

# 基于形态特征判定五种鹬类性别的可靠性

柯婉娟<sup>①</sup> 张守栋<sup>①</sup> 马强<sup>②</sup> 吴巍<sup>②</sup> 薛文杰<sup>②</sup> 汤臣栋<sup>②</sup>  
李欣海<sup>③</sup> 马志军<sup>①\*</sup>

① 复旦大学生物多样性科学研究所, 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 长江河口湿地生态系统野外科学观测研究站  
上海 200433; ② 上海市崇明东滩鸟类自然保护区管理处 上海 202183; ③ 中国科学院动物研究所,  
动物进化与系统学重点实验室 北京 100101

**摘要:** 快速准确地鉴定两性同型鸟类个体性别在鸟类生态学研究具有重要意义。本文选择 2008 年春季迁徙期在崇明东滩停歇的大滨鹬 (*Calidris tenuirostris*)、红腹滨鹬 (*C. canutus*)、红颈滨鹬 (*C. ruficollis*)、尖尾滨鹬 (*C. acuminata*) 及翘嘴鹬 (*Xenus cinereus*) 5 种两性同型的鹬类, 用分子生物学方法进行性别鉴定, 并基于个体的形态特征 (体重、翅长、喙长、头喙长及跗跖长) 采用判别分析方法对性别进行判定。结果表明, 尖尾滨鹬雄性各形态特征均显著大于雌性, 其他 4 种鹬类则相反。5 种鹬类形态特征的性别差异指数在 0.5% ~ 25.3% 之间, 重叠度在 29.4% ~ 98.6% 之间。5 种鹬类判别分析判定性别的准确率在 (0.69 ± 0.06) ~ (0.96 ± 0.01) 之间, 其中, 尖尾滨鹬判别准确率 (0.96) 最高, 翘嘴鹬判别准确率 (0.69) 最低。形态特征在两性间的差异程度影响性别的判别准确率。另外, 两性性比对性别判别的准确率也有影响: 性比偏雄性鸟类的雄性判别准确率高于雌性, 而性比偏雌性鸟类的雌性判别准确率高于雄性。采用判别分析估测的性比与分子生物学鉴定结果相似, 表明判别分析在判定种群的性比方面具有较高的可靠性。

**关键词:** 鹬类; 形态特征; 判别分析; 性别判别; 准确率; 性比

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 04-555-10

## Reliability of Identifying Gender of Five Sandpipers Using Morphologic Measurements

KE Wan-Juan<sup>①</sup> ZHANG Shou-Dong<sup>①</sup> MA Qiang<sup>②</sup> WU Wei<sup>②</sup> XUE Wen-Jie<sup>②</sup>  
TANG Chen-Dong<sup>②</sup> LI Xin-Hai<sup>③</sup> MA Zhi-Jun<sup>①\*</sup>

① Coastal Ecosystems Research Station of Yangtze River Estuary, Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433; ② Management Office of Shanghai Chongming Dongtan National Nature Reserve, Chongming 202183; ③ Key Laboratory of the Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目 (No. 31572280);

\* 通讯作者, E-mail: zhijunm@fudan.edu.cn;

**第一作者介绍** 柯婉娟, 女, 硕士研究生; 研究方向: 鸟类生态学; E-mail: 14210700093@fudan.edu.cn.

收稿日期: 2017-01-17, 修回日期: 2017-04-29 DOI: 10.13859/j.cjz.201704002

**Abstract:** Rapid and accurate identification of the gender of monomorphic birds, which are difficult to determine by direct observation, is of great significance in the study of avian ecology. Discriminant analysis according to morphological characteristics has been frequently used for sexing individuals in monomorphic species because of its fast, simple procedure and high accuracy. This study used discriminant analysis to identify the gender of five monomorphic sandpiper species at Chongming Dongtan, a stopover site of the East Asian-Australasian Flyway (EAAF): Great Knots *Calidris tenuirostris*, Red Knots *C. canutus*, Red-necked Stints *C. ruficollis*, Sharp-tailed Sandpipers *C. acuminata*, and Terek Sandpipers *Xenus cinereus*. Five morphological characteristics (body weight, wing length, bill length, head and bill length, and tarsus length) were measured during spring migration in 2008. Firstly, we identified the gender of the individuals in the five species using molecular biological method. Then we used independent *t* tests to compare the difference in the morphological characteristics between the males and females. The degree of overlap in morphological characteristics between males and females as well as the sexual dimorphism index were calculated for each species. Finally, we used discriminant analysis to deduce the gender of each individual according to morphological measurements and compared the results with that from molecular biology method. The morphological characteristics of the males were significantly larger than that of the females in Sharp-tailed Sandpipers, while the females were larger than the males in other four species (Table 1). The sexual size dimorphism index of morphological characteristics in the five sandpiper species varied in 0.5% - 25.3% (Table 2), and the interspecific overlaps of morphological characteristics varied in 29.4% - 98.6% (Table 1). The accuracy of gender identification using discriminant analysis was  $0.69 \pm 0.06$  -  $0.96 \pm 0.01$ , with the highest in the Sharp-tailed Sandpipers (96%) while the lowest in the Terek Sandpipers (69%, Table 3). The difference in morphological characteristics between the genders affected the accuracy of gender discrimination. In addition, sex ratio might also affect the accuracy of gender discrimination. The sex ratio estimated using discriminant analysis is similar to that using molecular biological method (Table 3), indicating that the discriminant analysis has a high reliability in determining the sex ratio of population.

**Key words:** Sandpiper; Morphological characteristics; Discriminant analysis; Gender discrimination; Accuracy; Sex ratio

性别判定在比较两性个体的行为差异、分析动物的种群动态及种群维持机制等生态学研究 中至关重要。在鸟类学研究中,可以根据外部形态特征直接确定性二型明显的鸟类个体的性别,但是很难直接判定两性同型鸟类个体的性别。已有多种方法用于两性同型鸟类性别的鉴定,如行为观察 (Fletcher et al. 2003)、解剖 (Miller et al. 1955)、泄殖腔检测和腹腔镜检测 (Maron et al. 1984)、鸣声分析 (Klenova et al. 2012, Volodin et al. 2015)、形态测量数据分析 (Kerry et al. 1992)、分子生物学方法鉴定 (Dubiec et al. 2006, Costantini et al. 2008)、远

红外光谱鉴定 (Steiner et al. 2016) 等。在上述方法中,解剖、泄殖腔检测和腹腔镜检测等方法会对鸟类造成伤害 (Volodin et al. 2009, Bazzano et al. 2012); 行为观察通常是在繁殖期通过观察个体的求偶炫耀、筑巢、孵卵及亲代抚育等行为来判定个体性别 (Elie et al. 2011),但在非繁殖期不适用。尽管分子生物学方法可以准确判断鸟类的性别,但需要开展室内实验,难以在野外快速判断个体的性别 (Volodin et al. 2015)。大部分两性同型鸟类的两性个体在形态特征方面存在一定程度的差异,基于形态特征的差异可以通过统计学方法对个体性别进行推

断 (Murphy 2007, Cardoni et al. 2009), 并且基于形态特征的性别判断方法对鸟无伤害, 因此在鸟类学研究中得到广泛应用 (Meissner 2005, Polito et al. 2012)。

判别分析 (discriminant analysis) 是根据两性个体的形态特征来判断性别的常用方法 (Meissner et al. 2008)。该方法利用已知性别个体的形态特征构建判别分析式, 将未知性别个体的形态数据代入判别分析式, 基于得到的判别分数来判定性别。本研究以 2008 年春季在上海崇明东滩迁徙经过的 5 种两性同型的鹬类为研究对象, 比较这 5 种鹬类两性间形态特征的差异, 根据分子生物学方法所得到的性别鉴定结果, 采用判别分析方法基于其形态特征进行性别判定, 评估判别分析判定这 5 种鹬类个体性别和估测种群性比的可靠性。目前, 崇明东滩所处的东亚-澳大利西亚迁徙路线上的多种候鸟受到迁徙停歇地丧失和退化的影响, 种群快速下降 (Hua et al. 2015)。本研究以期为进一步探讨迁徙停歇地丧失对两性个体的不同影响和分析种群趋势提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 鹬类形态特征测量及采样

本研究选取大滨鹬 (*Calidris tenuirostris*)、红腹滨鹬 (*C. canutus*)、红颈滨鹬 (*C. ruficollis*)、尖尾滨鹬 (*C. acuminata*) 和翘嘴鹬 (*Xenus cinereus*) 5 种迁徙的鹬类作为研究对象。这 5 种鹬类的形态特征数据来自于上海崇明东滩鸟类自然保护区 (31°25' ~ 31°38'N, 121°50' ~ 122°05'E) 2008 年春季的环志数据。其中鹬类的喙长 (自喙基生羽处至上喙先端的直线距离)、头喙长、跗跖长 (自胫骨与跗跖关节后面的中点, 至跗跖与中跗跖关节前面最下方整片鳞下缘的距离) 用游标卡尺 (100577, 广陆, 精度 0.1 mm) 测量, 用直尺 (GB9056-88, 华剑, 精度 1 mm) 测量翅长 (放平及拉直后的翅长即最大翼弦), 体重用电子天平 (PL4001, 梅特勒, 精度 0.1 g) 称量。待每只个体形态特征测

量结束后, 拔取 4 ~ 5 根体羽, 置于干燥的信封中保存, 用于分子生物学方法的性别鉴定。

### 1.2 分子生物学方法的性别鉴定

采用随机抽样的方法, 分别从大滨鹬、红腹滨鹬、红颈滨鹬、尖尾滨鹬和翘嘴鹬 5 种鹬类羽毛样品中随机抽取了 122、90、101、194 和 144 只个体的羽毛样品。用灭菌医用剪剪取羽毛根部 1 cm 左右置于 1.5 ml 的无菌离心管中, 用赛默飞动物组织直接 PCR 试剂盒 (Thermo Scientific Phire Animal Tissue Direct PCR Kit#F-140WH, www.thermoscientific.com/onebio) 进行 DNA 提取和 PCR 扩增。采用 P2/P8 引物对 (Wang et al. 2009) 进行扩增。扩增采用 50  $\mu$ l 反应体系, 25  $\mu$ l 的 2  $\times$  Phire Animal Tissue PCR 扩增缓冲液, P2/P8 引物 (10  $\mu$ mol/L) 各 3.5  $\mu$ l, Phire Hot Start II DNA 聚合酶 1  $\mu$ l (5 U/ $\mu$ l), 无菌蒸馏水 16  $\mu$ l, 1 cm 的羽根末端。扩增条件为: 98°C 预变性 5 min, 98°C 变性 5 s, 66.5°C 退火 5 s, 72°C 延伸 20 s, 共 40 个循环, 72°C 最终延伸 1 min。所有的扩增产物进行 2% 琼脂糖凝胶电泳 (280 V, 25 min), 染色后在凝胶成像仪中观察扩增条带, 雄性个体呈现 CHD-Z 一条条带, 雌性个体呈现 CHD-Z 与 CHD-W 两条条带, 以此判定个体性别。

### 1.3 数据分析

**1.3.1 两性间形态特征比较** 用独立  $t$  检验分别比较 5 种鹬类两性间各形态特征的差异, 并计算各形态特征在两性间的重叠范围、重叠度 (在两性个体的形态特征重叠区的个体数及其占总数的百分比) 和性别差异指数 (sexual dimorphism index, SDI)。各特征的性别差异指数计算如公式 (1) 所示, 其中  $i$  为性别差异指数,  $\bar{F}$  和  $\bar{M}$  分别为雌性和雄性形态特征的均值 (Greenwood 2003)。本研究将喙长作为与觅食活动密切相关的营养形态特征的代表, 将跗跖长作为非营养形态特征的代表, 采用 Nebel 等 (2011) 的方法, 计算 5 种鹬类的喙长性别差异指数残差 (residual bill-SDI, 即喙长差异指数绝对值与跗跖长差异指数绝对值的差值), 以反

映食物竞争压力和性选择压力对两性形态特征进化的作用。计算方法如公式(2)所示,其中  $i'$  为喙长性别差异指数残差,  $i_{\text{bill}}$  和  $i_{\text{tarsus}}$  分别为喙长性别差异指数和跗跖长性别差异指数。

$$i = \frac{100\% * |\bar{F} - \bar{M}|}{\min(\bar{F}, \bar{M})} \quad \text{公式(1)}$$

$$i' = |i_{\text{bill}}| - |i_{\text{tarsus}}| \quad \text{公式(2)}$$

**1.3.2 判别分析判定个体性别及估测种群性比** 为了避免形态测量的异常值对分析结果的影响,本研究首先基于稳健马氏距离检测多元异常值,并删除异常值样本;再用 Box'M 检验对 5 种鹬类的雌雄样本进行组内协方差矩阵齐质性检验,若组内协方差矩阵齐性,则用线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA), 否则用二次判别分析 (quadratic discriminant analysis, QDA), 采用 Wilk's lambda 最小值准则逐步筛选变量,用 R 软件中 MASS 包的 lda 或 qda 函数 (Venables et al. 2013) 分别对 5 种鹬类进行性别判别。

每次判别分析均随机抽取三分之二的样本作为训练集进行训练,将剩下的三分之一样本作为测试集进行测试,得到混淆矩阵。以分子生物学的性别鉴定结果作为标准,依照公式(3)、(4)、(5)、(6)、(7) 分别计算每种鸟类判别分析的准确率 ( $A$ )、雌性判别准确率 ( $A_F$ )、雄性判别准确率 ( $A_M$ ), 并计算估测的性比 ( $R_1$ ) 和实际性比 ( $R_0$ )。其中,  $N_F$ 、 $N_M$ 、 $N_T$  分别为雌性判别正确个数、雄性判别正确个数和样本总数,  $N_{F0}$ 、 $N_{M0}$  分别为用于判别分析的雌性个体数和雄性个体数。

$$A = (N_F + N_M) / N_T \quad \text{公式(3)}$$

$$A_F = N_F / N_{F0} \quad \text{公式(4)}$$

$$A_M = N_M / N_{M0} \quad \text{公式(5)}$$

$$R_1 = N_F / N_M \quad \text{公式(6)}$$

$$R_0 = N_{F0} / N_{M0} \quad \text{公式(7)}$$

每种鹬类判别分析均运行 100 次,最后计

算得到判别分析的准确率、雌性判别准确率、雄性判别准确率以及估测性比的平均值。所有的检验和算法运行都在 R 软件 3.3.2 版本 (R Core Team 2016) 中完成。

## 2 结果

本研究用分子生物学方法对 146 只翘嘴鹬、90 只红腹滨鹬、101 只红颈滨鹬、122 只大滨鹬和 194 只尖尾滨鹬进行性别鉴定。其中,翘嘴鹬雌性个体为 66 只,雄性为 80 只;红腹滨鹬雌性和雄性均为 45 只;红颈滨鹬雌性为 59 只,雄性为 42 只;大滨鹬雌性为 58 只,雄性为 64 只;尖尾滨鹬雌性为 156 只,雄性为 38 只。

### 2.1 两性间形态特征比较

在 5 种鹬类所测量的喙长、头喙长、跗跖长、翅长及体重这 5 个形态特征,尖尾滨鹬雌性个体的各形态特征均显著小于雄性个体 ( $P < 0.05$ )。其他 4 种鹬类则是雌性个体的形态特征大于雄性个体。除大滨鹬体重 ( $P > 0.05$ ) 和翅长 ( $P > 0.05$ ) 以及红腹滨鹬跗跖长 ( $P > 0.05$ ) 在两性间差异不显著外,其他形态特征两性间差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。

5 种鹬类各形态特征在两性间具有较高的重叠度 (29.4% ~ 98.6%)。其中,尖尾滨鹬翅长的重叠度最小 (29.4%),翘嘴鹬跗跖长的重叠度最高 (98.6%) (表 1)。5 种鹬类形态特征在两性间的性别差异指数在 0.5% ~ 25.3% 之间,其中,尖尾滨鹬体重的性别差异指数最高 (25.3%),大滨鹬跗跖长性别差异指数最低 (0.5%),除喙长外,尖尾滨鹬形态特征的性别差异指数均高于其他鹬类。种内各形态特征在两性间的差异程度也不同。其中,体重的差异较大,除红颈滨鹬喙长的两性差异指数 (5.8%) 略大于其体重两性差异指数 (5.5%) 外,其他鹬类体重的性别差异指数均大于其他形态特征的性别差异指数 (表 2)。

翘嘴鹬、红腹滨鹬、红颈滨鹬及大滨鹬 4 种鹬类两性个体营养形态特征的差异程度均大

表 1 五种鹬类形态特征的性别间比较  
 Table 1 Comparison on the morphological characteristics between the males and the females in five sandpiper species

形态特征 Morphological traits	物种 Species	雌性 Female (Mean $\pm$ SD)	雄性 Male (Mean $\pm$ SD)	P 值 P value (t-test)	重叠范围 Overlap range	重叠度 (%) Overlap percentage
体重 Weight (g)	翘嘴鹬 Terek Sandpiper	68.5 $\pm$ 9.7	63.6 $\pm$ 7.1	0.001	55.2 ~ 94.0	93.8
	红腹滨鹬 Red Knot	99.8 $\pm$ 9.3	94.6 $\pm$ 9.6	0.010	82.6 ~ 119.4	92.2
	红颈滨鹬 Red-necked Stint	27.0 $\pm$ 3.3	25.6 $\pm$ 3.4	0.047	21.7 ~ 33.7	96.0
	大滨鹬 Great Knot	139.4 $\pm$ 11.8	131.9 $\pm$ 11.8	0.001	116.4 ~ 157.9	92.6
	尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	50.5 $\pm$ 7.4	63.3 $\pm$ 7.2	<0.001	49.5 ~ 80.6	60.3
喙长 Bill length (mm)	翘嘴鹬 Terek Sandpiper	49.8 $\pm$ 2.8	47.8 $\pm$ 2.9	<0.001	42.8 ~ 53.8	93.8
	红腹滨鹬 Red Knot	33.3 $\pm$ 1.4	32.2 $\pm$ 1.3	<0.001	29.8 ~ 35.3	96.7
	红颈滨鹬 Red-necked Stint	18.1 $\pm$ 0.8	17.1 $\pm$ 0.9	<0.001	16.4 ~ 19.2	90.1
	大滨鹬 Great Knot	43.8 $\pm$ 2.1	43.2 $\pm$ 1.9	0.143	39.5 ~ 47.2	96.7
	尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	25.0 $\pm$ 0.9	26.0 $\pm$ 1.0	<0.001	24.1 ~ 27.5	86.6
头喙长 Head & bill length (mm)	翘嘴鹬 Terek Sandpiper	76.6 $\pm$ 3.0	74.2 $\pm$ 3.2	<0.001	68.5 ~ 80.5	93.8
	红腹滨鹬 Red Knot	62.3 $\pm$ 2.0	61.0 $\pm$ 1.6	0.001	57.6 ~ 66.2	97.8
	红颈滨鹬 Red-necked Stint	39.1 $\pm$ 0.8	38.2 $\pm$ 1.1	<0.001	37.1 ~ 41.1	93.1
	大滨鹬 Great Knot	75.6 $\pm$ 2.3	74.7 $\pm$ 2.1	0.028	71.1 ~ 79.7	96.7
	尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	50.0 $\pm$ 1.2	52.8 $\pm$ 1.3	<0.001	49.9 ~ 53.4	58.2
翅长 Wing length (mm)	翘嘴鹬 Terek Sandpiper	137.2 $\pm$ 2.6	134.5 $\pm$ 3.2	<0.001	133 ~ 142	83.6
	红腹滨鹬 Red Knot	168.9 $\pm$ 4.8	166.9 $\pm$ 4.2	0.038	156 ~ 177	97.8
	红颈滨鹬 Red-necked Stint	104.2 $\pm$ 2.6	102.5 $\pm$ 2.7	0.002	99 ~ 110	98.0
	大滨鹬 Great Knot	193.9 $\pm$ 4.2	187.9 $\pm$ 4.0	<0.001	185 ~ 199	86.9
	尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	131.0 $\pm$ 2.3	138.3 $\pm$ 3.2	<0.001	133 ~ 137	29.4
跗跖长 Tarsus length (mm)	翘嘴鹬 Terek Sandpiper	29.7 $\pm$ 1.2	29.3 $\pm$ 1.2	0.016	26.4 ~ 32.1	98.6
	红腹滨鹬 Red Knot	32.0 $\pm$ 1.2	31.7 $\pm$ 1.2	0.223	29.7 ~ 34.0	95.6
	红颈滨鹬 Red-necked Stint	20.1 $\pm$ 0.8	19.5 $\pm$ 0.8	<0.001	17.5 ~ 20.8	88.1
	大滨鹬 Great Knot	36.6 $\pm$ 1.2	36.4 $\pm$ 1.4	0.399	33.4 ~ 39.0	97.5
	尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	29.5 $\pm$ 1.0	31.6 $\pm$ 1.3	<0.001	28.1 ~ 32.4	90.7

表 2 五种鹞类各形态特征性别差异指数及喙长差异指数残差

Table 2 Sexual dimorphism index (SDI) of morphological characteristics and residual bill-SDI in the five sandpiper species

物种 Species	性别差异指数 Sexual dimorphism index (%)					喙长差异指数 残差 (%) Residual bill-SDI
	体重 Weight	翅长 Wing length	喙长 Bill length	头喙长 Head & bill length	跗跖长 Tarsus length	
翘嘴鹞 Terek Sandpiper	7.7	2.0	4.2	3.2	1.4	2.8
红腹滨鹞 Red Knot	5.5	1.2	3.4	1.2	0.9	2.5
红颈滨鹞 Red-necked Stint	5.5	1.7	5.8	1.7	3.1	2.7
大滨鹞 Great Knot	5.6	3.2	1.4	3.2	0.5	0.9
尖尾滨鹞 Sharp-tailed Sandpiper	25.3	5.6	4.0	5.6	7.1	- 3.1

于其非营养形态特征的差异, 即喙长性别差异残差均为正值, 分别为 2.8、2.5、2.7、0.9, 尖尾滨鹞则情况相反, 喙长性别差异残差为负值, 为 - 3.1 (表 2)。

## 2.2 性别判定及性比估测

基于稳健马氏距离对 5 种鹞类雌性样本和雄性样本分别进行多元异常值检测, 大滨鹞雌性样本和雄性样本分别检测到 5 个和 0 个异常值; 红腹滨鹞雌性样本和雄性样本分别检测到 3 个和 2 个异常值; 红颈滨鹞雌性样本和雄性样本分别检测到 3 个和 4 个异常值; 尖尾滨鹞雌性样本和雄性样本分别检测到 4 个和 0 个异常值; 翘嘴鹞雌性样本和雄性样本分别检测到 5 个和 3 个异常值。将所有异常样本删除后, 再用判别分析判定性别。其中, 大滨鹞 117 只 (雌性 53 只, 雄性 64 只), 红腹滨鹞 85 只 (雌性 42 只, 雄性 43 只), 红颈滨鹞 94 只 (雌性 56 只, 雄性 38 只), 尖尾滨鹞 190 只 (雌性 152 只, 雄性 38 只), 翘嘴鹞 138 只 (雌性 61 只, 雄性 77 只)。

用 Box'M 检验 5 种鹞类组内协方差矩阵齐质性, 发现红腹滨鹞 ( $\chi^2 = 10.84$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.76$ )、翘嘴鹞 ( $\chi^2 = 7.41$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.95$ ) 和尖尾滨鹞 ( $\chi^2 = 19.96$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.17$ ) 组内方差矩阵均齐性, 因此用线性判别分析判定

性别; 而大滨鹞 ( $\chi^2 = 38.32$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.001$ ) 和红颈滨鹞 ( $\chi^2 = 26.33$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.03$ ) 组内方差矩阵非齐性, 则用二次判别分析判定性别。根据 Wilk's lambda 最小值准则进行筛选变量后, 大滨鹞的性别用翅长和体重两个变量进行判别, 红腹滨鹞的性别用喙长、体重和头喙长 3 个变量进行判别, 红颈滨鹞的性别用喙长、体重和翅长 3 个变量进行判别, 尖尾滨鹞的性别用体重、翅长、喙长和头喙长 4 个变量进行判别, 翘嘴鹞的性别则是用翅长和头喙两个变量进行判别 (表 3)。

5 种鹞类基于形态特征采用判别分析判定性别的准确率具有较大的种间差异, 性别判别准确率在 0.69 ~ 0.96 之间。其中, 尖尾滨鹞的性别判别准确率最高, 其雌性判别准确率和雄性判别准确率均高于其他 4 种鹞类的雌、雄判别准确率。翘嘴鹞性别判别准确率最低 (表 3)。

5 种鹞类中, 尖尾滨鹞、红颈滨鹞性比 (雌性数目/雄性数目) 偏雌性, 分别为 4.00 和 1.47, 翘嘴鹞、红腹滨鹞和大滨鹞性比偏雄性, 分别为 0.79、0.98 和 0.83。这 5 种鹞类通过判别分析估测得到的性比均与其实际性比接近 (表 3)。另外, 性比偏雄性鸟类 (翘嘴鹞、红腹滨鹞、大滨鹞) 雄性判别准确率大于雌性判别准确率; 性比偏雌性鸟类 (红颈滨鹞、尖尾滨鹞) 的雌

表 3 五种鹬类基于形态特征用判别分析判别性别及性比估测结果  
 Table 3 Accuracy of sex identification and sex ratio using discriminant analysis in five sandpiper species

物种 Species	变量 variable	判别 分析类型 Discriminant analysis type	判别 准确率 Accuracy	雌性判别正确率 Accuracy of female	雄性判别正确率 Accuracy of male	估测性比 $R_1$ Estimated sex ratio	实际性比 $R_0$ Actual sex ratio
翘嘴鹬 Terek Sandpiper	翅长 + 喙长 Wing length + Bill length	Linear discriminant analysis (LDA)	0.69 ± 0.06	0.59 ± 0.13	0.77 ± 0.09	0.64 ± 0.22	0.79
红腹滨鹬 Red Knot	喙长 + 体重 + 头喙长 Bill length + Weight + Head & bill length	Linear discriminant analysis (LDA)	0.73 ± 0.07	0.73 ± 0.11	0.74 ± 0.11	1.0 ± 0.35	0.98
红颈滨鹬 Red-necked Stint	喙长 + 体重 + 翅长 Bill length + Weight + Wing length	Quadratic discriminant analysis (QDA)	0.77 ± 0.08	0.82 ± 0.11	0.70 ± 0.11	1.7 ± 0.51	1.47
大滨鹬 Great Knot	翅长 + 体重 Winglength + Weight	Quadratic discriminant analysis (QDA)	0.79 ± 0.06	0.79 ± 0.08	0.80 ± 0.09	0.92 ± 0.27	0.83
尖尾滨鹬 Sharp-tailed Sandpiper	翅长 + 体重 + 喙长 + 头喙长 Wing length + Weight + Bill length + Head & bill length	Linear discriminant analysis (LDA)	0.96 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.85 ± 0.08	4.6 ± 0.78	4.00

“ $R_1$ ”表示用判别分析估测得到的性比,“ $R_0$ ”为实际性比,用于判别分析的雌性个体数与雄性个体数的比值。

“ $R_1$ ” represents sex ratio of females and males in each species calculated by discriminant analysis, “ $R_0$ ” represents the sex ratio of the number of females and the number of males in the discriminant analysis.

性判别准确率高于雄性（表 3）。

### 3 讨论

#### 3.1 两性间形态差异

性大小二型（sexual size dimorphism）在鸟类中较为普遍，一般为雄性个体大于雌性个体（Price 1984），但相反的性大小二型（reversed sexual dimorphism，即雌性个体体型大于雄性）普遍存在于鹬类（Warham 1972, Figuerola 1999）。本研究发现，尖尾滨鹬的雄性各形态特征均大于雌性的形态特征，而大滨鹬、红腹滨鹬、红颈滨鹬及翘嘴鹬 4 种鹬类情况相反，即为相反的两性间形态大小差异。两性间体型大小差异与其婚配制度相关，在一雄多雌婚配制度的鸟类中，雄性个体大于雌性（Jönsson et al. 1990），本研究的 5 种鹬类中，尖尾滨鹬婚配制度为一雄多雌，其他 4 种鹬类均为单配偶制（Hoyo et al. 1996），表明婚配制度可能是尖尾滨鹬性大小二型与其他 4 种鹬类不同的原因。

关于两性个体体型大小差异的原因，性选择假说则认为，雄性之间竞争交配机会并有保卫领域等行为，导致雄性个体体型大于雌性个体（Hedrick et al. 1989）。食物竞争假说则认为两性个体通过对食物和栖息地等资源分开利用的方式以减少两性间的食物资源竞争，从而导致两性间形态特征的差异（Shine 1989）。鸟类两性间体型大小差异多由性选择决定（Székely et al. 2000）。但如果两性个体的喙长差异程度大于体型大小的差异程度，食物竞争对鸟类喙长的性大小二型的形成有着重要的贡献（Price 1984）。喙是鸟类觅食的主要器官，喙长可以代表其营养形态特征，而跗跖长可以代表非营养形态特征（Nebel et al. 2011）。本研究中，大滨鹬、红腹滨鹬、红颈滨鹬及翘嘴鹬 4 种鹬类的营养形态特征（喙长）的两性间差异程度大于非营养形态特征（跗跖长）的两性间差异程度，表明性选择和食物竞争的共同作用导致了这 4 种鹬类两性间形态特征差异，并且 4 种鹬类的食物竞争压力可能大于性选择压力。然而，尖

尾滨鹬营养形态特征（喙长）两性间的差异程度小于非营养形态特征（跗跖长）两性间差异程度，表明尖尾滨鹬性选择压力可能大于两性间食物竞争压力。

#### 3.2 基于判别分析方法的性别判定

判别分析已被广泛应用于两性同型的鹬类性别鉴定（Sikora et al. 2011, Jiménez et al. 2015, Meissner et al. 2016）。在用判别分析判定鹬类性别的研究中，黑腹滨鹬（*C. alpina*）雄性和雌性的判别准确率分别达 100% 和 97.3%（Meissner et al. 2008）；姬鹬（*Lymnocyptes minimus*）判别准确率可达 99%（Sikora et al. 2011）；小滨鹬（*C. minutilla*）和西滨鹬（*C. marui*）判别准确率分别达 91% 和 97%（Jiménez et al. 2015）；砾鹬（*Actitis hypoleucos*）判别准确率为 77.1%（Meissner et al. 2016）。本研究用判别分析判定 5 种鹬类性别的准确率为 69% ~ 96%，其中，尖尾滨鹬的判别效果最好（0.96），判别准确率、雌性判别准确率和雄性判别准确率均高于另外 4 种鸟类。尖尾滨鹬除喙长外，其他形态特征性别差异指数均大于其他 4 种鹬类，表明性别间形态差异程度会影响判别分析判定性别的效果（Dechaume-Moncharmont et al. 2011）。尖尾滨鹬除跗跖长重叠度（90.7%）略高于红颈滨鹬跗跖重叠度（88.1%）外，其他各形态特征的重叠度均低于其他 4 种鹬类（表 1），这表明重叠度也会影响判别分析的准确率（Meissner et al. 2016）。尽管 5 种鹬类均有某些形态特征的重叠度达到 90% 以上，但判别分析的性别判断准确率可达 69% 以上，有助于快速判定两性同型鸟类的性别。

5 种鹬类中，大滨鹬、红颈滨鹬、尖尾滨鹬及翘嘴鹬 4 种鹬类均无亚种分化（王岐山等 2006），红腹滨鹬有两个亚种（*C. c. piersmai* 亚种和 *C. c. rogersi* 亚种）在崇明东滩迁徙停歇（Hassell et al. 2011）。尽管这两个亚种的繁殖羽存在较明显区别（Hassell et al. 2011），但在崇明东滩停歇时的繁殖羽并未完全更换，因此本研究无法将两个亚种完全区分开来。两亚种的



形态特征有差异 (Tomkovich 2001), 所以红腹滨鹬判定性别的准确度较低, 可能与未能区分亚种也有一定的关系。

5 种鹬类通过判别分析估测得到的性比均与其实际性比接近, 这表明基于形态特征用判别分析方法能较准确地估测各物种的性比。另外, 性比偏雄性鸟类雄性个体判别准确率高于雌性, 性比偏雌性的鸟类雌性判别准确率高于雄性。一般认为, 对非平衡样本进行分类偏差抽样, 会导致占多数的类别判别效果较好, 占少数的类别判别效果较差的结果 (Nguyen et al. 2009), 表明种群的性比可能影响其各性别的判别准确率。

**致谢** 感谢上海市崇明东滩鸟类自然保护区管理处和环志志愿者在野外采样中的帮助。感谢惠鑫、高岩、谭坤、金欣、范钧、彭鹤博等在样品采集、室内实验及论文修改过程中提供的帮助。

## 参 考 文 献

- Bazzano G, Lèche A, Martella M B, et al. 2012. Efficiency of the cloacal sexing technique in greater rhea chicks (*Rhea americana*). *British Poultry Science*, 53(3): 394–396.
- Cardoni D A, Maldonado J E, Isacch J P, et al. 2009. Subtle sexual dimorphism in the Bay-capped wren-spinetail (*Spartonicoa maluoides*; Furnariidae) uncovered through molecular sex determination. *Ornitologia Neotropical*, 20(3): 347–355.
- Costantini V, Guaricci A C, Laricchiuta P, et al. 2008. DNA sexing in Humboldt penguins (*Spheniscus humboldti*) from feather samples. *Animal Reproduction Science*, 106(1): 162–167.
- Dechaume-Moncharmont F X, Monceau K, Cezilly F. 2011. Sexing birds using discriminant function analysis: a critical appraisal. *The Auk*, 128(1): 78–86.
- Dubiec A, Zagalska-Neubauer M. 2006. Molecular techniques for sex identification in birds. *Biological Letters*, 43(1): 3–12.
- Elie J E, Mathevon N, Vignal C. 2011. Same-sex pair-bonds are equivalent to male-female bonds in a life-long socially monogamous songbird. *Behavioral Ecology & Sociobiology*, 65(12): 2197–2208.
- Figuerola J. 1999. A comparative study on the evolution of reversed size dimorphism in monogamous waders. *Biological Journal of the Linnean Society*, 67(1): 1–18.
- Fletcher K L, Hamer K C. 2003. Sexing terns using biometrics: the advantage of within-pair comparisons. *Bird Study*, 50(1): 78–83.
- Greenwood J G. 2003. Measuring sexual size dimorphism in birds. *Ibis*, 145(3): 513–513.
- Hassell C, Southey I, Boyle A, et al. 2011. Red Knot *Calidris canutus*: subspecies and migration in the East Asian-Australasian flyway—where do all the Red Knot go. *Birding Asia*, 16(2011): 89–93.
- Hedrick A V, Temeles E J. 1989. The evolution of sexual dimorphism in animals: hypotheses and tests. *Trends in Ecology & Evolution*, 4(5): 136–138.
- Hoyo J D, Elliott A, et al. 1996. *Handbook of the Birds of the World, Volume 3: Hoatzin to Auks*. Barcelona: Lynx Edicions, 513–524.
- Hua N, Tan K, Chen Y, et al. 2015. Key research issues concerning the conservation of migratory shorebirds in the Yellow Sea region. *Bird Conservation International*, 25(1): 38–52.
- Jiménez A, García-Lau J, González A, et al. 2015. Sex determination of Least sandpiper (*Calidris minutilla*) and Western sandpiper (*Calidris mauri*): comparing methodological robustness of two morphometric methods. *Waterbirds*, 38(1): 10–18.
- Jönsson P E, Alerstam T. 1990. The adaptive significance of parental role division and sexual size dimorphism in breeding shorebirds. *Biological Journal of the Linnean Society*, 41(4): 301–314.
- Kerry K R, Agnew D J, Clarke J R, et al. 1992. Use of morphometric parameters for the determination of sex of Adelie penguins. *Wildlife Research*, 19(6): 657–653.
- Klenova A V, Zubakin V V, Zubakina E V, et al. 2012. Indicators of individuality and sex in advertising calls of two closely related auklet species (*Charadriiformes*, Alcidae): Crested auklet and Parakeet auklet (*Aethia cristatella*, *Cyclorhynchus psittacula*). *Zoologicheskii Zhurnal*, 91(7): 869–880.
- Maron J L, Myers J P. 1984. A description and evaluation of two techniques for sexing wintering sanderlings. *Journal of Field Ornithology*, 55(3): 336–342.
- Meissner W. 2005. Sex determination of juvenile Dunlins migrating

- through the Polish baltic region. *Journal of Field Ornithology*, 76(4): 368–372.
- Meissner W, Krupa R. 2016. Identifying the sex of the Common sandpiper (*Actitis hypoleucos*) by linear measurements. *Annales Zoologici Fennici*, 53(3/4): 175–182.
- Meissner W, Pilacka L. 2008. Sex identification of adult Dunlins, *Calidris alpina alpina* migrating in autumn through Baltic region. *Ornis Fennica*, 85(4): 135–138.
- Miller W J, Wagner F H. 1955. Sexing mature Columbiformes by cloacal characters. *The Auk*, 72(3): 279–285.
- Murphy M T. 2007. A cautionary tale: Cryptic sexual size dimorphism in a socially monogamous passerine. *The Auk*, 124(2): 515–525.
- Nebel S, Thompson G J. 2011. The evolution of sexual bill-size dimorphism in shorebirds: a morphometric test of the resource partitioning hypothesis. *Evolutionary Ecology Research*, 13(1): 35–44.
- Nguyen G H, Bouzerdoum A, Phung S L. 2009. Learning Pattern Classification Tasks with Imbalanced Data Sets. Pattern recognition. Vukovar, Croatia: InTech. INTECH Open Access Publisher.
- Polito M J, Clucas G V, Hart T, et al. 2012. A simplified method of determining the sex of *Pygoscelis* penguins using bill measurements. *Marine Ornithology*, 40(2): 89–94.
- Price T D. 1984. The evolution of sexual size dimorphism in Darwin's Finches. *American Naturalist*, 123(4): 500–518.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. [CP/OL]. [2016-10-31]. <http://www.R-project.org/>.
- Shine R. 1989. Ecological causes for the evolution of sexual dimorphism: a review of the evidence. *Quarterly Review of Biology*, 64(4): 419–461.
- Sikora A, Dubiec A. 2011. Sex identification of Jack Snipe *Lymnocyptes minimus* by discriminant analysis of morphometric measurements. *Ardea*, 95(1): 125–133.
- Steiner G, Preusse G, Zimmerer C, et al. 2016. Label free molecular sexing of monomorphic birds using infrared spectroscopic imaging. *Talanta*, 150: 155–161.
- Székely T, Reynolds J D, Figuerola J. 2000. Sexual size dimorphism in shorebirds, gulls, and alcids: the influence of sexual and natural selection. *Evolution*, 54(4): 1404–1413.
- Tomkovich P S. 2001. A new subspecies of Red Knot *Calidris canutus* from the New Siberian Islands. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 121(4): 257–263.
- Venables W N, Ripley B D. 2013. *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. New York: Springer Science & Business Media.
- Volodin I A, Volodina E V, Klenova A V, et al. 2015. Gender identification using acoustic analysis in birds without external sexual dimorphism. *Avian Research*, 6(1): 1–17.
- Volodin I, Kaiser M, Matrosova V, et al. 2009. The technique of noninvasive distant sexing for four monomorphic *Dendrocygna* whistling duck species by their loud whistles. *Bioacoustics*, 18(3): 277–290.
- Wang N, Zhang Z W. 2009. The novel primers for sex identification in the brown eared-pheasant and their application to other species. *Molecular Ecology Resources*, 9(1): 186–188.
- Warham J. 1972. Breeding seasons and sexual dimorphism in Rockhopper penguins. *The Auk*, 89(1): 86–105.
- 王岐山, 马鸣, 高育仁, 等. 2006. 中国动物志: 鸟纲. 北京: 科学出版社, 340–377.