

全国中文核心期刊（生物科学类）●双月刊



ISSN 1000-7083
CN 51-1193/Q
CODEN SIDOEB

四川动物

Sichuan Journal of Zoology



主办：
四川省动物学会 成都大熊猫繁育研究基金会
四川省野生动植物保护协会 四川大学

4
Vol. 37 2018

《四川动物》杂志院士顾问组

尹文英 陈宜瑜 唐崇惕 孙儒泳 曹文宣 刘以训 孟安明 郑光美 郑守仪 魏于全
张亚平

《四川动物》杂志第十届编委会（依姓名汉语拼音为序）

- 主 编** 岳碧松 四川大学生命科学学院, 四川省动物学会
- 副 主 编** 刘少英 四川省林业科学研究院
王跃招 中国科学院成都生物研究所
张和民 中国大熊猫保护研究中心
- 编 委** 丁 平 浙江大学生命科学学院
龚继恩 中国濒危物种进出口管理办公室成都办事处
郭 聪 四川大学生命科学学院
何舜平 中国科学院水生生物研究所
蒋学龙 中国科学院昆明动物研究所
李德生 中国大熊猫保护研究中心
李玉鹏 沈阳师范大学化学与生命科学学院
马 鸣 中国科学院新疆生态与地理研究所
史海涛 海南师范大学生命科学学院
邰发道 陕西师范大学生命科学学院
魏辅文 中国科学院动物研究所
杨 光 南京师范大学生命科学学院
杨旭煜 四川省野生动物资源调查保护管理站
尹海林 四川大学实验动物中心
张树义 华东师范大学生命科学学院
张耀光 西南大学水产科学研究所
张正旺 北京师范大学生命科学学院
周立志 安徽大学资源与环境工程学院
邹方东 四川大学生命科学学院
- 王 强 成都动物园
张安居 成都大熊猫繁育研究基金会
张志和 成都大熊猫繁育研究基地
方盛国 浙江大学生命科学学院
顾海军 四川省野生动物资源调查保护管理站
侯 蓉 成都大熊猫繁育研究基地
贾竞波 东北林业大学野生动物资源学院
李保国 西北大学生命科学学院
李 明 中国科学院动物研究所
卢 欣 武汉大学生命科学学院
冉江洪 四川大学生命科学学院
宋昭彬 四川大学生命科学学院
王进军 西南大学植物保护学院
吴 毅 广州大学生命科学学院
杨晓君 中国科学院昆明动物研究所
余建秋 成都动物园
曾晓茂 中国科学院成都生物研究所
张堰铭 中国科学院西北高原生物研究所
张迎梅 兰州大学生命科学学院
周材权 西华师范大学生命科学学院
宗 浩 四川师范大学生命科学学院

2018年 第37卷 第4期·双月刊

ISSN 1000-7083

CN 51-1193/Q

国内定价: 50元/册, 300元/年

国外定价: 20美元/册, 120美元/年

<http://www.scdwzz.com> 或 www.scdwzz.com.cn

投稿、订阅、广告联系处: 《四川动物》编辑部

地址: 成都市望江路29号 四川大学生命科学学院内

邮政编码: 610064

电话: 028-85410485

ISSN 1000-7083



9 771000 708180

四川动物

SICHUAN DONGWU

(双月刊, 1981年创刊)

第37卷●第4期

2018年7月28日出版

- ★《中文核心期刊要目总览》核心期刊
- ★中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)
- ★中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- ★“中国学术期刊(光盘版)”入编期刊
- ★“中国期刊网”入编期刊
- ★中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
- ★中国科学引文数据库收录期刊
- ★中文科技期刊数据库收录期刊
- ★超星期刊出版平台收录期刊
- ★CEPS 思博网收录期刊
- ★中国生物医学文献数据库收录期刊
- ★中国生物学文摘数据库收录期刊
- ★《中国生物学文摘》收录期刊
- ★英国 Zoological Record 文献数据库收录期刊

主管: 四川省科学技术协会
主办: 四川省动物学会
成都大熊猫繁育研究基金会
四川省野生动植物保护协会
四川大学
协办: 四川大学生命科学学院
中国大熊猫保护研究中心
成都大熊猫繁育研究基地
成都动物园

主 编: 岳碧松
编辑部主任: 杜蓓蓓
编辑·出版·发行: 《四川动物》编辑部
(成都市望江路29号 四川大学生命科学院内)
邮政编码: 610064
电话·微信: (028) 85410485·15881112385
印刷: 成都博瑞传播股份有限公司印务分公司
发行范围: 国内外公开发行
中国标准连续出版物号: ISSN 1000-7083
CN 51-1193/Q
CODEN: SIDOEB

国内定价: 50元/册, 300元/年
国外定价: 20美元/册, 120美元/年

郑重声明: 本刊所截彩色图片, 未经本刊书面许可, 不得复制、翻印及传播

目 次

●研究报告

基于卫星跟踪的洞庭湖越冬小天鹅迁徙路线研究
..... 黄田, 徐正刚, 彭姣, 赵运林 (361)

体表擦拭取样在两栖动物保护遗传学研究中的应用
..... 艾永斌, 杨旭升, 彭卫华, 陈云梅, 徐凉燕, 罗剑, 夏云, 曾晓茂 (373)

灰胸薮鹀活动区的无线电遥测研究
..... 孔赤平, 吴永恒, 向明, 付义强 (381)

新疆博乐和伊犁河谷敏麻蜥的种下分类地位探讨
..... 龔雄, 刘金龙, 周天和, 宋琪, 郭宪光 (387)

蛙类前肢形态对树栖环境的适应性演化
..... 杨暄, 姜德纯, 党宁馨, 李家堂 (400)

应用DNA条形码技术鉴别寄生紫薇绒蚱的跳小蜂
..... 张泽源, 秦耀光, 李枢强 (406)

●基础资料

美洲大蠊成虫肠道菌群多样性分析
..... 郝艳芹, 周闯, 晋家正, 沈咏梅, 张修月, 岳碧松 (415)

温度和光周期对虎斑蝶幼期生长发育的影响
..... 陈楨, 周成理, 陈晓鸣, 石雷 (420)

上海郊野公园无尾两栖动物微生境利用特征研究
..... 黄凯, 慕志强, 岳衢, 于峰, 袁晓, 薄顺奇, 王正寰 (426)

海南四眼斑水龟的分类地位与命名 林柳, 孙亮, 王伟, 史海涛 (435)

**SICHUAN JOURNAL
OF ZOOLOGY**

July 28, 2018 Vol. 37, No. 4
Bimonthly, Established in 1981

Director:

Sichuan Association for Science and Technology

Sponsored by:

Sichuan Society of Zoologists

Chengdu Giant Panda Breeding Research

Foundation

Sichuan Association of Wildlife Conservation

Sichuan University

Co-sponsored by:

College of Life Sciences, Sichuan University

China Conservation and Research Center for

Giant Panda

Chengdu Research Base of Giant Panda Breeding

Chengdu Zoo

Editor-in-chief:

YUE Bisong

Manager:

DU Beibei

Edited, Published and Distributed by:

Editorial Department of Sichuan Journal of
Zoology

Address: College of Life Sciences,

Sichuan University

No. 29, Wangjiang Road, Chengdu,

Sichuan, 610064, China

Tel: 86-28-85410485

WeChat: 15881112385

Printed by:

Chengdu B-Ray Media Co., Ltd. Printing Branch
Company

CSSN:

ISSN 1000-7083

CN 51-1193/Q

CODEN:

SIDOEB

CONTENTS

Study on the migration routes of overwintering *Cygnus columbianus* in Dongting

Lake based on satellite tracking

HUANG Tian, XU Zhenggang, PENG Jiao, ZHAO Yunlin (361)

The application of extracting DNA from skin swabbing in amphibians

AI Yongbin, YANG Xusheng, PENG Weihua, CHEN Yunmei, XU Liangyan,

LUO Jian, XIA Yun, ZENG Xiaomao (373)

The home range of *Liocichla omeiensis* by radio tracking

KONG Chiping, WU Yongheng, XIANG Ming, FU Yiqiang (381)

Taxonomical status of *Eremias arguta* from Bole city and Ili River Valley, Xin-

jiang Uyghur Autonomous Region, China

GONG Xiong, LIU Jinlong, ZHOU Tianhe, SONG Qi, GUO Xianguang (387)

Morphological evolution of the forelimb of frogs (*Anura*) in adaption to arbo-

real environment

YANG Tong, JIANG Dechun, DANG Ningxin, LI Jiatang (400)

Application of DNA barcoding in identification of encyrtid parasitoids of *Acan-*

thococcus* (= *Eriococcus*) *lagerstroemiae

ZHANG Zeyuan, QIN Yaoguang, LI Shuqiang (406)

* * * * *

Analysis on the intestinal microbiota diversity of adult *Periplaneta americana*

HAO Yanqin, ZHOU Chuang, JING Jiazheng, SHEN Yongmei, ZHANG Xiuyue,

YUE Bisong (415)

基于卫星跟踪的洞庭湖越冬小天鹅迁徙路线研究

黄田^{1,2}, 徐正刚^{2,3}, 彭姣⁴, 赵运林^{3*}

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 湖南城市学院信息与电子工程学院, 湖南益阳 413002;
3. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 4. 湖南省动物物联网工程技术研究中心, 长沙 410205)

摘要: 掌握洞庭湖越冬小天鹅 *Cygnus columbianus* 的迁徙行为和规律, 明确迁徙路线和停歇地, 是小天鹅栖息地恢复研究及保护的基础。2014—2017 年, 在湖南东洞庭湖国家级自然保护区对 18 只小天鹅进行卫星跟踪, 收集了 38 882 条定位数据。本研究确定了小天鹅西线、中线和东线 3 条迁徙路线, 其中, 新发现的西线沿我国湖北、河南、山西、陕西、内蒙古, 以及蒙古国、哈萨克斯坦, 抵达俄罗斯亚马尔-涅涅茨自治区北部靠近喀拉海的北极苔原。西线春季迁徙距离为 6 715 km, 平均迁徙速度为 $21.52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 秋季迁徙距离为 7 467 km, 平均迁徙速度为 $32.75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。中线春季迁徙距离为 2 083 km, 平均迁徙速度为 $28.93 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。东线春季迁徙距离为 5 965 ~ 6 351 km, 平均迁徙速度为 $(28.71 \pm 0.95) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 秋季迁徙距离为 5 101 ~ 5 331 km, 平均迁徙速度为 $(29.15 \pm 3.65) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。小天鹅春季迁徙进程慢于秋季, 迁徙途中的最大飞行速度达 $133.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。内蒙古自治区的黄河湿地和大兴安岭两侧河谷湿地是迁徙途中的重要中转站, 小天鹅在此停歇 15 d 以上。本研究有助于了解小天鹅对栖息环境的偏好及迁徙路线选择策略, 为禽流感等疾病传播和防控提供科学依据。

关键词: 小天鹅; 迁徙路线; 停歇地; 卫星跟踪

中图分类号: Q959.7; Q958.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7083(2018)04-0361-12

Study on the Migration Routes of Overwintering *Cygnus columbianus* in Dongting Lake Based on Satellite Tracking

HUANG Tian^{1,2}, XU Zhenggang^{2,3}, PENG Jiao⁴, ZHAO Yunlin^{3*}

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. College of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan Province 413002, China;
3. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;
4. Hunan Engineering Research Center for Internet of Animals, Changsha 410205, China)

Abstract: Conservation of *Cygnus columbianus* and restoration of their habitats depend on the knowledge of migration routes, stopover sites, and overwintering patterns. During 2014 to 2017, satellite tracking was carried out on 18 *C. columbianus* individuals in the Dongting Lake and 38 882 positioning data points were collected. The central and eastern migration routes of *C. columbianus* were confirmed and a newly western route was discovered in this study. The new route passes through Hubei, Henan, Shanxi, Shaanxi, Inner Mongolia in China, Mongolia, and Kazakhstan to reach the arctic tundra near the Kara Sea in the north of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in Siberia, Russia. On the western route, the birds traveled 6 715 km at $21.52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ during spring migration and 7 467 km at $32.75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ during autumn migration. On the central route, they traveled 2 083 km at an average speed of $28.93 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ during spring migration. On the eastern route, they traveled 5 965 ~ 6 351 km at an average speed of $(28.71 \pm 0.95) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ during spring migration and 5 101 ~ 5 331 km at an average speed of $(29.15 \pm 3.65) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ during autumn migration. The speed of migration during

收稿日期: 2018-03-23 接受日期: 2018-04-20

基金项目: 湖南省动物物联网工程技术研究中心建设项目(2017TP2014)

作者简介: 黄田(1982—), 男, 博士, 讲师, 生态学专业, E-mail: 65061902@qq.com

*通信作者 Corresponding author, E-mail: zyl8291290@163.com

spring is slower than that during autumn, and the maximum speed is $133.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. The Yellow River wetland and the river valley wetlands on both sides of the Greater Khingan Mountains in Inner Mongolia Autonomous Region, China are important transit stations during migration, and the birds rest there for more than 15 days. This study increases the knowledge of habitat preference and migration routes of *C. columbianus*, and provides useful data for understanding the transmission of diseases such as avian flu.

Keywords: *Cygnus columbianus*; migration route; stopover; satellite tracking

小天鹅 *Cygnus columbianus* 隶属雁形目 Anseriformes 鸭科 Anatidae 天鹅属 *Cygnus*, 是国家 II 级重点保护野生鸟类, 在北美洲、欧洲及亚洲均有分布。洞庭湖越冬小天鹅属于小天鹅古北亚种 *C. c. bewickii*, 每年 6—7 月在北极苔原带繁殖, 8 月末至 9 月初离开繁殖地前往越冬地, 翌年 3 月中下旬再从越冬地返回繁殖地 (黄慧敏等, 2013)。通常呈 6—10 余只的小群或家族群迁徙, 沿途常在食物丰富的湖泊、湿地停歇, 有时甚至直到天气变冷后才逐渐南迁, 因而常在 10 月中下旬至 11 月中下旬到达我国南方的越冬地。近年来, 由于违法狩猎和环境变化, 小天鹅数量有所下降 (Zhao *et al.*, 2016), 准确掌握洞庭湖越冬小天鹅的迁徙行为和规律, 是小天鹅保护和栖息地恢复研究的基础。

研究候鸟迁徙的传统方法有野外观察、雷达监测和环志等 (马志军, 2009), 由于距离远、时间长, 迁徙过程中面临气候、疾病、天敌袭击和人类猎杀等威胁, 传统方法往往难以获取连续大量的观测数据。20 世纪 80 年代后期, 卫星追踪技术开始应用于鸟类迁徙研究, 该技术具有范围广、时间长、数据准确、实时性高和数据量大等优点 (关鸿亮, 通口广芳, 2000)。国外利用卫星跟踪技术研究小天鹅迁徙多涉及迁徙路线 (Woodbridge *et al.*, 1995; Kamiya & Ozaki, 2002; Olson *et al.*, 2009; Nuijten *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2016)、能量计算 (Pennycuik *et al.*, 1996; Badzinski *et al.*, 2015)、禽流感传播 (Newman *et al.*, 2009) 等方面。国内关于小天鹅的研究主要集中在行为 (王会志等, 1995; 段酬苍等, 2016)、栖息环境 (傅勇, 2004; 李言阔等, 2013)、食性 (张梅清等, 2016) 等方面, 迁徙路线相关的研究报道较少。利用卫星追踪技术对洞庭湖小天鹅迁徙进行研究, 可准确记录迁徙过程, 发现繁殖地、迁徙过程中的停歇地和新的越冬地, 为洞庭湖小天鹅及生物多样性保护提供参考。同时, 小天鹅可能是禽流感病毒的携带

者, 了解其迁徙路线对禽流感疫情的防控也有重要意义。

1 研究方法

1.1 卫星追踪器安装

2014 年 3 月 7 日和 2015 年 1 月 28 日, 分别在湖南东洞庭湖国家级自然保护区 2 处地点 ($112^{\circ}49'21''\text{E}, 29^{\circ}14'50''\text{N}$; $112^{\circ}53'38''\text{E}, 29^{\circ}26'33''\text{N}$) 采用灯捕法捕捉了 6 只和 4 只小天鹅。2015 年 2 月 8 日, 湖南东洞庭湖国家级自然保护区管理局救助了 8 只小天鹅。抓捕和救助工作经林业主管部门审批, 手续合法。为这 18 只小天鹅安装湖南环球信士科技有限公司研发的背负式卫星追踪器 (表 1), 安装过程中使用头套罩住了小天鹅头部, 以防止受伤。追踪器装置总质量为 28—30 g, 仅为小天鹅体质量的 0.5%, 远小于动物遥测技术中跟踪器质量不超过体质量 3%—5% 的经验值 (Barron *et al.*, 2010)。

1.2 追踪数据的收集与筛选

卫星追踪器的数据采集频率一般为每小时 1 次, 当电量较低时可调整采集频率, 每天在固定时间传回数据。本研究中的追踪器没有开通国际漫游服务, 小天鹅迁徙出境后, 数据先保存在本地存储器中, 待回迁时再将存储的数据发送回来。数据内容包括设备编号、采集时间、经度、纬度、速度、高度、航向、温度、电压、精度共 10 个字段。

位点数据共有 A、B、C、D、E、N 6 个精度等级, 其中, A 级精度为 5 m, B 级为 10 m, C 级为 20 m, D 级为 100 m, E 级为基站定位, N 级为无效等级。基站定位精度依赖基站的分布及覆盖范围, 一般为 50—200 m, 偏远地区可达到 1 000 m (张爱国, 2010)。A—D 级数据可直接用于研究小天鹅的迁徙、活动范围及栖息地利用。E 级数据占比一般很小, 相对于大尺度的迁徙路线, 其精度是可以接受的, 可作为小天鹅迁徙路线的核心节点补充。

1.3 数据分析

1.3.1 迁徙状态改变日期 根据迁徙状态,可将小天鹅迁徙过程划分为繁殖期、秋季迁徙期、越冬期和春季迁徙期。本文采用迁移日期变化分析法来确定迁徙状态改变的“日期阈值”(Chen *et al.*, 2016),认为某一时刻经度、纬度及活动距离发生显著变化,为迁徙状态变化的临界点。如果临界点前后数据不完整,则取相邻日期的中间值。如果追踪器没有记录到达和离开的日期,则可以假定为到达和离开前一个点和后一个点的中间日期(Ely & Meixell, 2016)。

由于追踪器采集频率不固定,且有部分无效数据,相邻2个追踪位点之间平均活动距离计算方法为: $dis = \frac{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{(T_{i+1} - T_i) \times F}$, 其中, X 、 Y 为追踪位点投影到通用横向墨卡托(WGS 1984 UTM Zone 49N)后的坐标值, T 为采集时间, F 为标准采集频率(1次/h), 距离单位为 km。

1.3.2 停歇地与停歇时间 小天鹅迁徙距离达数千公里,迁徙过程中需要在多个地点停留以补充能量。在 ArcGIS 10.1 中筛选出迁徙途中速度小于 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的追踪点,根据位点的分布情况,将半径 25 km 范围内、至少含有不同日期的 2 个位点的区域定义为迁徙停歇地(郭家良等, 2015)。停歇时间为在停歇地停留的时间,迁徙停歇时间为各个停歇地停留时间之和。

1.3.3 迁徙距离、迁徙速度与飞行速度 繁殖地与越冬地之间各停歇点间距离之和为迁徙距离,计算公式为: $dis = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$, 其中, x 、 y 为停歇地经纬度投影到通用横向墨卡托后的坐标值。迁徙速度等于迁徙距离除以迁徙总时间,飞行速度等于相邻 2 个停歇点之间的距离除以飞行时间。

1.3.4 物种状态判定 卫星跟踪物种状态一般可分为活动、死亡、救助和失联。本文所采用的背负式卫星追踪器大部分隐藏在羽毛中,温度传感器贴近小天鹅身体,飞行时设备内部温度会冷却到接近环境空气温度,停留在地面时接近体温(Penny-cońick *et al.*, 1996)。同时结合追踪位点的聚集程度和速度可有效判定物种状态。当温度持续 72 h 低

于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 位点聚集在 100 m 以内,速度为 0 时可认定为死亡。超过 1 年没有信号回传,且中断联系之前的数据正常可认定为失联。追踪设备信号正常,且能准确记录物种活动轨迹的可认定为活动。

1.3.5 迁徙路线的绘制 HQXS_Client 是追踪设备供应商提供的数据管理工具,可以筛选数据直接生成迁徙路线,也可以将数据导出为 shape file,在 ArcGIS 10.1 中去除无效位点后,利用 point convert to line 生成迁徙路线。

2 结果

2.1 卫星追踪数据概况

2014 年 3 月 8 日—2017 年 10 月 1 日,共采集 38 882 条数据,其中, A 级 9 792 条(25.18%), B 级 12 269 条(31.55%), C 级 4 179 条(10.75%), D 级 2 620 条(6.74%), N 级 10 022 条(25.78%), 可用于迁徙路线研究的位点占 74.22%。跟踪时间最长的是 7#, 超过 977 d, 最短的是 10#, 不到 4 d(表 1)。

2.2 迁徙时间与迁徙进程

筛选出迁徙过程中速度大于 0 的轨迹点,按时段进行统计分析,发现小天鹅的迁徙活动主要集中在 18:00—05:00(72.47%, 图 1), 这可能是由于夜间能躲避天敌,适合长途迁徙,而白天的主要活动是觅食和休息。

利用迁移日期变化分析法对 7# 小天鹅的 5 次迁徙数据进行分析,可以界定 2015—2017 年春季的迁徙开始日期分别为 3 月 12 日、18 日和 25 日, 2015、2016 年秋季迁徙开始日期分别为 9 月 26 日和 9 月 25 日,迁徙过程中的重要时间和空间节点基本重合,具有明显规律。春季迁徙始于 3 月中旬,终于 6 月初,持续 74~83 d,繁殖期为 112~114 d;秋季迁徙始于 9 月下旬,终于 11 月中旬,持续 48~60 d,越冬期为 127~128 d。繁殖地经纬度为 $7.8^\circ \sim 138.2^\circ\text{E}$ 、 $71.1^\circ \sim 71.5^\circ\text{N}$,迁徙过程中的 3 个重要停歇地经纬度分别为: $109.8^\circ \sim 110.3^\circ\text{E}$ 、 $40.5^\circ \sim 40.6^\circ\text{N}$ 、 $120.9^\circ \sim 123.6^\circ\text{E}$ 、 $43.9^\circ \sim 45.5^\circ\text{N}$ 、 $123.9^\circ \sim 125.1^\circ\text{E}$ 、 $65.1^\circ \sim 66.2^\circ\text{N}$ 。除 2016 年 9 月 19—30 日追踪器数据缺失外,其他迁徙状态改变日期前后的经度、纬度和平均活动距离值变化十分明显。

表 1 卫星追踪小天鹅的基本信息

Table 1 List of satellite tracking information of *Cygnus columbianus*

编号 ID	放飞日期 Released date	来源 Source	体质量 Body mass/kg	跟踪时间 Tracking time/h	频率 Frequency/(次/h)	追踪装置规格 Device specifications	数据量 Amount/条
1#	2014/03/07	捕捉	7.3	1 239	1		1 272
2#	2014/03/07	捕捉	6.9	5 770	1		3 530
3#	2014/03/07	捕捉	7.1	761	1	型号: HQBP2525	900
4#	2014/03/07	捕捉	7.4	1 462	1	高度: 25 mm	1 483
5#	2014/03/07	捕捉	6.2	1 103	1	质量: 25 g	1 010
6#	2014/03/07	捕捉	7.4	618	1		602
7#	2015/01/28	捕捉	6.0	23 469	1, 2		12 524
8#	2015/01/28	捕捉	—	1 472	1		1 309
9#	2015/01/28	捕捉	5.9	10 222	1, 2		8 326
10#	2015/01/28	捕捉	—	90	1		74
11#	2015/02/08	救助	7.3	455	1		454
12#	2015/02/08	救助	7.4	164	1	型号: HQBP3527	165
13#	2015/02/08	救助	—	108	1	高度: 35 mm	109
14#	2015/02/08	救助	7.3	2 197	1	质量: 27 g	2 154
15#	2015/02/08	救助	6.0	1 357	1		1 348
16#	2015/02/08	救助	7.1	1 244	1		852
17#	2015/02/08	救助	6.2	1 722	1		1 626
18#	2015/02/08	救助	7.4	1 150	1		1 144

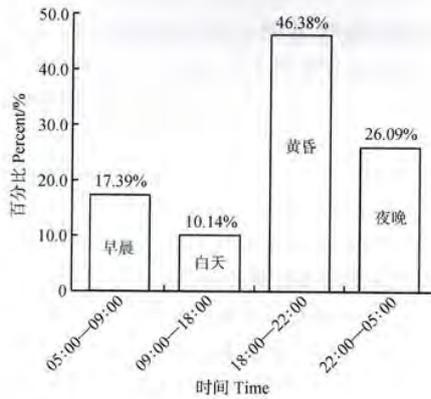


图 1 不同时段小天鹅迁徙活动量
Fig. 1 Percent composition of the *Cygnus columbianus* activity in different times

洞庭湖越冬小天鹅春季迁徙的开始日期从 2 月中旬一直到 4 月下旬(表 2)。其中,2014 年跟踪的小天鹅($n=6$)中,2#、3#、6#于 3 月 14—22 日开始北迁,1#、4#、5#于 4 月 3—28 日开始北迁。2015 年跟踪的小天鹅($n=8$)中,7#、9#、18#于 3 月 7—13 日开始北迁,8#、14#、15#、17#于 3 月 26—28 日开始北迁,

16#于 2 月 26 日开始向南方迁徙。2016 年跟踪的小天鹅($n=2$)中,9#于 2 月 17 日开始北迁,7#于 3 月 18 日开始北迁。2017 年跟踪的小天鹅($n=1$),7#于 3 月 25 日开始北迁。

繁殖地位于俄罗斯西西伯利亚地区和远东地区的小天鹅秋季迁徙的开始时间一般为 9 月下旬,前后相差仅 5 d(表 3)。其中,2014 年跟踪到繁殖地位于蒙古国东戈壁省的 2#小天鹅秋季迁徙时间开始于 8 月 31 日。2015 年跟踪的小天鹅($n=2$)中,7#于 9 月 26 日开始南迁,9#于 9 月 21 日开始南迁。2016 年跟踪的 7#小天鹅于 9 月 25 日开始南迁。2017 年跟踪的 7#小天鹅于 9 月 22 日开始南迁。

通过连续 4 年的卫星跟踪,发现春季迁徙进程差异较大,2015 年春季迁徙进程整体较快(图 2)。迁徙开始时间较早的小天鹅($n=8$)一般在 1~2 d 内就能抵达内蒙古自治区的黄河湿地,在此停歇 15.35 d ± 13.75 d 后,继续迁往繁殖地。迁徙开始时间较晚的小天鹅($n=9$)在前期停歇次数明显较多,都未能完成迁徙进程,追踪器记录到的迁徙距离也较短。

表 2 小天鹅春季迁徙进程
Table 2 Migration process of *Cygnus columbianus* in spring

编号 ID	年份 Year	开始日期 Start date	结束日期 End date	停歇次数 Stopover times	停歇天数 Stopover duration/d	最后位置 Last location	迁徙距离 Migration distance/km	迁徙速度 Migration speed/ (km · h ⁻¹)	越冬地 Wintering ground	繁殖地 Breeding ground	状态 Status
1#	2014	04/10	—	2	17.0	陕西省旬河山谷地带	699	—	洞庭湖	—	失联
2#	2014	03/22	04/25	1	31.0	蒙古国东戈壁省	2 083	28.93	洞庭湖	蒙古国东戈壁省 (110°7'56"E, 46°22'28"N)	活动
3#	2014	03/14	—	1	22.0	蒙古国, 中蒙边境以北 19 km	2 160	—	洞庭湖	—	失联
4#	2014	04/28	—	3	7.5	河南省洛阳市城郊	643	—	洞庭湖	—	失联
5#	2014	04/03	—	1	15.0	湖北省钟祥市汉水水域	227	—	洞庭湖	—	死亡
6#	2014	03/22	—	2	10.0	蒙古国, 中蒙边境以北 20 km	1 700	—	洞庭湖	—	失联
7#	2015	03/12	06/03	7	74.0	俄罗斯远东地区	6 351	29.40	洞庭湖	俄罗斯远东地区 (138°9'12"E, 71°29'43"N)	活动
8#	2015	03/26	—	2	2.0	河北省石家庄动物园	1 042	—	洞庭湖	—	失联
9#	2015	03/07	05/26	10	67.0	俄罗斯西西伯利亚	6 715	21.52	洞庭湖	俄罗斯西西伯利亚 (68°23'13"E, 71°43'01"N)	活动
14#	2015	03/27	—	3	35.5	辽宁省辽河水域	1 760	—	洞庭湖	—	失联
15#	2015	03/25	—	2	10.5	河南省信阳某水库	410	—	洞庭湖	—	失联
16#	2015	02/26	—	4	30.0	湖南省湘江祁阳段水域	1 010	—	洞庭湖	—	失联
17#	2015	03/28	—	3	16.0	河南省郑州市贾鲁河水域	614	—	洞庭湖	—	失联
18#	2015	03/13	—	2	11.0	洞庭湖	525	—	洞庭湖	—	救助
7#	2016	03/18	05/31	10	65.0	俄罗斯远东地区	5 965	27.62	洞庭湖	俄罗斯远东地区 (138°10'00"E, 71°29'41"N)	活动
9#	2016	02/18	—	1	36.0	内蒙古自治区巴彦淖尔市北部	1 700	—	鄱阳湖	—	失联
7#	2017	03/25	06/01	6	64.0	俄罗斯远东地区	5 587	28.41	洞庭湖	俄罗斯远东地区 (138°10'10"E, 71°29'49"N)	活动

表 3 小天鹅秋季迁徙进程
Table 3 Migration process of *Cygnus columbianus* in autumn

编号 ID	年份 Year	开始日期 Start date	结束日期 End date	停歇次数 Stopover times	停歇天数 Stopover duration/d	最后位置 Last location	迁徙距离 Migration distance/km	迁徙速度 Migration speed/ (km · h ⁻¹)	越冬地 Wintering ground	繁殖地 Breeding ground	状态 Status
2#	2014	08/31	—	1	19.0	内蒙古自治区 乌梁素海	627	—	—	蒙古国东戈壁省 (110°7'56"E, 46°22'28"N)	死亡
7#	2015	09/26	11/12	4	40.0	洞庭湖	5 331	31.73	鄱阳湖 + 龙盛湖 + 洞庭湖	俄罗斯远东地区 (138°9'12"E, 71°29'43"N)	活动
9#	2015	09/21	11/27	4	57.5	鄱阳湖	7 467	32.75	鄱阳湖 + 龙盛湖	俄罗斯西西伯利亚 (68°23'13"E, 71°43'01"N)	活动
7#	2016	09/25	11/15	4	43.0	洞庭湖	5 101	26.57	鄱阳湖 + 洞庭湖	俄罗斯远东地区 (138°10'00"E, 71°29'41"N)	活动
7#	2017	09/22	—	1	4.0	吉林省向海	3 554	—	—	俄罗斯远东地区 (138°10'26"E, 71°29'51"N)	活动

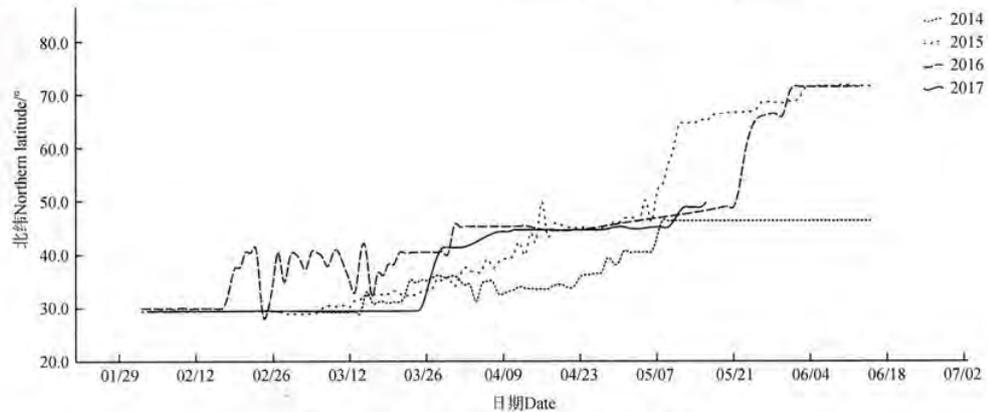


图 2 2014—2017 小天鹅春季迁徙的时间和纬度
Fig. 2 Time-latitude analysis of spring migration of *Cygnus columbianus* during 2014-2017

小天鹅完成春季迁徙 ($n=4$) 抵达俄罗斯繁殖地的时间在 5 月 26 日—6 月 3 日, 迁徙时间为 74 ~ 83 d, 中途停歇 60 ~ 74 d; 抵达蒙古国繁殖地时间为 4 月 25 日, 迁徙时间为 34 d, 中途停歇 31 d (表 2)。小天鹅完成秋季迁徙 ($n=3$) 抵达越冬地的时间在 11 月 12—27 日, 在俄罗斯西西伯利亚繁殖的 9# 小天鹅迁徙时间为 67 d, 中途停歇 57.5 d; 在俄罗斯远东地区繁殖的 7# 小天鹅迁徙时间为 47 ~ 51 d, 中途停歇 40 ~ 43 d。春季迁徙平均时间为 $76.25 \text{ d} \pm 6.65 \text{ d}$, 秋季迁徙平均时间为 $55.00 \text{ d} \pm 10.58 \text{ d}$, 春季迁徙比秋季迁徙平均慢 22 d 左右 (表 3)。

截止到 2017 年 10 月 1 日, 卫星追踪的 18 只小天鹅中有 1 只 (7#) 判定为活动, 2 只 (2#, 5#) 判定为死亡, 1 只 (18#) 被救助 (http://www.shidi.org/sf-CC27A46BF4264F2C971E27B4E0224D73_151_zhanghong258.html), 其余 14 只判定为失联。2# 小天鹅在 2014 年秋季迁徙时, 在内蒙古乌梁素海停歇了 19 d, 追踪器最后发回的 157 个位点都聚集在半径 25 m 范围内, 且设备内部温度长时间低于 10°C , 最低至 2.0°C , 与正常体温相差很大, 认定为死亡。5# 小天鹅在 2014 年春季迁徙时, 在湖北省钟祥市失联, 后世界自然基金会在汉水水域发现了佩带卫星追踪器的 5# 小天鹅尸体, 确认死亡。

2.3 迁徙路线

本研究共记录小天鹅完整春季迁徙路线 5 次 (2# 1 次, 7# 3 次, 9# 1 次), 完整秋季迁徙路线 3 次 (7# 2 次, 9# 1 次)。记录不完整春季迁徙路线

10 次, 其中, 3# 和 6# 从越冬地往北迁徙到达蒙古国境内, 后失联; 而 1#, 4#, 5#, 8#, 14#, 15#, 16#, 17# 仅记录到国内部分迁徙路线, 后失联。10#, 11#, 12#, 13# 在越冬地就中断了追踪信号, 没有记录到迁徙路线。

小天鹅迁徙路线可以分为西线、中线和东线 (图 3), 西线经我国湖北、河南、山西、陕西、内蒙古、蒙古国、哈萨克斯坦, 到达俄罗斯亚马尔-涅涅茨自治区北部; 中线经我国湖北、河南、山西、陕西、内蒙古, 抵达蒙古国东戈壁省北部地区; 东线经我国湖北、安徽、山东、天津、辽宁、内蒙古、黑龙江, 到达俄罗斯远东地区萨哈共和国勒拿河流域。

对比发现, 小天鹅春季和秋季迁徙路线不同 (图 4)。东线小天鹅春季迁徙沿太行山脉以西, 之后往西拐到内蒙古河套地区的停歇地, 再往东沿大兴安岭东侧出境; 秋季迁徙时, 国外部分轨迹与春季迁徙路线交叉或重叠, 国内的迁徙轨迹则在太行山脉以东, 比春季路线偏东 300 ~ 400 km。西线小天鹅的春、秋两季迁徙路线的国内部分基本重合, 但国外部分相差较大, 春季迁徙路线沿蒙古国、俄罗斯的图瓦共和国、哈卡斯共和国、科麦罗沃州、阿尔泰边疆区、新西伯利亚州、托木斯克州、汉特-曼西自治区, 最终抵达亚马尔-涅涅茨自治区北部; 秋季路线则相对偏西, 经过俄罗斯的汉特-曼西自治区、秋明州、库尔干州, 再进入哈萨克斯坦的南哈萨克斯坦州、阿克莫拉、卡拉干达、东哈萨克斯坦州, 再经过我国新疆, 最后从蒙古国南部进入我国内蒙古。

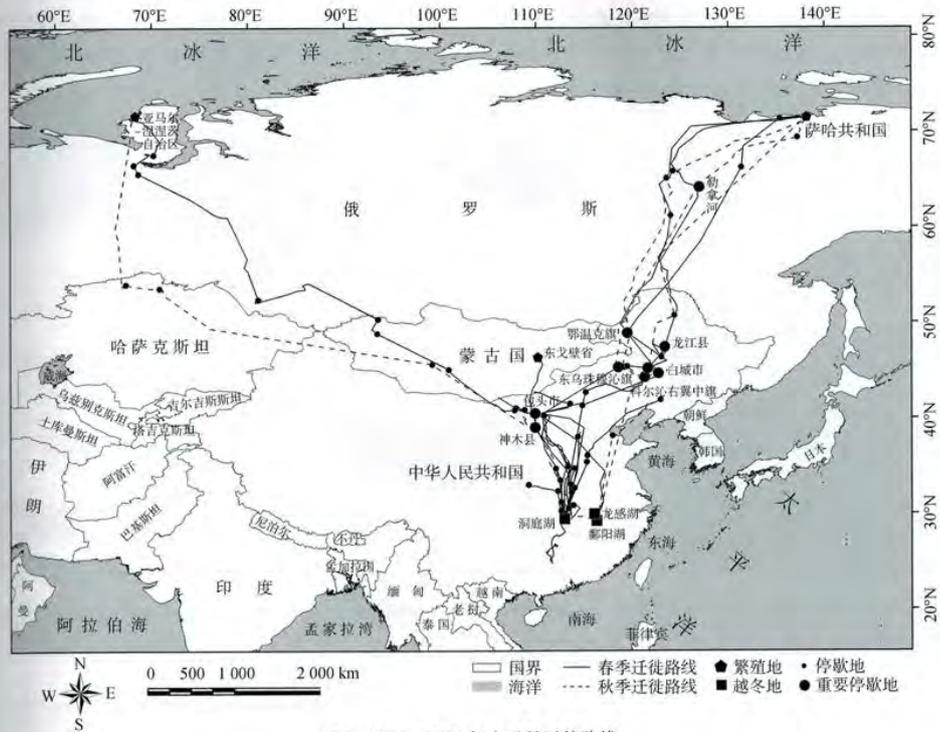


图3 2014—2017年小天鹅迁徙路线
Fig. 3 The migration routes of *Cygnus columbianus* in 2014 - 2017

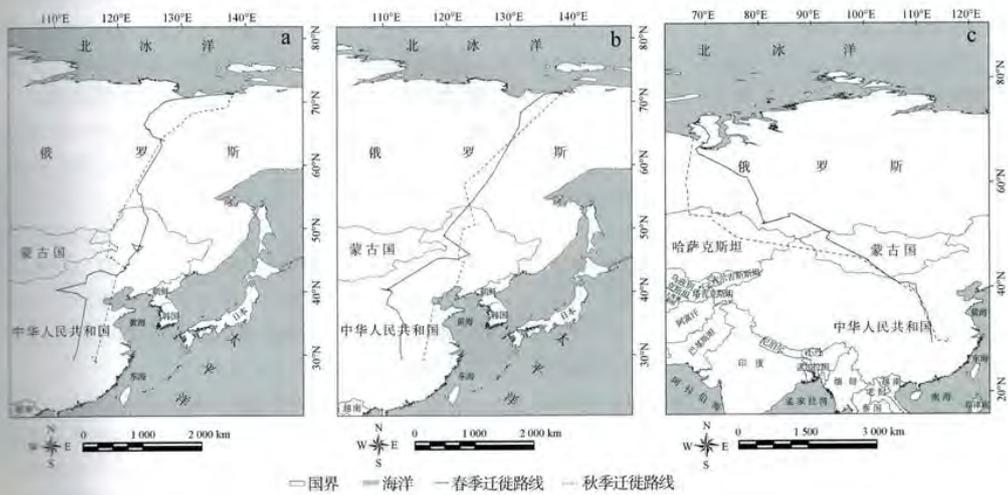


图4 小天鹅春、秋季迁徙路线
Fig. 4 The migration routes of *Cygnus columbianus* in spring and autumn

a. 7#小天鹅 2015 年迁徙路线, b. 7#小天鹅 2016 年迁徙路线, c. 9#小天鹅 2015 年迁徙路线
a. migration routes of 7# in 2015, b. migration routes of 7# in 2016, c. migration routes of 9# in 2015

同一只小天鹅每年迁徙路线也不固定(图 5), 如,7#和9#小天鹅春季迁徙有时会沿太行山西边北上,有时会沿太行山东边北上,再横穿太行山脉

抵达河套地区。7#小天鹅 2015 年春季迁徙从大兴安岭东边走,秋季则从西边回,2016 年则刚好相反。

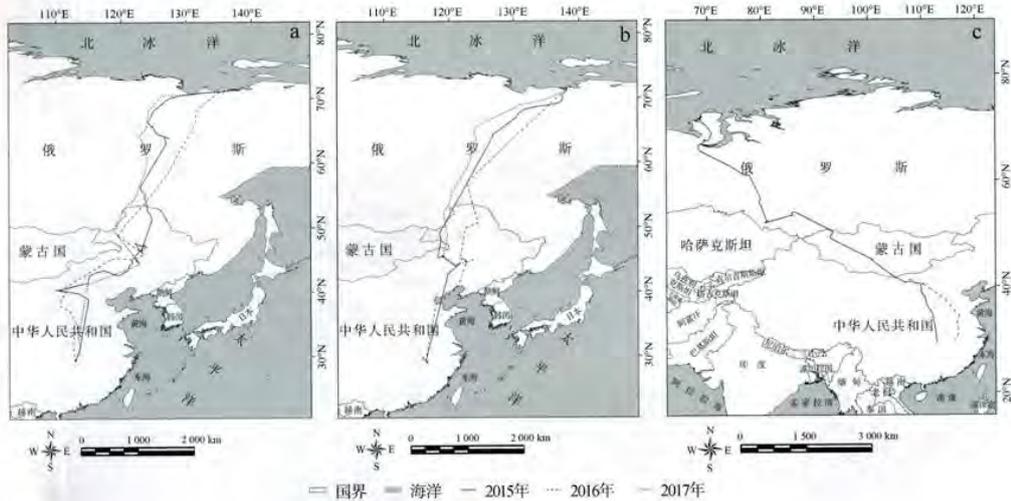


图 5 不同年份小天鹅迁徙路线
Fig. 5 The migration routes of *Cygnus columbianus* in different years

a. 7#小天鹅春季迁徙路线, b. 7#小天鹅秋季迁徙路线, c. 9#小天鹅春季迁徙路线
a. migration routes of 7# in spring, b. migration routes of 7# in autumn, c. migration routes of 9# in spring

完成部分迁徙进程的小天鹅的迁徙路线也有较大差异(图 6), 如,1#小天鹅 4 月上旬才开始春季迁徙,在鄂豫边界停歇 3 d 后向西进入陕西,最后在旬河山谷地带失联。16#小天鹅于 2 月底开始春季迁徙,方向却是一路向南,经过西洞庭湖、益阳、长沙、娄底、邵阳、永州,到达湖南最南端与广西交界地带,后又折返到广西全州湘江水域,最后沿湘江到达祁阳城郊,于湘江水域失联。18#小天鹅于 3 月中旬离开洞庭湖后,经长江、汉水、孝感、武汉、赤壁、岳阳又折回到洞庭湖,最后失联。

2.4 繁殖地、中途停歇地与越冬地

洞庭湖越冬小天鹅的繁殖地有 3 处,分别位于俄罗斯亚马尔-涅涅茨自治区北部靠近喀拉海的北极苔原地带(68°18'34.40"E,71°38'52.78"N)、俄罗斯远东地区萨哈共和国勒拿河中下游河岸线及亚纳湾群岛的北极苔原地带(138°11'25.79"E,71°28'31.23"N)和蒙古国东戈壁省北部湖泊(110°07'51.71"E,46°22'18.93"N)(图 3)。

迁徙途中小天鹅通常会停歇 7~10 次,共发现小

天鹅停歇地 55 处(图 3,图 7),其中,停歇时间超过 7 d 的有 31 处,停歇次数超过 2 次的有 10 处,两者同时满足的重要停歇地有 9 处(图 3,表 4)。春季迁徙时,西线的停歇时间为 67 d,东线的平均停歇时间为 66.3 d ± 7.1 d,中线仅在内蒙古河套地区黄河湿地停歇 31 d。秋季迁徙时,西线的停歇时间为 57.5 d,东线的平均停歇时间为 41.5 d ± 2.1 d。

利用 Google Earth 影像数据可以准确识别停歇地的土地利用类型,包括河流、湖泊、库塘、滩涂、农田、林地(图 8)。发现小天鹅常选择开阔的湖泊、库塘、水流缓慢的河流和邻近的滩涂及农田停歇,偶尔在林地短暂停歇。

同一只小天鹅历年的越冬地不固定,如,7#小天鹅 2015 年秋季返迁时,先迁徙到小天鹅在我国南方的一个重要越冬地江西鄱阳湖,11 月底迁飞到湖北龙感湖,12 月中旬才迁回到洞庭湖。2016 年秋季返迁时,也是先到鄱阳湖,12 月上旬迁回到洞庭湖。9#小天鹅 2015 年没有在洞庭湖越冬,而是先在鄱阳湖短暂停歇后辗转转到湖北龙感湖越冬。

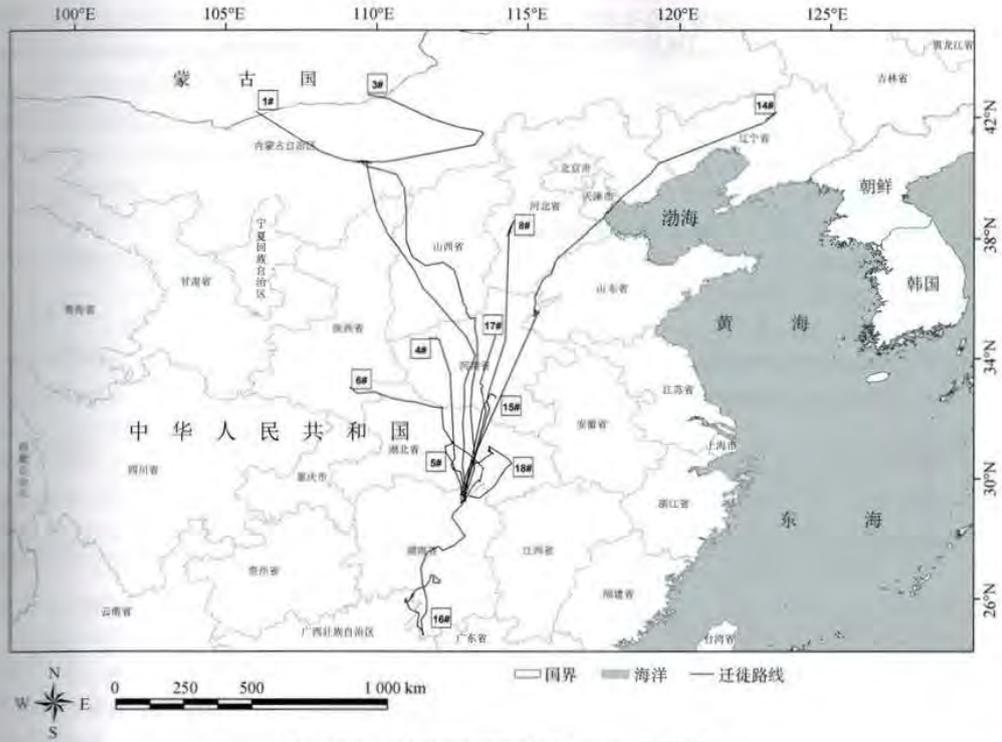


图6 2014—2015年未完成春季迁徙的小天鹅迁徙路线
Fig. 6 The unfinished migration routes of *Cygnus columbianus* in 2014 - 2015

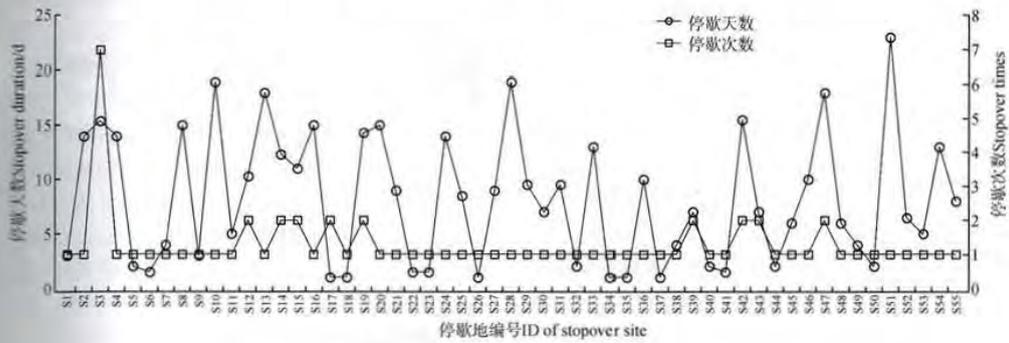


图7 小天鹅迁徙途中停歇次数与时间
Fig. 7 Times and duration of stopovers of *Cygnus columbianus* during the migration process

2.5 迁徙距离与速度

繁殖地在俄罗斯远东地区的小天鹅春季迁徙距离为 5 965 ~ 6 351 km, 平均迁徙速度为 (28.71 ± 0.95) km · h⁻¹, 最大飞行速度达 109 km · h⁻¹; 秋季迁

徙距离为 5 101 ~ 5 331 km, 平均迁徙速度为 (29.15 ± 3.65) km · h⁻¹, 最大飞行速度达 68.5 km · h⁻¹。繁殖地在俄罗斯西西伯利亚地区的小天鹅春季迁徙距离为 6 715 km, 平均迁徙速度为 21.52 km · h⁻¹, 最大

表 4 小天鹅重要停歇地
Table 4 The location of main stopovers sites of *Cygnus columbianus*

停歇地 Stopover site	停歇次数 Stopover times	停歇天数 Stopover duration/d	地理坐标 Location	行政区划 Region	生境 Habitat
黄河湿地	2#、3#、6#各 1 次 7#、9#各 2 次	15.4	109°49'55"E, 40°29'36"N	内蒙古自治区包头市	河流、滩涂
新开河湿地	7# 2 次	10.3	121°14'07"E, 44°16'10"N	内蒙古自治区通辽市 科尔沁左翼中旗	库塘
黑龙江哈拉海湿地	7# 2 次	12.3	123°19'41"E, 47°25'03"N	黑龙江省 齐齐哈尔市龙江县	库塘、滩涂
俄罗斯萨哈共和国 勒拿河中游湿地	7# 2 次	11.0	126°53'15"E, 64°5'27"N	俄罗斯萨哈共和国	河流、滩涂
红碱滩风景区	9# 2 次	14.3	109°50'19"E, 39°1'38"N	陕西省榆林市神木县	库塘、滩涂
大兴安岭西侧河湿地	7# 2 次	7.0	118°28'49"E, 45°17'55"N	内蒙古自治区锡林郭勒盟 东乌珠穆沁旗	河流、滩涂
内蒙古图牧吉国家级 自然保护区	7# 2 次	15.5	121°33'22"E, 45°11'06"N	内蒙古自治区兴安盟 科尔沁右翼中旗	库塘、农田
辉河湿地	7# 2 次	7.0	119°26'15"E, 48°52'26"N	内蒙古自治区 呼伦贝尔市鄂温克旗	河流
霍林河湿地	7# 2 次	19.5	122°39'20"E, 44°40'01"N	吉林省白城市通榆县	库塘、湖泊

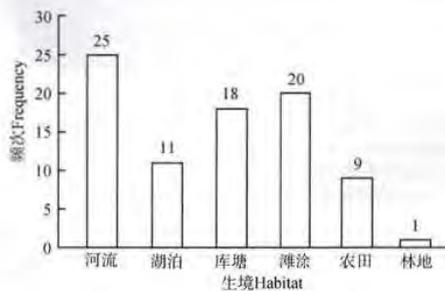


图 8 小天鹅停歇地生境类型
Fig. 8 Habitat types of stopover sites of *Cygnus columbianus*

飞行速度达 $96.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 秋季迁徙距离为 7467 km , 平均迁徙速度为 $32.75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 最大飞行速度达 $133.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。繁殖地在蒙古国的小天鹅春季迁徙距离为 2083 km , 平均迁徙速度为 $28.93 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 最大飞行速度达 $114.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。迁徙失败的小天鹅的迁徙距离一般在 1000 km 以内。

3 讨论与结论

3.1 最佳迁徙时间

统计结果显示, 3 月中旬可能是小天鹅春季迁徙的最佳时间。2014 年追踪的 2#、3#、6# 小天鹅于 3 月中下旬开始迁徙, 均成功迁飞出境, 其中 2# 到达 370

位于蒙古国的繁殖地, 3#、6# 出境后失联。4 月开始迁徙的 1#、4#、5# 小天鹅未能越过黄河, 最终失联。2015 年也有相同现象, 7#、9# 小天鹅于 3 月中旬开始迁徙, 成功抵达了俄罗斯繁殖地, 另外 5 只迁徙开始时间推迟了 16 d 左右, 最终失联。如不考虑设备故障因素, 小天鹅迁徙失败的可能性很大。候鸟迁徙是一个快速消耗能量的过程, 鸟类需要储备大量的脂肪以保证迁徙飞行时期的能量需求 (马志军等, 2005), 食物资源是能量积累的一个重要限制因子, 对鸟类迁徙有显著影响 (Lindstrom, 1991)。洞庭湖地区气候季节变化明显, 4 月湖区气温逐渐回升, 降水增多, 水位上涨明显。小天鹅的食物主要分布在开阔的浅水区, 气温和水深会影响小天鹅的食物资源数量与空间分布 (张梅清等, 2016), 来不及迁徙的小天鹅难以完成能量储备, 很可能是导致迁徙失败的原因。

3.2 重要停歇地及停歇次数

内蒙古的黄河湿地和大兴安岭两侧河谷湿地是小天鹅迁徙途中最重要的 2 处停歇地, 所有成功迁徙的小天鹅都会在此中转, 停歇时间均超过 15 d。加强这类停歇地的保护, 对于小天鹅种群是非常必要的。

能够顺利到达中转站的小天鹅在迁徙前期少有停歇或停歇时间不超过 1 d, 到达中转站之后则会停

需很长一段时间来补充体力和能量,为下一阶段迁飞做准备。相反,迁徙前期停歇次数多、停歇时间较长的小天鹅很难顺利到达迁徙中转站,这很可能是体能不足以支撑长距离的迁飞,并且多次停歇也增加了遭遇其他风险的可能性。

3.3 迁徙路线

本研究表明,洞庭湖越冬小天鹅有东线、中线、西线3条重要的迁徙通道。东线沿我国湖北、安徽、山东、天津、辽宁、内蒙古、黑龙江,抵达俄罗斯远东地区萨哈共和国勒拿河流域,与Speed和Nolet(2006)得出的小天鹅在古北区东部繁殖的迁徙路线有部分重叠。中线沿我国湖北、河南、山西、陕西、内蒙古,抵达蒙古国东戈壁省北部地区,与其他学者的报道基本一致(王大霖,2009)。西线沿我国湖北、河南、山西、陕西、内蒙古,蒙古国,哈萨克斯坦,抵达俄罗斯亚马尔-涅涅茨自治区北部,没有发现其他文献有关于这条迁徙线路的报道。

3.4 春季迁徙策略

在大多数迁徙鸟类的研究中,春季迁徙比秋季迁徙快(Fransson,1995;Alerstam,2006;Nilsson *et al.*,2013)。出现这一现象主要有2个原因,一是春季迁徙的条件更好,如,摄取食物的可能性更高、白天更长(Bauchinger & Klaassen,2005)、能获得更多的风辅助飞行(Kemp *et al.*,2010)。另一原因是迁徙鸟类在繁殖领域存在激烈的竞争,春季选择快速迁徙以尽早到达繁殖地(Kokko,1999)。本研究中,小天鹅春季迁徙时间比秋季平均慢22 d,可能与高纬度繁殖的时间压力有关。极地繁殖的鸟类可能采用综合资本繁殖和收入繁殖的策略(Si *et al.*,2015),在春季迁徙时需要在迁徙停歇地补充额外的能量,并携带到繁殖地用于繁殖活动。

3.5 禽流感病毒的传播途径

小天鹅迁徙途中在农田、林地和库塘等停歇,这增加了与家禽和其他鸟类接触的可能。相关研究表明,禽流感传播可能与野鸟、留鸟在交接区内的相互作用有关(吴晓旭等,2013),因此,小天鹅可能在停歇地与家禽交叉传播禽流感病毒。要确定禽流感传播与小天鹅等携带者迁徙的关系,还需要进一步研究候鸟迁徙与禽流感爆发在时空上的关系等。

3.6 卫星环志注意事项

本研究共对18只小天鹅进行了卫星追踪,至2017年10月,追踪小天鹅中1只活动、2只死亡、1只被救助、14只失联。虽然单只个体最长跟踪时间达977 d,但环志的总体成功率很低。作者认为选择健康的小天鹅至关重要,长距离而危险的迁徙过程对个体体能具有很大挑战。2015年2月救助的8只中毒或受伤的小天鹅,在圈养一段时间后放飞,可能还没有恢复到完全健康的状态,卫星追踪在较短时间内全部失败,平均追踪时间为43.7 d,最短的不到5 d。此外,正确的安装方式和稳定可靠的设备也是影响卫星环志成功率的重要因素。

致谢:湖南东洞庭湖国家级自然保护区、世界自然基金会在项目执行过程中给予了大力支持,湖南环球信士科技有限公司在卫星追踪器的安装和设备控制方面给予了技术帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- 段酬苍,赵运林,李立,等. 2016. 救助小天鹅越冬期行为节律研究[J]. 野生动物学报, 37(3): 216-220.
- 傅勇. 2004. 崇明东滩冬季水鸟生境选择与保护策略研究[D]. 上海: 华东师范大学.
- 关鸿亮, 通口广芳. 2000. 卫星跟踪技术在鸟类迁徙研究中的应用及展望[J]. 动物学研究, 21(5): 412-415.
- 郭家良, 刘雪华, 杨萍, 等. 2015. 豆雁在中国的春季迁徙路线及迁徙停歇地[J]. 动物学杂志, 50(2): 288-293.
- 黄慧敏, 赵运林, 王定兴, 等. 2013. 基于RS和GIS的洞庭湖小天鹅越冬生境选择研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 22(1): 62-66.
- 李言阔, 黄建刚, 李凤山, 等. 2013. 鄱阳湖越冬小天鹅在高水位年份的昼间时间分配和活动节律[J]. 四川动物, 32(4): 498-503.
- 马志军, 王勇, 陈家宽. 2005. 迁徙鸟类中途停歇期的生理生态学研究[J]. 生态学报, 25(11): 3067-3075.
- 马志军. 2009. 鸟类迁徙的研究方法和研究进展[J]. 生物学通报, 44(3): 5-9.
- 王大霖. 2009. 新疆发现用于“监测全球禽流感”的环志小天鹅[N]. 新华每日电讯, 06-14(002).
- 王会志, 姚红, 虞快. 1995. 小天鹅行为谱的初步建立[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 3: 75-82.
- 吴晓旭, 田怀玉, 周森, 等. 2013. 全球变化对人类传染病发生与传播的影响[J]. 中国科学: 地球科学,

- 11: 1743-1759.
- 张爱国. 2010. 移动空间数据组织与自适应定位地图服务研究[D]. 福州: 福州大学.
- 张梅清, 赵运林, 徐正刚, 等. 2016. 洞庭湖越冬小天鹅食性研究[J]. 西南林业大学学报, 36(4): 121-125.
- Alerstam T. 2006. Strategies for the transition to breeding in time-selected bird migration [J]. *Ardea*, 150(1): 51-56.
- Badzinski SS, Kennedy L, Petrie SA, et al. 2015. Variation in body composition and digestive organs of tundra swans during migration at Long Point, Lake Erie, Ontario [J]. *Waterbirds*, 34: 468-475.
- Barron DG, Brawn JD, Weatherhead PJ. 2010. Meta-analysis of transmitter effects on avian behaviour and ecology [J]. *Methods in Ecology & Evolution*, 1(2): 180-187.
- Bauchinger U, Klaassen M. 2005. Longer days in spring than in autumn accelerate migration speed of passerine birds [J]. *Journal of Avian Biology*, 36(1): 3-5.
- Chen W, Doko T, Fujita G, et al. 2016. Migration of tundra swans (*Cygnus columbianus*) wintering in Japan using satellite tracking: identification of the eastern Palearctic flyway [J]. *Zoological Science*, 33(1): 63-72.
- Ely CR, Meixell BW. 2016. Demographic outcomes of diverse migration strategies assessed in a metapopulation of tundra swans [J]. *Movement Ecology*, 4(1): 1-15.
- Fransson T. 1995. Timing and speed of migration in north and west European populations of *Sylvia* warblers [J]. *Journal of Avian Biology*, 26(1): 39-48.
- Kamiya K, Ozaki K. 2002. Satellite tracking of Bewick's swan migration from Lake Nakaumi, Japan [J]. *Waterbirds*, 25: 128-131.
- Kemp MU, Shamoun-Baranes J, van Gasteren H, et al. 2010. Can wind help explain seasonal differences in avian migration speed? [J]. *Journal of Avian Biology*, 41(6): 672-677.
- Kokko H. 1999. Competition for early arrival in migratory birds [J]. *Journal of Animal Ecology*, 68(5): 940-950.
- Lindstrom MÅ. 1991. Maximum fat deposition rates in migrating birds [J]. *Ornis Scandinavica*, 22(1): 12-19.
- Newman SH, Iverson SA, Takekawa JY, et al. 2009. Migration of whooper swans and outbreaks of highly pathogenic avian influenza H5N1 virus in eastern Asia [J]. *PLoS ONE*, 4(5): e5729. DOI: 10.1371/journal.pone.0005729.
- Nilsson C, Klaassen RH, Alerstam T. 2013. Differences in speed and duration of bird migration between spring and autumn [J]. *American Naturalist*, 181(6): 837-845.
- Nuijten RJM, Kölsch A, van Gils JA, et al. 2014. 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*, 45(2): 113-122.
- Olson D, Warren J, Reed T. 2009. Satellite-tracking the seasonal locations of trumpeter swans *Cygnus buccinator* from Red Rock Lakes National Wildlife Refuge, Montana, USA [J]. *Wildfowl*, 59: 3-16.
- Pennycuik CJ, Einarsson Ó, Bradbury TAM, et al. 1996. Migrating whooper swans *Cygnus cygnus*: satellite tracks and flight performance calculations [J]. *Journal of Avian Biology*, 27(2): 118-134.
- Si Y, Xin Q, Boer WFD, et al. 2015. Do arctic breeding geese track or overtake a green wave during spring migration? [J]. *Scientific Reports*, 5(1): 8749.
- Speed NBA, Nolet BA. 2006. Speed of spring migration of tundra swans *Cygnus columbianus* in accordance with income or capital breeding strategy [J]. *Ardea*, 94(3): 579-591.
- Woodbridge B, Finley KK, Seager ST. 1995. An investigation of the Swainson's hawk in Argentina [J]. *Journal of Raptor Research*, 29(3): 202-204.
- Zhao YL, Tian H, Jiao P, et al. 2016. Relationship between meteorological factor and population quantity of *Cygnus Columbianus* population overwintering [J]. *Gummi Fasern Kunststoffe*, 69(14): 1104-1110.