



# 基于卫星追踪的燕隼秋季 迁徙路线及中途停歇地的研究

李思梦<sup>1,2</sup>, 赵筱涛<sup>2</sup>, 徐沛卓<sup>2</sup>, 万名弢<sup>2</sup>, 许永珊<sup>2</sup>, 许青<sup>2\*</sup>

(1. 东北林业大学奥林学院, 哈尔滨, 150040;

2. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨, 150040)

## 稿件运行过程

收稿日期: 2024-04-05

修回日期: 2024-04-19



关键词: 燕隼;

卫星追踪;

迁徙路线;

活动规律;

中途停歇地

**Keywords:** Eurasian hobby (*Falco sub-buteo*);

Satellite tracking;

Migration route;

Activity patterns;

Stopover sites

中图分类号: Q958.13

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-02-0336-11

DOI: 10.12375/ysdwx.20250211

## 摘要

2022年8—11月,利用卫星跟踪技术结合实地调查,对东北地区燕隼(*Falco sub-buteo*)秋季的迁徙路线及中途停歇地的利用进行了研究。结果表明:(1)燕隼的迁徙路线经过我国东北、华北以及南部沿海地区,一直延伸到东南半岛、孟加拉国,最远到达非洲肯尼亚,位于东亚-澳大利西亚和中亚-东非迁徙路线上。调查期间燕隼平均日迁飞距离为 $(305.57 \pm 141.93)$  km,瞬时飞行速度大多处于 $20 \leq v < 40$  km/h,最快瞬时飞行速度为109.50 km/h。最远迁徙至非洲肯尼亚的燕隼,迁徙距离达11 715.26 km,其最长的跨海不停歇迁飞距离为2 861.47 km,平均速度为31.79 km/h;最长的陆上不停歇迁飞距离为1 285.99 km,平均速度为47.63 km/h。(2)对影响燕隼迁徙启动的气候因子探究发现,迁徙启动与风向( $r = -0.678, P < 0.001$ )和平均气温( $r = -0.482, P < 0.05$ )均存在显著的负相关,说明北风和降温促进燕隼开始迁飞。(3)分析燕隼迁徙过程中的日活动节律,发现其活动量从06:00开始逐步增加,15:00左右达到峰值,此时的平均活动量为 $(2\ 313.49 \pm 97.67)$ 次;随后活动量逐渐减少,21:00降至最低,从21:00至次日06:00,活动量保持在较低水平,平均活动量为 $(341.73 \pm 292.33)$ 次。(4)燕隼在秋季迁徙期间有2或3个中途停歇地,主要分布在辽东半岛、山东半岛以及东南亚地区。使用动态布朗桥模型计算燕隼在中途停歇地的活动区域,结果显示燕隼95% dBBMM、90% dBBMM和50% dBBMM平均活动区域面积分别为 $(82.91 \pm 100.24)$ 、 $(51.47 \pm 59.93)$ 、 $(4.66 \pm 3.00)$  km<sup>2</sup>,个体之间的活动面积不存在显著差异( $P > 0.05$ )。(5)对燕隼中途停歇地的核心活动区域(50% dBBMM)土地利用类型分析发现,燕隼中途停歇地的土地利用类型主要为耕地,其次是草地、建筑区和林地。研究结果可为燕隼及其栖息地保护策略的制定提供参考。

第一作者简介: 李思梦(1998—),女,硕士研究生;主要从事鸟类生态学研究。E-mail:lsm\_simone@163.com

\*通信作者: 许青, E-mail:xuqing-hrb@163.com

## The Study on the Autumn Migration Routes and Stopover Sites of Eurasian Hobby Based on Satellite Tracking

LI Simeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaotao<sup>2</sup>, XU Peizhuo<sup>2</sup>, WAN Mingtao<sup>2</sup>, XU Yongshan<sup>2</sup>, XU Qing<sup>2\*</sup>

(1. Aulin College, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China;

2. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China)

**Abstract:** From August to November in 2022, the study was conducted on the autumn migration routes and the utilization of stopover sites of Eurasian hobbies (*Falco subbuteo*) in the northeast region in China with the satellite tracking technology combined with field investigations. The results showed that: (1) The migration paths of Eurasian hobbies extends through northeastern China, north China, and the southern coastal areas, all the way to the Southeast Asian Peninsula, Bangladesh, and as far as Kenya in Africa. These routes are situated along the East A, 1sia-Australasia and Central Asia-East Africa migratory flyways. During the investigation period, the average daily migration distance of Eurasian hobbies was  $(305.57 \pm 141.93)$  km, with the instantaneous flight speeds mostly ranging between 20 and 40 km/h, and the fastest recorded instantaneous speed was 109.50 km/h. The Eurasian hobby that migrated the furthest to Kenya covered a migration distance of 11 715.26 km, its longest non-stop migration distance across the sea was 2 861.47 km at an average speed of 31.79 km/h, and the longest non-stop overland migration distance was 1 285.99 km at an average speed of 47.63 km/h. (2) Investigation of the climatic factors affecting the initiation of migration in Eurasian hobbies revealed a significant negative correlation with wind direction ( $r = -0.678$ ,  $P < 0.001$ ) and average temperature ( $r = -0.482$ ,  $P < 0.05$ ), which indicated that northerly winds and a drop in temperature promote the onset of migration in Eurasian hobbies. (3) Analysis of the daily activity rhythms during the migration process of Eurasian hobbies showed that their activity gradually increases from 06:00, peaking around 15:00 with an average activity level of  $(2\ 313.49 \pm 97.67)$ . Subsequently, the activity decreases, reaching its lowest at 21:00. From 21:00 to the next morning at 06:00, the activity remains at a low level, with an average activity level of  $(341.73 \pm 292.33)$ . (4) During the autumn migration period, Eurasian hobbies utilize 2–3 stopover sites, primarily located on the Liaodong Peninsula, Shandong Peninsula, and in Southeast Asia. The dynamic Brownian bridge movement model (dBBMM) was applied to calculate the activity areas at stopover sites, which revealed that the average area of 95% dBBMM activity zones was  $(82.91 \pm 100.24)$  km<sup>2</sup>, 90% dBBMM was  $(51.47 \pm 59.93)$  km<sup>2</sup>, and 50% dBBMM was  $(4.66 \pm 3.00)$  km<sup>2</sup>, with no significant differences in activity area sizes among individuals ( $P > 0.05$ ). (5) Analysis of the land use types within the core activity areas (50% dBBMM) of the stopover sites showed that the primary land use type was cropland, followed by grassland, built-up areas, and woodland. The results of this study can be used as a reference for the formulation of strategies for the protection of Eurasian hobby and its habitat.

燕隼(*Falco subbuteo*)为国家二级重点保护野生动物<sup>[1]</sup>,分布几乎遍及全国各地<sup>[2]</sup>。该物种共有2个亚种,即指名亚种(*F. s. subbuteo*)和南方亚种(*F. s. streichi*),繁殖地广泛分布于欧洲、亚洲中部和东部的多个国家,越冬地主要集中在非洲以及东南亚和南亚等地区<sup>[2-5]</sup>。我国境内2个亚种都有分布,本研究对象为东北地区的燕隼指名亚种<sup>[2-3]</sup>。东北地区燕隼每年4月末—6月初繁殖,并于9—10月飞往南方越冬<sup>[6]</sup>。目前对燕隼迁徙的研究主要集中在欧洲

种群。Meyburg *et al.*<sup>[7]</sup>在德国对1只成年燕隼进行追踪,详细记录了这只燕隼2次春秋迁徙期间的行为模式以及越冬地和繁殖地等信息,揭示了德国与非洲南部之间燕隼完整的迁徙动态。Strandberg *et al.*<sup>[8]</sup>通过卫星遥测技术对鸢(*Pandion haliaetus*)、鵟头蜂鹰(*Pernis apivorus*)、白头鹞(*Circus aeruginosus*)和燕隼4种猛禽迁徙穿越撒哈拉沙漠的过程进行记录,揭示了它们在何时何地面临更高的风险和死亡率;该研究记录了成年燕隼从瑞典到南非的秋季迁

徙,发现燕隼迁徙路线的汇聚和连续雨林的分布之间存在显著关联,指出燕隼可以最大限度地缩短穿越森林的飞行距离,选择集中于更适合迁徙和觅食的廊道上<sup>[9]</sup>;此外,Strandberg *et al.*<sup>[10]</sup>的分析还揭示了燕隼在北欧和南非之间迁徙期间每日飞行时间和沿途迁徙速度的变化,为理解燕隼迁徙行为提供了重要信息。

鸟类的迁徙是一个复杂的过程,受气候、食物资源及中途停歇地条件等多种因素的影响,其中适宜的中途停歇地对于燕隼等长距离迁徙鸟类进行休息和能量补给具有重要意义<sup>[11]</sup>。然而,我国关于燕隼具体迁徙路线和中途停歇地的研究尚未见报道。基于此,本研究利用卫星追踪技术,对在东北地区繁殖

的燕隼的迁徙路线、活动规律及其中途停歇地进行研究,为燕隼及其栖息地的保护和可持续发展提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 燕隼追踪与迁徙数据获取

2022年8—10月,在辽宁省大连市某机场鸟网上救助了数只燕隼。选择体质量 $\geq 120$  g且身体健康、状态良好的个体,为其佩戴背负式卫星追踪器后放飞。追踪器由湖南环球信士科技有限公司生产,型号为HQBG1206(6.5 g),符合鸟类追踪器质量在其体质量的3%~5%的经验值<sup>[12]</sup>。本研究追踪6只燕隼,相关体征信息见表1。

表1 燕隼相关体征参数

Table 1 Related morphometric parameters of Eurasian hobby

个体 Individual	体长/cm Body length	翅长/cm Wingspan length	尾长/cm Tail length	跗蹠/cm Instep length	头高/cm Head height	头长/cm Head length	喙长/cm Beak length	体质量/g Body mass
NFU026	26.1	28.1	13.3	3.58	2.33	4.24	1.75	134
NFU027	25.1	29.7	12.7	3.50	2.18	4.24	1.80	135
NFU030	28.0	33.0	15.0	4.16	2.45	4.25	1.47	155
NFU031	25.3	29.4	12.5	3.51	2.46	4.27	1.97	140
NFU036	25.5	30.5	12.0	3.57	2.18	4.17	1.81	131
NFU037	27.5	31.5	14.0	3.43	2.40	4.51	1.94	130

追踪器每3 h回传一次数据。回传数据包括燕隼的位置数据(经纬度、海拔和位置定位等级)、运动数据(运动量、运动航向和运动瞬时速度)、追踪器数据(卫星追踪器电压、追踪器所采集到的燕隼身体接触面温度)以及追踪器回传位点的时间。为确保研究的准确性,仅采用位置定位误差在20 m以内的数据。

## 1.2 数据处理

### 1.2.1 迁徙路径及速度分析

从环球信士卫星追踪数据服务平台调取燕隼活动位点的经纬度,下载并导入ArcGIS 10.6软件中进行处理,探究燕隼迁徙路线。将追踪器回传信息导入Excel中,分别计算每只燕隼迁飞段的迁徙距离、迁飞时间和迁徙停歇时间等。探究燕隼迁徙过程中的瞬时飞行速度,定义 $0 \leq v \leq 5$  km/h的瞬时飞行速度为不飞行状态, $v \geq 5$  km/h的瞬时飞行速度为飞行状态,将瞬时飞行速度按梯度分类,分别对6只燕隼的瞬时飞行速度进行提取和整合。

### 1.2.2 影响迁徙启动的气候因子分析

研究燕隼在大连市金州区迁飞启动与气候因子之间的关系,选择燕隼迁飞启动前后4 d的逐日气象数据,包括天气(晴朗、阴、阵雨、小雨、中雨、大雨、雾)、平均气温、降水量、相对湿度、风速、风向(东风、东北风、东南风、北风、西风、西北风、西南风、南风)、总云量、雷暴概率以及能见度,在R 4.2.2软件中建立线性混合模型(linear mixed model, LME)全模型,按照赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)排序,筛选出在因变量条件下的最优模型,并展示其最优模型结果。研究使用的气象数据来源于欧洲中期天气预报中心(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的数据集(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为逐时)<sup>[13]</sup>、美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心网站(National Centers for Environmental Information, NCEI),获取2022年9—10月辽宁省大连市金州区3个气象站的气象数据。

### 1.2.3 日活动节律分析

分析燕隼的日活动节律,利用卫星追踪器中内置步行检测和计步功能的三轴加速度传感器,记录燕隼在采集周期内运动的次数,并将其作为活动量进行后续分析。由于卫星追踪器回传的数据时间为北京时间,为了精确燕隼迁徙路线上不同时区的日活动节律,将不同地理位置的数据进行时区调整。

### 1.2.4 迁徙中途停歇地面积及土地利用类型分析

本研究定义白天为06:00—18:00,夜间为18:00—06:00。迁徙期间夜间连续2个定位点之间的平均运动速度 $< 0.5 \text{ km/h}$ 时为燕隼进入夜栖地时间,连续2个定位点之间的平均运动速度 $\geq 0.5 \text{ km/h}$ 时为燕隼离开夜栖地时间。定义连续2个及以上夜栖地之间距离 $\leq 20 \text{ km}$ 的为中途停歇地,将中途停歇地作为一个停歇单元,放飞地至中途停歇地、2个中途停歇地之间的路段划分为迁飞段。利用R 4.2.2软件中move包构建动态布朗桥模型(dynamic Brownian bridge movement model, dBBMM)<sup>[14-15]</sup>,分别对燕隼的中途停歇地活动区域进行计算,以95% dBBMM作为活动区域,90% dBBMM作为主要活动区域,50% dBBMM作为核心活动区域<sup>[16-17]</sup>,用rgdal包将计算结果导入ArcGIS 10.6软件计算其相应的面积;使用

10 m精度的土地覆盖数据集,通过ArcGIS 10.6软件分析燕隼中途停歇地的土地利用类型,计算燕隼在中途停歇地不同土地利用类型的占比。研究使用的全球土地覆盖数据来源于Esri公司基于10 m分辨率的哨兵2号(Sentinel-2)卫星影像。

在数据处理过程中,首先对数据进行方差齐性和正态性检验,若数据符合方差齐性和正态性,采用单因素方差分析或独立样本 $t$ 检验;反之,则使用非参数Kruskal-Wallis检验。所有数据分析在R 4.2.2和SPSS 27.0软件中完成。

## 2 结果分析

### 2.1 迁徙路线

通过ArcGIS 10.6软件绘制出6只燕隼的秋季迁徙路线(图1)。由图1可见,燕隼大体上沿着东亚-澳大利西亚迁徙路线,从辽东半岛出发,飞越渤海海峡到达山东半岛,停留一段时间后,继续向南迁飞。其中,NFU026号燕隼于2022年11月18日到达湖北省孝感市附近,在此地停留16天后信号丢失;NFU030、NFU031及NFU036号沿海岸线飞行,NFU027距海岸线300~600 km飞行,最终都到达东南亚地区越冬;NFU037号沿着西亚-东非的迁徙路线继续飞行,先后跨越孟加拉湾和阿拉伯海,最终到达非洲肯尼亚。

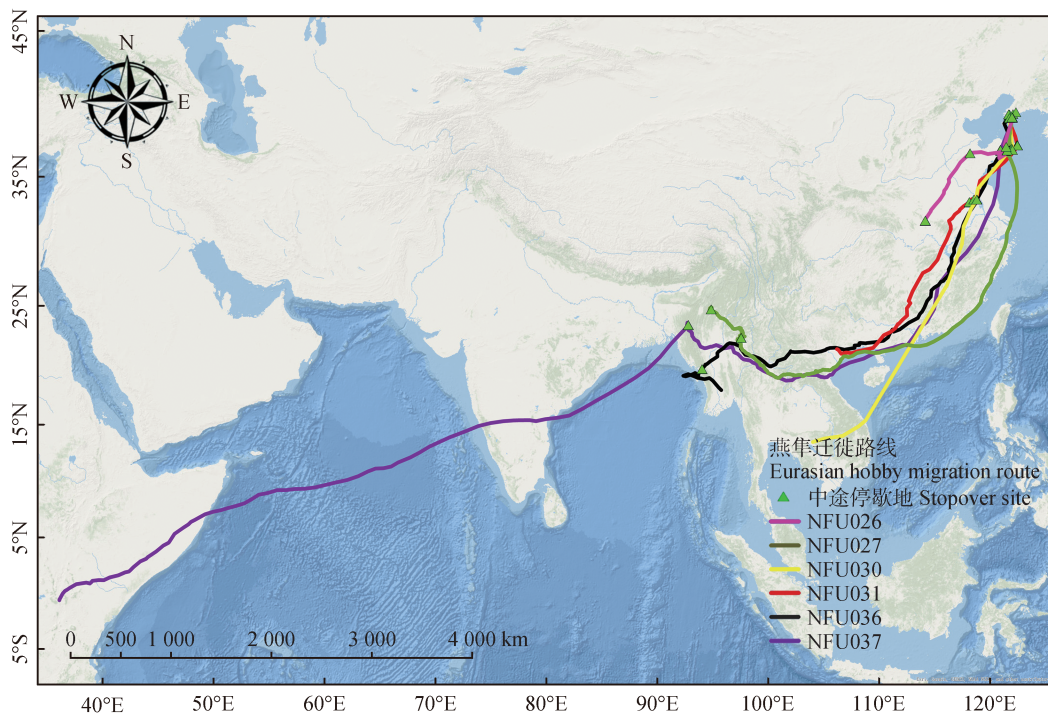


图1 燕隼的迁徙路线

Figure 1 The migratory route of Eurasian hobby

### 2.2 迁飞速度和迁徙距离

燕隼的瞬时飞行速度按梯度分布见图2,燕隼在迁徙过程中以  $20 \leq v < 30$  km/h 的瞬时飞行速度最多,占

33.43%;其次是  $30 \leq v < 40$  km/h,占24.53%;最少的为  $90 \leq v < 100$  km/h 和  $100 \leq v < 110$  km/h,均占0.15%。其中,燕隼最快的瞬时飞行速度为109.50 km/h。

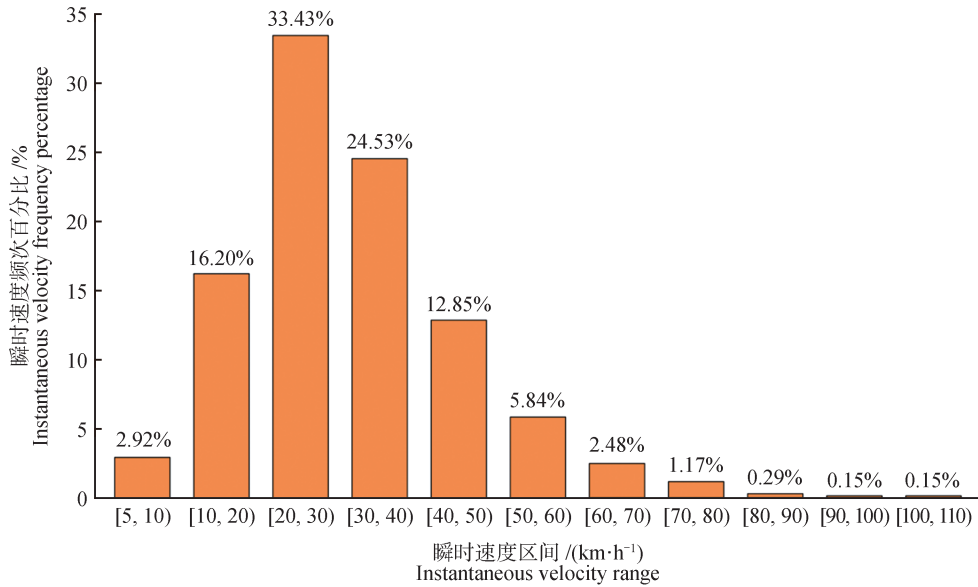


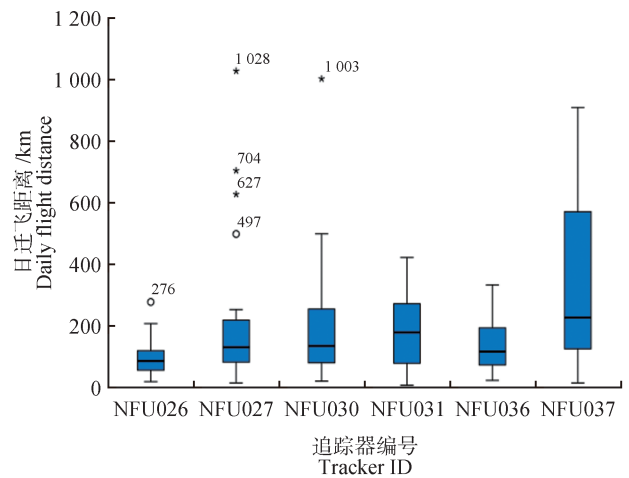
图2 燕隼的瞬时飞行速度分布

Figure 2 Distribution of instantaneous flight speeds of Eurasian hobby

对每只燕隼在迁飞段的迁飞距离以及每段迁飞过程中的平均日迁飞距离进行 Kruskal-Wallis 检验,结果显示,不同燕隼个体之间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。燕隼在整个迁飞过程中的日迁飞距离平均值为  $(305.57 \pm 141.93)$  km,最大值为1028.18 km(图3);在不同迁飞段的迁飞距离平均值为  $(1438.00 \pm 1940.00)$  km,最大值为6971.35 km。其中,NFU037号燕隼到达非洲肯尼亚的总迁飞距离为11715.26 km,是本研究追踪的燕隼个体中迁飞的最远距离。燕隼最长的跨海不停歇迁飞距离为2861.47 km,用时约90 h,平均速度为31.79 km/h;最长的陆上不停歇迁飞距离为1285.99 km,用时27 h,平均速度为47.63 km/h。

### 2.3 触发迁徙启动的气候因子

燕隼迁离前后大连市金州区的气象数据显示,2022年9—10月的气温  $8.86 \sim 24.32$  °C,雨天占14.75%,晴和多云的天气占67.21%,雾天占14.75%,阴天占3.29%。使用线性混合模型分析,结果表明,风向与燕隼在大连市迁徙启动呈极显著负相关 ( $r = -0.678, P < 0.001$ ),平均气温与迁徙启动时间也显示显著负相关 ( $r = -0.482, P < 0.05$ )。天气 ( $r = 0.342, P = 0.081$ )、风速 ( $r = 0.162, P = 0.420$ )和能见度 ( $r = 0.276, P = 0.164$ )对于燕隼在



\*. 远离大多数数据的极端值; °. 比极端值稍微温和的离群值。  
\*. Denotes extreme values that are far from most data; °. Indicates outliers that are slightly milder than the extreme.

图3 燕隼的日迁飞距离箱线图

Figure 3 Boxplot of daily migration distance of Eurasian hobby

大连市开始迁飞启动的影响不显著。

### 2.4 迁徙过程中的日活动节律

对卫星追踪器回传的活动量进行 Kruskal-Wallis 检验,表明不同燕隼个体之间没有显著的活动差异性 ( $P > 0.01$ )。燕隼的活动量从06:00开始逐步增

加,至 15:00 左右达到峰值,此时的平均活动量为 (2 313.49 ± 97.67) 次;随后活动量逐渐减少,到 21:00 降至最低,从 21:00 至次日 06:00,活动量一直保持在较低水平,平均值为 (341.73 ± 292.33) 次 (图 4)。

## 2.5 迁徙中途停歇地利用

### 2.5.1 中途停歇地面积及停留时间

燕隼中途停歇地的分布见表 2,使用 Pearson 相关性分析发现,燕隼中途停歇地面积与停留时间之间不存在显著相关性 ( $P > 0.05$ )。对燕隼个体在中途停歇地的活动面积进行平均化处理,得到燕隼 50% dBBMM 的面积为 (4.66 ± 3.00) km<sup>2</sup>、90% dBBMM 的面积为 (51.47 ± 59.93) km<sup>2</sup>、95% dBBMM 的面积为 (82.91 ± 100.24) km<sup>2</sup> (表 3)。通过对比迁飞时间与在中途停歇地停留的时间,得到燕隼

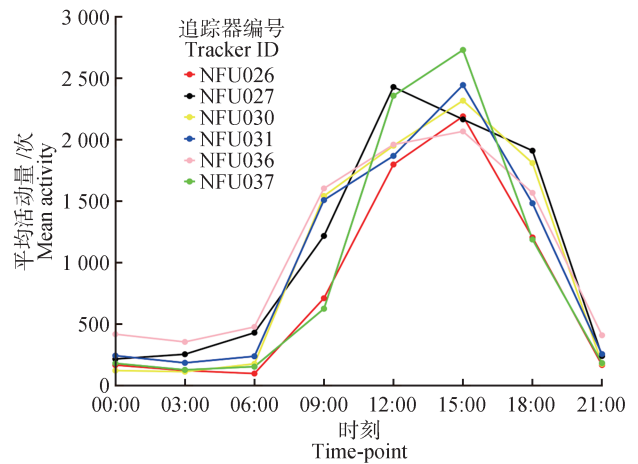


图 4 燕隼日活动节律

Figure 4 Daily activity rhythm of Eurasian hobby

在中途停歇地停留时间占总迁飞时间的 (68.55 ± 14.50)%。

表 2 燕隼中途停歇地分布

Table 2 Stopover distribution of Eurasian hobby

个体 Individual	停歇地编号 Stopover site ID	中途停歇地 Stopover site
NFU026	1	辽宁省大连市金州区
	2	山东省烟台市牟平区
	3	山东省威海市乳山市
	4	山东省淄博市临淄区
	5	湖北省孝感市大悟县
NFU027	1	山东省威海市乳山市、烟台市海阳市
	2	缅甸掸邦昔卜、孟崖
	3	缅甸实皆省霍马林
NFU030	1	辽宁省大连市金州区
	2	山东省威海市文登区
	3	江苏省淮安市洪泽区洪泽湖
NFU031	1	山东省威海市荣成市
	2	江苏省宿迁市泗洪县洪泽湖
	3	安徽省滁州市明光市淮河
NFU036	1	辽宁省大连市金州区
	2	山东省烟台市海阳市、威海市乳山市
	3	缅甸若开邦安
NFU037	1	山东省烟台市海阳市
	2	印度米佐拉姆邦塞尔奇普、艾藻尔

表3 燕巢中途停歇地面积

Table 3 Stopover sites area of Eurasian hobby km<sup>2</sup>

个体 Individual	50% dBBMM	90% dBBMM	95% dBBMM
NFU026	1.66	95.00	28.56
NFU027	4.12	173.10	286.60
NFU030	4.73	28.76	43.69
NFU031	10.37	36.52	47.26
NFU036	2.99	24.26	35.47
NFU037	4.07	29.05	55.85
平均值 ± 标准差 Mean ± SD	4.66 ± 3.00	51.47 ± 59.93	82.91 ± 100.24

2.5.2 在中途停歇地的日活动距离

对每只燕巢在中途停歇地的日活动距离进行Kruskal-Wallis检验,发现不同燕巢个体之间存在显著性差异( $P < 0.001$ )。对每只燕巢在中途停歇地的日活动距离进行均值化处理,可以明显看出,NFU027号燕巢在中途停歇地的日活动距离高于其他燕巢(图5)。其中NFU030号燕巢在中途停歇地中的日活动距离最远,为97.27 km。

2.5.3 中途停歇地的土地利用类型

通过对燕巢中途停歇地的土地利用类型探究(表4),发现在燕巢的停歇地中耕地面积占比最大。其次,燕巢的核心活动区域在草地、建筑区和林地的利用面积均为13%左右;在主要活动区域和活动区域中,对林地和草地的利用面积均占20%左右。

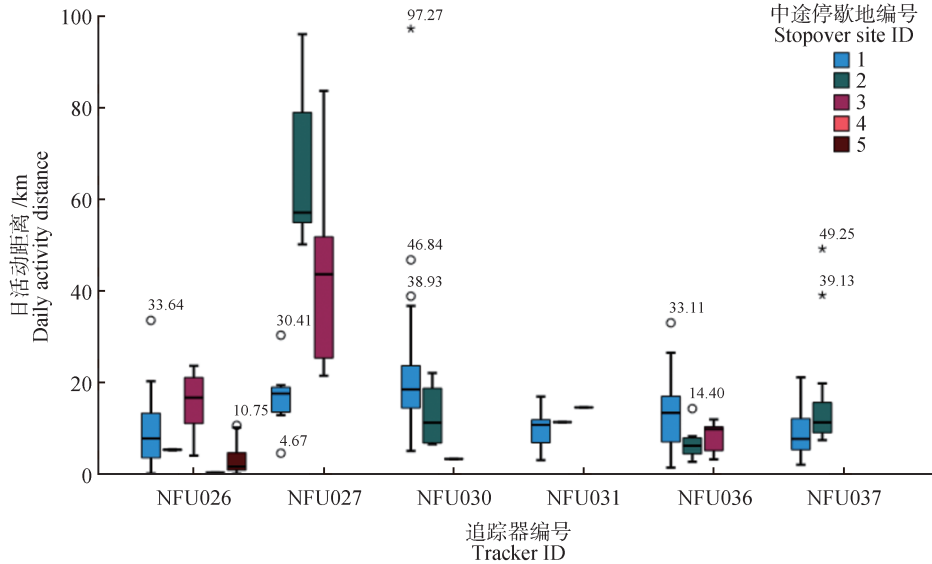


图5 燕巢在中途停歇地的日活动距离箱线图

Figure 5 Boxplot of daily activity distance of Eurasian hobby in stopover sites

表4 燕巢中途停歇地的土地利用类型占比

Table 4 Land use types of Eurasian hobby stopover sites

%

土地类型 Land type	水域 Water area	林地 Woodland	淹没植被 Submerged vegetation	耕地 Cropland	建筑区 Built-up areas	雪/冰 Snow/Ice	裸地 Bare ground	草地 Grassland
50% dBBMM	8.29	12.80	0.95	51.53	13.00	0	0.36	13.07
90% dBBMM	4.30	23.41	0.65	39.47	11.04	0	0.75	20.37
95% dBBMM	4.78	26.11	0.43	37.63	10.75	0	0.48	19.83

3 讨论

3.1 迁徙路线和迁徙时间

通过实地调查和对卫星追踪器回传数据的分

析,发现燕巢自8月中下旬开始出现在大连市某机场及其周边,9月上旬,燕巢的数量达到峰值,9月中旬后逐渐减少。这一现象与万冬梅等<sup>[18]</sup>在大连老铁山和锦州绥中地区对辽宁省猛禽迁徙规律的调查研

究结果基本相符,燕隼南迁的趋势一直持续到10月底。欧洲的燕隼迁徙追踪报道发现瑞典南部捕获追踪的4只燕隼长途迁徙穿越撒哈拉沙漠和热带雨林,其中3只到达南非,1只到达非洲东部越冬<sup>[10]</sup>;德国追踪的1只成年燕隼秋迁也穿越了沙漠和雨林,最终到达南非<sup>[7]</sup>。本研究追踪的燕隼迁徙路线显示,它们大体上是沿着东亚-澳大利西亚迁徙路线,从辽东半岛出发,跨越渤海海峡至山东半岛,停留一段时间后大部分前往东南亚地区越冬,仅有1只继续沿着西亚-东非的迁徙路线,到达非洲肯尼亚。

根据国内相关文献<sup>[19-20]</sup>记载,燕隼指名亚种的越冬区在西藏南部,然而本研究追踪的个体并未飞往该区域。考虑到燕隼指名亚种分布较广,可能存在多样化的迁徙路线,青海、新疆和甘肃等地的燕隼沿着中亚-印度的迁徙路线到达西藏南部等地越冬;而东北、华北地区和山东等地的燕隼,由于我国西高东低的地势特点,大多选择沿着东部沿海地区迁飞。因此,推测东北和华北地区的燕隼越冬地主要位于东南亚或东非等地。由于样本量较少,本研究无法充分证实这一假设。尽管如此,从已观察到的迁徙路线和行为模式中表现出的相似特征,表明了燕隼典型的迁徙习性。未来的研究可以对不同地区燕隼的春、秋季迁徙进行更深入地调查探讨。

### 3.2 迁徙过程中飞行速度和迁徙距离

燕隼在迁徙过程中的速度受到多种因素影响,包括风向、风速、气压、温度和湿度等外界气候因素,以及燕隼体力和体质量等自身因素。在大多数情况下,燕隼的迁飞速度保持在20~40 km/h,既能确保飞行效率,又能节省体力和能量消耗。这与Strandberg *et al.*<sup>[10]</sup>通过卫星跟踪瑞典南部的燕隼所记录的平均飞行速度40 km/h,以及Bruderer *et al.*<sup>[21]</sup>使用雷达探测技术测量的燕隼飞行速度11.3 m/s基本相吻合。

燕隼在迁徙过程中的日迁飞距离存在个体差异,NFU037号燕隼的总迁飞距离最远,且在迁徙途中需要长时间飞越孟加拉湾、阿拉伯海这两大地理屏障,其中跨越孟加拉湾全程约1 580.97 km飞行32 h、跨越阿拉伯海全程约2 800 km飞行90 h不停歇,因此它的日迁飞距离范围高于其他个体。相比之下,NFU026号燕隼的日迁飞距离上限较低,这主要是因为它仅跨越了黄海后一直在我国内陆迁飞,还未出境就已丢失信号。此外,本研究中记录到的

燕隼的最长日迁飞距离为1 028.18 km,该记录是在NFU027号燕隼沿我国东南沿海地区海岸线持续飞行时获得,当日该燕隼在凌晨仍在继续迁飞。这一发现与德国燕隼的追踪研究结果相似,该研究指出燕隼在跨越沙漠和雨林屏障时迁徙速度会明显加快,最高达到621 km/d<sup>[7]</sup>。

### 3.3 迁徙过程中的活动规律

通过对燕隼在大连市金州区的迁飞启动与气候因子的关系探究发现,北风和降温均会促使燕隼开始向南迁徙。这与王鹏华<sup>[22]</sup>对国内黑鸢(*Milvus migrans*)迁徙追踪的研究结果一致,黑鸢在秋季迁飞时也倾向于选择顺风条件。同样,在中国东部沿海地区对猛禽迁徙的监测及气象数据分析结果也显示,猛禽通常会利用顺风迁飞以减少能量消耗,如遇逆风它们可能会选择在当地停留;此外,气温变化对猛禽迁徙有着显著影响,气温的升高会导致迁徙延迟,而气温大幅度下降则会迎来猛禽迁徙的高峰期<sup>[23]</sup>。

活动节律反映了动物在不同时间维度上的活动强度、变化规律以及该物种对环境条件等的响应与适应,这对于目标物种的保护与管理具有重要的意义<sup>[24]</sup>。猛禽通常在白天迁徙<sup>[22,25]</sup>,而在夜间迁飞的较为少见,一般与长途跨海密切相关<sup>[26-29]</sup>。本研究发现,燕隼大多数时间都在白天迁飞,这与瑞典南部追踪的4只燕隼迁徙习性<sup>[9]</sup>相一致。相比鸮、草原雕(*Aquila nipalensis*)或鵟头蜂鹰这种强烈依赖热气流、驭风飞驰的大型猛禽会被白天热流时间(09:00—17:00)和气候条件限制<sup>[29-33]</sup>,隼类翅膀窄而尖,适合扑翼飞行而非翱翔<sup>[33]</sup>。因此燕隼通常日出前后出发,且推迟进入夜栖地的时间,这可能与采用飞行觅食和热浮迁徙相结合的策略有关<sup>[10]</sup>。

本研究追踪的燕隼存在夜间迁徙的现象。其中,有2只燕隼的夜间迁徙行为出现在飞越海洋以及沿海岸线飞行时。NFU037号燕隼的第一段夜间长距离迁飞发生在中国境内,穿梭于武夷山脉和南岭等山峰的中间低洼地带时,夜间的谷地同高度空气冷却较慢<sup>[34]</sup>,山谷风可能更有利于其飞行;其余两段夜间迁飞均在飞越海洋时,首先是跨越孟加拉湾,在印度半岛短暂休息一夜后,继续长时间飞越阿拉伯海,这与Meyburg *et al.*<sup>[7]</sup>于德国追踪的燕隼在夜间穿越地中海的迁徙模式相似。由于海上无法停歇,一旦启程只能日夜不停地迁飞。海洋具有较大

比热容,在夜间海面相比陆地降温缓慢<sup>[35]</sup>,本研究认为夜晚跨海迁飞,气流更加稳定,在飞行过程中受到的阻力会更小,翅膀的气动性能更高,自身体内水分蒸发少,有利于燕隼节省能量,更高效地维持长时间长距离飞行。

### 3.4 迁徙中途停歇地的利用

燕隼是进行长距离迁徙的鸟类,连续飞行会消耗大量繁殖期后期所积攒能量<sup>[36]</sup>,因此个体在迁徙过程中会选择合适的地点补充能量和休整。不同燕隼的中途停歇地面积不同,停留时间和日活动距离长短不一。停留时间长,活动距离远,可能是需要扩大范围寻找机会捕食昆虫、小型雀形目(Passeriformes)鸟类和啮齿类(Rodentia)动物,在启动前积累充足的脂肪储备,为继续向越冬地迁飞提供保障<sup>[11,37]</sup>;停留时间较短,可能是为了躲避恶劣天气短暂停留<sup>[11]</sup>。

NFU027号燕隼在中途停歇地NFU027-1与NFU027-2和NFU027-3的日活动距离存在显著差异,这可能与地理位置造成的不同生态环境有关。具体来说,该燕隼在山东省的NFU027-1中途停歇地相对活动距离较小,而在缅甸的NFU027-2和NFU027-3中途停歇地的活动距离显著增加。这可能是在山区林地覆盖率高、视野受限的缅甸地区,燕隼不得不投入更多的时间、飞行更远的距离以找到开阔的地带进行捕食。同样对于追踪的其他燕隼来说,不同个体可能根据各自所处的地形和生境条件展现出不同的行为模式,这种差异强调了中途停歇地生境质量对燕隼迁徙行为的重要影响。

通过对燕隼中途停歇地的土地利用类型面积计算对比可知,耕地占比最大。这与先前相关研究的发现<sup>[38-40]</sup>一致,燕隼偏好栖息于散布高大树木的开阔低地,并选择周边的农田作为主要的觅食地。生活在农业区附近的燕隼种群密度和生产力有时甚至高于居住在更自然环境中的欧洲种群<sup>[41]</sup>。这可能是耕地提供了丰富的食物来源,普遍存在着各种昆虫、小型哺乳动物以及雨燕科(Apodidae)、燕科(Hirundinidae)、雀科(Passeridae)和百灵科(Alaudidae)鸟类<sup>[39,41-42]</sup>,是燕隼觅食的绝佳场所。同时,农业机械化的普及减少了人类活动,降低了人为干扰对燕隼活动造成的影响<sup>[41]</sup>。此外,燕隼喜好侵占喜鹊(*Pica serica*)和小嘴乌鸦(*Corvus corone*)的巢穴<sup>[39-40,43]</sup>,而鸦科(Corvidae)鸟类也常在农田栖息活动,这也是燕

隼对耕地偏好的原因之一<sup>[41]</sup>。

燕隼的核心活动区域中对草地、建筑区和林地的利用面积占比相近。对草地的偏好可能与其开阔的地形能够提供良好的视野和猎物捕捉空间有关,以往对燕隼栖息地的研究显示,开放的栖息地平均占其巢址周围面积的75%<sup>[38]</sup>。建筑区内大量的飞行昆虫和城市适应性鸟类如家燕(*Hirundo rustica*)、麻雀(*Passer montanus*)等,是燕隼潜在的食物资源<sup>[39]</sup>;其次,高楼、电塔等建筑物可以为它们提供较高安全性且较好视野的栖息环境。Parr<sup>[39]</sup>的研究指出,燕隼会捕食林地雀形目鸟类,林地也为燕隼提供食物来源的同时,树木也为其提供了遮蔽和安全的栖息条件。Meyburg *et al.*<sup>[7]</sup>的调查表明,在安哥拉越冬地的燕隼偏好草原和低树林地交替的栖息地,当地林区丰富的白蚁资源是其重要的食物来源。这些发现都与本研究对燕隼生境偏好的分析结果相吻合。此外,Meyburg *et al.*<sup>[7]</sup>和Strandberg *et al.*<sup>[9]</sup>的追踪研究均认为燕隼会选择农田、退化的林地和潮湿的热带草原这种开阔的栖息地,尽量减少经过热带雨林这一生态屏障,因为雨林的树冠阻碍觅食,且长时间的降雨也不利于飞行。国内对黑鸢追踪的研究发现,越冬地在东南亚的黑鸢在森林区域停歇频次更高<sup>[22]</sup>。本研究认为缅甸地区的森林分布可能相对较为广泛,耕地、草地和建筑区相对较少,并且燕隼为躲避偷猎等人为干扰,在林地之中活动相对隐蔽,但实际的燕隼迁徙行为更为灵活和复杂,可能受到多种生态和个体差异共同影响。

### 参考文献:

- [1] 薛林旺,李育森,孟小丽. 燕隼的一些生态学资料[J]. 四川动物, 1993, 12(3): 41-42.  
XUE L W, LI Y S, MENG X L. Some ecological data of the *Falco subbuteo*[J]. Sichuan Journal of Zoology, 1993, 12(3): 41-42.
- [2] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2023: 177.  
ZHENG G M. A checklist on the classification and distribution of the birds of China [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023: 177.
- [3] 约翰·马敬能. 中国鸟类野外手册: 马敬能新编版: 上册[M]. 李一凡,译. 北京: 商务印书馆, 2022: 191.  
MACKINNON J. Guide to the birds of China: new edition by John MacKinnon: Vol. I [M]. LI Y F, trans. Beijing: The Commercial Press, 2022: 191.
- [4] PALLINGER F, SOARES J G, SCHUNCK F. First record of Eur-

- asian hobby *Falco subbuteo* in South America [J]. Bulletin of the British Ornithologists' Club, 2023, 143(3): 346-349.
- [5] BirdLife International. *Falco subbuteo* [J/OL]. The IUCN Red List of Threatened Species, 2021: e. T22696460A206270514 [2024-03-08]. <https://www.iucnredlist.org/species/22696460/206270514>.
- [6] 傅承钊. 燕隼的巢及雏鸟生长发育[J]. 国土与自然资源研究, 1988(4): 49.  
FU C Z. The nest and nestling development of the *Falco subbuteo* [J]. Territory & Natural Resources Study, 1988(4): 49.
- [7] MEYBURG B U, HOWEY P W, MEYBURG C, et al. Two complete migration cycles of an adult hobby tracked by satellite [J]. British Birds, 2011, 104(1): 2-15.
- [8] STRANDBERG R, KLAASSEN R H G, HAKE M, et al. How hazardous is the Sahara Desert crossing for migratory birds? Indications from satellite tracking of raptors [J]. Biology Letters, 2010, 6(3): 297-300.
- [9] STRANDBERG R, KLAASSEN R H G, HAKE M, et al. Converging migration routes of Eurasian hobbies *Falco subbuteo* crossing the African equatorial rain forest [J]. Proceedings: Biological Sciences, 2009, 276(1657): 727-733.
- [10] STRANDBERG R, KLAASSEN R H G, OLOFSSON P, et al. Daily travel schedules of adult Eurasian hobbies *Falco subbuteo*: variability in flight hours and migration speed along the route [J]. Ardea, 2009, 97(3): 287-295.
- [11] 马志军, 李博, 陈家宽. 迁徙鸟类对中途停歇地的利用及迁徙对策[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1404-1412.  
MA Z J, LI B, CHEN J K. Study on the utilization of stopover sites and migration strategies of migratory birds [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1404-1412.
- [12] BARRON D G, BRAUN J D, WEATHERHEAD P J. Meta-analysis of transmitter effects on avian behaviour and ecology [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(2): 180-187.
- [13] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus climate change service (C3S) climate data store (CDS) [DB/OL]. [2024-02-13]. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- [14] 徐沛卓, 许青. 基于卫星追踪的东北地区红隼冬季家域及移动特点[J]. 野生动物学报, 2023, 44(3): 603-614.  
XU P Z, XU Q. Winter home range and movement characteristics of common kestrels in northeast China based on satellite tracking [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023, 44(3): 603-614.
- [15] KRANSTAUBER B, CAMERON A, WEINZEL R, et al. The Movebank data model for animal tracking [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(6): 834-835.
- [16] PERIS A, CLOSA F, MARCO I, et al. Towards the comparison of home range estimators obtained from contrasting tracking regimes: the wild boar as a case study [J]. European Journal of Wildlife Research, 2020, 66(2): 32.
- [17] MITCHELL L J, WHITE P C L, ARNOLD K E. The trade-off between fix rate and tracking duration on estimates of home range size and habitat selection for small vertebrates [J]. PLoS One, 2019, 14(7): e0219357.
- [18] 万冬梅, 高玮, 赵匠, 等. 辽宁猛禽迁徙规律的研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(2): 78-83.  
WAN D M, GAO W, ZHAO J, et al. On the migration law of raptor in Liaoning Province [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2002, 34(2): 78-83.
- [19] 蔡其侃. 北京鸟类志 [M]. 北京: 北京出版社, 1988: 131-132.  
CAI Q K. Birds of Beijing [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1988: 131-132.
- [20] 高玮. 中国隼形目鸟类生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 137-144.  
GAO W. Ecology of falcon order in China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 137-144.
- [21] BRUDERER B, BOLDT A. Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds [J]. Ibis, 2001, 143(2): 178-204.
- [22] 王鹏华. 卫星追踪黑鸢的迁徙研究 [D]. 保定: 河北大学, 2020.  
WANG P H. Study on the migration of black kite tracked by satellite [D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [23] 李重和, 杨若莉, 刘岱基, 等. 中国东部沿海地区猛禽迁徙与天气、气候的关系研究 [J]. 林业科学研究, 1991, 4(1): 10-14.  
LI Z H, YANG R L, LIU D J, et al. Research on the relationship between migration of the birds of prey and climate in the seaboard of eastern China [J]. Forest Research, 1991, 4(1): 10-14.
- [24] 陈立军, 束祖飞, 肖治术. 应用红外相机数据研究动物活动节律: 以广东车八岭保护区鸡形目鸟类为例 [J]. 生物多样性, 2019, 27(3): 266-272.  
CHEN L J, SHU Z F, XIAO Z S. Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve [J]. Biodiversity Science, 2019, 27(3): 266-272.
- [25] BILDSTEIN K L. Migrating raptors of the world: their ecology & conservation [M]. New York: Cornell University Press, 2006: X.
- [26] STRANDBERG R, KLAASSEN R H G, HAKE M, et al. Complex timing of marsh harrier *Circus aeruginosus* migration due to pre- and post-migratory movements [J]. Ardea, 2008, 96(2): 159-171.
- [27] HAKE M, KJELLÉN N, ALERSTAM T. Age-dependent migration strategy in honey buzzards *Pernis apivorus* tracked by satellite [J]. Oikos, 2003, 103(2): 385-396.

- [28] MEYER S K, SPAAR R, BRUDERER B. Sea crossing behaviour of falcons and harriers at the southern Mediterranean coast of Spain[J]. *Avian Science*, 2003, 3(2/3): 153-162.
- [29] DECANDIDO R, BIERREGAARD R O, Jr, MARTELL M S, *et al.* Evidence of nocturnal migration by osprey (*Pandion haliaetus*) in North America and Western Europe[J]. *Journal of Raptor Research*, 2006, 40(2): 156-158.
- [30] KJELLÉN N, HAKE M, ALERSTAM T. Strategies of two ospreys *Pandion haliaetus* migrating between Sweden and tropical Africa as revealed by satellite tracking[J]. *Journal of Avian Biology*, 1997, 28(1): 15-23.
- [31] KJELLÉN N, HAKE M, ALERSTAM T. Timing and speed of migration in male, female and juvenile ospreys *Pandion haliaetus* between Sweden and Africa as revealed by field observations, radar and satellite tracking[J]. *Journal of Avian Biology*, 2001, 32(1): 57-67.
- [32] KLAASSEN R H G, STRANDBERG R, HAKE M, *et al.* Flexibility in daily travel routines causes regional variation in bird migration speed[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2008, 62(9): 1427-1432.
- [33] 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, 27(4): 289-301.
- [34] 伍光和, 田连恕, 胡双熙, 等. 自然地理学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 384.  
WU G H, TIAN L S, HU S X, *et al.* Physical geography[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000: 384.
- [35] MELLONE U, LÓPEZ-LÓPEZ P, LIMIÑANA R, *et al.* Weather conditions promote route flexibility during open ocean crossing in a long-distance migratory raptor[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(4): 463-468.
- [36] BATTLE P F, PIERSMA T, DIETZ M W, *et al.* Empirical evidence for differential organ reductions during trans-oceanic bird flight [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2000, 267: 191-195.
- [37] SCHAUB M, JENNI L. Body mass of six long-distance migrant passerine species along the autumn migration route [J]. *Journal für Ornithologie*, 2000, 141(4): 441-460.
- [38] SERGIO F, BOGLIANI G. Hobby nest-site selection and productivity in relation to intensive agriculture and forestry[J]. *The Journal of Wildlife Management*, 2000, 64(3): 637-646.
- [39] PARR S J. The breeding ecology and diet of the hobby *Falco subbuteo* in southern England[J]. *Ibis*, 1985, 127(1): 60-73.
- [40] FULLER R J, BAKER J K, MORGAN R A, *et al.* Breeding populations of the hobby *Falco subbuteo* on farmland in the southern midlands of England[J]. *Ibis*, 1985, 127(4): 510-516.
- [41] SERGIO F, BOGLIANI G. Eurasian hobby density, nest area occupancy, diet, and productivity in relation to intensive agriculture[J]. *The Condor*, 1999, 101(4): 806-817.
- [42] 江庆澜, 唐兆恒, 林继球. 五种猛禽的食性食量分析[J]. 中山大学学报论丛, 1995(1): 108-112.  
JIANG Q L, TANG Z H, LIN J Q. Analyse the feeding habits and capacity for five species of birds of prey[J]. *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University*, 1995(1): 108-112.
- [43] BIJLSMA R G. Hobby [M]//HAGEMEIJER W J M, BLAIR M J. The EBCC atlas of European breeding birds: their distribution and abundance. London: T & A D Poyser, 1997: 186-187.