

# 扎龙国家级自然保护区冬季笼养丹顶鹤与白枕鹤 种间适合度的比较

杨志宏<sup>1\*</sup>, 邹红菲<sup>2</sup>, 邵淑丽<sup>1</sup>, 郭立业<sup>3</sup>, 林春山<sup>3</sup>, 张显光<sup>3</sup>

(1. 齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006; 2. 东北林业大学野生动物资源学院, 哈尔滨 150040;  
3. 黑龙江扎龙国家级自然保护区, 黑龙江齐齐哈尔 161003)

**摘要:** 通过比较黑龙江扎龙国家级自然保护区冬季笼养丹顶鹤 *Grus japonensis* 与白枕鹤 *Grus vipio* 的适合度, 以期为拟定不同的保护对策提供参考。本文以保护区冬季 1 月(4 周)单笼饲养的丹顶鹤(5 ♀、7 ♂)和白枕鹤(3 ♀、5 ♂)为研究对象, 对其体质量变化、摄食量和摄食比例、摄入能量需求及能量收支进行种间比较。结果发现, 丹顶鹤的体质量下降(9.35%)显著而白枕鹤体质量下降(3.02%)不显著。丹顶鹤和白枕鹤的摄食比例(鲫鱼/玉米)分别为 12.70/1 和 0.93/1。丹顶鹤摄入能量和排出水热能散失实测值均极显著高于白枕鹤( $P < 0.001$ )。丹顶鹤与白枕鹤单位体质量(/kg)能量收支比较, 摄入能量种间差异无统计学意义( $P > 0.05$ ), 而丹顶鹤的排出水热能散失极显著高于白枕鹤( $P < 0.01$ )。另外, 低温和短光照的胁迫使可摄食鲫鱼和玉米的时间分别在 5.5 h 和 9.5 h 以内。结果表明, 冬季相同生境中丹顶鹤和白枕鹤的摄入能量需求水平相同, 但其能量收支因摄食偏好而出现显著变化。总之, 从食性偏好、食物可获得性和能量收支来看, 保护区冬季笼养白枕鹤的适合度应该高于丹顶鹤。

**关键词:** 丹顶鹤; 白枕鹤; 适合度; 扎龙国家级自然保护区

**中图分类号:** Q959.7    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-7083(2017)01-0087-07

## Comparison of Fitness between Captive *Grus japonensis* and *Grus vipio* in Winter in Zhalong National Nature Reserve

YANG Zhihong<sup>1\*</sup>, ZOU Hongfei<sup>2</sup>, SHAO Shuli<sup>1</sup>, GUO Liye<sup>3</sup>, LIN Chunshan<sup>3</sup>, ZHANG Xianguang<sup>3</sup>

(1. College of Life Sciences, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang Province 161006, China;  
2. College of Wildlife Resources, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Zhalong Nature Reserve, Qiqihar,  
Heilongjiang Province 161003, China)

**Abstract:** The present study was designed to compare the winter fitness of red-crowned crane (*Grus japonensis*) and white-naped crane (*G. vipio*) winter inhabitation in Qiqihar, Heilongjiang province, China, and to provide more reference on situ conservation. *G. japonensis* (5 ♀, 7 ♂) and *G. vipio* (3 ♀, 5 ♂) were housed individually in cages (6 m × 4 m × 4 m) in their natural habitat in Zhalong National Nature Reserve (123°51' - 124°37'E, 46°48' - 47°32'N). Twenty adults were fed with the same diets and feeding method. Crucian carp (*Carassius auratus*) and corn were supplied regularly. During the process, *G. japonensis* and *G. vipio* were maintained in natural conditions with a short photoperiod of 9.5L:14.5D. The body mass changes, food intake, food intake ratio, energy budget, and energy budget of unit body mass in the winter birds were compared after 4 weeks. The birds were weighed (0.01 kg) twice at the start and finish of the experiment. Energy and water intake was measured for every bird. The amount of supplied and residual food was weighed daily during the experiment, and the caloric content of food intake was determined using an oxygen bomb calorimeter. The fecal discharge frequency was calculated by counting fecal deposits 5 times per day, after which the deposit was removed to ensure accurate measurement. The results showed that the body mass of *G. japonensis* and *G. vipio* were reduced 9.35% ( $P < 0.05$ ) and 3.02% ( $P > 0.05$ ), respectively, and food intake ratio (crucian carp/corn) were 12.70/1 and 0.93/1, respectively. No significant difference was observed in body temperature. Energy intake and the cooling energy of water discharged measured values of *G. japonensis* were significantly higher than *G. vipio* ( $P < 0.001$ ). However, although the energy intake of unit

收稿日期:2016-10-02    接受日期:2016-11-18

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(C2016059); 国家自然科学基金项目(31470016; 31070345)

作者简介:杨志宏(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事鸟类生理生态学和能量学研究

\* 通信作者 Corresponding author, E-mail: yzh0452@163.com

body mass (/kg) between the two birds was not significantly different, the cooling energy of water discharged of unit body mass in *G. japonensis* was significantly higher than *G. vipio*. In addition, due to the stress of low air temperature and short photoperiod, the food intake time of crucian carp and corn was limited only within 5.5 h and 9.5 h, respectively. These findings suggested that the energy intake demand of *G. japonensis* was the same as the *G. vipio* in winter, however, the energy budget benefits were different because of their different feeding preference. In conclusion, from the perspective of food availability and energy budget, the fitness of *G. vipio* should be higher than *G. japonensis* in winter in Zhalong National Nature Reserve.

**Keywords:** *Grus japonensis*; *Grus vipio*; fitness; Zhalong National Nature Reserve

适合度源于达尔文的“最适者生存”思想,也是生存能力和繁殖能力的相对测定指标(张晓爱,2001a)。适合度与能量预算之间的联系是生态能量学研究的核心问题(张晓爱,2001b)。鸟类的能量收支对策与收益或能量代谢水平与机理等都是鸟类学家关注的焦点(Guillemette & Butler, 2012; Hegemann *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2014; 杨志宏等, 2014, 2015)。能量代谢水平与代谢机理是决定鸟类物种分布和丰富度、繁殖成功和适合度的重要因素(Zheng *et al.*, 2014a, 2014b)。能量收支是鸟类生存的重要特征,并贯穿其整个生活史。鸟类保持最适的能量收支平衡应该是其主要的生存对策。鸟类能够充分利用自身具有的物种进化优势和选择最适的能量收支对策来应对生境变化,其生理或行为所表现出的适应性调节与其能量收支密切相关(Hegemann *et al.*, 2012; Guillemette & Butler, 2012)。鸟类选择不同的能量收支对策不仅可以获得不同的收益,还可以反映出物种对环境特有的适应机制和不同的进化对策(Carpenter *et al.*, 1993; Zheng *et al.*, 2014a; Wu *et al.*, 2015)。

体质量是衡量动物体内能量储备或能量代谢水平的重要参数,体质量变化总与其能量收支的收益有关(杨志宏等, 2015)。鸟类保持高且相对恒定的体温是其进行正常生命活动的生理基础,其中高体温的维持主要依赖于能量收支的收益(Thouzeau *et al.*, 1999)。鸟类的行为选择(Li *et al.*, 2013)、生活史对策(Liechti, 2006)、生存与繁殖(Suárez *et al.*, 2005)、能量收支水平与进化适合度(Mészáros *et al.*, 2006)等也都与其能量收支的收益有关。摄入能量是衡量种间或种内不同个体能量收支水平的重要参数(Hegemann *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2014)。摄食偏好或摄食比例的变化不仅可以直接反映出鸟类摄入能量或营养的需求(杨志宏等, 2014, 2015),还可以间接反映出鸟类不同的适应模式和生理能力(Mc-

Nab, 2003; McNab & Ellis, 2006; Lee *et al.*, 2007)。

丹顶鹤 *Grus japonensis* 和白枕鹤 *Grus vipio* 是同属于鹤形目 Gruiformes 鹤科 Gruidae 的大型杂食性鸟类,中国脊椎动物红色名录将丹顶鹤和白枕鹤列为濒危(EN)物种(蒋志刚等, 2016)。黑龙江扎龙国家级自然保护区(123°51' ~ 124°37' E, 46°48' ~ 47°32' N)是中国北方同纬度地区中保留最完整、最原始、最开阔的湿地生态系统。每年繁殖季节会有丹顶鹤和白枕鹤等 6 种鹤类在此停留或繁殖。近年来,保护区内笼养丹顶鹤已有 300 余只(王文锋等, 2011)和白枕鹤 20 只左右,冬季需要确保其安全越冬;同时每年冬季都会有野生和野化放归的少则十几只的丹顶鹤和多则数十只的白枕鹤留居保护区越冬,它们更需要关注和保护。丹顶鹤和白枕鹤的适合度若存在种间差异,给予的保护对策也应有所不同。

本文以保护区冬季成年笼养丹顶鹤(5 ♀、7 ♂)和白枕鹤(3 ♀、5 ♂)为研究对象,通过拟实验室方法对其体质量变化、能量收支和摄食比例等进行种间比较,并从食性偏好、自主选择性摄食、冬季食物可获得性和能量收支等方面来探讨适合度的种间差异。

## 1 材料和方法

### 1.1 保护区概况、动物处理与饲养方法及实验期间气候特点

扎龙国家级自然保护区是国际重要湿地(Luo *et al.*, 2014),也是丹顶鹤和白枕鹤等许多鸟类的繁殖地(Wu & Zou, 2011; Luo *et al.*, 2013)。保护区总面积约 2 100 km<sup>2</sup>(核心区面积约为 700 km<sup>2</sup>,缓冲区面积达 1 400 km<sup>2</sup>)。

2014 年 1 月 2—29 日,以保护区单笼(长 6 m × 宽 4 m × 高 4 m)饲养的 12 只成年丹顶鹤(5 ♀、

7 ♂) 和 8 只白枕鹤 (3 ♀、5 ♂) 为研究对象。实验前、后于 08:00 喂鱼前分别称量丹顶鹤和白枕鹤的体质量,即为初始体质量和最终体质量。实验期间对笼舍、塑料桶(饲喂食物与水)对应编号。1月2日 09:00 清理笼舍内的粪便和供给食物后实验开始,实验持续 28 d 至 1月30日上午清理并计数笼舍内的粪便后结束。实验期间供给丹顶鹤和白枕鹤的食物及方式相同,即干玉米粒每日足量供给(置于一桶中),鲫鱼 *Carassius auratus* 和饮水(混装于另一桶中)定时足量供给(08:00—08:30 供给,15:00—15:30 收回)。

实验期间日均最低温度为  $-24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、日均最高温度为  $-13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 1),光照周期约为 9.5L:14.5D,经常刮 3~4 级西北风。

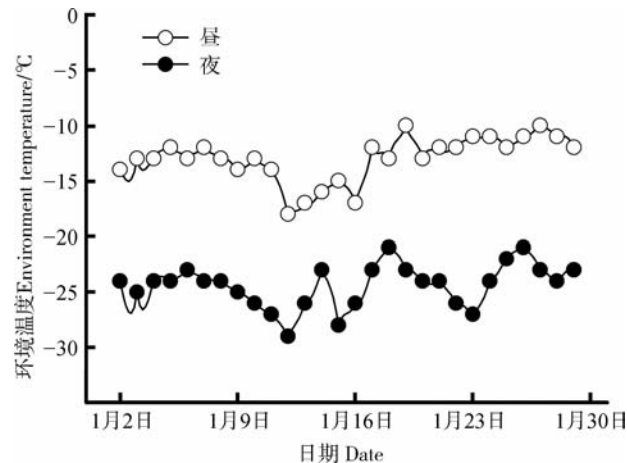


图 1 实验期间环境温度变化

Fig. 1 Environment temperature change during the test

## 1.2 体质量和体温的测定

采用电子秤(TCS100,浙江)称量体质量,方法为: $B = (A + B) - A$ (A 为饲养员体质量;B 为鹤体质量)(杨志宏等,2015)。用电子体温计测量体核温度,测温探头插入泄殖腔内约 3 cm 处静置约 20 s 至数值稳定时读数(精确到  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。实验前后相同时间各测体温 1 次,平均值记为丹顶鹤的日平均体温。

## 1.3 摄食(水)量与能量收支

每日相同时间称量食物和水的初质量(供给量)与末质量(剩余量),其差值记为当日摄入量和水量。用氧弹热量计(GR-3500 型,广东)测定食物热值。受自然环境低温影响和水温持续降低的变化,摄入水温以初水水温(饲喂时刻测定水温)和终水水温(冰水混合时水温  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的平均值来计算。

计算公式为:干物质(kg) = 物质总质量(kg) - 物质中水质量(kg),摄食量(kg/d) = 投食量(kg/d) - 剩余食物量(kg/d),摄入能量(kJ/d) = 摄入干食物质量(kg/d) × 干食物热值(kJ/kg),摄食比例 = 摄食鲫鱼量(kg/d)/摄食玉米量(kg/d),摄水量(kg/d) = 饮水量(kg/d) + 摄入食物中的水量(kg/d)。

假设丹顶鹤与白枕鹤体内的含水量基本保持不变,即以每日摄水量约等于排出水量为前提来计算和分析它们的排出水热能散失。排出水热能散失  $Q = C \times M \times (T_b - T_a)$ ,其中 C 为水的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ],M 为每日摄水量(kg), $T_b$  为鸟体温( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_a$  为摄入水温( $^{\circ}\text{C}$ )(杨志宏等,2014)。

## 1.4 排泄次数

每天累计计数排泄次数(每次计数后均随即清除粪便,避免粪便重合,使累计计数准确)4 次(昼 3 夜 1):白天累计计数 3 次,记为昼的排泄次数(10:00—10:30、13:00—13:30 和 15:50—16:20),以傍晚最后 1 次清除结束时开始直至次日清晨(同一时间)的排泄次数记为夜的排泄次数,昼夜排泄次数的总和记为日排泄次数,共计 28 次(排泄次数/只/日)。

## 1.5 统计分析

利用 SPSS 16.0 进行统计分析。种内初始和最终体质量的比较采用配对样本 t 检验(Paired-samples)。种间体质量、体温、摄食量、摄水量、排泄次数、能量收支各参数的实测值和单位体质量能量收支参数的比较均采用独立样本 t 检验(Independent-samples)。排泄次数和摄水量采用 Spearman 进行相关分析。文中数据均以平均值 ± 标准差(Mean ± SD)表示, $P < 0.05$  为差异有统计学意义, $P < 0.01$  为差异有高度统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 体质量和体温

丹顶鹤和白枕鹤的初始体质量分别为  $11.12\text{ kg} \pm 1.20\text{ kg}$  和  $6.30\text{ kg} \pm 0.66\text{ kg}$ ,最终体质量分别为  $10.08\text{ kg} \pm 1.19\text{ kg}$  和  $6.28\text{ kg} \pm 0.50\text{ kg}$ 。初始、最终体质量比较,丹顶鹤最终体质量下降(9.35%)显著、白枕鹤最终体质量下降(3.02%)不显著( $t = 6.586, df = 11, P = 0.022$ ;  $t = 1.903, df = 7, P = 0.153$ )。实验期间,丹顶鹤和白枕鹤的体温分别为  $42.2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $42.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,种间差异无统计学意义( $t = 0.373, df = 18, P = 0.542$ )。

### 2.2 摄食(水)量和能量收支

丹顶鹤摄入鲫鱼的量为白枕鹤的 4.74 倍 ( $t = 21.195, df = 18, P < 0.001$ )。白枕鹤摄入玉米的量为丹顶鹤的 2.87 倍 ( $t = 6.896, df = 18, P < 0.001$ )。丹顶鹤的摄水量为白枕鹤的 3.23 倍,其中丹顶鹤摄入食物中的水量和饮水量均极显著高于白枕鹤 ( $t = 16.836, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 21.383, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 6.670, df = 18, P < 0.001$ ) (图 2)。丹顶鹤自主性摄食比例(鲫鱼/玉米)为 12.70/1,白枕鹤为 0.93/1。

丹顶鹤摄入总能量、摄入鲫鱼的能量和排出水热能散失依次为白枕鹤的 1.44 倍、4.86 倍和 3.25 倍 ( $t = 6.319, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 21.225, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 17.058, df = 18, P < 0.001$ ) ; 而白枕鹤摄入玉米的能量为丹顶鹤的 2.82 倍 ( $t = 6.930, df = 18, P < 0.001$ ) (图 3)。

丹顶鹤和白枕鹤单位体质量摄入总能量的种间差异无统计学意义 ( $t = -0.082, df = 18, P = 0.935$ )。丹顶鹤单位体质量摄入鲫鱼的能量和排出水热能散失为白枕鹤的 2.30 倍和 1.69 倍,但白枕鹤摄入玉米的能量为丹顶鹤的 5.25 倍 ( $t = 6.820, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 3.585, df = 18, P = 0.002$ ;  $t = 7.100, df = 18, P < 0.001$ ) (图 4)。丹顶鹤摄入鲫鱼的能量、摄入玉米的能量和排出水热能散失的能量分别占其摄入总能量的 79.20%、20.78% 和 3.4%。白枕鹤摄入鲫鱼的能量、摄入玉米的能量和排出水热能散失的能量分别占其摄入总能量的 34.11%、65.89% 和 1.99%。

### 2.3 排泄次数

丹顶鹤日、昼和夜排泄次数依次为白枕鹤的 2.35 倍、2.92 倍和 1.40 倍,日与昼排泄次数的种间差异均有高度统计学意义,而夜排泄次数的种间差异无统计学意义 ( $t = 6.280, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 6.323, df = 18, P < 0.001$ ;  $t = 5.989, df = 18, P = 0.056$ ) (图 5)。相关分析表明摄水量与排泄次数极显著正相关 ( $r^2 = 0.897, P < 0.001$ ) (图 6)。

### 2.4 观察结果

粪尿混合物形态差异:丹顶鹤白天排泄物多为白色、滩状,固形物(黑色颗粒)含量不同,含水量大和排泄次数较多,夜晚排泄物中会有白色滩状和少量泛绿色短条堆状 2 种形态的粪便。白枕鹤白天排

泄物多为绿色条形堆状为主,固形物多,含水量和排泄次数均比丹顶鹤少,有时也有白色液体与暗绿色固形物相混合的滩状粪便。

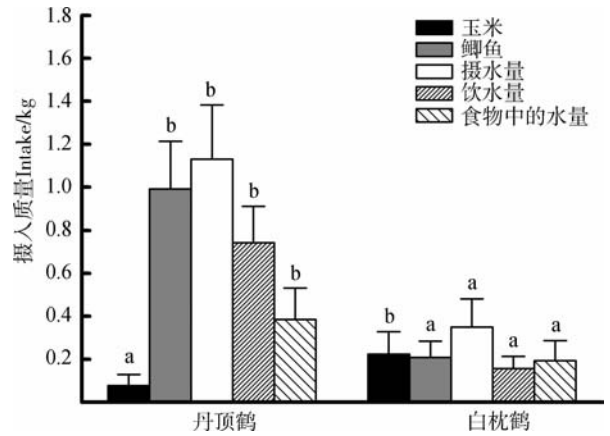


图 2 摄食和摄水量实测值的种间比较  
Fig. 2 Food and water intake in *Grus japonensis* and *G. vipio*  
数据为平均值 ± 标准差; 不同字母代表种间差异有统计学意义; 下同。  
Results are presented as means ± sd; different letters indicate there is a significant difference; the same below.

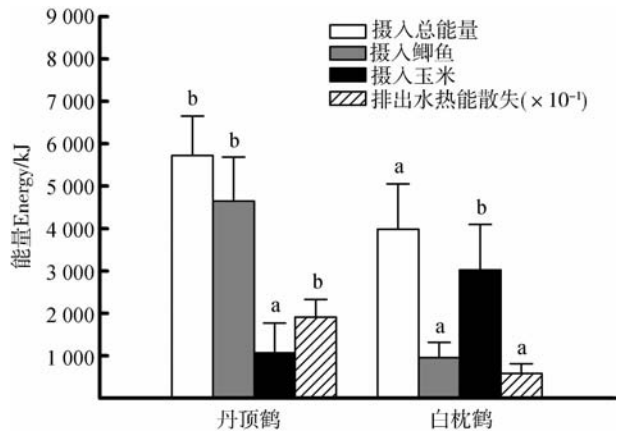


图 3 能量收支实测值种间比较  
Fig. 3 Comparison of energy budget in *Grus japonensis* and *G. vipio*

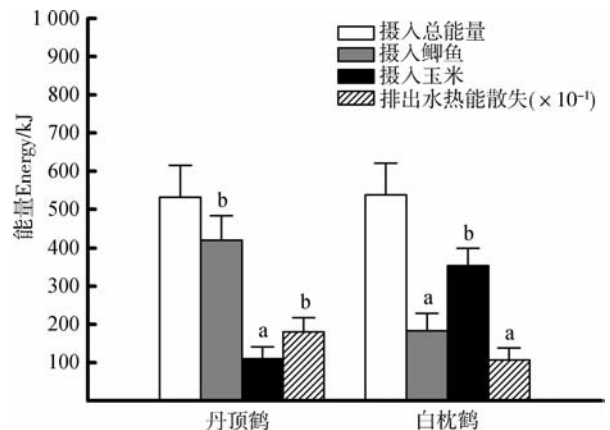


图 4 单位体质量(/kg)能量收支的种间比较  
Fig. 4 Comparison of energy budget on unit body mass in *Grus japonensis* and *G. vipio*

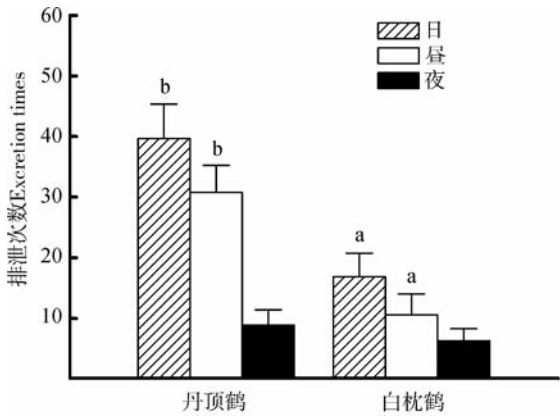


图5 排泄次数的种间比较

Fig. 5 The difference of excretion times between *Grus japonensis* and *G. vipio*

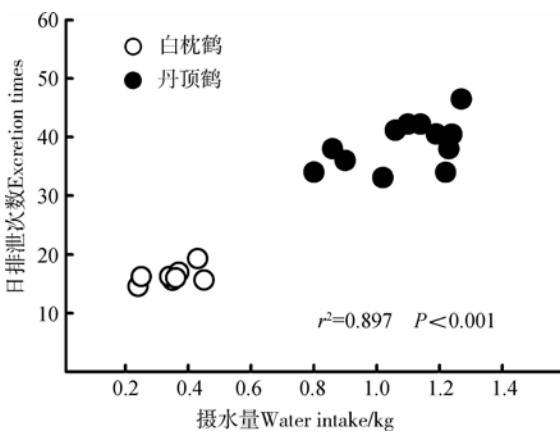


图6 摄水量与日排泄次数的相关性

Fig. 6 The relationship between water intake and excretion times

### 3 讨论

实验期间保护区内的丹顶鹤和白枕鹤需要面对全年最大的生存压力。如,低温和昼夜温差大;光照时间昼短夜长,白天可摄食时间受限,夜晚(降温)生存能耗增加、无法摄食(昼出夜伏鸟类)和漫长黑夜需要消耗更多体内储备的能量;常刮3~4级西北冷风。所以满足摄入能量需求应该是留居丹顶鹤和白枕鹤成功越冬的必要条件。

#### 3.1 摄食偏好、食物可获得性和摄食(水)量

动物种间不同的摄食需求是经过长期进化形成的(McNab, 2003)。丹顶鹤与白枕鹤虽然均为杂食性鸟类(Lee et al., 2007),同时供给足量的鲫鱼和玉米后,丹顶鹤和白枕鹤自主选择性摄食比例存在较大的种间差异,前者以摄食鲫鱼为主,后者以摄食玉米为主,这表明它们存在摄食偏好。体型差异可能是丹顶鹤和白枕鹤出现摄食偏好的原因之一,因为

体型大的动物往往会选择适口的食物并需要摄入相对多的食物和能量。摄食偏好也可能与食物的适口性有关。丹顶鹤可以轻易吞咽一条100 g左右的鲫鱼,而摄入同质量的干玉米粒却需要逐粒啄食数十次。丹顶鹤与白枕鹤摄食偏好是否与其消化道形态结构的种间差异有关尚需验证。本文认为冬季笼养丹顶鹤和白枕鹤的自主选择性摄食首先应该是满足其摄入能量需求,其次是摄入营养需求,并且,它们摄食偏好的种间差异很可能会对其摄入能量需求及能量收支的收益产生不同的影响。

食物可获得性也是影响动物能量收支的重要影响因素之一(杨志宏,邵淑丽, 2011;杨志宏等, 2014)。分析动物的食物可获得性时不能脱离其特定的生态位,既要考虑可获得食物的质量、数量、营养和适口性等,还要考虑食物的可摄食时间、动物处理食物的能力及其摄入能量需求等(杨志宏等, 2015)。可摄食时间缩短是扎龙保护区冬季丹顶鹤和白枕鹤都需要面临的生存胁迫因素之一,并且,鲫鱼和玉米这2种食物的可摄食时间也存在较大差异,前者受限于低温和短光照的交互作用(5.5 h以内),后者受限于短光照(9.5 h左右)。低温环境中水结冰,剩余的鱼会冰冻于桶壁内侧,有鱼而无法摄食(破冰取鱼)。相比白枕鹤,丹顶鹤对鲫鱼存在摄食偏好,其摄入鲫鱼的量也远多于摄入玉米的量,然而有限的时间内丹顶鹤摄入鲫鱼的量很有可能并不能满足摄入需求,摄入鲫鱼不足时只能靠摄入玉米来补充。白枕鹤的摄食偏好与丹顶鹤不同,其摄入玉米的需求更多。所以从食物可获得性角度,扎龙冬季笼养或散养丹顶鹤的生存压力都应该大于白枕鹤。

丹顶鹤的体质量大于白枕鹤,所以需要摄入相对多的食物和能量。本研究结果发现,虽然丹顶鹤摄入鲫鱼的量、摄水量、摄入鲫鱼中的水量和饮水量均显著多于白枕鹤,摄入玉米的量却显著少于白枕鹤。丹顶鹤偏好摄食鲫鱼,所以摄入玉米量的实测值有可能会低于其预期值。摄水量取决于饮水和摄入食物中的水,鱼水混合的饲喂方式应该是导致丹顶鹤饮水量显著增加的直接原因。本文认为白枕鹤的摄水量应该更接近其冬季的摄水需求,而丹顶鹤的摄水量很可能已经超过其摄水需求。所以摄食量和摄水量的种间显著差异不仅与其体质量的种间差

异有关,还应该与其摄食偏好有关。

### 3.2 能量收支和摄入能量需求

相同生境中动物单位体质量的摄入能作为能量学参数,可以比较相同时段不同物种种间的摄入能量需求,还可以比较同一物种种内不同时间段的摄入能量需求。本研究结果发现,虽然丹顶鹤和白枕鹤单位体质量摄入总能量种间差异无统计学意义(单位体质量摄入总能量中前者以鲫鱼为主、后者以玉米为主),但由于丹顶鹤的日摄入能量需求存在尚未满足的可能性,所以这一结果还不能证明它们有着相同的摄入能量需求。

鸟类不同的能量收支对策可以间接反映出鸟类不同的适应模式(Lee *et al.*, 2007)和生理能力(McNab & Ellis, 2006; McNab, 2013)。本研究结果发现,丹顶鹤的摄入总能量、摄入鲫鱼的能量和排出水热能散失的能量均显著高于白枕鹤,摄入玉米的能量显著低于白枕鹤。本文认为丹顶鹤和白枕鹤能量收支实测值的显著差异应该同时与其体质量及摄食偏好的种间差异有关。鸟类体内正常的新陈代谢和废物排出体外都离不开水,水的摄入和排出对鸟类维持正常的生理机能和进行体温调节意义重大(杨志宏等, 2014)。丹顶鹤和白枕鹤排出水热能散失种间差异有统计学意义,这意味着它们的能量收支收益可能会因为排水量(取决于摄水量并受摄食偏好影响)的种间差异而不同。

粪尿混合排泄是鸟类的生物学特征,鸟类通过多次排泄可以及时排出体内的代谢废物,还可以通过减轻体质量来减少行为能耗,及通过排泄物中的水进行体温调节(杨志宏等, 2015)。丹顶鹤日和昼的排泄次数均显著高于白枕鹤,而夜的排泄次数种间差异无统计学意义,这可能与摄水量的种间差异有关。相关分析表明冬季丹顶鹤与白枕鹤的日排泄次数均与其摄水量显著正相关。所以,摄食偏好的种间差异能够引起其摄入(或排出)水量、排泄次数和排泄物形态及排出水热能散失发生连锁变化。

冬季,摄食偏好与食物可获得性的共同作用使丹顶鹤和白枕鹤有不同的能量收支水平及收益。

### 3.3 体质量和体温

鸟类体质量发生改变不仅与气候的季节性变化有关(Cooper, 2007; Zheng *et al.*, 2014b),也与其自身生理状态的适应性调节有关(McWilliams & Kara-

sov, 2001; 杨志宏, 邵淑丽, 2011)。气候是决定鸟类个体能量消耗水平的重要因素之一。气候季节性的动态变化能够引起鸟类摄能需求和能量收支对策的改变。鸟类体质量变化与其体内高能储备物质如蛋白质和脂肪含量的变化有关(Zheng *et al.*, 2014b),并取决于每日的摄食量(Lee *et al.*, 2007)、摄入食物质量差异(杨志宏, 邵淑丽, 2011)和食物可获得性及其能量收支的收益(杨志宏等, 2015)。实验期间相同生存环境中丹顶鹤和白枕鹤的体质量均呈下降趋势,丹顶鹤的体质量降低(9.35%)显著,而白枕鹤体质量降低(3.02%)不显著。本文认为,冬季最冷月低温和短光照的生存胁迫是导致丹顶鹤与白枕鹤体质量下降的直接原因。生境、食物和食物的供给方式等都相同,为什么丹顶鹤的体质量降低显著而白枕鹤体质量降低不显著呢?这很可能与丹顶鹤和白枕鹤的食性偏好有关。首先,丹顶鹤和白枕鹤自主性摄食比例(鲫鱼/玉米)分别为 12.70/1 和 0.93/1。低温和短光照的交互作用限制了可摄食食物的时间,可摄食玉米的时间与光照时间相同约 9 h,而可摄食鲫鱼的时间通常仅为 4~5 h(水结冰)。水结冰后,虽然桶内有鲫鱼,但是丹顶鹤无法摄食冰冻于桶壁的鲫鱼,因此也存在没有满足摄食鲫鱼需求的可能性,即其摄食比例的理论值很可能会大于实测值(12.70/1)。当摄入鲫鱼的能量需求未能满足时,可以通过摄食玉米来补充。其次,丹顶鹤的摄水量为白枕鹤的 3.23 倍,这应该与鲫鱼的含水量大、鱼水混合饲喂方式及其摄入较多的鲫鱼有关。丹顶鹤与白枕鹤种间体温差异无统计学意义。如果丹顶鹤和白枕鹤的摄水量等于排出水量,那么摄水量多也就意味着排出水热能散失的增加。最后,食性偏好致使丹顶鹤与白枕鹤的能量收支水平及收益发生改变,并最终导致种间体质量的不同变化。

总之,从食性偏好、食物可获得性和种间能量收支差异来看,保护区冬季笼养白枕鹤的适合度应该高于丹顶鹤。

### 参考文献:

- 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 2016. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 24(5): 500-551.
- 王文锋, 高忠燕, 李长友, 等. 2011. 扎龙湿地丹顶鹤种群数量调查及保护[J]. 野生动物, 32(2): 80-82.

- 杨志宏, 邵淑丽. 2011. 食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响[J]. 生态学报, 31(14): 3937-3946.
- 杨志宏, 吴庆明, 杨渺, 等. 2014. [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节[J]. 生态学报, 34(10): 2617-2628.
- 杨志宏, 邹红菲, 高忠燕, 等. 2015. 食物可获得性对冬季丹顶鹤能量收支的影响——以扎龙自然保护区人工辅助繁育丹顶鹤为例[J]. 生态学报, 35(13): 4408-4415.
- 张晓爱, 赵亮, 胥志清. 2001a. 鸟类生态能量学的几个基本问题[J]. 动物学研究, 22(3): 231-238.
- 张晓爱, 赵亮, 康玲. 2001b. 鸟类能量学的学科结构及其发展[J]. 动物学研究, 22(2): 146-153.
- Carpenter FL, Hixon MA, Beuchat CA, *et al.* 1993. Biphasic mass gain in migrant hummingbirds: body composition changes, torpor, and ecological significance [J]. Ecology, 74(4): 1173-1182.
- Cooper SJ. 2007. Daily and seasonal variation in body mass and visible fat in mountain chickadees and juniper titmice [J]. The Wilson Journal of Ornithology, 119(4): 720-724.
- Guillemette M, Butler PJ. 2012. Seasonal variation in energy expenditure is not related to activity level or water temperature in a large diving bird [J]. The Journal Experimental Biology, 215(18): 3161-3168.
- Hegemann A, Matson KD, Versteegh MA, *et al.* 2012. Wild skylarks seasonally modulate energy budgets but maintain energetically costly inflammatory immune responses throughout the annual cycle [J]. PLoS ONE, 7(5): e36358. DOI:10.1371/journal.pone.0036358.
- Lee SD, Jabłoński PG, Higuchi H. 2007. Effect of heterospecifics on foraging of endangered red-crowned and white-naped cranes in the Korean Demilitarized Zone [J]. Ecological Research, 22(4): 635-640.
- Liechti F. 2006. Birds: blowin' by the wind? [J]. Journal of Ornithology, 147(2): 202-211.
- Li ZQ, Wang Z, Ge C. 2013. Time budgets of wintering red-crowned cranes: effects of habitat, age and family size [J]. Wetlands, 33(2): 227-232.
- Luo JM, Yin XR, Ya YJ, *et al.* 2013. Pb and Cd bioaccumulations in the habitat and preys of red-crowned cranes (*Grus japonensis*) in Zhalong Wetland, northeastern China [J]. Biological Trace Element Research, 156(1): 134-143.
- Luo JM, Ye YJ, Gao ZY, *et al.* 2014. Characterization of heavy metal contamination in the habitat of red-crowned crane (*Grus japonensis*) in Zhalong Wetland, northeastern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 93(3): 327-333.
- McNab BK. 2003. Ecology shapes bird bioenergetics [J]. Nature, 426(6967): 620-621.
- McNab BK, Ellis HI. 2006. Flightless rails endemic to islands have lower energy expenditures and clutch sizes than flighted rails on islands and continents [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology, 145(3): 295-311.
- McNab BK. 2013. The ecological energetics of birds in New Guinea [J]. Bull-Florida Museum of Natural History, 52(2): 95-159.
- McWilliams SR, Karasov WH. 2001. Phenotypic flexibility in digestive system structure and function in migratory birds and its ecological significance [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology, 128(3): 579-593.
- Mészáros A, Tóth Z, Pásztor L. 2006. Body mass of female great tits (*Parus major*) at egg laying [J]. Journal of Ornithology, 147(3): 414-418.
- Suárez F, Traba J, Herranz J. 2005. Body mass changes in female tawny pipits *Anthus campestris* during the nesting stage [J]. Journal of Ornithology, 146(4): 372-376.
- Thouzeau C, Duchamp C, Handrich Y. 1999. Energy metabolism and body temperature of barn owls fasting in the cold [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 72(2): 170-178.
- Wu MS, Xiao YC, Yang F, *et al.* 2014. Seasonal variation in body mass and energy budget in Chinese bulbuls (*pycnonotus sinensis*) [J]. Avian Research, 5: 4.
- Wu MX, Zhou LM, Zhao LD, *et al.* 2015. Seasonal variation in body mass, body temperature and thermogenesis in the Hwamei, *Garrulax cantors* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology, 179: 113-119.
- Wu QM, Zou HF. 2011. Nest-site selection pattern of *Grus japonensis* in Zhalong Nature Reserve of northeast China [J]. Journal of Forestry Research, 22(2): 281-288.
- Zheng WH, Li M, Liu JS, *et al.* 2014a. Seasonal variation of metabolic thermogenesis in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*) over a latitudinal gradient [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 87(5): 704-718.
- Zheng WH, Liu JS, Swanson DL. 2014b. Seasonal phenotypic flexibility of body mass, organ masses, and tissue oxidative capacity and their relationship to resting metabolic rate in Chinese bulbuls [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 87(3): 432-444.