

丝光椋鸟的代谢产热特征及 体温调节的日周期变化

赵磊^{①③} 郑立云^① 张伟^① 黄迪飞^① 徐云^① 柳劲松^{①②*}

① 温州大学生命与环境科学学院 温州 325035; ② 温州大学应用生态研究所 温州 325035;

③ 大连海事大学环境系统生物学研究所 大连 116021

摘要: 为探讨丝光椋鸟(*Sturnus sericeus*)代谢产热特征及体温调节的日周期变化,本研究采用开放式氧气分析仪及数字式温度计,测定了丝光椋鸟24 h 体温、体重(M_b)和基础代谢率(BMR)的连续变化。结果显示,丝光椋鸟体温、体重及代谢率的日周期变化存在显著差异。丝光椋鸟夜间体温明显低于白昼,其中体温在凌晨5时降至 $(40.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$;体重昼夜变化明显,且在20:00~次日6:00时雌雄丝光椋鸟体重的下降与时间分别存在明显的线性关系,雌性为 $M_b = 83.46(\pm 0.12) - 0.41(\pm 0.02)t$ ($R^2 = 0.992, P < 0.01$);雄性为 $M_b = 76.74(\pm 0.15) - 0.39(\pm 0.02)t$ ($R^2 = 0.986, P < 0.01$) (式中的 t 代表时间)。丝光椋鸟的BMR在凌晨4时降至最低,为 $(1.96 \pm 0.06) \text{ ml}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。结果表明,丝光椋鸟通过内源性的调节,即夜间降低体温、体重及代谢率等途径,调节生理能量平衡,从而适应昼夜环境变化。

关键词: 丝光椋鸟;体温;体重;基础代谢率;日周期变化

中图分类号: Q958, Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263(2013)02-269-09

Daily Cyclic Variation of Metabolism and Thermoregulation in the Silky Starling

ZHAO Lei^{①③} ZHENG Li-Yun^① ZHANG Wei^① HUANG Di-Fei^①
XU Yun^① LIU Jin-Song^{①②*}

① School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035;

② Institute of applied ecology, Wenzhou University, Wenzhou 325035;

③ Institute of Environmental Systems Biology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: In order to explain the daily cyclic variation of metabolism and thermoregulation in the Silky Starling (*Sturnus sericeus*), the 24 hours continuous changes of body temperature (T_b), body mass (M_b) and basal metabolic rate (BMR) in silky starling were measured. T_b was determined by a digital thermometer (Beijing Normal University Instruments Co., model TH-212) inserting to cloaca, M_b was measured by an electronic scale (Mettler-Toledo, model PL3001-S) to the nearest 0.1 g, and BMR was measured by an open oxygen analyzer (AEI, model S-3A/I) temperature controlled at $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, respectively. The results showed that daily variation of T_b , M_b and BMR was great significantly. Both of T_b and M_b were significantly lower and varied greatly in night time than those in day time. The lowest T_b was $40.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$ at 5 o'clock. The value of M_b

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 31070366),浙江省新苗人才计划项目(No. 2009R424023);

* 通讯作者, E-mail: ljs@wzu.edu.cn;

第一作者介绍 赵磊,男,硕士研究生;研究方向:动物生理生态学;E-mail:520zyzb@163.com。

收稿日期: 2012-09-06, **修回日期:** 2013-01-13

showed a obvious linear variation with time during 20:00–6:00, and the relationship of M_b in female was $M_b = 83.46 (\pm 0.12) - 0.41 (\pm 0.02) t$ ($R^2 = 0.992$, $P < 0.01$) and in male was $M_b = 76.74 (\pm 0.15) - 0.39 (\pm 0.02) t$ ($R^2 = 0.986$, $P < 0.01$), respectively. The lowest BMR was $(1.96 \pm 0.06) \text{ ml}/(\text{g} \cdot \text{h})$ at 4 o'clock. In summary, silky starling could adjust their daily cyclic variation by decrease T_b , M_b and BMR at night. This inner physiological energetic regulation mechanism improved their acclimatization to the diurnal environment variation.

Key words: Silky Starling (*Sturnus sericeus*); Body temperature; Body mass; Basal metabolic rate; Daily cyclic variation

动物的能量支出水平决定其行为、生理特征以及与生态环境的相互作用和制约,其代谢产热、体温和体重等作为衡量生命活动的重要指标,能很好地反映其能量支出水平(Swanson 1991, Zheng et al. 2008a)。鸟类保持最适的能量平衡是其主要的生存对策之一,对环境表现出形态、生理和行为上的适应(Lovegrove 2003, Doucette et al. 2008)。鸟类是恒温动物(homeotherm),通过内部的代谢产热维持着较高的体温。较高的体温通常意味着巨大的能量支出,即鸟类有相对较高的代谢产热。鸟类的高代谢产热特征和体温调节与其能量利用、分配、生活史对策及其进化途径等方面密切相关,反映了动物对环境的适应模式和生存能力,体现出生物多样性与环境之间相适应的关系(McNab 2009)。

鸟类的代谢产热可分为专性产热(obligatory thermogenesis)和兼性产热(facultative thermogenesis)。专性产热是指动物在热中性温度区的产热,产生于全身各个器官,如基础代谢产热(basal metabolic thermogenesis)(AL-Mansour 2004, McKechnie et al. 2007, 柳劲松等 2008, 张国凯等 2008)。基础代谢率(basal metabolic rate, BMR)是恒温动物维持正常生理机制的最小产热速率,是动物在清醒时维持身体各项基本功能所需的最小能量值(Zheng et al. 2008b, McNab 2009, 郑蔚虹等 2010)。BMR 作为个体能量消耗产生的热量的下限,是最常用的比较内温动物代谢率的方式,现在已经成为种间和种内能量代谢水平比较的重要参数(Lindsay et al. 2009a, b)。

基础代谢率的高低与种群对环境的适应程度有关,如格尔丹雀(*Erythrura gouldiae*)(Burton et al. 2003)、橙颊梅花雀(*Estrilda melpada*)和七彩文鸟(*Chloebia gouldiae*)(Marschall et al. 1991)、画眉(*Garrulax canorus*)(Liu et al. 2005)和白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)(Zheng et al. 2008b)等鸟类有低的基础代谢率和高热传导,与其主要分布在气候相对温暖和食物相对丰富的狭窄地区有关;而太平鸟(*Bombycilla garrulus*)(李铭等 2005)、燕雀(*Fringilla montifringilla*)和北朱雀(*Carpodacus roseus*)(Liu et al. 2004)及黄眉鹀(*Emberiza chrysophrys*)和红胁绣眼鸟(*Zosterops erythropleura*)(Liu et al. 2005)有高的基础代谢率和相对低的下临界温度,这使得其有较广的地理分布以及能够适应低温环境。鸟类的代谢产热支出可以被一系列行为和生理的机制相抵消,例如小环境的选择,群居,兼性低体温(facultative hypothermia)反应以及代谢特征的适应性变化(McKechnie et al. 2002)。这些行为和生理上的适应性变化通常使得鸟类的体温具有明显的昼夜节律,活动时体温最高,静止时体温最低。研究发现鸟类常常在夜间出现明显的体温降低现象,如波多短尾(*Todus mexicanus*)(Merola-Zwartjes et al. 2000)、虹彩蜂鸟(*Amazilia versicolor*)(Bech et al. 1997)、灰噪鸦(*Perisoreus canadensis*)(Waite 1991)、白颊黑雁(*Branta leucopsis*)(Butler et al. 2001)和白头鹎(周围等 2010)等。目前认为,鸟类夜间出现的体温降低现象可能是其作为应对环境压力的一种生存策略,对增加体温调节能力或减少

能量消耗具有积极重要的作用,它受食物供给、环境温度、激素水平及繁殖周期等一系列的生理生态因素的共同调节 (McKechnie et al. 2002)。

丝光椋鸟 (*Sturnus sericeus*) 属雀形目 (Passeriformes) 椋鸟科 (Sturnidae)。在我国分布较广,西至重庆、四川、贵州和云南,北至陕西南部、河南南部和安徽南部,东至江苏镇江、上海等长江流域及其以南一直到海南岛等我国南部地区;在国外冬季偶见于越南 (MacKinnon et al. 2000)。主要栖息于海拔 1 000 m 以下的低山丘陵和山脚平原地区的次生林、小块丛林和稀树草坡等开阔地带,尤以农田、道旁、旷野和村落附近的稀疏林间较常见,也出现于河谷和海岸。丝光椋鸟为留鸟,主要以昆虫为食,也吃桑树 (*Morus alba*)、榕树 (*Ficus microcarpa*) 等植物果实与种子。已发现丝光椋鸟具有较高的体温和热传导,相对较宽的热中性区 (thermal neutral zone, TNZ) 和较低的 BMR (Zhang et al. 2006)。

为了进一步认识小型鸟类产热特征及体温调节的日周期变化,我们选定丝光椋鸟为研究对象,在室温条件下,测定了丝光椋鸟的 BMR、体温、体重的 24 h 昼夜节律的变化,通过代谢率与体温调节等指标的分析,探讨其对生存环境的某些适应性特征。我们推测作为节省能量的生存策略,丝光椋鸟在夜间可能会降低基础能量消耗 (BMR)、体温和体重等生理指标。

1 材料与方 法

1.1 实验材料 成年的丝光椋鸟 16 只 (8 ♂、8 ♀),于 2009 年 12 月捕自温州地区 (27°29'N, 120°51'E)。温州地区年平均温度为 18℃,变化范围从 2℃到 40.7℃,其中最热月 (7 月份)和最冷月 (1 月份)的平均气温分别是 39℃和 8℃。将丝光椋鸟标记并分笼饲养于温州大学生态学重点实验室,饲喂北京市开元饲料有限责任公司生产的适用于鹁哥 (*Gracula religiosa*) 和八哥 (*Acridotheres cristatellus*) 的标准鸟食。每笼 1 只,笼的长 × 宽 × 高为 50 cm × 50 cm ×

60 cm,在自然光照的环境条件下自由取食和饮水,适应 1 周后进行实验,期间实验室平均温度为 (12.0 ± 0.4)℃ (范围 11.6 ~ 12.3℃)。

1.2 体温、体重的测定 体温 (T_b) 采用北京师范大学司南仪器厂生产的便携式数字温度测量仪测定 (TH-212,精确度为 0.1℃)。将温度计插入丝光椋鸟泄殖腔内约 1.5 cm 处,待温度计示数稳定后记录其体温。体重 (M_b) 的测定采用梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司生产的电子天平 (PL3001-S,精确度为 0.1 g)。体重和体温每隔 1 h 记录 1 次,共记录 24 次。实验期间环境温度基本维持恒定,平均温度为 (12.0 ± 0.4)℃ (范围 11.6 ~ 12.3℃)。由于雌雄体温差异不显著,故将丝光椋鸟体温合并一组。

1.3 代谢率的测定 动物的代谢率以每小时单位体重的耗氧量表示 [ml/(g·h)]。耗氧量的测定按照 McNab (2006) 描述的方法,采用美国 AEI 公司生产的开放式氧气分析仪 (S-3A/I),空气流量为 300 ml/h,人工气候培养箱控制呼吸室温度,温度设置为 25℃,呼吸室体积为 3.6 L。每天 6:00 ~ 14:00 时、14:00 ~ 22:00 时和 22:00 ~ 次日 06:00 时分三个时间段连续测定实验动物的代谢率 (metabolic rate, MR)。动物实验前的 4 h 和实验期间均禁食。放入呼吸室内适应 1 h,每隔 1 h 读取一次数据,在每个小时内选择一段连续的、稳定的最低值计算 MR。MR 的计算采用 Hill (1972) 描述的方法。热传导按照牛顿冷却定律简化公式 $C = MR / (T_b - T_a)$,计算丝光椋鸟的热传导率,式中, C 为热传导 [ml/(g·h·℃)], MR 是代谢率 [ml/(g·h)], T_b 为体温 (℃), T_a 是环境温度 (℃) (Ashoff 1981)。

1.4 统计分析 使用 SPSS 11.5 统计软件包进行相关统计处理,利用 Origin 6.0 软件绘图。日体温及体重的差异采用重复性测量方差分析 (repeated measure ANOVA);体温、体重及代谢率的昼夜组间差异采用配对样本 t 检验分析 (paired-samples t test);为了避免代谢率指标受体重的影响而导致分析结果出现误差,采用体

重为协变量的协方差分析 (ANCOVA) 比较代谢率相对大小的昼夜和雌雄差异。文中数据以平均值 ± 标准误 (Mean ± SE) 表示, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 丝光椋鸟体温和体重的日周期变化 丝光椋鸟体温日周期变化具有极显著的差异 ($F_{(23,408)} = 33.232, P < 0.01$), 其中在白昼 (9:00 ~ 18:00 时) 保持高而恒定的体温, 平均为 $(42.3 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, 而夜晚时体温较低, 为 $(41.2 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, 其中凌晨 5:00 时体温降至最低, 为 $(40.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ($n = 16$) (图 1)。

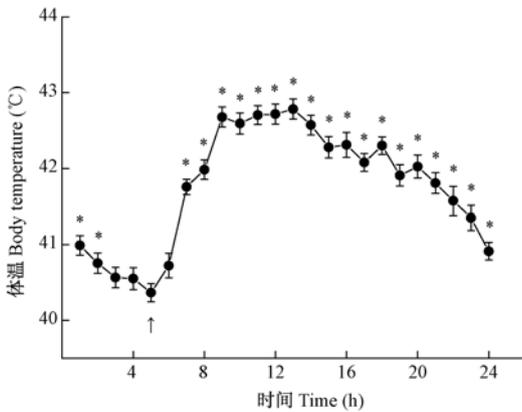


图 1 丝光椋鸟体温的日周期变化 ($n = 16$)

Fig. 1 Daily variations in body temperature of *Sturnus sericeus*

数据为平均值 ± 标准误; 与凌晨 5:00 时相比较, * $P < 0.05$ 。

The values are Mean ± SE; * $P < 0.05$ compared with measurement at 5 a. m.

雌雄丝光椋鸟的体重差异显著 ($t = 10.331, P < 0.001$), 雌性的平均体重为 $(81.3 \pm 0.5)\text{g}$ ($n = 8$), 雄性的平均体重为 $(74.8 \pm 0.4)\text{g}$ ($n = 8$) (图 2)。雌性丝光椋鸟的体重日周期变化具有显著性差异 ($F_{(23,168)} = 0.404, P < 0.05$), 在清晨 (8:00 时) 体重达到最小值 $(77.3 \pm 1.9)\text{g}$, 黄昏 (19:00 时) 达到最大值 $(83.9 \pm 2.2)\text{g}$ ($n = 8$); 雄性丝光椋鸟在清晨 (7:00 时) 体重为 $(72.4 \pm 2.2)\text{g}$, 在黄昏 (19:

00 时) 体重增加至 $(76.4 \pm 2.2)\text{g}$ ($n = 8$), 但雄性体重日周期变化无显著性差异 ($P > 0.05$) (图 2)。

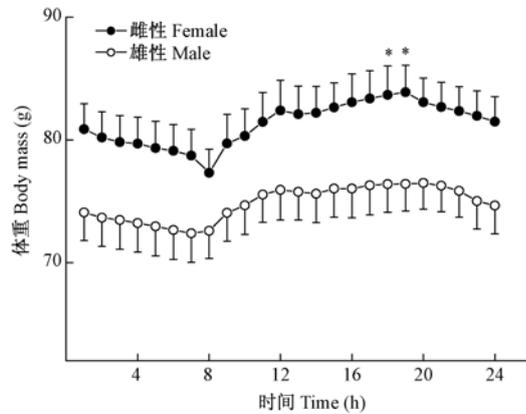


图 2 丝光椋鸟平均体重的日周期变化

(♂, $n = 8$; ♀, $n = 8$)

Fig. 2 Daily variations in mean body mass of *Sturnus sericeus*

数据为平均值 ± 标准误; 与凌晨 8:00 时相比较, * $P < 0.05$ 。

The values are Mean ± SE; * $P < 0.05$ compared with measurement at 8 a. m.

在夜晚 20:00 时到次日凌晨 7:00 时丝光椋鸟的体重存在明显的线性降低 (图 3), 雌性丝光椋鸟体重降低的线性方程为: $M_b = 83.46$

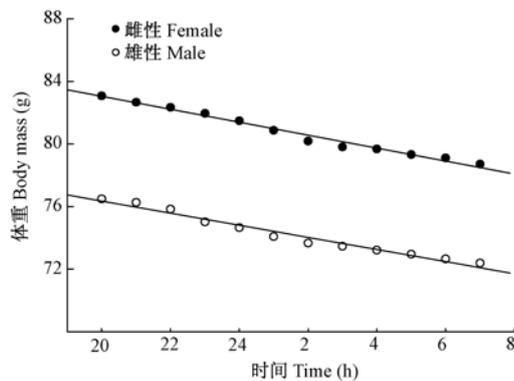


图 3 丝光椋鸟 (20:00 ~ 次日 7:00) 平均体重的线性变化

Fig. 3 Linear variations on mean body mass of *Sturnus sericeus* in the time of 20:00 - 7:00

(± 0.12) - 0.41 (± 0.02) t ($R^2 = 0.992$, $P < 0.01$); 雄性丝光椋鸟体重降低的线性方程为: $M_b = 76.74$ (± 0.15) - 0.39 (± 0.02) t ($R^2 = 0.986$, $P < 0.01$), 式中的 t 代表时间。

2.2 丝光椋鸟基础代谢率 (BMR) 和热传导 (C) 的日周期变化 经协方差校正后雌雄丝光椋鸟的 BMR 差异不显著, 将丝光椋鸟 BMR 合并一组。丝光椋鸟 BMR 存在明显的日周期变化 ($F_{(23,360)} = 22.218$, $P < 0.001$), 凌晨 4 时 BMR 降到最小值, 为 (1.96 ± 0.06) ml/(g·h), 14 时达到最大值, 为 (3.45 ± 0.22) ml/(g·h) ($n = 16$), 夜间代谢率较白昼降低了 43.19% (图 4)。由于丝光椋鸟的体重存在明显的昼夜节律, 单位体重的 BMR 经协方差校正后, 出现显著差异 ($F_{(23,359)} = 22.122$, $P < 0.001$), 夜间代谢率较白昼降低了 44.62%。

丝光椋鸟的热传导 C 同样存在明显的昼夜变化, 夜间和白天的 C 分别为 0.07 ml/(g·h·°C) 和 0.10 ml/(g·h·°C) ($t = 6.213$, $P < 0.001$)。

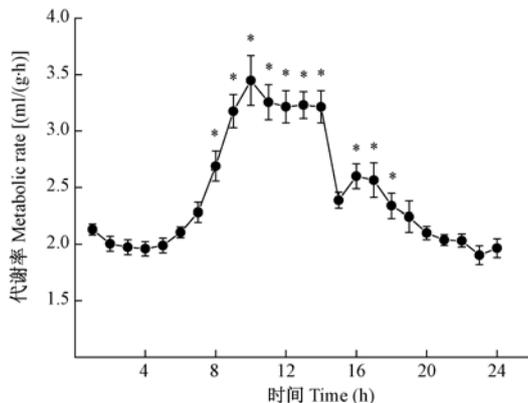


图 4 丝光椋鸟平均代谢率的日周期变化 ($n = 16$)

Fig. 4 Daily variations on mean metabolic rates of *Sturnus sericeus*

数据为平均值 \pm 标准误; 与凌晨 4:00 时相比较, * $P < 0.05$ 。

The values are Mean \pm SE; * $P < 0.05$ compared with measurement at 4 a. m.

3 讨论

3.1 体温的日周期变化 体温是代谢率产热和热传导散热相互作用的结果, 体温调节与代谢率和热传导的比值紧密相关。Prinzinger 等 (1991) 总结了 1 001 种不同状态下鸟类的体温, 认为鸟类由于飞翔而具有相对较高的代谢率, 较高的体温是对高代谢率的生理适应, 是长期进化的结果。此外, 鸟类的高体温还可以增加体温与环境温度差值, 有利于夏季向外界环境散热, 以更好地适应外界环境 (Burton et al. 2003)。然而在环境温度较低时, 常常会引起鸟类体温下降。鸟类体温调节程度决定于代谢率改变程度以及热传导能力, 一些小型鸟类通常在低温条件下通过降低体温, 缩小与环境温度的差异, 作为一种节省能量的生存对策, 减少能量支出。McKechnie 等 (2002) 将鸟类这种夜间体温明显低于正常活动水平定义为兼性低体温 (facultative hypothermia), 传统地分为冬眠 (hibernation)、日休眠 (daily torpor) 及静止低体温 (rest-phase hypothermia), 冬眠与日休眠之间的区别在于它们持续的长度及最低的临界体温, 而休眠与静止低体温之间的界线却不清晰。目前公认的标准是体温下降幅度大于 10°C 即认为鸟类休眠, 相反则认为是静止低体温。在所有的动物地理区中, 除了东洋界 (Indomalaya) 以外其他各大界均有报道一些鸟类物种有兼性低体温现象, 并随纬度从高到低, 鸟类出现低体温的物种数有增加的趋势。如澳大利亚界 (Australasia) 和热带界 (Afrotropics) 分别有 11 种和 12 种; 而新北界 (Nearctic) 和新热带界 (Neotropics) 分别有 18 种和 29 种之多。近年来, 人们在澳洲发现在一些较大的鸟类中 (体重在 200 g 以上) 也出现类似的低体温现象, 如澳洲裸鼻鸱 (*Aegotheles cristatus*) (Brigham et al. 2000) 和茶色蟆口鸱 (*Podargus strigoides*) (Körtner et al. 2000), 使我们对鸟类的低体温现象有了一个全新的认识。本研究中, 丝光椋鸟的体温具有明显的昼夜节律, 在夜间其体温显著下降, 最低值为 (40.4 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$, 对比

McKechnie 等(2002)的定义,我们认为丝光椋鸟这种夜间体温下降的现象是静止低体温。

低温是导致鸟类体温昼夜节律变化的因素之一,大多数小型鸟类在低温条件下表现出不同程度的低体温反应。例如,雨燕科(Apodidae)有2种出现低体温现象,白喉叉尾雨燕(*Aeronautes saxatilis*)夜间体温为17℃,比白天体温(38.6℃)降低了21.6℃(Bartholomew et al. 1957);蜂鸟科(Trochilidae)有29种出现不同程度的体温下降,其中宽尾煌蜂鸟(*Selasphorus platycercus*)夜间体温为6.5℃,比白天体温(38.7℃)降低了32.2℃(Calder et al. 1973),这些鸟类代谢率下降程度直接反映了低体温期间节约能量的大小。本次实验中环境昼夜温度较为恒定,但丝光椋鸟的体温却表现出明显的昼夜节律,且在夜间其体温显著下降,这表明环境温度不是丝光椋鸟体温昼夜变化的直接因素。实验中还发现丝光椋鸟夜间热传导较白昼下降了30%,代谢率下降了43.19%。周围等(2010)发现白头鹎在昼夜温度较为恒定的夏季,体温依然表现出明显的昼夜节律,在夜间其体温显著下降,认为白头鹎是通过减少代谢消耗及降低热传导,从而达到调节体温的目的。

食物是引起鸟类体温昼夜节律变化的另一重要因素。作为应对夜间食物摄入量的减少,改变体温调节能力或减少能量消耗是小型鸟类采取的有效对策之一(Macleod et al. 2005)。如宽尾煌蜂鸟在食物充足的时候夜间采取不休眠的对策,而在食物匮乏时则有日蛰伏(torpor)现象(Calder et al. 1973)。仓鸮(*Tyto alba*)长时间饥饿导致自身能量储备不足,最终在夜间出现低体温反应(Thouzeau et al. 1999)。我们的研究发现,丝光椋鸟在自由取食的条件下,其夜间体温依然持续下降,推测食物不是导致丝光椋鸟产生低体温的影响因素。

3.2 体重与基础代谢率的日周期变化 体积是影响脊椎动物能量代谢消耗的主要因子,实际科研工作中通常以体重代替体积作为测量标准(Gillooly et al. 2001)。体重是一个高度变化

的特征变量,其不仅反映体积大小,而且反映身体能量储备的多少(Pravosudov et al. 1997)。本研究中,丝光椋鸟的昼夜体重表现出明显差异,夜间较白昼低,在一定程度上反映了丝光椋鸟夜间能量储备低的特点,同时BMR降低了44.62%,这进一步支持了我们对于有关丝光椋鸟昼夜能量储备差异特点的猜测。鸟类对外界条件变化较为敏感,易受环境变化的影响,能量代谢调节是其重要的适应手段,而鸟类能量代谢中一般较高的代谢率需要一个较大的代谢机器,从而更好的用以代谢反应,这其中体重就是扮演了一个“较大的代谢机器”的角色(Książek et al. 2004)。较多的研究表明,环境因子如低温、降水和捕食压力等会影响鸟类的摄食和能量储备,鸟类面对食物的不可预测性,通常采取增加日体重来适应环境的变化。如白喉带鹀(*Zonotrichia albicollis*)(Kontogiannis 1967)、沼泽山雀(*Parus palustris*)(Hurly 1992)及斑马雀(*Taeniopygia guttata*)(Cuthill et al. 1997)等大多数鸟类为了应对夜间食物资源的不可预测性采取日间摄入大量的食物来增加体重,而雀鹰(*Accipiter nisus*)(Newton et al. 1983)、灰林鸮(*Strix aluco*)(Hirons 1984)和紫翅椋鸟(*Sturnus vulgaris*)(Witter et al. 1995)等通过增加日体重等途径应对繁殖期间成功地抵抗食物获得的不可预测。本研究中丝光椋鸟在自由取食以及环境温度基本恒定的条件下,无论雌性及雄性在清晨体重均降到最低值(雌性:77.3 g;雄性:72.4 g),而在黄昏(19:00时)达到最大值(雌性:83.9 g;雄性:76.4 g)。在众多模型及假说中,“能量需求”假说(energy demand)和“饥饿与捕食者权衡”假说(trade-off between starvation and predation)可以部分分析鸟类体重的变化(Houston et al. 1993)。“能量需求”假说认为,白天增加能量储备量可以在一定程度上减轻夜间饥饿;而“饥饿与捕食者权衡”假说认为,鸟类日间体重快速增加可以更好地避开被捕食的威胁。增加能量储备量虽然在一定程度上减轻了夜间饥饿,在另一方面却增加了被捕食的危险及提高了代谢能量的支

出。丝光椋鸟日间体重增加速率较大,而夜间体重减少速率较小(图 2 和图 3),体现出丝光椋鸟可以通过改变能量储备水平,继而达到日间摄食与躲避捕食者等生存压力之间的平衡。

当外界条件发生变化时,一些鸟类 BMR 的调节往往表现出与体重相同的变化趋势 (McNab 2009)。BMR 是鸟类生活节奏的重要指标,其昼夜变化更为明显的表现出了鸟类昼夜的能量需求 (Wiersma et al. 2007)。Reinertsen et al (1986) 研究发现褐头山雀 (*Parus montanus*)、大山雀 (*P. major*) 和白腰朱顶雀 (*Acanthis flammea*) 在低温条件下通过夜间降低体温和代谢率而减少能量支出。蓝枕鼠鸟 (*Urocolius macrourus*)、艾伦煌蜂鸟 (*Selasphorus sasin*)、金领侏儒雀 (*Manacus vitellinus*) 及红顶侏儒鸟 (*Pipra mentalis*) 在低温条件下代谢率分别减少了 17.4%、67.4%、33.1% 和 20.8% (Bartholomew et al. 1983)。类似的结果在其他鸟类,如领伯劳 (*Lanius collaris*) (Soobramoney et al. 2003)、白腹毛脚燕 (*Delichon urbicum*) (Prinzinger et al. 1988) 和艾米花蜜鸟 (*Chalcomitra amethystina*) (Lindsay et al. 2009a) 也有发现。对比前人的实验结果,丝光椋鸟夜间 BMR 显著低于白昼(降低了 44.62%),同时表现出较低的体温和热传导。较低的 BMR 可以减少能量支出,而较低的体温和热传导可以减少热量的散失,从而达到节省能量的生存策略。

总之,丝光椋鸟通过内源性的调节,即夜间降低体温、体重、热传导及代谢率等途径,调节能量储备水平,从而适应昼夜环境变化。

参 考 文 献

- AL-Mansour M I. 2004. Seasonal variation in basal metabolic rate and body composition within individual sanderling bird *Calidris alba*. *Journal of Biological Sciences*, 4(4): 564-567.
- Ashoff J. 1981. Thermal conductance in mammals and birds; its dependence on body size and circadian phase. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 69(4): 611-619.
- Bartholomew G A, Howell T R, Cade T J. 1957. Torpidity in the white-throated swift, Anna hummingbird, and poor-will. *The Condor*, 59(3): 145-155.
- Bartholomew G A, Vleck C M, Bucher T L. 1983. Energy metabolism and nocturnal hypothermia in two tropical passerine frugivores, *Manacus vitellinus* and *Pipra mentalis*. *Physiological Zoology*, 56(3): 370-379.
- Bech C, Abe A S, Steffensen J F, et al. 1997. Torpor in three species of Brazilian hummingbirds under semi-natural conditions. *The Condor*, 99(3): 780-788.
- Brigham R M, Körtner G, Maddocks T A, et al. 2000. Seasonal use of torpor by free-ranging Australian owl-nightjars (*Aegotheles cristatus*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 73(5): 613-620.
- Burton C T, Weathers W W. 2003. Energetics and thermoregulation of the Gouldian Finch (*Erythrura gouldiae*). *Emu*, 103(1): 1-10.
- Butler P J, Woakes A J. 2001. Seasonal hypothermia in a large migrating bird: saving energy for fat deposition? *Journal of Experimental Biology*, 204(7): 1361-1367.
- Calder W A, Booser J. 1973. Hypothermia of broad-tailed hummingbirds during incubation in nature with ecological correlations. *Science*, 180(4087): 751-753.
- Cuthill I C, Hunt S, Cleary C, et al. 1997. Color bands, dominance and body mass regulation in male zebra finches (*Taeniopygia guttata*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 267(1384): 1093-1099.
- Doucette L I, Geiser F. 2008. Seasonal variation in thermal energetics of the Australian owl-nightjar (*Aegotheles cristatus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 151(4): 615-620.
- Gillooly J F, Brown J H, West G B, et al. 2001. Effects of size and temperature on metabolic rate. *Science*, 293(5538): 2248-2251.
- Hill R W. 1972. Determination of oxygen consumption by use of the paramagnetic oxygen analyzer. *Journal of Applied Physiology*, 33(2): 261-263.
- Hirons G J M, Hardy A R, Stanley P I. 1984. Body weight, gonad development and moult in the Tawny owl (*Strix aluco*). *Journal of Zoology*, 202(2): 145-164.
- Houston A I, McNamara J M, Hutchinson J M C. 1993. General results concerning the trade-off between gaining energy and avoiding predation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 341(1298): 375-397.
- Hurly T A. 1992. Energetic reserves of marsh tits (*Parus palustris*): food and fat storage in response to variable food supply. *Behavioral Ecology*, 3(2): 181-188.
- Kontogiannis J E. 1967. Day and night changes in body weight of the white-throated sparrow, *Zonotrichia albicollis*. *The Auk*,

- 84(3): 390–395.
- Körtner G, Brigham R M, Geiser F. 2000. Winter torpor in a large bird. *Nature*, 407(6802): 318.
- Książek A, Konarzewski M, Łapo I B. 2004. Anatomic and energetic correlates of divergent selection for basal metabolic rate in laboratory mice. *Physiological and Biochemical Zoology*, 77(6): 890–899.
- Lindsay C V, Downs C T, Brown M. 2009a. Physiological variation in amethyst sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in summer. *Journal of Thermal Biology*, 34(4): 190–199.
- Lindsay C V, Downs C T, Brown M. 2009b. Physiological variation in Amethyst Sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in winter. *Journal of Experimental Biology*, 212(4): 483–493.
- Liu J S, Wang D H, Wang Y, et al. 2004. Energetics and thermoregulation of the *Carpodacus roseus*, *Fringilla montifringilla* and *Acanthis flammea*. *Acta Zoologica Sinica*, 50(3): 357–363.
- Liu J S, Wang D H, Sun R Y. 2005. Climatic adaptations in metabolism of four species of small birds in China. *Acta Zoologica Sinica*, 51(1): 24–30.
- Lovegrove B G. 2003. The influence of climate on the basal metabolic rate of small mammals: A slow-fast metabolic continuum. *Journal of Comparative Physiology: B*, 173(2): 87–112.
- MacKinnon J, Phillipps K. 2000. *A Field Guide to the Birds of China*. Oxford: Oxford University Press, 265–501.
- Macleod R, Barnett P, Clark J A, et al. 2005. Body mass change strategies in blackbirds *Turdus merula*: the starvation-predation risk trade-off. *Journal of Animal Ecology*, 74(2): 292–302.
- Marschall U, Prinzinger R. 1991. Vergleichende ökophysiologie von fünf prachtfinkenarten (Estrildidae). *Journal of Ornithology*, 132(3): 319–323.
- McKechnie A E, Chetty K, Lovegrove B G. 2007. Phenotypic flexibility in the basal metabolic rate of laughing doves: responses to short-term thermal acclimation. *Journal of Experimental Biology*, 210(1): 97–106.
- McKechnie A E, Lovegrove B G. 2002. Avian facultative hypothermic responses: a review. *The Condor*, 104(4): 705–724.
- McNab B K. 2006. The relationship among flow rate, chamber volume and calculated rate of metabolism in vertebrate respirometry. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 145(3): 287–294.
- McNab B K. 2009. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 152(1): 22–45.
- Merola-Zwartjes M, Ligon J D. 2000. Ecological energetics of the Puerto Rican Tody: heterothermy, torpor and intra-island variation. *Ecology*, 81(4): 990–1002.
- Newton I, Marquiss M, Village A. 1983. Weights, breeding, and survival in European Sparrow hawks. *The Auk*, 100(2): 344–354.
- Pravosudov V V, Grubb T C Jr. 1997. Energy management in passerine birds during the nonbreeding season: A review // Val N J, Ellen K D, Charles T F. *Current Ornithology*, 14. Berlin: Springer, 189–234.
- Prinzinger R, Preßmar A, Schleucher E. 1991. Body temperature in Birds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 99(4): 499–506.
- Prinzinger R, Siedle K. 1988. Ontogeny of metabolism, thermoregulation and torpor in the House Martin *Delichon u. urbica* (L.) and its ecological significance. *Oecologia*, 76(2): 307–312.
- Reinertsen R E, Haftorn S. 1986. Different metabolic strategies of northern birds for nocturnal survival. *Journal of Comparative Physiology: B*, 156(5): 655–663.
- Soobramoney S, Downs C T, Adams N J. 2003. Physiological variability in the Fiscal Shrike *Lanius collaris* along an altitudinal gradient in South Africa. *Journal of Thermal Biology*, 28(8): 581–594.
- Swanson D L. 1991. Seasonal adjustments in metabolism and insulation in the Dark-eyed Junco. *The Condor*, 93(3): 538–545.
- Thouzeau C, Duchamp C, Handrich Y. 1999. Energy metabolism and body temperature of barn owls fasting in the cold. *Physiological and Biochemical Zoology*, 72(2): 170–178.
- Waite T A. 1991. Nocturnal hypothermia in gray jays *Perisoreus canadensis* wintering in interior Alaska. *Ornis Scandinavica*, 22(2): 107–110.
- Wiersma P, Muñoz-García A, Walker A, et al. 2007. Tropical birds have a slow pace of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(22): 9340–9345.
- Witter M S, Swaddle J P, Cuthill I C. 1995. Periodic food availability and strategic regulation of body mass in the European starling, *Sturnus vulgaris*. *Functional Ecology*, 9(4): 568–574.
- Zhang Y P, Liu J S, Hu X J, et al. 2006. Metabolism and thermoregulation in two species of passerines from south-eastern China in summer. *Acta Zoologica Sinica*, 52(4): 641–647.
- Zheng W H, Li M, Liu J S, et al. 2008a. Seasonal acclimatization of metabolism in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular*

- and Integrative Physiology, 151(4): 519–525.
- Zheng W H, Liu J S, Jiang X H, et al. 2008b. Seasonal variation on metabolism and thermoregulation in Chinese bulbul. *Journal of Thermal Biology*, 33(6): 315–319.
- 李铭, 柳劲松, 韩宏磊, 等. 2005. 太平鸟和灰头鹀的代谢产热特征及体温调节. *动物学研究*, 26(3): 287–293.
- 柳劲松, 李铭, 邵淑丽. 2008. 树麻雀肝脏和肌肉产热特征的季节性变化. *动物学报*, 54(5): 777–784.
- 张国凯, 方媛媛, 姜雪华, 等. 2008. 白头鹀的代谢率与器官重量在季节驯化中的可塑性变化. *动物学杂志*, 43(4): 13–19.
- 郑蔚虹, 方媛媛, 姜雪华, 等. 2010. 白头鹀肝脏和肌肉冬夏两季的代谢产热特征比较. *动物学研究*, 31(3): 319–327.
- 周围, 王玉萍, 陈德汉, 等. 2010. 白头鹀体温、体重及能量代谢的昼夜节律. *生态学杂志*, 29(12): 2395–2400.

《动物学杂志》投稿注意事项

1 稿件的投寄

请登录本刊网站(dwzzz.ioz.ac.cn)注册投稿,稿件请保存为 Word 2003 版的文件,全文使用宋体(西文 Time New Roman 字体)小四号字 1.5 倍行距。作者在投稿的同时务必作出承诺,稿件不能一稿多投和侵权。

2 论文的格式要求

题目 应言简意赅。中文题目字数一般不超过 20 个字;英文题目不超过 10 个实词,实词首字母大写。

作者 署名入应是对论文的全部或部分内容做出主要贡献,并能对文章内容负责的人。

单位 应写作者单位的标准全称及所在地和邮编。作者单位 1 个以上时,以①、②、③…编码。

摘要 中文摘要要放在文首。内容包括:研究目的、方法、结果(主要数据)和结论。用第三人称叙述。英文摘要要放在中文摘要下面,其内容应与中文摘要相对应或略详于中文摘要。

关键词 一般为 3~5 个,中英文对应,分别列在中英文摘要下面,关键词之间以分号间隔。

前言 结合文献阐述国内外相关研究领域的发展状况及本研究的目的和意义。

正文 材料与应对材料的来源及方法的出处详细陈述;结果的数据要完整,微观形态的稿件应有实验照片作为依据;文字叙述要简洁明了,与图表内容相互呼应;讨论应依据前言的内容、结果的数据、现象展开讨论,以达到解决问题或得出结论的目的。

全文书写规格 文中请使用国家颁布的法定计量单位和符号及规范化的名词、术语。正文中首次出现的英文缩写词,应先写出中文名称后,再在括号内写出英文全称和缩写词。物种名称在摘要及正文中第一次出现时应附拉丁学名(种属名用斜体,属名首字母大写)。名词术语的用法文中应前后一致。

①小标题:应简短准确、层次清楚。各级标题一律采用阿拉伯数字连续编码,左顶格编排,如“1”(一级标)、“1.1”(二级标)、“1.1.1”(三级标)。

②图表:力求精选,反应同一数据的图与表不能重复。其序号一律采用阿拉伯数字编码,在文中引用处注明。线条图应用计算机绘制;照片图要求反差适中、层次清晰。显微及电镜照片,应注明长度标尺和放大倍数。

参考文献 应列出与本文直接有关的中外文主要文献。本刊文献采用著者-出版年制,在正文中采用“著者 出版年”格式提示所引文献的出处,若所引文献有 2 名以上作者时,正文引用处以第一作者后加“等”或“et al.”字表示。如:1 个作者(郑光美 1987, Abbot 2001);2 个以上作者(冯祚建等 1985, Laycock et al. 1975);第一作者相同且出版年相同的文献,在年代后标注 a, b, …, 以示区别。文后参考文献中列出前 3 名作者,超过 3 名作者时,加“, et al.”或“, 等”。国外作者姓名书写是先姓后名,名后不加缩写点,作者之间用“, ”分开。按西文在前,中文在后的格式排列,西文文献按第一作者姓氏首字母升序排列,中文参考文献按第一作者姓氏汉语拼音升序排列。具体格式如下:

期刊 作者姓名. 出版年. 文题名. 刊名, 卷(期)号:起止页码. 示例:

郑光美. 1987. 黄腹角雉. *动物学杂志*, 22(5): 40–43.

Wu P, Zhou K Y. 1998. General condition of systematics study on Tesudines. *Chinese Journal of Zoology*, 33(6): 38–45.

(下转第 280 页)

woodiana)等。此外,本次还采集到大量中国淡水蛭的空壳标本,这表明中国淡水蛭可能过去就已在各处有分布,而且数量较多,但是20世纪80~90年代对南四湖调查中并未发现(刘月英等1986a,马俊岭等1997)。这是否由于环境污染、栖息地破坏等原因导致其种群数量急剧下降,有待进一步加强中国淡水蛭的基础生物学研究,为对其实施有效保护提供理论依据。

致谢 文中标本照片由曲阜师范大学生命科学学院侯元同教授协助拍摄,在此表示感谢。

参 考 文 献

- Brandt R A M. 1974. The non-marine aquatic mollusca of Thailand. *Archiv für Molluskenkunde*, 105(1/4): 1-423.
- Subba-Rao N V. 1989. *Handbook: Freshwater Molluscs of India. Burma: Zoological Survey of India*, 289.
- 崇加荣,吕传生,凌去非,等. 2002. 昆承湖底栖动物群落结构的研究. *水利渔业*, 22(4): 37-39.
- 胡菊英,姚简卿. 1981. 巢湖底栖动物调查. *安徽大学学报: 自然科学版*, (2): 159-172.
- 黄一鸣,林璇. 1986. 福州及其周围水域的双壳类//中国贝类学会. 贝类学论文集: 第二辑. 北京: 科学出版社, 150-151.
- 刘宝兴,由文辉. 2007. 黄浦江上游大型底栖动物生物多样性现状. *华东师范大学学报: 自然科学版*, (4): 124-131.
- 刘月英,王耀先,张文珍,等. 1986a. 南四湖贝类资源调查//中国贝类学会. 贝类学论文集: 第二辑. 北京: 科学出版社, 71-75.
- 刘月英,张文珍. 1979. 我国江苏省淡水蛭类一新种——中国淡水蛭. *动物分类学报*, 4(4): 356-357.
- 刘月英,张文珍,王耀先. 1986b. 广东深圳特区的淡水贝类//中国贝类学会. 贝类学论文集: 第二辑. 北京: 科学出版社, 42-44.
- 马俊岭,孙鹤田. 1997. 山东省的淡水贝类. *海洋科学集刊*, 39(2): 27-31.
- 舒凤月,王海军,潘保柱,等. 2009. 长江中下游湖泊贝类物种濒危状况评估. *水生生物学报*, 33(6): 1051-1058.
- 吴小平,梁彦龄,王洪铸,等. 2000. 长江中下游湖泊淡水贝类的分布及物种多样性. *湖泊科学*, 12(2): 111-118.
- 夏爱军,陈校辉,蔡永祥,等. 2006. 长江江苏段底栖动物群落结构现状及其水质的初步评价. *海洋渔业*, 28(4): 272-277.
- 张世海,张瑞雷,王丽卿,等. 2010. 上海市淀山湖底栖动物群落结构及水质评价. *四川动物*, 29(3): 452-458.
- 浙江动物志编辑委员会. 1991. *浙江动物志: 软体动物*. 杭州: 浙江科学技术出版社, 234-235.

(上接第277页)

专著 作者. 出版年. 书名. 版本(第一版不标注). 出版地: 出版者, 起止页码. 示例:

孙儒泳. 1992. *动物生态学原理*. 2版. 北京: 北京师范大学出版社, 329-330.

Jiang Z G. 1997. *Conservation Biology*. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 160-164.

论文集 作者. 出版年. 题名//编者. 论文集名. 出版地: 出版者, 起止页码. 示例:

陈大元. 1999. 动物显微受精与克隆研究//中国动物学会. *中国动物科学研究*. 北京: 中国林业出版社, 59-64.

Yang T. 1997. On the leeches from Wuling Mountains area in south China // Song D X. *Invertebrates of Wuling Mountains Area, Southwestern China*. Beijing: Science Press, 395-399.

学位论文 作者. 答辩年. 题目. 保存地: 保存单位及学位论文属性, 起止页码. 示例:

张劲硕. 2009. 蝙蝠分类的整合研究. 北京: 中国科学院动物研究所博士学位论文, 30-32.

电子文献 主要责任者. 出版年. 电子文献题名[文献类型标志/文献载体标志]. [引用日期]. 获取和访问路径. 方括号中的内容必须标注. 示例:

Gill F, Donsker D. 2011. *IOC World Bird Names (version 2.10)*. [EB/OL]. [2011-10-24]. <http://www.worldbirdnames.org/>.