欧洲越冬的白鹳数量增加^[109]。

东方白鹳原是从中俄交界的黑龙江流域迁徙至中国长江流域越冬的迁徙物种^[110],但是根据对东方白鹳的历史研究发现,个别东方白鹳有在北京和黄河三角洲越冬^[111,112],东方白鹳有长距离(黑龙江-长江)和短距离(黑龙江-渤海湾)两个迁徙种群。但是对于黑龙江-渤海湾种群的迁徙研究样本量很小,并且缺少完整的迁徙数据。我们的研究使用通过卫星遥测技术获得的东方白鹳的完整迁徙数据,来探究东方白鹳的短距离迁徙模式是否符合传统迁徙理论并比较长、短距离迁徙种群迁徙策略的异同。

3.2 研究方法

3.2.1 卫星追踪

2015 年 6-7 月, 在黑龙江省洪河国家级自然保护区 (47°47' N, 133°40' E) 捕捉 2 只东方白鹳幼鸟, 并安装了背包式追踪器(环球信士, HQBP3527, 27 克)。2016 年 6 月, 在黑龙江省洪河国家级自然保护区 (47°47' N, 133°40' E) 捕捉 4 只东方白鹳幼鸟, 并安装了背包式追踪器(环球信士, HQBP3622, 22 克)。2017 年 7 月, 在黑龙江省洪河国家级自然保护区 (47°47' N, 133°40' E) 捕捉 8 只东方白鹳幼鸟, 并安装了背包式追踪器(环球信士, HQBG3621S, 24 克)。2018 年 6-7 月, 在黑龙江省洪河国家级自然保护区 (47°47' N, 133°40' E) 捕捉 10 只东方白鹳幼鸟, 黑龙江嘟噜河省级湿地自然保护区 (47°11'N, 130°51'E) 捕捉 1 只东方白鹳幼鸟, 俄罗斯阿穆尔河流域捕捉 14 只东方白鹳幼鸟, 并安装了背包式追踪器(环球信士, HQBG3621S, 24 克; Ornitela, OT-E50-3G, 55 克)。所有设备都具有防水功能的太阳能电池, 设备每 10-180 分钟记录一次纬度和经度(在野外测试中, 水平精度为 9.6 ± 5.6 米), 每 8 到 24 小时通过移动设备传输一次数据, 用于数据分析。共追踪东方白鹳幼鸟 39 只, 获得完整的长距离迁徙路线 52 条(包括秋季迁徙 N=26 条, 春季迁徙 N=26 条), 完整的短距离迁徙路线 22 条(包括秋季迁徙 N=13 条, 春季迁徙 N=9 条)(表 3.1)。

表 3.1 2015-2018 年追踪的 39 只东方白鹳的个体信息表

Table 3.1. Summary table of details of 39 Oriental Storks tracked during 2015–2018

编号	体重 (千克)	捕捉时间	追踪器 厂家	设备型号	设备重量 (克)	迁徙距离
os001	5.515	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	长距离
os002	4.510	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	长距离
os003	4.636	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	长距离
os004	3.710	2018/6/14	环球信士	HQBG3621S	24	长距离
os005	4.478	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	长距离
os006	3.650	2016/6/28	环球信士	HQBP3622	22	长距离
os007	5.200	2017/7/6	环球信士	HQBP3622	22	长距离
os008	4.305	2018/6/11	环球信士	HQBP3622	22	长距离
os009	未知	2015/6/20	环球信士	HQBP3527	27	长距离
os010	未知	2015/7/8	环球信士	HQBP3527	27	长距离
os011	4.050	2018/6/17	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os012	3.970	2018/6/17	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os013	4.000	2018/7/8	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os014	4.865	2018/6/17	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os015	4.770	2018/7/13	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os016	3.930	2018/6/16	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os017	4.140	2018/7/13	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os018	3.295	2018/6/18	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os019	4.515	2018/6/14	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os020	3.580	2018/7/8	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os021	5.235	2018/7/6	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os022	4.200	2018/6/16	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os023	5.575	2018/6/28	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os024	4.040	2018/6/28	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os025	5.245	2018/6/27	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os026	4.535	2018/6/30	Ornitela	OT-E50-3G	55	长距离
os027	4.005	2018/6/11	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os028	4.380	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os029	4.090	2017/7/4	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os030	4.250	2017/7/2	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os031	3.795	2018/6/11	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os032	3.435	2018/6/13	环球信士	HQBG3621S	24	短距离
os033	3.155	2017/6/27	德鲁伊	Debut15	19	短距离
os034	3.950	2016/6/23	环球信士	HQBP3622	22	短距离
os035	3.950	2016/6/24	环球信士	HQBP3622	22	短距离
os036	3.540	2018/6/13	环球信士	HQBP3527	27	短距离
os037	4.425	2018/6/18	Ornitela	OT-E50-3G	55	短距离
os038	4.085	2018/6/17	Ornitela	OT-E50-3G	55	短距离
os039	4.060	2018/6/15	Ornitela	OT-E50-3G	55	短距离

3.2.2 迁徙参数定义

为有效的评估追踪个体的迁徙策略和量化追踪个体的迁徙路径。我们引用了11项迁徙参数：迁徙开始时间，迁徙到达时间，迁徙距离，迁徙持续时间，迁徙速度，停歇位点数，停歇持续时间，飞行时间，飞行速度，步长，偏离指数。

迁徙开始时间是离开繁殖地或越冬地的时间，即判断为迁徙开始位点所对应的时间；迁徙到达时间为到达繁殖地或越冬地的时间，即判断为迁徙结束位点所对应的时间；迁徙距离为候鸟南北迁徙过程中累积的飞行距离（不包括在中途停歇地活动的距离）；迁徙持续时间指候鸟在南北迁徙过程中，从离开繁殖地（越冬地）到达越冬地（繁殖地）所花费的时间，其中包括中途停歇花费的时间；迁徙速度，为迁徙距离除以迁徙时间所得的值，表示该迁徙个体迁徙过程的平均速度；停歇位点数，是指在候鸟迁徙过程中，被判断为中途停歇位点的个数；停歇持续时间，为追踪个体在中途停歇地停留的时长；飞行速度，是迁徙距离除以飞行时间，而飞行时间是迁徙持续时间减去停歇持续时间，表示追踪个体处于飞行状态下的速度。步长是指相邻两个停留地点之间的距离。偏离指数，是指迁徙结束与开始之间的位移与迁徙距离的比值，是测量鸟类实际追踪路径与迁徙起点和终点之间直线距离的差异。

3.2.3 识别迁徙时间、停歇时间和停歇地

我们使用了 Wang 等人 (2018) 描述的方法^[75]。将运动轨迹分为“飞行”和“非飞行”段，然后我们使用谷歌地球将鸟类运动可视化，以判断每个位点的到达和离开时间。我们将非飞行时间超过 48 小时的 GPS 点集群定义为中途停歇地^[113]。基于这些运动分段，可以确定繁殖地、越冬地和停歇地的到达和离开时间。

3.2.4 统计分析

对于每个迁徙参数（到达和离开日期除外）的结果，我们使用 t 检验和威尔科克森符号秩检验来分别检验黑龙江-长江和黑龙江-渤海湾种群秋季、春季迁徙参数之间的显著差异。对于同时符合正态分布和方差齐性的迁徙参数使用 t 检验，否则，使用威尔科克森符号秩检验。

3.3 研究结果

黑龙江-长江种群（秋季迁徙：N=26，春季迁徙：N=26）从黑龙江流域出发，越冬于长江中下游，春季迁徙返回黑龙江流域（图 3.1 和图 3.2）。大多数个体在 10 月下旬离开繁殖地，11 月下旬到达越冬地，春季迁徙开始于 3 月下旬，5 月上旬返回繁殖地（春季和秋季迁徙的迁徙参数比较结果见表 3.2 和图 3.3 a-i，所有结果均用平均值 $\pm$ 标准差来表示）。在长距离的春季和秋季迁徙中，迁徙距离（ 2953.26 ± 325.80 千米与 2865.07 ± 214.66 千米；图 3.3c）、迁徙持续时间（ 36.77 ± 31.79 天与 30.91 ± 13.60 天；图 3.3a）、停歇持续时间（ 25.54 ± 29.94 天与 15.38 ± 12.90 天；图 3.3b）和停歇位点数（ 1.31 ± 0.97 与 1.77 ± 1.24 ；图 3.3e）都没有显著差异。然而，春季迁徙的飞行速度显著快于秋季（ 278.85 ± 65.23 千米/天与 190.68 ± 37.68 千米/天；图 3.3f），飞行时间也少于秋季（ 11.22 ± 3.36 天与 15.53 ± 3.06 天；图 3.3i）。

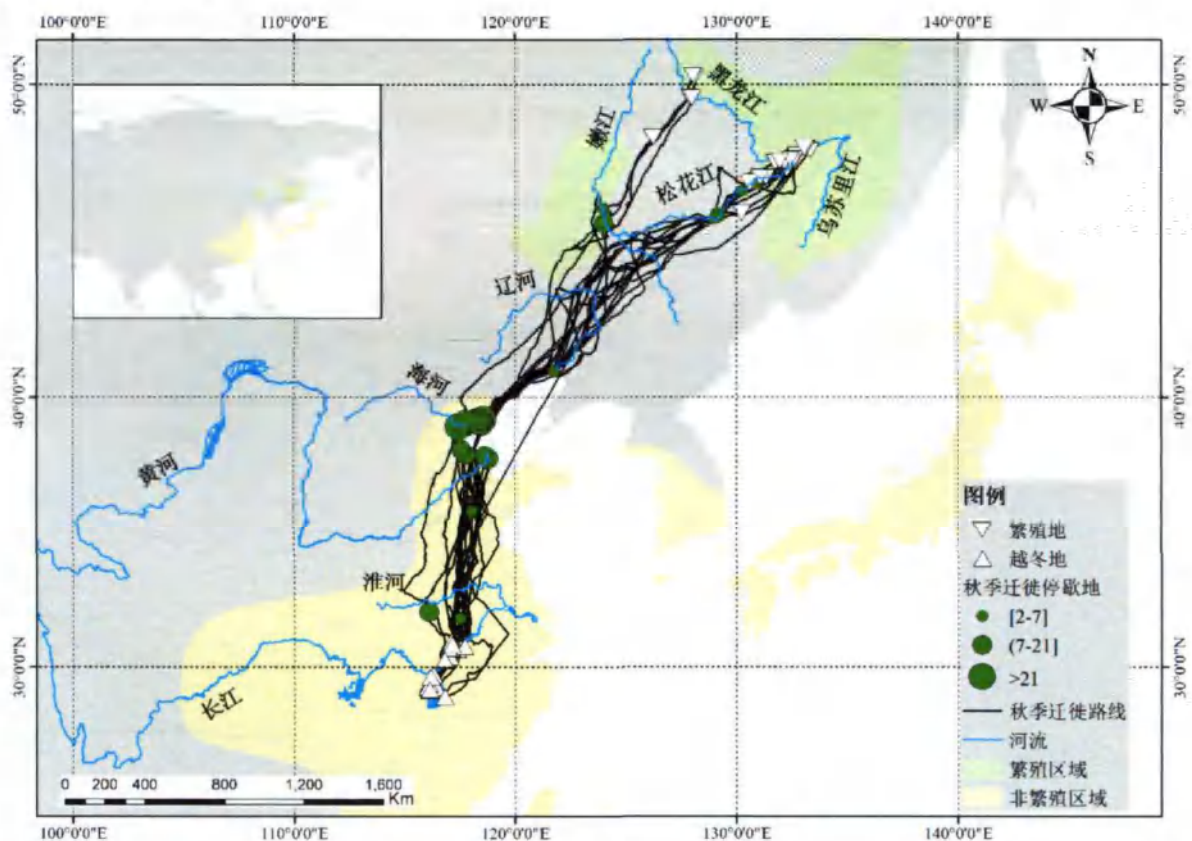


图 3.1 东方白鹳黑龙江-长江种群秋季迁徙路线和停歇位点图 (N=26)

Fig 3.1 Heilong River-Yangtze River population autumn migration routes and stopover sites of Oriental Storks (N=26)

图注：繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

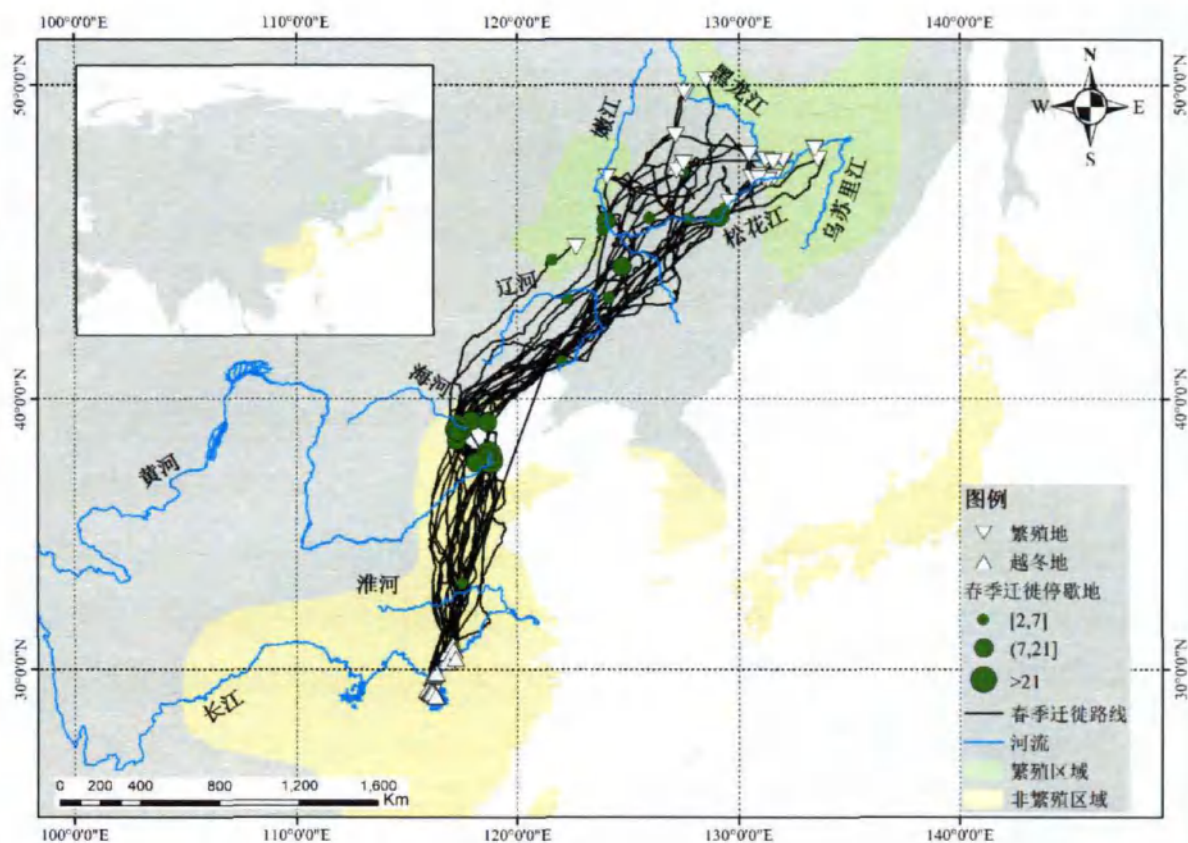


图 3.2 东方白鹳黑龙江-长江种群春季迁徙路线和停歇位点图 (N=26)

Fig 3.2 Heilong River-Yangtze River population spring migration routes and stopover sites of Oriental Storks (N=26)

图注：繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

表 3.2 东方白鹳黑龙江-长江种群的秋季和春季迁徙参数统计表

Table 3.2 Summary table comparing the mean values of Heilong River-Yangtze River population autumn and spring migration parameters generated from tagged Oriental Storks

迁徙参数	秋季(平均值±标准差)	春季(平均值±标准差)	p 值
迁徙开始时间	26 October ± 7	28 March ± 26	
迁徙结束时间	26 November ± 15	4 May ± 41	
迁徙持续时间(天)	30.91 ± 13.60	36.77 ± 31.79	0.38
迁徙距离(千米)	2865.07 ± 214.66	2953.26 ± 325.80	0.24
迁徙速度(千米/天)	110.40 ± 44.48	129.09 ± 78.06	0.30
飞行速度(千米/天)	190.68 ± 37.68	278.85 ± 65.23	<0.001
飞行时间(天)	15.53 ± 3.06	11.22 ± 3.36	<0.001
停歇时间(天)	15.38 ± 12.90	25.54 ± 29.94	0.11
停歇位点数	1.77 ± 1.24	1.31 ± 0.97	0.07
步长(千米)	1287.96 ± 674.36	1525.12 ± 705.52	0.20
偏离指数	0.83 ± 0.05	0.80 ± 0.08	<0.05

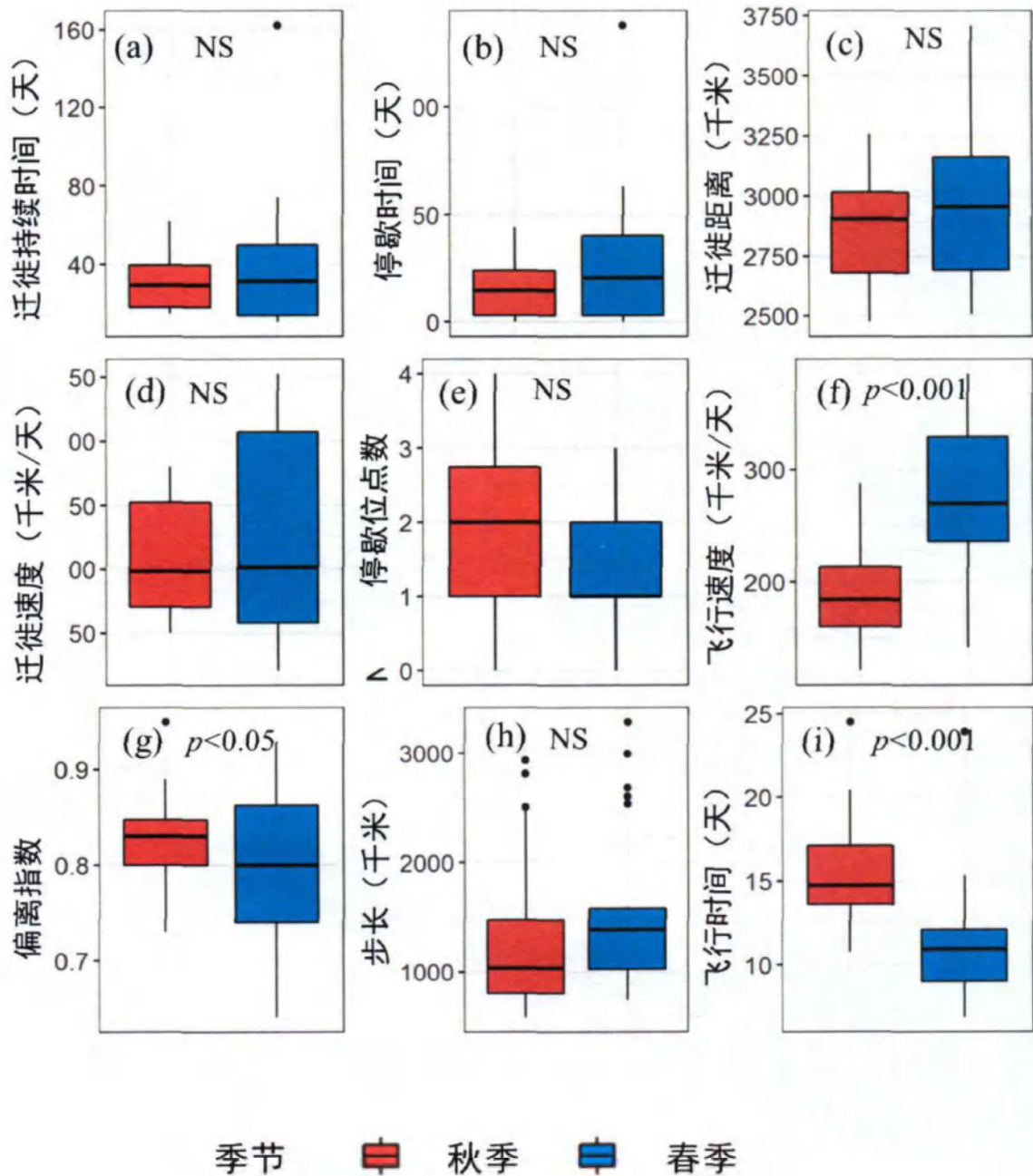


图 3.3 东方白鹳黑龙江-长江种群春季和秋季迁徙参数箱线图

Fig 3.3 Box plot summaries of Heilong River-Yangtze River population migration parameters of tagged Oriental Storks

图注：基于配对 t 检验和威尔科克森符号秩检验，显示了秋季和春季迁徙参数之间显著差异的概率水平，“NS”表示不显著

黑龙江-渤海湾种群（秋季迁徙：N=13，春季迁徙：N=9）从黑龙江流域出发，越冬于渤海湾，春季迁徙返回黑龙江流域（图 3.4 和图 3.5）。大多数个体在 10 月下旬离开繁殖地，11 月下旬到达越冬地，春季迁徙开始于 4 月下旬，5 月上旬返回繁殖地（春季和秋季迁徙的迁徙参数比较结果见表 3.3 和图 3.6 a-i，所

有结果均用平均值 $\pm$ 标准差来表示)。在短距离的春季和秋季迁徙中, 迁徙距离 (1533.78 ± 424.84 千米与 1566.85 ± 325.92 千米; 图 3.6c)、停歇持续时间 (5.37 ± 9.68 天与 17.75 ± 18.24 天; 图 3.6b) 和停歇位点数 (0.67 ± 1.12 与 1.77 ± 1.54 ; 图 3.6e) 没有显著差异。然而, 春季迁徙比秋季迁徙更快 (迁徙速度 211.13 ± 118.16 千米/天与 92.41 ± 61.69 千米/天; 图 3.6d), 且春季迁徙持续时间更短 (11.22 ± 8.72 天与 28.00 ± 21.20 天; 图 3.6a)。春季迁徙的飞行速度也快于秋季 (280.40 ± 61.95 千米/天与 185.49 ± 71.95 千米/天; 图 3.6f), 飞行时间短于秋季 (5.85 ± 2.47 天与 10.25 ± 6.46 天; 图 3.6i)。

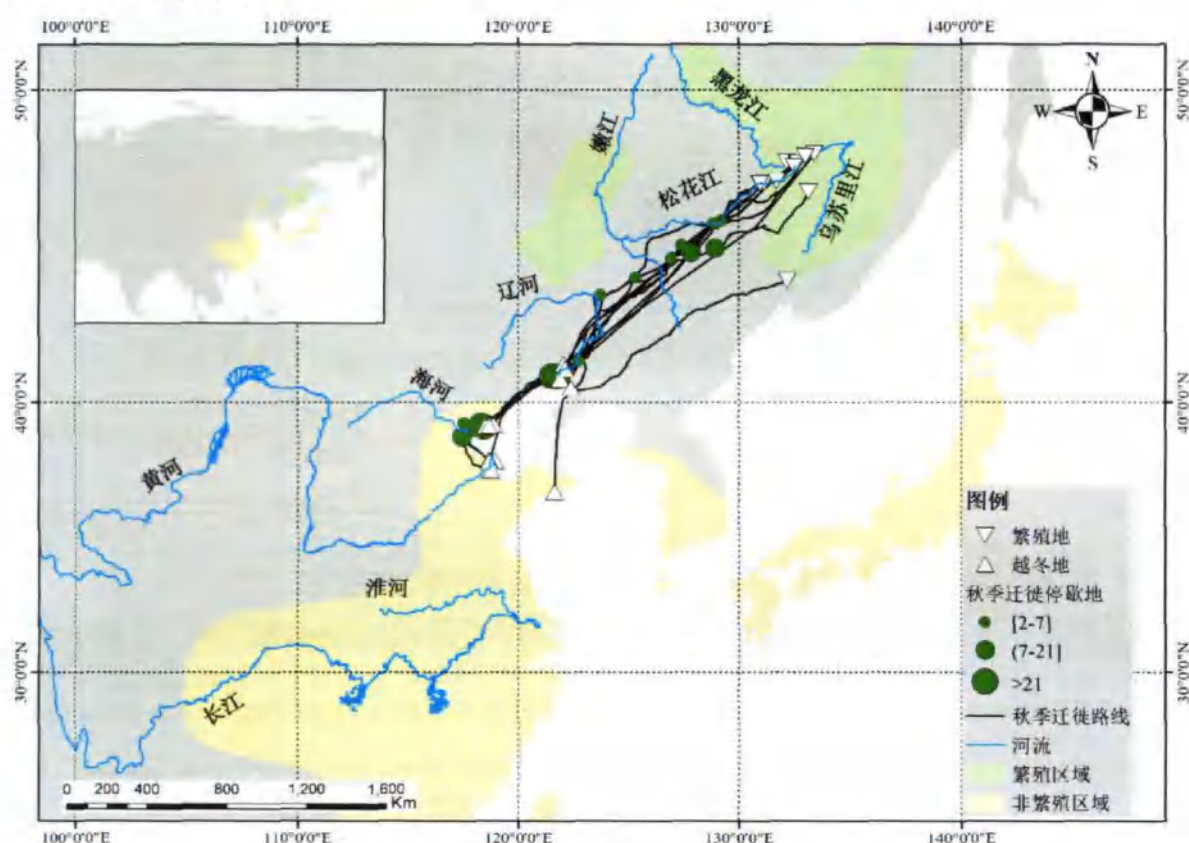


图 3.4 东方白鹳黑龙江-渤海湾种群秋季迁徙路线和停歇位点图 (N=13)

Fig 3.4 Heilong River-Bohai Bay population autumn migration routes and stopover sites of Oriental Storks (N=13)

图注: 繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

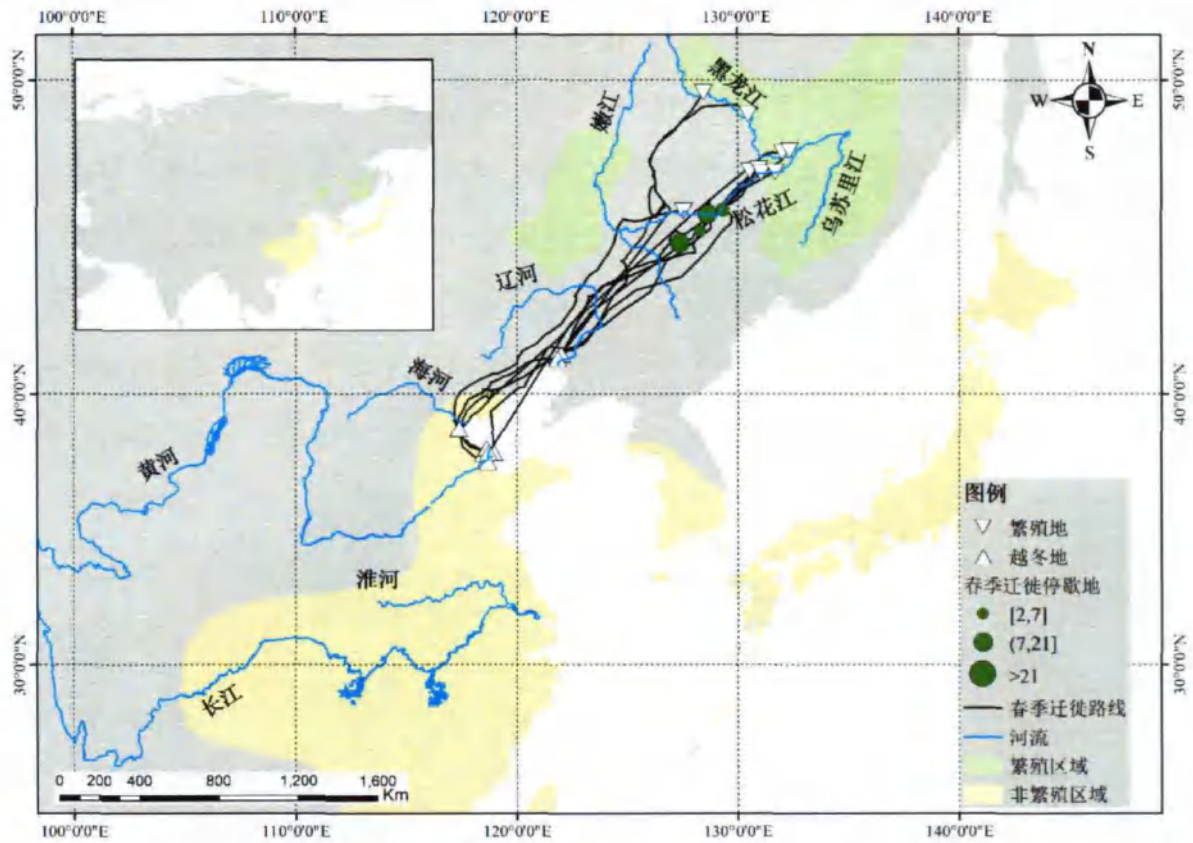


图 3.5 东方白鹳黑龙江-渤海湾种群春季迁徙路线和停歇位点图 (N=9)

Fig 3.5 Heilong River-Bohai Bay population spring migration routes and stopover sites of Oriental Storks (N=13)

图注：繁殖区域和非繁殖区域的分布来自于 BirdLife International

表 3.3 东方白鹳黑龙江-渤海湾种群秋季和春季迁徙参数统计表

Table 3.3 Summary table comparing the mean values of Heilong River-Bohai Bay population autumn and spring migration parameters generated from tagged Oriental Storks

迁徙参数	秋季(平均值±标准差)	春季(平均值±标准差)	p 值
迁徙开始时间	24 October ± 8	23 April ± 35	
迁徙结束时间	21 November ± 17	4 May ± 31	
迁徙持续时间(天)	28.00 ± 21.20	11.22 ± 8.72	<0.05
迁徙距离(千米)	1566.85 ± 325.92	1533.78 ± 424.84	0.69
迁徙速度(千米/天)	92.41 ± 61.69	211.13 ± 118.16	<0.05
飞行速度(千米/天)	185.49 ± 71.95	280.40 ± 61.95	<0.05
飞行时间(天)	10.25 ± 6.46	5.85 ± 2.47	<0.05
停歇时间(天)	17.75 ± 18.24	5.37 ± 9.68	0.05
停歇位点数	1.77 ± 1.54	0.67 ± 1.12	0.07
步长(千米)	704.85 ± 301.97	1253.70 ± 650.27	<0.05
偏离指数	0.88 ± 0.07	0.87 ± 0.09	0.87

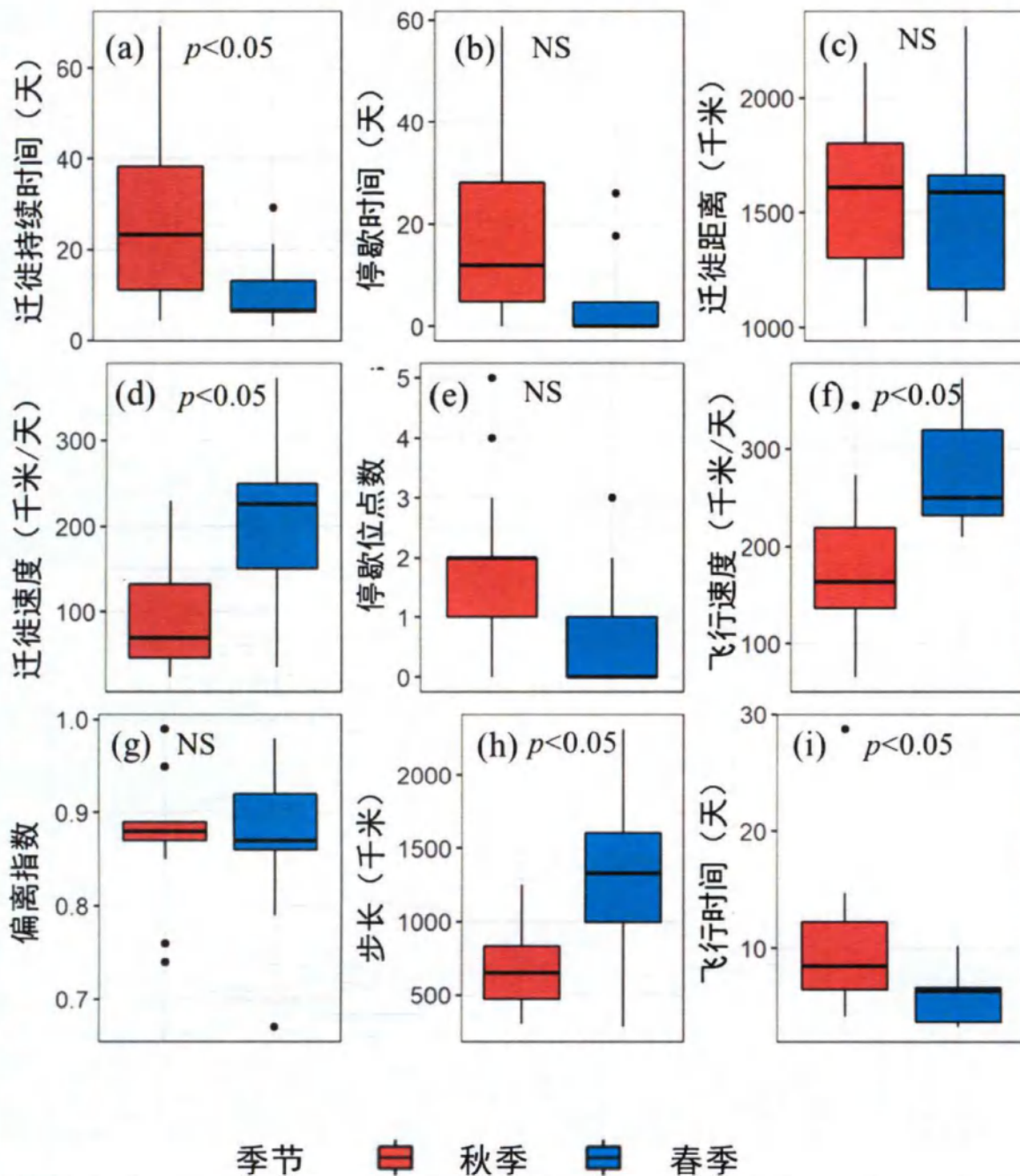


图 3.6 东方白鹳黑龙江-渤海湾种群春季和秋季迁徙参数箱线图

Fig 3.6 Box plot summaries of Heilong River-Bohai Bay population migration parameters of tagged Oriental Storks

图注：基于独立样本 t 检验和威尔科克森符号秩检验，显示了秋季和春季迁徙参数之间显著差异的概率水平，“NS”表示不显著

3.4 讨论

我们的研究第一次比较了东方白鹳黑龙江-渤海湾种群春、秋迁徙的季节性差异。通过 t 检验和威尔科克森符号秩检验,分析了迁徙距离、迁徙持续时间、迁徙速度、飞行时间、飞行速度、停歇持续时间等迁徙参数与季节的关系。结果发现在黑龙江-渤海湾种群的短距离迁徙中,迁徙距离、停歇持续时间和停歇位点数在春季和秋季迁徙中没有显著差异,而春季迁徙的迁徙速度和飞行速度明显大于秋季,春季迁徙的持续时间明显小于秋季。传统迁徙理论认为,迁徙鸟类在春季迁徙过程中,会采取时间最小化策略,即春季迁徙受到时间的限制,会快于秋季迁徙。所以迁徙理论预测,为了占领高质量的栖息地,迁徙鸟类在春季迁徙中会尽可能早地到达繁殖地^[87,90]。另外,春季的顺风条件明显优于秋季,季节性的顺风差异也导致了春季迁徙快于秋季迁徙。

可能由于全球气候变暖,导致东方白鹳正在缩短它们的迁徙距离,形成了长距离和短距离两种迁徙模式。类似的情况也在别的物种中出现,全球气候变化导致欧洲西北部冬季变暖,缩短了 12 个物种的迁徙距离,迁徙距离的下降可能是气候变化造成的^[114]。这将使这些鸟类能够调整迁徙的开始和结束时间,以达到最佳繁殖条件^[115,116]。短距离迁徙鸟类不必像长距离迁徙鸟类那样因到达繁殖地太晚承受代价^[105,117],因为长距离迁徙鸟类的迁徙策略不那么灵活^[118]。如果短距离迁徙鸟类确实比长距离迁徙鸟类更能适应气候变化,这可能会使后者处于竞争劣势^[119]。

长距离和短距离秋季迁徙持续时间差异不大,但是长距离迁徙的春季迁徙持续时间是短距离的 3 倍多,原因可能是:短距离迁徙的种群活动范围较小,可以晚些离开繁殖地,越冬地离繁殖地较近,能够更好地预测其繁殖地的情况^[120]。研究还发现,迁徙距离较短、羽翼未丰的欧洲白鹳个体在第一次秋季迁徙的死亡率较低^[121]。

本研究分别比较了东方白鹳长距离迁徙和短距离迁徙的春秋迁徙策略,第一次介绍了东方白鹳的从黑龙江流域到渤海湾的短距离迁徙。但是目前尚不清楚该物种在渤海湾的越冬种群数量。因此,我们建议进一步进行地面实况调查,改善对该物种种群数量的监测。

3.5 小结

有研究发现,长距离迁徙的物种秋季迁徙快于春季,短距离迁徙的物种春季迁徙快于秋季。根据对东方白鹳的历史研究发现,个别东方白鹳有在北京和黄河三角洲越冬,东方白鹳有长距离(黑龙江-长江)和短距离(黑龙江-渤海湾)两个迁徙种群。但是对于黑龙江-渤海湾种群的迁徙研究样本量很小,并且缺少完整的迁徙数据。我们的研究使用通过卫星遥测技术获得的 39 只东方白鹳的完整迁徙数据,首次获得了东方白鹳黑龙江-渤海湾种群完整的春、秋迁徙路线,使用统计分析方法比较了春、秋迁徙策略,来探究东方白鹳的两种迁徙模式是否符合传统迁徙理论。结果发现,黑龙江-渤海湾种群的春季迁徙比秋季迁徙更快(迁徙速度 211.13 ± 118.16 千米/天与 92.41 ± 61.69 千米/天, $p < 0.05$),且春季迁徙持续时间更短(11.22 ± 8.72 天与 28.00 ± 21.20 天, $p < 0.05$)。春季迁徙的飞行速度也快于秋季(280.40 ± 61.95 千米/天与 185.49 ± 71.95 千米/天, $p < 0.05$),飞行时间短于秋季(5.85 ± 2.47 天与 10.25 ± 6.46 天, $p < 0.05$),符合传统迁徙理论。长距离和短距离秋季迁徙持续时间差异不大,但是长距离迁徙的春季迁徙持续时间是短距离的 3 倍多,可能是由于短距离迁徙的种群活动范围较小。

第四章 东方白鹳的栖息地利用和保护现状

4.1 研究背景

栖息地是指动物生活的场所,是维持其生命活动所依赖的各种环境资源的总和。栖息地利用是动物在不同生境或生境类型上的分布。研究动物的栖息地利用具有重大意义,也是动物生态学研究的一个重要领域。因为栖息地的质量是决定鸟类种群数量动态的关键,研究栖息地的利用可以了解鸟类的觅食行为和环境因子的关系,并且为物种保护提供理论支撑^[122]。

段玉宝等人 2008-2009 年在黄河三角洲基于野外调查,对东方白鹳繁殖期觅食地的利用进行了研究,结果表明,东方白鹳繁殖期倾向于在明水面、芦苇沼泽和滩地中觅食,对草地和农田利用极少^[123]。谢鹏对东方白鹳的繁殖期、迁徙期和越冬期栖息地生境进行调查,并采集了多个生境因子和植物优势种数据。对调查数据采用多元统计等方法,比较东方白鹳在繁殖期、迁徙期和越冬期生境选择的差异性和相似性^[124]。雷倩等人基于核密度分析与 Maxent 模型,对繁殖季东方白鹳幼鸟在三江平原的活动规律、不同阶段下潜在适宜生境的变化情况及其主要影响因子等进行分析,发现主要影响因子分别为:土地覆被类型、水体、相对湿度、草本沼泽及相对风速^[125]。目前关于东方白鹳栖息地利用的研究主要是基于野外生境调查进行的,没有结合卫星追踪和遥感数据,比较年生活周期的栖息地利用和保护现状。

物种的保护现状研究发现,灰雁在繁殖地和越冬地的受保护比例相对较高(繁殖地 46.4%,越冬地 40%),可能是其种群数量上升的一个原因。所以研究鸟类的保护现状,提出合理的保护建议可以促进种群恢复。目前东方白鹳仍处于濒危状态,是我国 I 级重点保护动物,种群的受胁因素尚未完全清楚,中国和俄罗斯保护区做了大量的人工招引工作,一定程度推动了东方白鹳的种群恢复,调查中发现,长江中下游越冬的种群数量上升,俄罗斯阿穆尔地区的繁殖种群数量也在上升。为了更加有效地保护这一濒危物种,研究其年生活周期不同阶段的栖息地利用和保护现状是很有必要的。

我们的研究将东方白鹳在繁殖期、停歇期和越冬期的卫星追踪数据分别与全球地表覆被数据、国家级自然保护区进行叠加计算，研究东方白鹳黑龙江-长江种群和黑龙江-渤海湾种群在年生活周期中的栖息地利用和保护现状。研究结果不仅可以了解东方白鹳的栖息地利用情况和保护现状，也可以为物种的有效保护提供参考建议。

4.2 研究方法

4.2.1 栖息地利用计算

我们使用第三章获得的 39 只东方白鹳个体的卫星追踪数据，分别计算黑龙江-长江种群和黑龙江-渤海湾种群在繁殖期、停歇期和越冬期的栖息地利用情况。首先选择了白天的位点，因为水鸟被认为主要在白天觅食。然后我们继续排除了个体白天可能处于飞行状态的数据，将速度大于 4m/s 的位点认为是飞行的位点。之后，我们利用 Arcgis 10.6 将 GPS 位点与 30m 分辨率的清华大学地球系统科学系宫鹏教授研究组发布的 2017 年全球地表覆盖图（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）叠加，以获得每个 GPS 位点对应的土地覆被类型。该土地覆被栅格数据包含的土地覆被类型有：农田、林地、草地、灌丛、湿地、水体、苔原、人工表面、裸土和冰雪层。

4.2.2 保护现状计算

为了计算东方白鹳活动位点的受保护占比，将繁殖、停歇和越冬期间的活动位点与国家级自然保护区进行叠加，获取受保护占比，即受保护占比=保护区内活动位点数/总活动位点数。

4.3 研究结果

4.3.1 黑龙江-长江种群栖息地利用

我们利用黑龙江-长江种群的 GPS 位点进行栖息地利用分析,发现该种群在繁殖期主要利用草地 48%、农田 46%和水体 4%,秋季迁徙停歇期主要利用水体 58%、农田 14%和草地 13%,春季迁徙停歇期主要利用水体 49%和农田 24%,越冬期主要利用水体 61%、湿地 23%和农田 15%。全年生活周期中利用农田的比例较高。

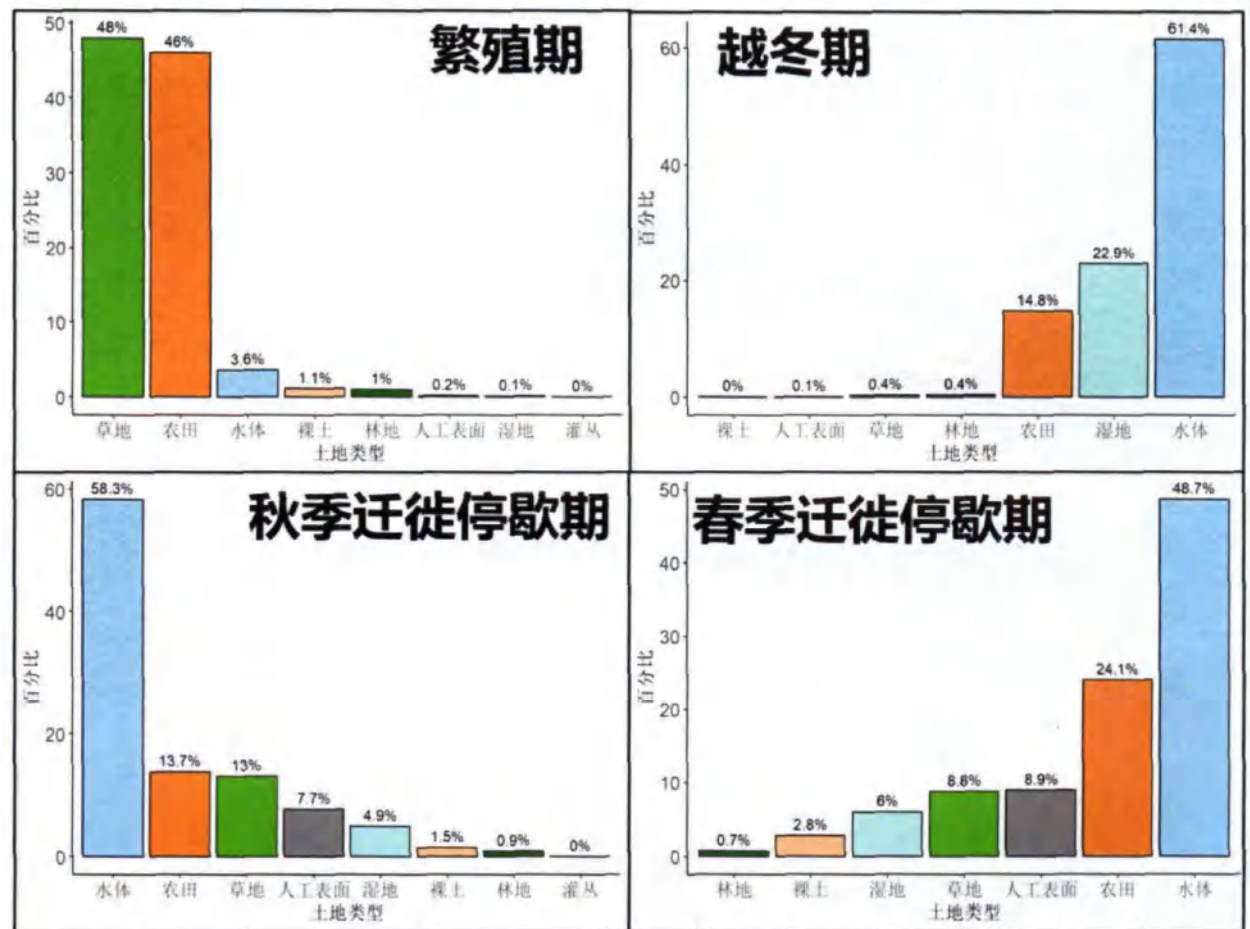


图 4.1 黑龙江-长江种群年生活周期的栖息地利用类型及比例

Fig 4.1 The percent and land type used by Heilong River-Yangtze River population

4.3.2 黑龙江-渤海湾种群栖息地利用

我们利用黑龙江-渤海湾种群的 GPS 位点进行栖息地利用分析,发现该种群在繁殖期主要利用农田 51%、草地 41%和水体 7%,秋季迁徙停歇期主要利用水

体 59%和农田 23%，春季迁徙停歇期主要利用农田 39%、水体 23%和草地 18%，越冬期主要利用水体 50%和农田 20%。同黑龙江-长江种群一样，黑龙江-渤海湾种群年生活周期中利用农田的比例较高，同时在越冬期和春季迁徙停歇期利用人工表面的比例超过 15%，说明鸟类可能在破碎化的栖息地中觅食。

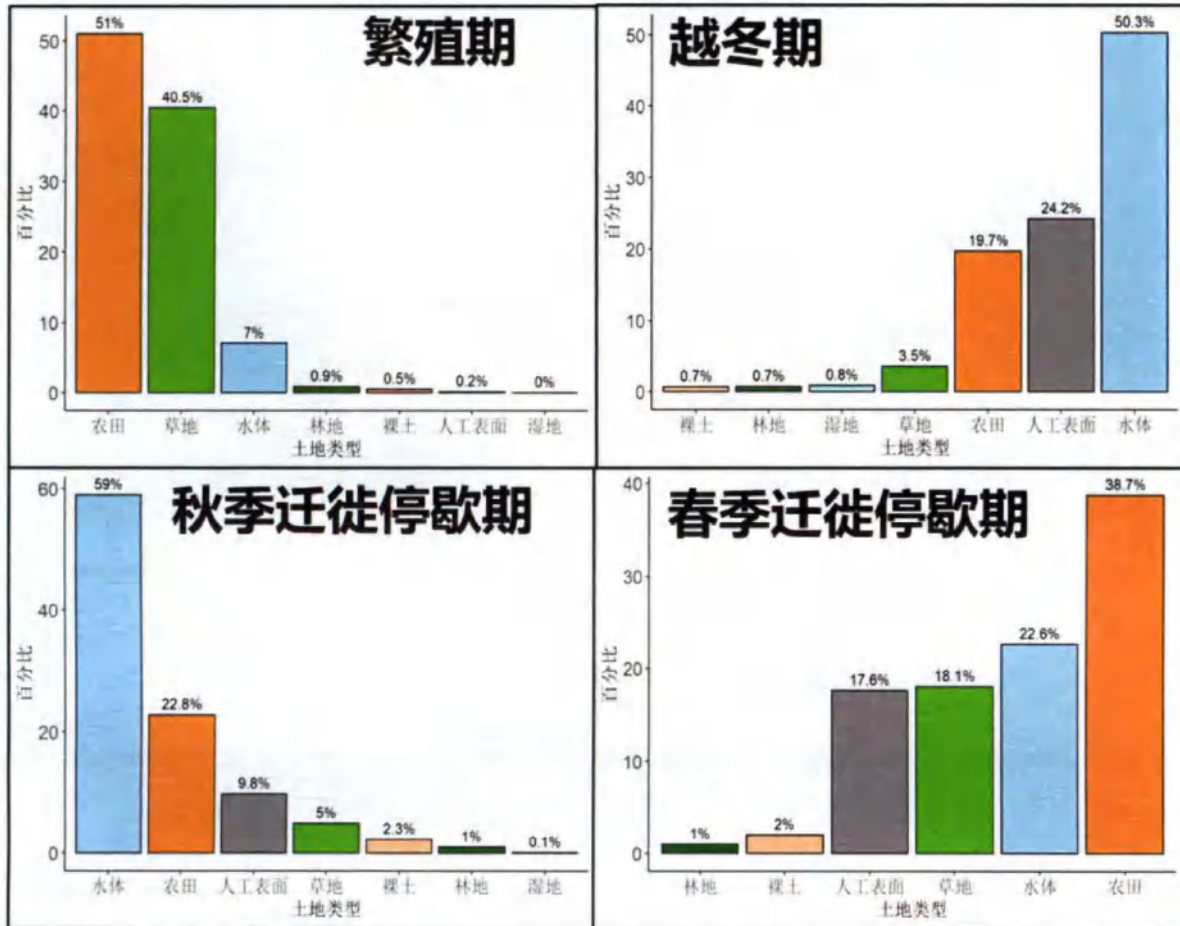


图 4.2 黑龙江-渤海湾种群年生活周期的栖息地利用类型及比例

Fig 4.2 The percent and land type used by Heilong River-Bohai Bay population

4.3.3 黑龙江-长江种群保护现状

统计东方白鹳黑龙江-长江种群繁殖、停歇和越冬期间的 GPS 位点位于保护区内情况，发现该种群在繁殖期有 29.4%的活动位点位于保护区内，主要分布于中国的三江、洪河、挠力河和兴凯湖国家级自然保护区以及俄罗斯的 Amurskaya 保护区。停歇期有 34.9%的活动位点位于保护区内，主要分布于莫莫格、向海、双台河口和黄河三角洲国家级自然保护区。越冬期有 50.5%的活动位点位于保护区内，主要分布于升金湖、鄱阳湖和南矶山湿地国家级自然保护区。

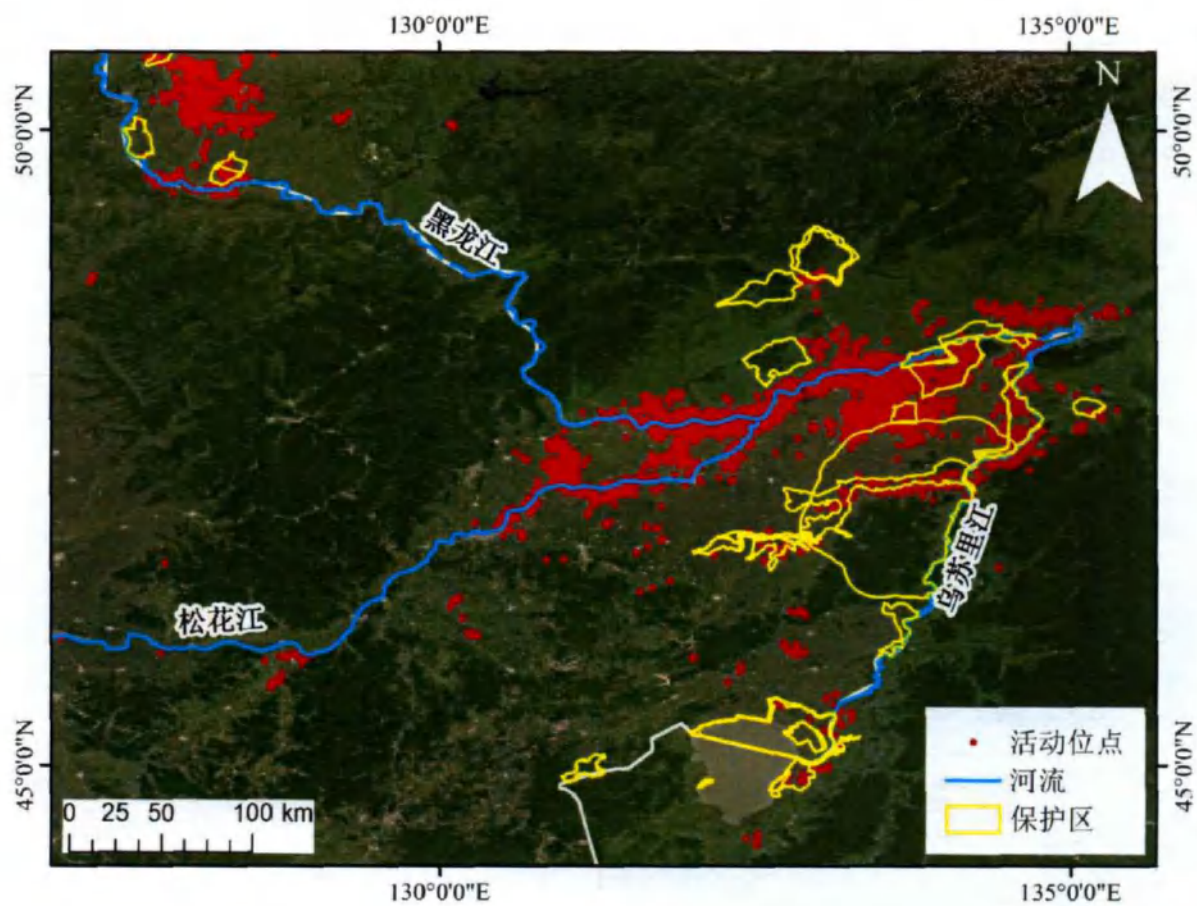


图 4.3 黑龙江-长江种群在繁殖期的保护现状 (29.4%)

Fig 4.3 The protection status of Heilong River-Yangtze River population in breeding period

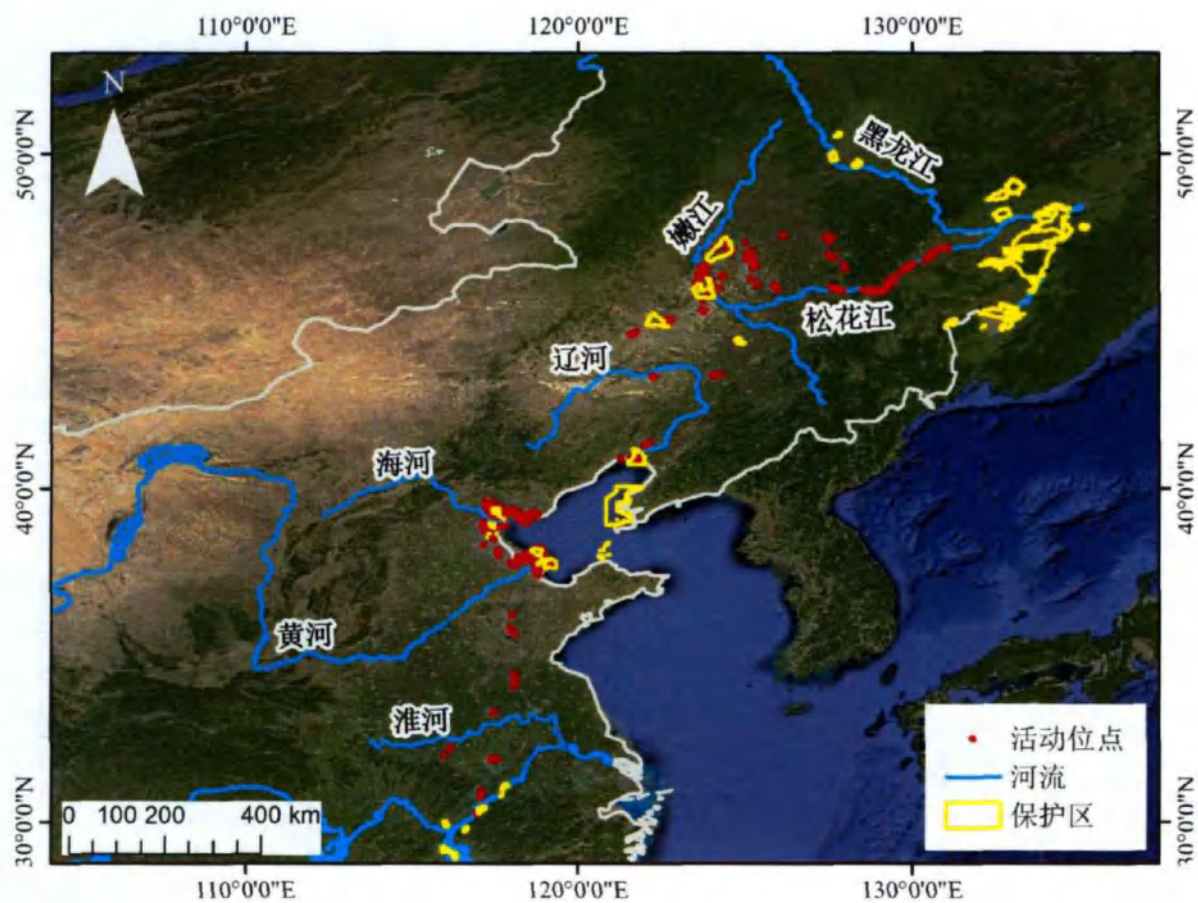


图 4.4 黑龙江-长江种群在停歇期的保护现状 (34.9%)

Fig 4.4 The protection status of Heilong River-Yangtze River population in stopover period

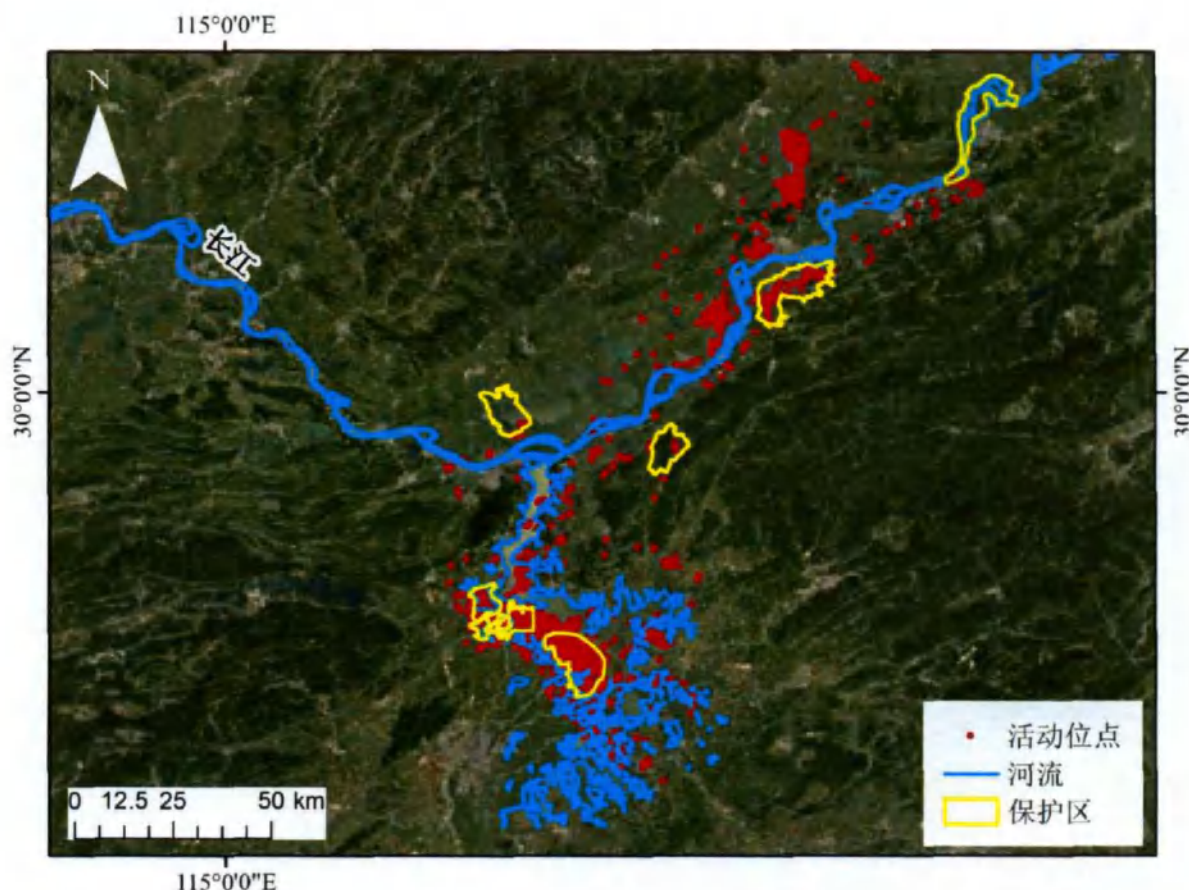


图 4.5 黑龙江-长江种群在越冬期的保护现状 (50.5%)

Fig 4.5 The protection status of Heilong River-Yangtze River population in wintering period

4.3.4 黑龙江-渤海湾种群保护现状

统计东方白鹤黑龙江-渤海湾种群繁殖、停歇和越冬期间的 GPS 位点位于保护区内情况,发现该种群在繁殖期有 25.4%的活动位点位于保护区内,主要分布于三江、洪河、挠力河和兴凯湖国家级自然保护区。停歇期有 15.1%的活动位点位于保护区内,主要分布于双台河口国家级自然保护区。越冬期有 10.9%的活动位点位于保护区内,主要分布于双台河口和黄河三角洲国家级自然保护区。黑龙江-渤海湾种群在停歇期和越冬期大多数活动位点都不在保护区内,保护区比例较低,主要是由于主要活动区域:松花江流域和河北唐山没有设立相应的保护区。

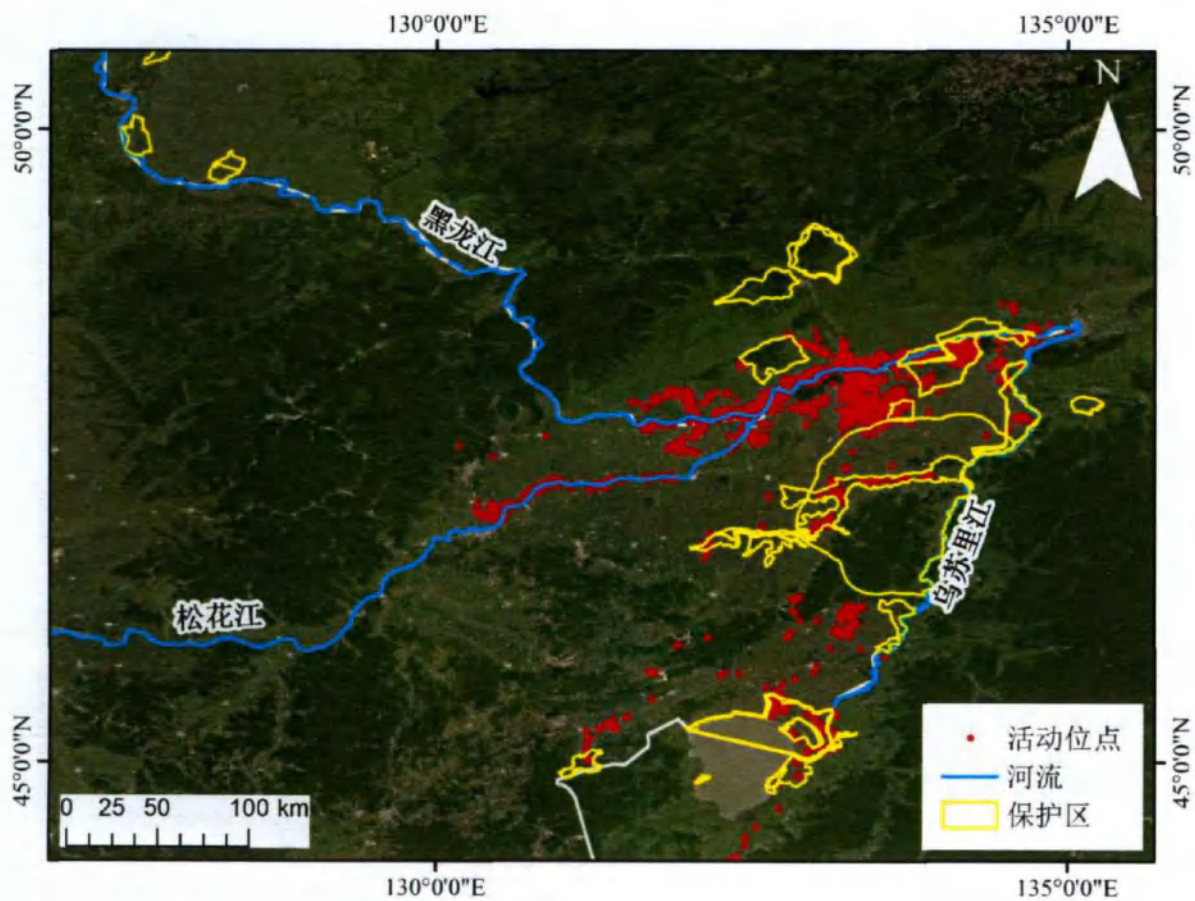


图 4.6 黑龙江-渤海湾种群在繁殖期的保护现状 (25.4%)

Fig 4.6 The protection status of Heilong River-Bohai Bay population in breeding period

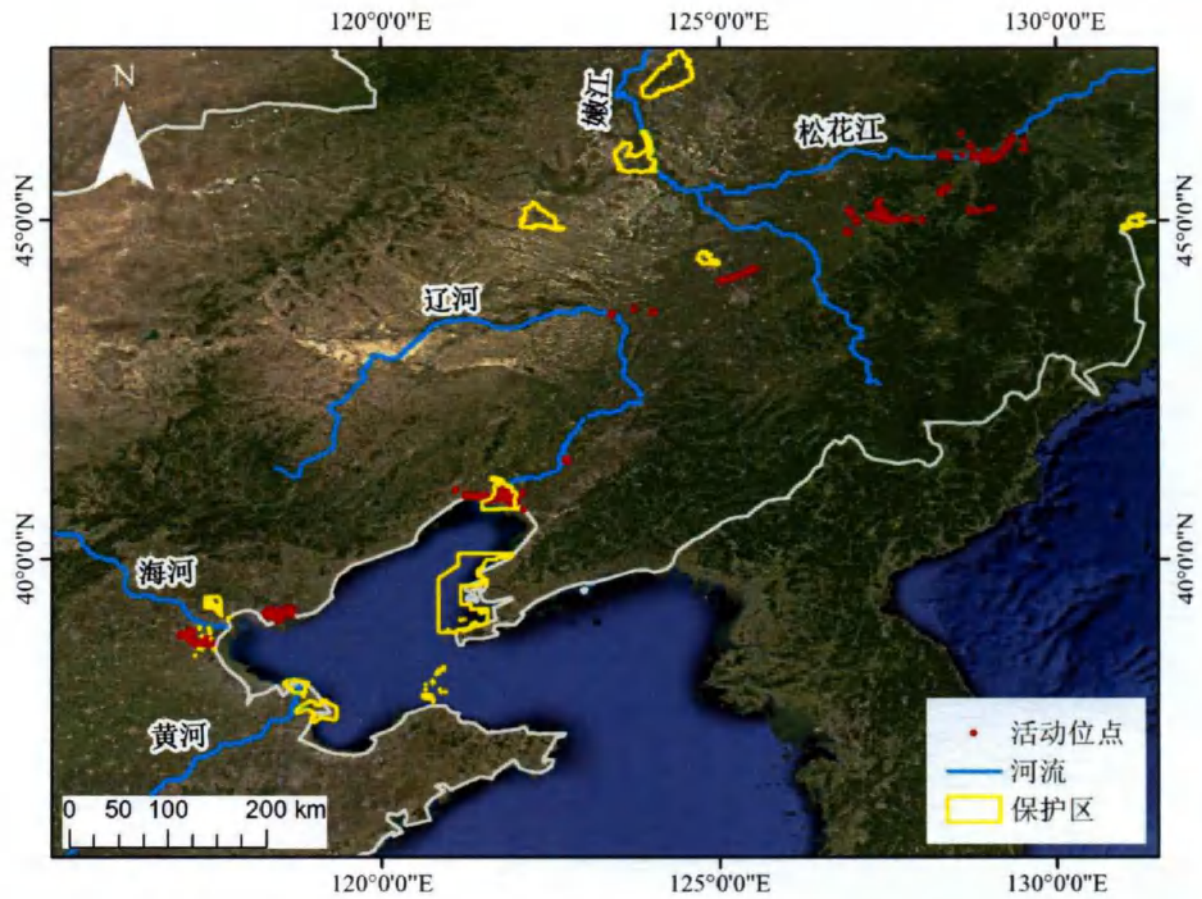


图 4.7 黑龙江-渤海湾种群在停歇期的保护现状（15.1%）

Fig 4.7 The protection status of Heilong River-Bohai Bay population in stopover period



图 4.8 黑龙江-渤海湾种群在越冬期的保护现状 (10.9%)

Fig 4.8 The protection status of Heilong River-Bohai Bay population in wintering period

4.4 讨论

基于卫星追踪技术,我们获得了东方白鹳长距离和短距离迁徙种群在繁殖期、停歇期和越冬期的活动位点数据。通过栖息地利用分析,我们发现两个种群在繁殖期主要位于三江平原,水体、农田和草地是主要的土地覆被类型,湿地利用的比例很少。可能原因是 1983 年之后,当三江平原景观处于高度破碎化状态(1983~2005 年),东方白鹳的筑巢地和觅食地景观相互隔离,栖息地处于严重隔离状态,从而降低了湿地斑块的利用率^[126]。黑龙江-长江种群越冬期主要位于长江流域,利用水体(61%)、湿地(23%)和农田(15%),而黑龙江-渤海湾种群越冬期主要位于渤海湾,利用水体(50%)和农田(20%)。栖息地利用结果与越冬地(长江流域和渤海湾)景观特征一致。长江流域湖泊众多,是我国地表水资源最丰富的地区,天津市大量的养殖区域和盐田面积的扩大,给东方白鹳的迁徙和越冬提供充足的食物和水^[127]。

黑龙江-渤海湾种群在越冬期和春季停歇期利用到人工表面的比例都超过15%，经核查是东方白鹳在道路周边小于30米范围内的草地或农田活动，在和全球地表覆被数据进行叠加时，会被计入人工表面的栅格，我们的研究结果说明黑龙江-渤海湾种群在春季迁徙停歇期和越冬期可能是在破碎化的栖息地中觅食。所以保护东方白鹳栖息地最关键的问题是保护好栖息地的基本面积，需要有连续并且一定的面积作为保证^[128]。建立东方白鹳栖息地保护区，加强重点核心区的有效保护，减少或控制对湿地的人工开发，使得栖息在这里的动物处于相对稳定的环境中，进而吸引更多的鸟类，同时保证东方白鹳的迁徙连通性。

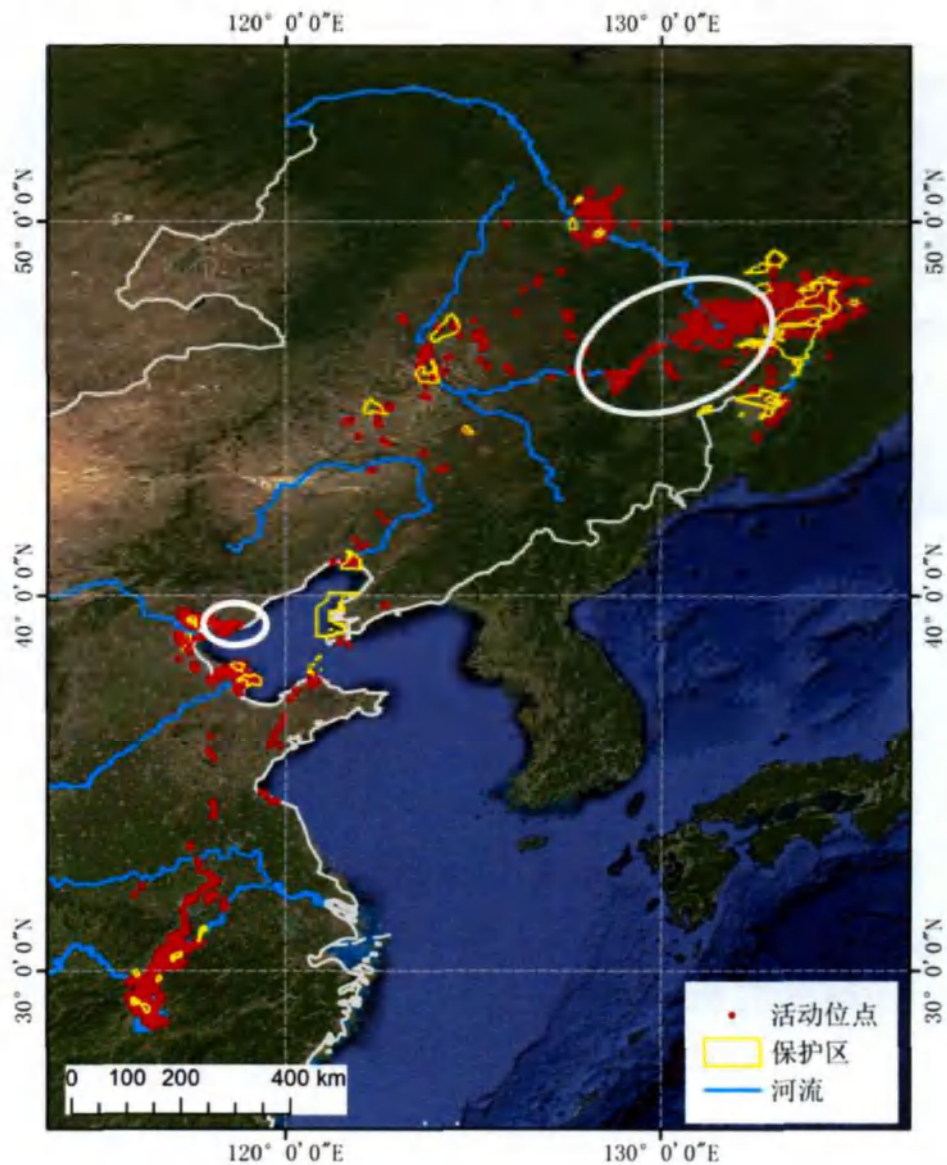


图 4.9 东方白鹳年生活周期的保护现状（白色圆圈代表建议增设的保护区位置）

Fig 4.9 The annual protection status of Oriental Storks (white circle represents the location of the proposed additional protection area)

在研究东方白鹳的保护现状时，发现长江-黑龙江种群年生活周期的不同阶段受保护比例超过 30%，保护比例较好，长江-渤海湾种群繁殖期受保护比例较好为 25%，而停歇期为 15%和越冬期为 11%，受保护比例低。所以我们建议增设两个保护区：松花江和黑龙江的交汇处以及永定新河和潮白河的入海口。在进行东方白鹳的保护工作时，应该加强对于现有湿地的保护，增设栖息地保护区，控制人工开发湿地，保证栖息地的完整连续，减少对湿地环境的干扰和破坏。

4.5 小结

研究栖息地的利用可以了解鸟类的觅食行为和环境因子的关系，并且为物种保护提供理论支撑。我们的研究将东方白鹳在繁殖期、停歇期和越冬期的卫星追踪数据分别与全球地表覆被数据、国家级自然保护进行叠加计算，研究东方白鹳黑龙江-长江种群和黑龙江-渤海湾种群在年生活周期中的栖息地利用和保护现状。结果发现，黑龙江-长江和黑龙江-渤海湾种群在年生活周期中的不同阶段主要利用水体、农田和草地，黑龙江-长江种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 29.4%、34.9%和 50.5%，黑龙江-渤海湾种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 25.4%、15.1%和 10.9%，黑龙江-渤海湾种群受保护比例较低，应增设黑龙江-松花江流域的交汇处以及永定新河和潮白河的入海口为保护区。

第五章 总结与展望

5.1 总结

基于卫星追踪对东方白鹳迁徙生态学的研究，其主要结论如下：

东方白鹳有长距离（黑龙江-长江）和短距离（黑龙江-渤海湾）两个迁徙种群。通过比较长江-黑龙江和长江-渤海湾种群的迁徙策略，发现两个种群春季迁徙都快于秋季，其中黑龙江-长江种群春季迁徙的飞行速度明显快于秋季，黑龙江-渤海湾种群春季迁徙的迁徙速度和飞行速度都明显快于秋季。顺风辅助可以解释东方白鹳在长距离迁徙中飞行速度的季节性差异，春季的顺风条件优于秋季，导致春季迁徙的飞行速度快于秋季。

黑龙江-长江和黑龙江-渤海湾种群在年生活周期中的不同阶段主要利用水体、农田和草地。黑龙江-长江种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 29.4%、34.9%和 50.5%，黑龙江-渤海湾种群繁殖、停歇和越冬期间的受保护比例分别为 25.4%、15.1%和 10.9%，黑龙江-渤海湾种群在停歇期和越冬期受保护比例较低，应增设黑龙江-松花江流域的交汇处以及永定新河和潮白河的入海口为保护区。

5.2 展望

目前追踪数据中还缺少松嫩平原的数据，所以后续研究考虑覆盖松嫩平原区域。比较不同繁殖地的东方白鹳幼鸟在迁徙模式上是否具有差异。由于气候变化和环境因素对鸟类的迁徙至关重要，所以未来的研究中我们也希望探究东方白鹳出现短距离迁徙的原因，以及其他环境因素（热气流、温度等）对迁徙的影响。有关栖息地退化和破碎化如何影响候鸟繁殖和越冬的相关研究还相对较少，结合卫星遥测和卫星追踪技术探讨栖息地退化对候鸟的影响，将是物种保护和栖息地管理研究的重要方向。

参考文献

- [1] BERTHOLD P. Bird migration: genetic programs with high adaptability[J]. *Zoology-Analysis of Complex Systems*, Urban & Fischer, 1998, 101(4): 235–245.
- [2] BERTHOLD P. Bird migration: a general survey[M]. Oxford University Press on Demand, 2001.
- [3] NEWTON N I. The migration ecology of birds[M]. Oxford: Academic Press, 2008.
- [4] HEDENSTROM A. Migration by Soaring or Flapping Flight in Birds - the Relative Importance of Energy-Cost and Speed[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 1993, 342(1302): 353–361.
- [5] SPAAR R, BRUDERER B. Optimal flight behavior of soaring migrants: a case study of migrating steppe buzzards, *Buteo buteo vulpinus*[J]. *Behavioral Ecology*, Oxford University Press, 1997, 8(3): 288–297.
- [6] NORBERG U M. Vertebrate flight: mechanics, physiology, morphology, ecology and evolution[M]. Springer Science & Business Media, 2012, 27.
- [7] SPAAR R, BRUDERER B. Soaring migration of Steppe Eagles *Aquila nipalensis* in southern Israel: flight behaviour under various wind and thermal conditions[J]. *Journal of Avian Biology*, 1996: 289–301.
- [8] PENNYCUICK C J. Soaring behaviour and performance of some East African birds, observed from a motor-glider[J]. *Ibis*, Wiley Online Library, 1972, 114(2): 178–218.
- [9] ROTICS S, KAATZ M, TURJEMAN S, 等. Early arrival at breeding grounds: Causes, costs and a trade-off with overwintering latitude[J]. *Journal of Animal Ecology*, Wiley Online Library, 2018, 87(6): 1627–1638.
- [10] LINDSTRÖM A Ake, ALERSTAM T, HEDENSTRÖM A. Faster fuelling is the key to faster migration[J]. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, 2019, 9(4): 288–289.
- [11] ALERSTAM T, HEDENSTROM A. The Development of Bird Migration Theory[J]. *Journal of Avian Biology*, 1998, 29(4): 343.
- [12] BEEKMAN J H, NOLET B A, KLAASSEN M. Skipping swans: fuelling rates and wind conditions determine differential use of migratory stopover sites of Bewick's Swans *Cygnus bewickii*[J]. *Ardea*, Citeseer, 2002, 90(3): 437–460.
- [13] GREEN M, ALERSTAM T, CLAUSEN P, 等. Dark-bellied Brent Geese *Branta bernicla bernicla*, as recorded by satellite telemetry, do not minimize flight distance during spring migration[J]. *Ibis*, Wiley Online Library, 2002, 144(1): 106–121.

- [14] PHILLIPS R A, SILK J R, CROXALL J P, 等. Summer distribution and migration of nonbreeding albatrosses: individual consistencies and implications for conservation[J]. Ecology, Wiley Online Library, 2005, 86(9): 2386–2396.
- [15] ALERSTAM T. Analysis and a theory of visible bird migration[J]. Oikos, JSTOR, 1978: 273–349.
- [16] ELKINS N. Weather and bird migration[J]. British Birds, 2005, 98: 238–256.
- [17] GWINNER E, SCHWABL H, SCHWABL-BENZINGER I. The migratory time program of the Garden Warbler: Is there compensation for interruptions?[J]. Ornis Scandinavica, JSTOR, 1992: 264–270.
- [18] VIEHMANN W. Orientierungsverhalten von Mönchsgrasmuecken (*Sylvia atricapilla*) in Frühjahr in Abhängigkeit der Wetterlage[J]. Vogelwarte, 1982, 31: 452–457.
- [19] KLAASSEN M, BEEKMAN J H, KONTIOKORPI J, 等. Migrating swans profit from favourable changes in wind conditions at low altitude[J]. Journal of Ornithology, Springer, 2004, 145(2): 142–151.
- [20] ERNI B, LIECHTI F, UNDERHILL L G, 等. Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe—a log-linear regression analysis[J]. Ardea, 2002, 90(1): 155–166.
- [21] FOX A D, GLAHDER C M, WALSH A J. Spring migration routes and timing of Greenland white-fronted geese—results from satellite telemetry[J]. Oikos, Wiley Online Library, 2003, 103(2): 415–425.
- [22] BECCIU P, PANUCCIO M, CATONI C, 等. Contrasting aspects of tailwinds and asymmetrical response to crosswinds in soaring migrants[J]. Behavioral ecology and sociobiology, Springer, 2018, 72(2): 28.
- [23] VANSTEELANT W M G, BOUTEN W, KLAASSEN R H G, 等. Regional and seasonal flight speeds of soaring migrants and the role of weather conditions at hourly and daily scales[J]. Journal of Avian Biology, 2015, 46(1): 25–39.
- [24] LIECHTI F, EHRICH D, BRUDERER B. Flight behaviour of white storks *Ciconia ciconia* on their migration over southern Israel[J]. Ardea, 1996, 84(1–2): 3–13.
- [25] BUTLER P J, BISHOP C M, WOAKES A J. Chasing a wild goose: posthatch growth of locomotor muscles and behavioural physiology of migration of an Arctic goose[G]//Avian Migration. Springer, 2003: 527–541.
- [26] DORKA V. Das jahres-und tageszeitliche Zugmuster von Kurz-und Langstreckenziehern nach Beobachtungen auf den Alpenpässen Cou/Bretolet (Wallis)[M]. Universitätsbibliothek Johann Christian Senckenberg, 2010.

- [27] ALERSTAM T. Bird migration[M]. Cambridge University Press, 1993.
- [28] KERLINGER P, MOORE F R. Atmospheric structure and avian migration[G]//Current ornithology. Springer, 1989: 109–142.
- [29] BRUDERER B. Three decades of tracking radar studies on bird migration in Europe and the Middle East[C]//Migrating Birds Know No Boundaries: Proceedings International Seminar on Birds and Flight Safety in the Middle East, Israel. 1999: 107–141.
- [30] ALERSTAM T. Flight by night or day? Optimal daily timing of bird migration[J]. Journal of Theoretical Biology, Elsevier, 2009, 258(4): 530–536.
- [31] GREEN A J, ELMBERG J. Ecosystem services provided by waterbirds[J]. Biological Reviews, Wiley Online Library, 2014, 89(1): 105–122.
- [32] ALERSTAM T. Bird migration Cambridge University Press[J]. Cambridge, UK, 1990.
- [33] BRAZIL M. Birds of East Asia: China, Taiwan, Korea, Japan, and Russia[M]. A&C Black, 2009.
- [34] CHEONG S, SUNG H-C, PARK S-R. A new method for sexing Oriental White Storks[J]. Journal of field ornithology, Wiley Online Library, 2007, 78(3): 329–333.
- [35] 曾昭文, 程岭, 李晓民. 我国东方白鹳种群现状及保护[J]. 国土与自然资源研究, 2003(1): 71–72.
- [36] 杨陈 [1, 周立志 [1, 朱文中, 等. 越冬地东方白鹳繁殖生物学的初步研究[D]. 2007.
- [37] COLLAR N J, ANDREEV A V, CHAN S, 等. Threatened birds of Asia: the BirdLife International red data book[M]. Birdlife International, Cambridge (RU), 2001.
- [38] ZHOU L, XUE W, ZHU S, 等. Foraging habitat use of oriental white stork (*Ciconia boyciana*) recently breeding in China[J]. Zoological science, BioOne, 2013, 30(7): 559–564.
- [39] 何芬奇, 田秀华, 于海玲, 等. 略论东方白鹳的繁殖分布区域的扩展[J]. 动物学杂志, 2008(6).
- [40] 周莉. 黄河三角洲自然保护区东方白鹳的繁殖保育[J]. 山东林业科技, 2006, 2: 38–39.
- [41] 王健, 李晓民. 黑龙江省洪河自然保护区东方白鹳巢址选择[J]. 東北林業大學學報, 東北林業大學學報編輯部, 2006, 34(1): 65–66.
- [42] 段玉宝, 田秀华, 朱书玉, 等. 黄河三角洲自然保护区东方白鹳的巢址利用[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 666–672.
- [43] 杨陈 [1, 周立志 [1, 朱文中, 等. 越冬地东方白鹳繁殖生物学的初步研究[D]. 2007.
- [44] 李晓民. 洪河自然保护区东方白鹳人工招引及种群恢复的研究[J]. 野生动物, 1995, 16(6): 15–18.
- [45] 段玉宝, 田秀华, 马建章, 等. 黄河三角洲东方白鹳繁殖期觅食栖息地的利用[J]. 生态学报, 2015, 35(8).

- [46] MIKHAILOV K E, SHIBNEV Y B. The threatened and near-threatened birds of northern Ussuriland, south-east Russia, and the role of the Bikin River basin in their conservation[J]. Bird Conservation International, Cambridge University Press, 1998, 8(2): 141–171.
- [47] VAN DEN BOSSCHE W, BERTHOLD P, DARMAN Y, 等. Satellite-tracking helps to discover stopover sites of the threatened Oriental White Stork (*Ciconia boyciana*)[J]. Microwave Telemetry, 2001, 2(1): 3–4.
- [48] 王禹石, 阮禄章, 黄鹏, 等. 鄱阳湖越冬季节东方白鹤栖息地选择及保护现状研究[J]. 安徽農業科學, 安徽農業科學編輯部, 2010, 38(14): 7376–7378.
- [49] 马雪峰, 田秀华, 何相宝, 等. 笼养东方白鹤越冬行为的研究[D]. 2006.
- [50] HUANG Y, ZHOU L. Screening and application of microsatellite markers for genetic diversity analysis of Oriental White Stork (*Ciconia boyciana*)[J]. Chinese Birds, 2011, 2(1): 33–38.
- [51] CHANGHU L, JIANPING W. Habitat and bird composition in winter in Sanjiang Nature Reserve, China[J]. FORKTAIL, 2000: 163–163.
- [52] BARTER M, CAO L, CHEN L, 等. Results of a survey for waterbirds in the lower Yangtze floodplain, China, in January-February 2004[J]. Forktail, ORIENTAL BIRD CLUB, 2005, 21: 1.
- [53] 邓学建, 王斌, 雷刚. 东洞庭湖冬季鸟类及其多样性分析[D]. 2001.
- [54] WILLIAMS M D. Autumn bird migration at Beidaihe, China, 1986–1990:(incorporating the report on China Cranewatch 1986)[M]. Beidaihe International Birdwatching Society, 2000.
- [55] SHIMAZAKI H, TAMURA M, DARMAN Y, 等. Network analysis of potential migration routes for Oriental White Storks (*Ciconia boyciana*)[J]. Ecological Research, 2004, 19(6): 683–698.
- [56] LIU H-Y, LIN Z-S, LIU H-Y. Response of oriental white storks *Ciconia boyciana* to the accumulative impact of anthropogenic habitat destruction and possible Allee effect[J]. Bird Conservation International, Cambridge University Press, 2008, 18(3): 292–300.
- [57] VAN DEN BOSSCHE W, BERTHOLD P, DARMAN Y, 等. Satellite-tracking helps to discover stopover sites of the threatened Oriental White Stork (*Ciconia boyciana*)[J]. Microwave Telemetry, 2001, 2(1): 3–4.
- [58] PENG W, ZHU B, DONG S, 等. Study on the Migration Route of Oriental White Stork in Autumn Tracked by Satellite[J]. .
- [59] Threatened birds of Asia: a project of the Bird Life Asia Partnership[M]. COLLAR N J. Cambridge: Bird Life International: 2001.
- [60] SHAMOUN-BARANES J, LIECHTI F, VANSTEELANT W M. Atmospheric conditions

- create freeways, detours and tailbacks for migrating birds[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, Springer, 2017, 203(6–7): 509–529.
- [61] BECCIU P, MENZ M H, AURBACH A, 等. Environmental effects on flying migrants revealed by radar[J]. *Ecography*, Wiley Online Library, 2019, 42(5): 942–955.
- [62] LIECHTI F. Birds: blowin' by the wind?[J]. *Journal of Ornithology*, Springer, 2006, 147(2): 202–211.
- [63] MELLONE U, KLAASSEN R H G, GARCÍA-RIPOLLÉS C, 等. Interspecific Comparison of the Performance of Soaring Migrants in Relation to Morphology, Meteorological Conditions and Migration Strategies[J]. *BOHRER G. PLoS ONE*, 2012, 7(7): e39833.
- [64] SAFI K, KRANSTAUBER B, WEINZIERL R, 等. Flying with the wind: scale dependency of speed and direction measurements in modelling wind support in avian flight[J]. *Movement Ecology*, Springer, 2013, 1(1): 4.
- [65] ROTICS S, KAATZ M, RESHEFF Y S, 等. The challenges of the first migration: movement and behaviour of juvenile vs. adult white storks with insights regarding juvenile mortality[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2016, 85(4): 938–947.
- [66] VIDAL-MATEO J, MELLONE U, LÓPEZ-LÓPEZ P, 等. Wind effects on the migration routes of trans-Saharan soaring raptors: geographical, seasonal, and interspecific variation[J]. *Current zoology*, Oxford University Press, 2016, 62(2): 89–97.
- [67] SHAMOUN-BARANES J, BAHARAD A, ALPERT P, 等. The effect of wind, season and latitude on the migration speed of white storks *Ciconia ciconia*, along the eastern migration route[J]. *Journal of Avian Biology*, 2003, 34(1): 97–104.
- [68] DESHOLM M, GILL R, BØVITH T, 等. Combining spatial modelling and radar to identify and protect avian migratory hot-spots[J]. *Current Zoology*, Oxford University Press Oxford, UK, 2014, 60(5): 680–691.
- [69] THORUP K, ALERSTAM T, HAKE M, 等. Traveling or stopping of migrating birds in relation to wind: an illustration for the osprey[J]. *Behavioral Ecology*, Oxford University Press, 2006, 17(3): 497–502.
- [70] RICHARDSON W. Timing of bird migration in relation to weather: updated review[G]//*Bird migration*. Springer, 1990: 78–101.
- [71] ALLEN P E, GOODRICH L J, BILDSTEIN K L. Within- and Among-Year Effects of Cold Fronts on Migrating Raptors at Hawk Mountain, Pennsylvania, 1934-1991[J]. *The Auk*, 1996, 113(2): 329–338.
- [72] MEYER S K, SPAAR R, BRUDERER B. To Cross the Sea or to Follow the Coast? Flight Directions and Behaviour of Migrating Raptors Approaching the Mediterranean Sea in

- Autumn[J]. *Behaviour*, 2000, 137(3): 379–399.
- [73] RUS A I, DUERR A E, MILLER T A, 等. Counterintuitive roles of experience and weather on migratory performance[J]. *The Auk: Ornithological Advances*, Oxford University Press, 2017, 134(3): 485–497.
- [74] NILSSON C, KLAASSEN R H G, ALERSTAM T. Differences in Speed and Duration of Bird Migration between Spring and Autumn[J]. *The American Naturalist*, 2013, 181(6): 837–845.
- [75] WANG X, CAO L, BYSYKATOVA I, 等. The Far East taiga forest unrecognized inhospitable terrain for migrating Arctic-nesting waterbirds?[J]. *Peerj*, 2018, 6: e4353.
- [76] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, 等. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–472.
- [77] KEMP M U, EMIEL VAN LOON E, SHAMOUN-BARANES J, 等. RNCEP: global weather and climate data at your fingertips[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(1): 65–70.
- [78] BENGTSSON D, AVRIL A, GUNNARSSON G, 等. Movements, Home-Range Size and Habitat Selection of Mallards during Autumn Migration[J]. *Plos One*, 2014, 9(6): e100764.
- [79] SHAMOUN-BARANES J, BAHARAD A, ALPERT P, 等. The effect of wind, season and latitude on the migration speed of white storks *Ciconia ciconia*, along the eastern migration route[J]. *Journal of Avian Biology*, 2003, 34(1): 97–104.
- [80] ŞEN Z, ALTUNKAYNAK A, ERDIK T. Wind velocity vertical extrapolation by extended power law[J]. *Advances in Meteorology*, Hindawi, 2012, 2012.
- [81] PARENT O, ILINCA A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review[J]. *Cold regions science and technology*, Elsevier, 2011, 65(1): 88–96.
- [82] HAKE M, KJELLÉN N, ALERSTAM T. Age-dependent migration strategy in honey buzzards *Pernis apivorus* tracked by satellite[J]. *Oikos*, Wiley Online Library, 2003, 103(2): 385–396.
- [83] MUELLER T, O'HARA R B, CONVERSE S J, 等. Social learning of migratory performance[J]. *Science*, American Association for the Advancement of Science, 2013, 341(6149): 999–1002.
- [84] SERGIO F, TANFERNA A, DE STEPHANIS R, 等. Individual improvements and selective mortality shape lifelong migratory performance[J]. *Nature*, Nature Publishing Group, 2014, 515(7527): 410–413.
- [85] ROTICS S, KAATZ M, TURJEMAN S, 等. Early arrival at breeding grounds: Causes, costs and a trade-off with overwintering latitude[J]. *Journal of Animal Ecology*, Wiley Online Library, 2018, 87(6): 1627–1638.
- [86] DUNNING JR J B. *CRC handbook of avian body masses*[M]. CRC press, 2007.

- [87] KOKKO H. Competition for Early Arrival in Migratory Birds[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1999, 68(5): 940–950.
- [88] LUTHIN C. Status of and Conservation Priorities for the Worlds Stork Species[J]. *Colonial Waterbirds*, 1987, 10(2): 181–202.
- [89] MØLLER A P. Phenotype-dependent arrival time and its consequences in a migratory bird[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1994, 35(2): 115–122.
- [90] SMITH R J, MOORE F R. Arrival timing and seasonal reproductive performance in a long-distance migratory landbird[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2005, 57(3): 231–239.
- [91] GUNNARSSON T G, GILL J A, ATKINSON P W, 等. Population-scale drivers of individual arrival times in migratory birds: Arrival times of migratory birds[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2006, 75(5): 1119–1127.
- [92] JANISZEWSKI T, MINIAS P, WOJCIECHOWSKI Z. Reproductive consequences of early arrival at breeding grounds in the White Stork *Ciconia ciconia*[J]. *Bird Study*, 2013, 60(2): 280–284.
- [93] MCINNES K L, ERWIN T A, BATHOLS J M. Global Climate Model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2011, 12(4): 325–333.
- [94] ROWE L, LUDWIG D, SCHLUTER D. Time, condition, and the seasonal decline of avian clutch size[J]. *The American Naturalist*, University of Chicago Press, 1994, 143(4): 698–722.
- [95] MCNAMARA J M, WELHAM R K, HOUSTON A I. The timing of migration within the context of an annual routine[J]. *Journal of Avian Biology*, JSTOR, 1998: 416–423.
- [96] PERRINS C M. The timing of birds 'breeding seasons[J]. *Ibis*, Wiley Online Library, 1970, 112(2): 242–255.
- [97] VAN NOORDWIJK A J, MCCLEERY R H, PERRINS C M. Selection for the timing of great tit breeding in relation to caterpillar growth and temperature[J]. *Journal of Animal Ecology*, JSTOR, 1995: 451–458.
- [98] KÖLZSCH A, MÜSKENS G J, KRUCKENBERG H, 等. Towards a new understanding of migration timing: slower spring than autumn migration in geese reflects different decision rules for stopover use and departure[J]. *Oikos*, Wiley Online Library, 2016, 125(10): 1496–1507.
- [99] NUIJTEN R J, KÖLZSCH A, VAN GILS J A, 等. The exception to the rule: retreating ice front makes Bewick's swans *Cygnus columbianus bewickii* migrate slower in spring than in autumn[J]. *Journal of Avian Biology*, Wiley Online Library, 2014, 45(2): 113–122.
- [100] BATBAYAR N. Breeding and migration ecology of bar-headed goose *Anser indicus* and swan

- goose *Anser cygnoides* in Asia[J]. 2013.
- [101] LI X, WANG X, FANG L, 等. Annual migratory patterns of Far East Greylag Geese (*Anser anser rubrirostris*) revealed by GPS tracking[J]. *Integrative Zoology*, Wiley Online Library, 2020, 15(3): 213–223.
- [102] ALERSTAM T, HEDENSTRÖM A, ÅKESSON S. Long-Distance Migration: Evolution and Determinants[J]. *Oikos*, 2003, 103(2): 247–260.
- [103] SOMVEILLE M, RODRIGUES A S, MANICA A. Why do birds migrate? A macroecological perspective[J]. *Global Ecology and Biogeography*, Wiley Online Library, 2015, 24(6): 664–674.
- [104] ORO D, GENOVART M, TAVECCHIA G, 等. Ecological and evolutionary implications of food subsidies from humans[J]. *Ecology letters*, Wiley Online Library, 2013, 16(12): 1501–1514.
- [105] BOTH C, VISSER M E. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird[J]. *Nature*, Nature Publishing Group, 2001, 411(6835): 296–298.
- [106] HÜPPOP O, PPOP K H. North Atlantic Oscillation and timing of spring migration in birds[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, The Royal Society, 2003, 270(1512): 233–240.
- [107] MARRA P P, FRANCIS C M, MULVIHILL R S, 等. The influence of climate on the timing and rate of spring bird migration[J]. *Oecologia*, Springer, 2005, 142(2): 307–315.
- [108] FRANCISCO S T. Wintering white storks (*Ciconia ciconia*) in South West Spain in the years 1991 and 1992[J]. *Die Vogelwarte*, 1995, 38: 41–45.
- [109] ARIZAGA J, RESANO-MAYOR J, VILLANÚA D, 等. Importance of artificial stopover sites through avian migration flyways: A landfill-based assessment with the White Stork *Ciconia ciconia*[J]. *Ibis*, Wiley Online Library, 2018, 160(3): 542–553.
- [110] COLLAR N J, ANDREEV A V, CHAN S, 等. Threatened birds of Asia: The birdlife international red data book. BirdLife international[J]. Cambridge, UK, 2001.
- [111] PENG W, ZHU B, DONG S, 等. Study on the Migration Route of Oriental White Stork in Autumn Tracked by Satellite[J]. .
- [112] SHIMAZAKI H, TAMURA M, DARMAN Y, 等. Network analysis of potential migration routes for Oriental White Storks (*Ciconia boyciana*)[J]. *Ecological Research*, Springer, 2004, 19(6): 683–698.
- [113] KOELZSCH A, MUESKENS G J D M, KRUCKENBERG H, 等. Towards a new understanding of migration timing: slower spring than autumn migration in geese reflects different decision rules for stopover use and departure[J]. *Oikos*, 2016, 125(10): 1496–1507.

- [114] VISSER M E, PERDECK A C, VAN BALEN J H, 等. Climate change leads to decreasing bird migration distances[J]. *Global Change Biology*, Wiley Online Library, 2009, 15(8): 1859–1865.
- [115] VISSER M E, BOTH C, LAMBRECHTS M M. Global climate change leads to mistimed avian reproduction[J]. *Advances in ecological research*, Elsevier, 2004, 35: 89–110.
- [116] VISSER M E, BOTH C. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, The Royal Society London, 2005, 272(1581): 2561–2569.
- [117] BOTH C, BOUWHUIS S, LESSELLS C M, 等. Climate change and population declines in a long-distance migratory bird[J]. *Nature*, Nature Publishing Group, 2006, 441(7089): 81–83.
- [118] GWINNER E. Circannual clocks in avian reproduction and migration[J]. *Ibis*, Wiley Online Library, 1996, 138(1): 47–63.
- [119] LEMOINE N, BÖHNING-GAESE K. Potential impact of global climate change on species richness of long-distance migrants[J]. *Conservation Biology*, Wiley Online Library, 2003, 17(2): 577–586.
- [120] COPPACK T, BOTH C. Predicting life-cycle adaptation of migratory birds to global climate change[J]. *Ardea*, BioOne, 2002, 55(1–2): 369–378.
- [121] CHENG Y, FIEDLER W, WIKELSKI M, 等. 《Closer-to-home》 strategy benefits juvenile survival in a long-distance migratory bird[J]. *Ecology and Evolution*, 2019.
- [122] HUDSON P J, RANDS M R. Ecology and management of gamebirds[M]. BSP Professional, 1988.
- [123] 段玉宝, 田秀华, 马建章, 等. 黄河三角洲东方白鹳繁殖期觅食栖息地的利用[J]. *生态学报*, 2015, 35(8).
- [124] 谢鹏. 东方白鹳 (*Ciconia boyciana*) 不同时期栖息地生境比较研究[D]. 东北林业大学, 2018.
- [125] 雷倩, 李金亚, 王强, 等. 东方白鹳幼鸟在繁殖区生境选择的跟踪研究[J]. *生态学报*, (9).
- [126] 刘红玉, 李兆富, 李晓民. 湿地景观破碎化对东方白鹳栖息地的影响——以三江平原东北部区域为例[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 817–823.
- [127] 杜林芳. 天津市东方白鹳栖息地变化研究[D]. 北京林业大学, 2010.
- [128] 高晓云. 七里海湿地保护管理对策研究[D]. 2004.

附录 A 追踪个体迁徙参数表

表 A.1 东方白鹳长距离春季和秋季迁徙参数表（停歇地定义为 48 小时）

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os001-A	2018/10/28	2018/11/12	2588.98	14.50	178.55	2.38	12.12	213.61	1294.49	1	秋季
os002-A	2018/10/28	2018/12/7	2532.93	39.50	64.12	22.00	17.50	144.74	1266.46	1	秋季
os003-A	2018/10/28	2018/11/22	2637.77	25.29	104.30	10.54	14.75	178.83	879.26	2	秋季
os004-A	2018/10/28	2018/11/13	2505.19	15.25	164.27	0.00	15.25	164.27	2505.19	0	秋季
os005-A	2018/10/28	2018/11/14	2475.46	16.17	153.09	0.00	16.17	153.09	2475.46	0	秋季
os006-A	2018/11/3	2018/12/16	2968.89	43.00	69.04	18.50	24.50	121.18	1484.44	1	秋季
os007-A	2018/11/3	2018/12/13	3028.12	39.25	77.15	22.00	17.25	175.54	1009.37	2	秋季
os008-A	2018/10/29	2018/11/15	2582.91	17.21	150.08	2.92	14.29	180.75	1291.45	1	秋季
os009-A	2018/10/31	2018/11/19	2808.04	18.71	150.08	0.00	18.71	150.08	2808.04	0	秋季
os010-A	2018/10/21	2018/11/21	2894.77	31.37	92.28	17.87	13.50	214.43	578.95	4	秋季
os011-A	2018/11/3	2018/12/17	2955.74	43.23	68.37	23.61	19.62	150.65	985.25	2	秋季
os012-A	2018/10/28	2018/11/22	2866.18	24.41	117.42	12.25	12.16	235.71	716.54	3	秋季
os013-A	2018/11/4	2018/12/17	2913.76	43.20	67.45	24.83	18.37	158.62	1456.88	1	秋季
os014-A	2018/11/4	2018/12/12	2846.53	38.33	74.26	24.39	13.94	204.20	711.63	3	秋季
os015-A	2018/10/14	2018/11/22	3258.03	39.24	83.03	24.99	14.25	228.63	651.61	4	秋季
os016-A	2018/10/28	2018/11/15	2974.00	17.38	171.12	2.67	14.71	202.18	1487.00	1	秋季
os017-A	2018/10/16	2018/11/3	3070.28	18.12	169.44	5.69	12.43	247.01	1535.14	1	秋季
os018-A	2018/10/28	2018/12/17	2841.48	49.22	57.73	33.63	15.59	182.26	947.16	2	秋季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os019-A	2018/10/29	2018/12/30	3091.94	62.10	49.79	41.69	20.41	151.49	1030.65	2	秋季
os020-A	2018/10/10	2018/12/4	3086.50	55.01	56.11	44.27	10.74	287.38	617.30	4	秋季
os021-A	2018/10/16	2018/11/12	3095.61	27.17	113.93	10.51	16.66	185.81	773.90	3	秋季
os022-A	2018/10/28	2018/11/14	2624.88	16.24	161.63	3.03	13.21	198.70	1312.44	1	秋季
os023-A	2018/10/28	2018/11/14	2933.97	16.30	180.00	0.00	16.30	180.00	2933.97	0	秋季
os024-A	2018/10/28	2018/11/22	3117.37	24.19	128.87	9.54	14.65	212.79	1039.12	2	秋季
os025-A	2018/10/28	2018/12/5	2826.52	37.12	76.15	25.04	12.08	233.98	706.63	3	秋季
os026-A	2018/10/21	2018/11/22	2966.05	32.23	92.03	17.53	14.70	201.77	988.68	2	秋季
os001-S	2019/4/1	2019/5/7	2625.55	36.21	72.51	27.83	8.38	313.31	1312.78	1	春季
os002-S	2019/4/1	2019/4/14	2815.34	13.21	213.12	2.75	10.46	269.15	1407.67	1	春季
os003-S	2019/4/1	2019/4/15	3285.73	14.42	227.86	0.00	14.42	227.86	3285.73	0	春季
os004-S	2019/4/6	2019/6/19	2965.56	74.21	39.96	63.25	10.96	270.58	988.52	2	春季
os005-S	2019/3/7	2019/3/20	2678.92	12.75	210.11	0.00	12.75	210.11	2678.92	0	春季
os006-S	2019/4/3	2019/4/14	2733.56	11.17	244.72	2.42	8.75	312.41	1366.78	1	春季
os007-S	2019/3/15	2019/3/25	2588.44	10.25	252.53	3.42	6.83	378.98	1294.22	1	春季
os008-S	2019/3/10	2019/3/25	2536.88	15.33	165.48	0.00	15.33	165.48	2536.88	0	春季
os009-S	2019/3/10	2019/3/25	2537.97	14.74	172.18	4.62	10.12	250.79	1268.98	1	春季
os010-S	2019/3/4	2019/4/2	2945.67	29.17	100.98	17.75	11.42	257.94	736.42	3	春季
os011-S	2019/4/5	2019/5/9	2983.62	34.08	87.55	25.89	8.19	364.30	1491.81	1	春季
os012-S	2019/3/4	2019/4/12	3186.22	39.27	81.14	29.67	9.60	331.90	1593.11	1	春季
os013-S	2019/3/23	2019/9/1	3379.84	162.11	20.85	138.20	23.91	141.36	844.96	3	春季
os014-S	2019/3/12	2019/4/29	3710.51	48.24	76.92	36.81	11.43	324.63	927.63	3	春季
os015-S	2019/3/15	2019/5/14	3097.31	60.12	51.52	52.08	8.04	385.24	1548.65	1	春季
os016-S	2019/3/18	2019/4/16	3541.86	29.15	121.50	17.25	11.90	297.64	1180.62	2	春季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os017-S	2019/5/22	2019/6/4	2599.80	13.12	198.16	0.00	13.12	198.16	2599.80	0	春季
os018-S	2019/4/17	2019/4/29	2992.06	12.19	245.45	0.00	12.19	245.45	2992.06	0	春季
os019-S	2019/3/30	2019/4/18	2762.67	18.92	146.02	7.63	11.29	244.70	920.89	2	春季
os020-S	2019/4/1	2019/5/4	3379.83	33.21	101.77	23.55	9.66	349.88	1126.61	2	春季
os021-S	2019/6/30	2019/8/19	2508.57	50.22	49.95	39.44	10.78	232.71	836.19	2	春季
os022-S	2019/3/19	2019/5/7	2840.43	49.22	57.71	40.63	8.59	330.67	1420.21	1	春季
os023-S	2019/3/31	2019/4/12	2839.25	11.43	248.40	3.79	7.64	371.63	1419.62	1	春季
os024-S	2019/4/24	2019/6/18	3185.31	54.82	58.10	41.03	13.79	230.99	1592.65	1	春季
os025-S	2019/3/3	2019/4/26	3002.40	53.16	56.48	42.28	10.88	275.96	750.60	3	春季
os026-S	2019/3/10	2019/5/4	3061.38	55.24	55.42	43.83	11.41	268.31	1530.69	1	春季

注：编号列中 A 表示“秋季”，S 表示“春季”，以下同。

表 A.2 东方白鹳短距离春季和秋季迁徙参数表 (停歇地定义为 48 小时)

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os028-A	2017/10/17	2017/10/29	1608.95	12.17	132.21	6.29	5.88	273.63	536.32	2	秋季
os029-A	2017/10/18	2017/11/10	1565.71	23.37	67.00	15.75	7.62	205.47	782.86	1	秋季
os030-A	2017/10/17	2017/11/16	1406.02	30.37	46.30	26.29	4.08	344.61	468.67	2	秋季
os031-A	2018/11/3	2018/11/11	1185.12	7.25	163.46	0.00	7.25	163.46	1185.12	0	秋季
os032-A	2018/11/3	2018/11/12	1250.72	8.46	147.84	0.00	8.46	147.84	1250.72	0	秋季
os033-A	2017/10/10	2017/12/18	1653.60	69.17	23.91	58.83	10.34	159.92	330.72	4	秋季
os034-A	2016/10/18	2016/12/14	1888.00	56.87	33.20	28.12	28.75	65.67	472.00	3	秋季
os035-A	2016/10/20	2016/12/15	1801.53	56.00	32.17	42.71	13.29	135.56	300.25	5	秋季
os006-A	2016/10/23	2016/11/15	1874.15	22.37	83.78	7.63	14.74	127.15	624.72	2	秋季
os036-A	2018/11/3	2018/11/28	1669.58	24.13	69.19	11.88	12.25	136.29	834.79	1	秋季
os037-A	2018/10/29	2018/12/6	2156.09	38.27	56.34	28.45	9.82	219.56	718.70	2	秋季
os038-A	2018/10/28	2018/11/2	1006.69	4.38	229.84	0.00	4.38	229.84	1006.69	0	秋季
os039-A	2018/11/3	2018/11/15	1302.91	11.22	116.12	4.78	6.44	202.32	651.46	1	秋季
os027-S	2019/4/28	2019/5/2	1662.77	4.46	372.82	0.00	4.46	372.82	1662.77	0	春季
os031-S	2019/3/17	2019/4/15	1026.34	29.21	35.14	26.00	3.21	319.73	342.11	2	春季
os032-S	2019/4/12	2019/4/15	1167.06	3.21	363.57	0.00	3.21	363.57	1167.06	0	春季
os034-S	2017/5/8	2017/5/15	1588.86	6.63	239.65	0.00	6.63	239.65	1588.86	0	春季
os035-S	2017/4/11	2017/4/24	1990.61	13.25	150.23	4.67	8.58	232.01	995.30	1	春季
os006-S	2017/4/22	2017/4/28	1604.44	6.42	249.91	0.00	6.42	249.91	1604.44	0	春季
os036-S	2019/7/16	2019/7/22	1329.49	6.33	210.03	0.00	6.33	210.03	1329.49	0	春季
os037-S	2019/4/5	2019/4/15	2312.85	10.23	226.09	0.00	10.23	226.09	2312.85	0	春季
os039-S	2019/4/3	2019/4/24	1121.58	21.28	52.71	17.66	3.62	309.83	280.39	3	春季

表 A.3 东方白鹳长距离春季和秋季迁徙参数表（停歇地定义为 24 小时）

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时 间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os001-A	2018/10/28	2018/11/12	2587.63	14.50	178.46	3.88	10.62	243.66	862.54	2	秋季
os002-A	2018/10/28	2018/12/7	2511.14	39.50	63.57	25.25	14.25	176.22	627.78	3	秋季
os003-A	2018/10/28	2018/11/22	2637.77	25.29	104.30	10.54	14.75	178.83	879.26	2	秋季
os004-A	2018/10/28	2018/11/13	2474.99	15.25	162.29	4.88	10.37	238.67	618.75	3	秋季
os005-A	2018/10/28	2018/11/14	2475.46	16.17	153.09	0.00	16.17	153.09	2475.46	0	秋季
os006-A	2018/11/3	2018/12/16	2968.89	43.00	69.04	18.50	24.50	121.18	1484.44	1	秋季
os007-A	2018/11/3	2018/12/13	3015.07	39.25	76.82	24.37	14.88	202.63	603.01	4	秋季
os008-A	2018/10/29	2018/11/15	2582.91	17.21	150.08	2.92	14.29	180.75	1291.45	1	秋季
os009-A	2018/10/31	2018/11/19	2808.04	18.71	150.08	0.00	18.71	150.08	2808.04	0	秋季
os010-A	2018/10/21	2018/11/21	2891.06	31.37	92.16	19.42	11.95	241.93	481.84	5	秋季
os011-A	2018/11/3	2018/12/17	2924.69	43.23	67.65	28.85	14.38	203.39	487.45	5	秋季
os012-A	2018/10/28	2018/11/22	2850.30	24.41	116.77	13.98	10.43	273.28	570.06	4	秋季
os013-A	2018/11/4	2018/12/17	2884.96	43.20	66.78	28.29	14.91	193.49	721.24	3	秋季
os014-A	2018/11/4	2018/12/12	2846.53	38.33	74.26	24.39	13.94	204.20	711.63	3	秋季
os015-A	2018/10/14	2018/11/22	3258.03	39.24	83.03	24.99	14.25	228.63	651.61	4	秋季
os016-A	2018/10/28	2018/11/15	2968.25	17.38	170.79	3.83	13.55	219.06	989.42	2	秋季
os017-A	2018/10/16	2018/11/3	3070.28	18.12	169.44	5.69	12.43	247.01	1535.14	1	秋季
os018-A	2018/10/28	2018/12/17	2824.36	49.22	57.38	35.39	13.83	204.22	706.09	3	秋季
os019-A	2018/10/29	2018/12/30	3001.40	62.10	48.33	46.93	15.17	197.85	500.23	5	秋季
os020-A	2018/10/10	2018/12/4	3086.50	55.01	56.11	44.27	10.74	287.38	617.30	4	秋季
os021-A	2018/10/16	2018/11/12	3019.59	27.17	111.14	12.25	14.92	202.39	603.92	4	秋季
os022-A	2018/10/28	2018/11/14	2624.88	16.24	161.63	3.03	13.21	198.70	1312.44	1	秋季
os023-A	2018/10/28	2018/11/14	2924.87	16.30	179.44	3.00	13.30	219.92	974.96	2	秋季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os024-A	2018/10/28	2018/11/22	3099.63	24.19	128.14	12.97	11.22	276.26	619.93	4	秋季
os025-A	2018/10/28	2018/12/5	2811.17	37.12	75.73	26.71	10.41	270.05	562.23	4	秋季
os026-A	2018/10/21	2018/11/22	2945.40	32.23	91.39	19.27	12.96	227.27	736.35	3	秋季
os001-S	2019/4/1	2019/5/7	2615.37	36.21	72.23	29.29	6.92	377.94	871.79	2	春季
os002-S	2019/4/1	2019/4/14	2815.34	13.21	213.12	2.75	10.46	269.15	1407.67	1	春季
os003-S	2019/4/1	2019/4/15	3285.73	14.42	227.86	0.00	14.42	227.86	3285.73	0	春季
os004-S	2019/4/6	2019/6/19	2929.63	74.21	39.48	64.87	9.34	313.66	732.41	3	春季
os005-S	2019/3/7	2019/3/20	2678.92	12.75	210.11	0.00	12.75	210.11	2678.92	0	春季
os006-S	2019/4/3	2019/4/14	2733.56	11.17	244.72	2.42	8.75	312.41	1366.78	1	春季
os007-S	2019/3/15	2019/3/25	2588.44	10.25	252.53	3.42	6.83	378.98	1294.22	1	春季
os008-S	2019/3/10	2019/3/25	2536.88	15.33	165.48	0.00	15.33	165.48	2536.88	0	春季
os009-S	2019/3/10	2019/3/25	2530.14	14.74	171.65	6.00	8.74	289.49	843.38	2	春季
os010-S	2019/3/4	2019/4/2	2927.31	29.17	100.35	21.04	8.13	360.06	487.88	5	春季
os011-S	2019/4/5	2019/5/9	2983.62	34.08	87.55	25.89	8.19	364.30	1491.81	1	春季
os012-S	2019/3/4	2019/4/12	3184.52	39.27	81.09	31.29	7.98	399.06	1061.51	2	春季
os013-S	2019/3/23	2019/9/1	3342.45	162.11	20.62	141.72	20.39	163.93	557.07	5	春季
os014-S	2019/3/12	2019/4/29	3710.51	48.24	76.92	36.81	11.43	324.63	927.63	3	春季
os015-S	2019/3/15	2019/5/14	3097.31	60.12	51.52	52.08	8.04	385.24	1548.65	1	春季
os016-S	2019/3/18	2019/4/16	3335.48	29.15	114.42	20.90	8.25	404.30	667.10	4	春季
os017-S	2019/5/22	2019/6/4	2545.20	13.12	193.99	5.51	7.61	334.45	636.30	3	春季
os018-S	2019/4/17	2019/4/29	2983.46	12.19	244.75	1.65	10.54	283.06	1491.73	1	春季
os019-S	2019/3/30	2019/4/18	2762.67	18.92	146.02	7.63	11.29	244.70	920.89	2	春季
os020-S	2019/4/1	2019/5/4	3379.83	33.21	101.77	23.55	9.66	349.88	1126.61	2	春季
os021-S	2019/6/30	2019/8/19	2483.36	50.22	49.45	41.11	9.11	272.60	620.84	3	春季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时 间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位 点数	季节
os022-S	2019/3/19	2019/5/7	2840.43	49.22	57.71	40.63	8.59	330.67	1420.21	1	春季
os023-S	2019/3/31	2019/4/12	2796.98	11.43	244.71	5.28	6.15	454.79	932.33	2	春季
os024-S	2019/4/24	2019/6/18	3162.70	54.82	57.69	42.68	12.14	260.52	1054.23	2	春季
os025-S	2019/3/3	2019/4/26	2972.56	53.16	55.92	45.46	7.70	386.05	495.43	5	春季
os026-S	2019/3/10	2019/5/4	2976.22	55.24	53.88	44.90	10.34	287.84	992.07	2	春季

表 A.4 东方白鹳短距离春季和秋季迁徙参数表（停歇地定义为 24 小时）

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时 间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位点数	季节
os028-A	2017/10/17	2017/10/29	1608.95	12.17	132.21	6.29	5.88	273.63	536.32	2	秋季
os029-A	2017/10/18	2017/11/10	1560.76	23.37	66.78	18.92	4.45	350.73	390.19	3	秋季
os030-A	2017/10/17	2017/11/16	1406.02	30.37	46.30	26.29	4.08	344.61	468.67	2	秋季
os031-A	2018/11/3	2018/11/11	1185.12	7.25	163.46	0.00	7.25	163.46	1185.12	0	秋季
os032-A	2018/11/3	2018/11/12	1244.55	8.46	147.11	1.62	6.84	181.95	622.27	1	秋季
os033-A	2017/10/10	2017/12/18	1621.12	69.17	23.44	62.12	7.05	229.95	231.59	6	秋季
os034-A	2016/10/18	2016/12/14	1888.00	56.87	33.20	28.12	28.75	65.67	472.00	3	秋季
os035-A	2016/10/20	2016/12/15	1801.53	56.00	32.17	42.71	13.29	135.56	300.25	5	秋季
os006-A	2016/10/23	2016/11/15	1874.15	22.37	83.78	7.63	14.74	127.15	624.72	2	秋季
os036-A	2018/11/3	2018/11/28	1660.24	24.13	68.80	13.50	10.63	156.18	553.41	2	秋季
os037-A	2018/10/29	2018/12/6	2156.09	38.27	56.34	28.45	9.82	219.56	718.70	2	秋季
os038-A	2018/10/28	2018/11/2	1006.69	4.38	229.84	0.00	4.38	229.84	1006.69	0	秋季
os039-A	2018/11/3	2018/11/15	1302.91	11.22	116.12	4.78	6.44	202.32	651.46	1	秋季
os027-S	2019/4/28	2019/5/2	1662.77	4.46	372.82	0.00	4.46	372.82	1662.77	0	春季
os031-S	2019/3/17	2019/4/15	1026.34	29.21	35.14	26.00	3.21	319.73	342.11	2	春季
os032-S	2019/4/12	2019/4/15	1167.06	3.21	363.57	0.00	3.21	363.57	1167.06	0	春季
os034-S	2017/5/8	2017/5/15	1588.86	6.63	239.65	0.00	6.63	239.65	1588.86	0	春季
os035-S	2017/4/11	2017/4/24	1990.61	13.25	150.23	4.67	8.58	232.01	995.30	1	春季
os006-S	2017/4/22	2017/4/28	1601.74	6.42	249.49	1.50	4.92	325.56	800.87	1	春季
os036-S	2019/7/16	2019/7/22	1329.49	6.33	210.03	0.00	6.33	210.03	1329.49	0	春季
os037-S	2019/4/5	2019/4/15	2281.81	10.23	223.05	3.47	6.76	337.55	760.60	2	春季
os039-S	2019/4/3	2019/4/24	1104.22	21.28	51.89	19.44	1.84	600.12	220.84	4	春季

表 A.5 东方白鹳长距离春季和秋季迁徙参数表（停歇地定义为 12 小时）

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时 间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位点数	季节
os001-A	2018/10/28	2018/11/12	2585.89	14.50	178.34	4.38	10.12	255.52	646.47	3	秋季
os002-A	2018/10/28	2018/12/7	2509.86	39.50	63.54	26.96	12.54	200.15	358.55	6	秋季
os003-A	2018/10/28	2018/11/22	2600.90	25.29	102.84	14.58	10.71	242.85	288.99	8	秋季
os004-A	2018/10/28	2018/11/13	2473.38	15.25	162.19	6.62	8.63	286.60	353.34	6	秋季
os005-A	2018/10/28	2018/11/14	2475.46	16.17	153.09	0.00	16.17	153.09	2475.46	0	秋季
os006-A	2018/11/3	2018/12/16	2968.89	43.00	69.04	18.50	24.50	121.18	1484.44	1	秋季
os007-A	2018/11/3	2018/12/13	3015.07	39.25	76.82	24.37	14.88	202.63	603.01	4	秋季
os008-A	2018/10/29	2018/11/15	2568.87	17.21	149.27	6.21	11.00	233.53	366.98	6	秋季
os009-A	2018/10/31	2018/11/19	2803.25	18.71	149.83	1.50	17.21	162.88	934.42	2	秋季
os010-A	2018/10/21	2018/11/21	2875.57	31.37	91.67	21.79	9.58	300.16	287.56	9	秋季
os011-A	2018/11/3	2018/12/17	2885.69	43.23	66.75	35.40	7.83	368.54	192.38	14	秋季
os012-A	2018/10/28	2018/11/22	2839.02	24.41	116.31	17.56	6.85	414.46	283.90	9	秋季
os013-A	2018/11/4	2018/12/17	2846.74	43.20	65.90	36.53	6.67	426.80	177.92	15	秋季
os014-A	2018/11/4	2018/12/12	2774.81	38.33	72.39	33.00	5.33	520.60	173.43	15	秋季
os015-A	2018/10/14	2018/11/22	3210.39	39.24	81.81	29.50	9.74	329.61	267.53	11	秋季
os016-A	2018/10/28	2018/11/15	2933.43	17.38	168.78	10.67	6.71	437.17	225.65	12	秋季
os017-A	2018/10/16	2018/11/3	3027.95	18.12	167.11	10.86	7.26	417.07	302.79	9	秋季
os018-A	2018/10/28	2018/12/17	2792.62	49.22	56.74	40.47	8.75	319.16	253.87	10	秋季
os019-A	2018/10/29	2018/12/30	2975.09	62.10	47.91	51.56	10.54	282.27	247.92	11	秋季
os020-A	2018/10/10	2018/12/4	3034.84	55.01	55.17	48.81	6.20	489.49	252.90	11	秋季
os021-A	2018/10/16	2018/11/12	2978.32	27.17	109.62	18.78	8.39	354.98	212.74	13	秋季
os022-A	2018/10/28	2018/11/14	2583.43	16.24	159.08	10.03	6.21	416.01	215.29	11	秋季
os023-A	2018/10/28	2018/11/14	2892.91	16.30	177.48	9.24	7.06	409.76	222.53	12	秋季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 间(天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位数	季节
os024-A	2018/10/28	2018/11/22	3083.09	24.19	127.45	16.85	7.34	420.04	280.28	10	秋季
os025-A	2018/10/28	2018/12/5	2807.47	37.12	75.63	29.69	7.43	377.86	280.75	9	秋季
os026-A	2018/10/21	2018/11/22	2891.97	32.23	89.73	26.97	5.26	549.80	192.80	14	秋季
os001-S	2019/4/1	2019/5/7	2611.32	36.21	72.12	29.92	6.29	415.15	652.83	3	春季
os002-S	2019/4/1	2019/4/14	2811.28	13.21	212.81	4.50	8.71	322.76	562.26	4	春季
os003-S	2019/4/1	2019/4/15	3281.36	14.42	227.56	2.37	12.05	272.31	656.27	4	春季
os004-S	2019/4/6	2019/6/19	2929.27	74.21	39.47	65.42	8.79	333.25	585.85	4	春季
os005-S	2019/3/7	2019/3/20	2678.92	12.75	210.11	0.00	12.75	210.11	2678.92	0	春季
os006-S	2019/4/3	2019/4/14	2732.01	11.17	244.58	3.09	8.08	338.12	910.67	2	春季
os007-S	2019/3/15	2019/3/25	2588.44	10.25	252.53	3.42	6.83	378.98	1294.22	1	春季
os008-S	2019/3/10	2019/3/25	2534.61	15.33	165.34	0.54	14.79	171.37	1267.31	1	春季
os009-S	2019/3/10	2019/3/25	2530.14	14.74	171.65	6.00	8.74	289.49	843.38	2	春季
os010-S	2019/3/4	2019/4/2	2917.26	29.17	100.01	23.46	5.71	510.90	291.73	9	春季
os011-S	2019/4/5	2019/5/9	2964.98	34.08	87.00	29.13	4.95	598.99	423.57	6	春季
os012-S	2019/3/4	2019/4/12	3154.16	39.27	80.32	33.86	5.41	583.02	450.59	6	春季
os013-S	2019/3/23	2019/9/1	3324.75	162.11	20.51	144.78	17.33	191.85	302.25	10	春季
os014-S	2019/3/12	2019/4/29	3707.73	48.24	76.86	38.56	9.68	383.03	529.68	6	春季
os015-S	2019/3/15	2019/5/14	3075.31	60.12	51.15	54.68	5.44	565.31	512.55	5	春季
os016-S	2019/3/18	2019/4/16	3167.53	29.15	108.66	24.03	5.12	618.66	316.75	9	春季
os017-S	2019/5/22	2019/6/4	2506.30	13.12	191.03	10.25	2.87	873.28	227.85	10	春季
os018-S	2019/4/17	2019/4/29	2973.65	12.19	243.94	4.76	7.43	400.22	424.81	6	春季
os019-S	2019/3/30	2019/4/18	2714.98	18.92	143.50	12.81	6.11	444.35	246.82	10	春季
os020-S	2019/4/1	2019/5/4	3351.31	33.21	100.91	27.12	6.09	550.30	372.37	8	春季
os021-S	2019/6/30	2019/8/19	2439.59	50.22	48.58	45.08	5.14	474.63	243.96	9	春季

附录 A 追踪个体迁徙参数表

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位点数	季节
os022-S	2019/3/19	2019/5/7	2795.82	49.22	56.80	45.55	3.67	761.80	279.58	9	春季
os023-S	2019/3/31	2019/4/12	2779.31	11.43	243.16	7.17	4.26	652.42	463.22	5	春季
os024-S	2019/4/24	2019/6/18	3115.57	54.82	56.83	46.83	7.99	389.93	311.56	9	春季
os025-S	2019/3/3	2019/4/26	2961.38	53.16	55.71	48.59	4.57	648.00	269.22	10	春季
os026-S	2019/3/10	2019/5/4	2953.02	55.24	53.46	48.47	6.77	436.19	328.11	8	春季

表 A.6 东方白鹳短距离春季和秋季迁徙参数表（停歇地定义为 12 小时）

编号	开始时间	结束时间	迁徙距离 (千米)	迁徙持续时 间 (天)	迁徙速度 (千米/天)	停歇时间 (天)	飞行时间 (天)	飞行速度 (千米/天)	步长 (千米)	停歇位点数	季节
os028-A	2017/10/17	2017/10/29	1606.06	12.17	131.97	8.25	3.92	409.71	267.68	5	秋季
os029-A	2017/10/18	2017/11/10	1557.05	23.37	66.63	20.25	3.12	499.05	259.51	5	秋季
os030-A	2017/10/17	2017/11/16	1405.69	30.37	46.29	26.92	3.45	407.45	351.42	3	秋季
os031-A	2018/11/3	2018/11/11	1185.12	7.25	163.46	0.00	7.25	163.46	1185.12	0	秋季
os032-A	2018/11/3	2018/11/12	1239.66	8.46	146.53	3.54	4.92	251.96	247.93	4	秋季
os033-A	2017/10/10	2017/12/18	1619.22	69.17	23.41	63.29	5.88	275.38	179.91	8	秋季
os034-A	2016/10/18	2016/12/14	1888.00	56.87	33.20	28.12	28.75	65.67	472.00	3	秋季
os035-A	2016/10/20	2016/12/15	1801.53	56.00	32.17	42.71	13.29	135.56	300.25	5	秋季
os006-A	2016/10/23	2016/11/15	1874.15	22.37	83.78	7.63	14.74	127.15	624.72	2	秋季
os036-A	2018/11/3	2018/11/28	1656.54	24.13	68.65	15.42	8.71	190.19	276.09	5	秋季
os037-A	2018/10/29	2018/12/6	2116.82	38.27	55.31	30.70	7.57	279.63	352.80	5	秋季
os038-A	2018/10/28	2018/11/2	997.32	4.38	227.70	2.44	1.94	514.08	199.46	4	秋季
os039-A	2018/11/3	2018/11/15	1287.49	11.22	114.75	9.00	2.22	579.95	160.94	7	秋季
os027-S	2019/4/28	2019/5/2	1662.77	4.46	372.82	0.00	4.46	372.82	1662.77	0	春季
os031-S	2019/3/17	2019/4/15	1017.89	29.21	34.85	26.63	2.58	394.53	254.47	3	春季
os032-S	2019/4/12	2019/4/15	1166.57	3.21	363.42	0.54	2.67	436.92	583.28	1	春季
os034-S	2017/5/8	2017/5/15	1588.86	6.63	239.65	0.00	6.63	239.65	1588.86	0	春季
os035-S	2017/4/11	2017/4/24	1988.01	13.25	150.04	5.25	8.00	248.50	662.67	2	春季
os006-S	2017/4/22	2017/4/28	1601.74	6.42	249.49	1.50	4.92	325.56	800.87	1	春季
os036-S	2019/7/16	2019/7/22	1326.66	6.33	209.58	0.58	5.75	230.72	663.33	1	春季
os037-S	2019/4/5	2019/4/15	2269.53	10.23	221.85	5.32	4.91	462.23	378.26	5	春季
os039-S	2019/4/3	2019/4/24	1100.50	21.28	51.72	20.22	1.06	1038.21	183.42	5	春季

附录 B 佩戴追踪器的东方白鹳照片



图 B.1: 佩戴环球信士追踪器的东方白鹳（韩国鸟类学家摄）



图 B.2: 佩戴 Ornitela 追踪器的东方白鹳（鄱阳湖保护区工作人员摄）



图 B.3: 佩戴 Ornitela 追踪器的东方白鹳放飞照片（崔岩摄）

致谢

三年的学习时光转瞬即逝。通过这三年的研究生学习，不仅自身的专业知识得到了提高，也体会到了充实的学习生活。首先我要感谢我的导师——曹垒研究员。感谢曹老师提供的研究平台以及对我的精心栽培和耐心指导，曹老师认真工作、一丝不苟的科研精神感染着我，并对我的毕业论文给予了莫大的鼓励和帮助。三年的研究生时光充实忙碌，曹老师始终指导着学习的方向。

感谢丹麦奥胡斯大学 Anthony David Fox 教授在我撰写英文文献时无私的帮助与建议，使我顺利完成了英文文章的撰写和修改。他严谨的科研态度和博学的鸟类学知识，让我受益匪浅。

感谢赵青山老师、王鑫老师、伊坤朋老师、孟凡娟老师、谷德海老师、罗娟娟老师！六位老师平易近人，给了我热情的指导和帮助。赵青山老师指导我论文的修改修改工作，并及时督促进度，给予帮助。王鑫老师时刻关心论文进度，分享学习方法，严谨的态度值得我学习。感谢伊坤朋老师对论文的关心和帮助，以及提供的提高效率各种方法。感谢孟老师、谷老师和罗老师在生活中给予的无私关心和帮助。

感谢祝芹师姐、张俊健师兄、邓雪琴师姐、方蕾师姐、李鸿滨师兄和李祥煌师兄对我的帮助，感谢他们在科研方法和论文写作上对我的指导，让我得以学会各种技能，顺利完成毕业论文写作。

感谢敖佩如、李畅、王昱熙、嘎日迪、喜吉热、马娟娟等同学在生活与学习上的陪伴与关心，你们都是我的良师益友，让我知道团结合作的重要性。

感谢我的家人对我的支持和鼓励。

感谢各位评审专家在百忙之中对本论文进行评阅，并提出了宝贵的修改意见。

本研究受到以下基金的资助，在此表示一并感谢：国家重点研发计划（资助编号：2016YFC0500406）、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目（资助编号：31661143027）、国家自然科学基金面上项目（资助编号：31670424, 31870369, 31970433）、中国生物多样性研究与监测专项网（Sino-BON）。

2020 年 6 月

在读期间发表的学术论文与取得的其他研究成果

已发表（或正式接受）的学术论文：

Shujuan Fan, Qingshan Zhao, Hongbin Li, Baoguang Zhu, Shubin Dong, Yanbo Xie, Lei Cao and Anthony David Fox. Cyclical helping hands: seasonal tailwinds differentially affect migrating Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) travel speed. *Avian Res* 11, 10 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40657-020-00196-8>