

珠颈斑鸠的代谢产热特征*

张婷¹ 李孝通² 柳劲松^{2**}¹ 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310018; ² 温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325035

摘要 采用封闭式氧气流体压力呼吸仪和数字式温度计,测定在环境温度(T_a)为 0 °C、6.5 °C、10.5 °C、16.5 °C、20 °C、22.5 °C、25 °C、27.5 °C 和 30 °C 时珠颈斑鸠(*Streptopelia chinensis*)的代谢率(MR)和体温(T_b),由此计算出每个温度点的热传导(C)以及 MR 和 C 的体质量预期值等指标,探讨其代谢产热特征。结果表明:在 T_a 为 0 °C ~ 30 °C 时,珠颈斑鸠的体温基本维持恒定,平均体温为(40.7±0.1) °C,热中性区(TNZ)为 22.5 ~ 27.5 °C,基础代谢率为(160.48±6.05) ml O₂ · h⁻¹,是体质量预期值的 65%; T_a 在 0 °C ~ 25 °C 范围内,热传导值最低且基本保持恒定,平均为(0.07±0.01) ml O₂ · g⁻¹ · h⁻¹ · °C⁻¹,是体质量预期值的 122%。珠颈斑鸠具有较低的 MR ,较高的 C 和 T_b ,能较好地适应南方较热的气候环境。

关键词 珠颈斑鸠; 代谢率; 热传导; 体温调节

中图分类号 Q958 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)5-0963-05

Metabolic thermogenesis of *Streptopelia chinensis*. ZHANG Ting¹, LI Xiao-tong², LIU Jin-song² (¹*School of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310018, China;* ²*School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5): 963-967.

Abstract: Aimed to understand the eco-physiological characteristics of *Streptopelia chinensis* in southeast China, its individuals in Wenzhou City (27°29'N, 120°51'E) of Zhejiang Province were live-trapped by mist net, with their metabolic rate (MR), body temperature (T_b), and thermal conductance (C) at ambient temperature (T_a) 0 °C, 6.5 °C, 10.5 °C, 16.5 °C, 20 °C, 22.5 °C, 25 °C, 27.5 °C and 30 °C measured. The MR was measured by using closed circuit respirometer, T_b was measured by the insertion of a digital thermometer into cloaca, and C was calculated by using the formula $C=MR/(T_b-T_a)$. At T_a 0 °C-30 °C, the T_b was relatively stable, with an average of (40.74±0.1) °C. The thermal neutral zone was 22.5 °C-27.5 °C, and the mean MR within the thermal neutral zone was (160.48±6.05) ml O₂ · h⁻¹, accounting for 65% of the expected value from its body mass. At T_a 0 °C-25 °C, the C was (0.07±0.01) ml O₂ · g⁻¹ · h⁻¹ · °C⁻¹, representing 122% of the expected value based on its body mass. In sum, *S. chinensis* had the eco-physiological characteristics of low MR , high T_b , narrow thermal neutral zone, and relatively high C , making it able to better adapt the warmer climate environment in south China.

Key words: *Streptopelia chinensis*; metabolic rate; thermal conductance; thermoregulation.

动物的能量代谢对策对物种的分布、丰富度以及动物的繁殖成功、生存适应等具有重要的作用,反映了动物对环境的适应模式和生理能力,体现出生物多样性与环境之间相适应的关系(Weathers, 1979; Willimas & Tieleman, 2000)。动物的能量代谢水平受许多环境和生理因子的影响,主要有环境温

度、体重、体温、身体组成和繁殖过程等,其中温度作为自然环境中最重要影响因子之一,对动物的体重、能量摄入和产热等有显著的影响(Bing *et al.*, 1998; Voltura & Wunder, 1998; Abelenda *et al.*, 2003)。鸟类的能量代谢影响着鸟类的分布和丰富度,是其主要的生存对策之一(Weathers, 1997; Lovegrove, 2003)。温带高纬度地区鸟类在冬季保持活动性,主要依赖于增加对寒冷的耐受性,可以通过行为、形态和生理机制的变化得以实现(Heldmaier,

* 国家自然科学基金项目(30670324、30870377)和浙江省自然科学基金资助项目(Y506089)。

** 通讯作者 E-mail: ljs@wzu.edu.cn

收稿日期: 2009-12-02 接受日期: 2010-02-07

1989; Corp, 1997)。生活在寒冷地区的小型鸟类,由于身体大小的限制使它们的羽毛隔热不能无限地增加,抵抗寒冷的主要方式可能是增加产热(Stokkan, 1992; Liknes *et al.*, 2002)。然而,潮湿的热带地区鸟类则通过蒸发散热的调节方式来降温,为了保持恒温而有效降低内源性产热水平对野外生存的热带鸟类是很有价值的适应特征(Weathers, 1997)。

基础代谢率(basal metabolic rate, BMR)是动物在静止、禁食和热中性区的代谢率,是动物保持正常生理功能的最小产热单位,是测定动物能量代谢水平的一个重要衡量指标(Liknes *et al.*, 2002)。BMR已经成为种间和种内能量代谢水平比较的重要参数,反映了不同物种不同个体的能量消耗水平(Yuni & Rose, 2005)。迄今为止,人们已经对大量动物的代谢率进行了研究,如 Hayssen 和 Lacy (1985)、Heusner (1991) 等分别总结了 293 种和 391 种哺乳动物的 BMR; Reynolds 和 Lee (1996) 总结了 254 种鸟类的 BMR, McNab (2008, 2009) 总结了 321 种哺乳动物的 BMR 和 533 种鸟类的 BMR, 认为动物的代谢率与体质量密切相关,与食物、气候、生境,及是否迁徙有关。中国鸟类能量学起步较晚,多集中在热调节的生理学方面。从 20 世纪 70 年代开始,在研究鸟类的静止代谢率、幼鸟体温调节及耗氧量等热生理能量学方面取得了一定成果(李世纯等, 1979)。80 年代,西北高原生物研究所开展了高原鸟类能学的研究,为了估算高寒草甸生态系统中通过鸟类群落的能量流,测定了高寒草甸鸟体含量的季节变化,同时测定了几种鸟的标准代谢率及探讨幼鸟发育的热调节机制(邓合黎和张晓爱, 1990); 小型鸟类的体温调节与能量代谢也有一些报道(钱国桢和徐宏发, 1986; 陈小勇等, 1999; 柳劲松, 2001a, 2001b)。这些研究发现,生活在寒冷地区的鸟类有较高的代谢率,而生活在湿热和沙漠环境中的鸟类有较低的代谢率。代谢水平的高低又直接反映出动物对外界环境的耐受性,具有高代谢产热能力的种群对寒冷环境的耐受性强,而对热环境适应能力较强的物种相应具有较低水平的代谢产热能力(Swanson & Weinacht, 1997)。

珠颈斑鸠(*Streptopelia chinensis*)为东洋界物种,属鸽形目(Columbiformes),鸠鸽科(Columbidae),斑鸠属(*Streptopelia*),分布范围较广,在中国北自河北、山西、陕西,南至广东海南,西至甘肃、四川,东至中国台湾,为中国台湾及沿海各省的常见留鸟。生

活在平原、山麓的疏林地帯,以农作物种子和杂草种子、樟树籽的内核,少量昆虫和初生螺蛳为食。为了解珠颈斑鸠的代谢产热特征,本文测定了不同环境温度条件下珠颈斑鸠的体温、代谢率和热传导的变化及与环境温度的关系,通过代谢率与体温调节的分析,探讨其对东南部沿海环境的某些适应性特征。

1 材料与方法

1.1 实验动物

珠颈斑鸠(*Streptopelia chinensis*)9只,平均体质量为(151.1±1.5)g,于2007年9月在浙江省温州市(27°29'N, 120°51'E)捕捉。将珠颈斑鸠标记后分笼饲养于温州大学动物实验室进行驯化,在自然光照下,室温平均为21℃的环境条件下定期喂食和饮水,适应1周后用于实验。

1.2 体温和代谢测定

体温采用北京师范大学司南仪器厂生产的便携式数字式温度测量仪测定(TH-212,精确度为0.1℃)。将温度计插入白头鸭泄殖腔内约1.5cm处,待温度计示数稳定后记录其体温。

代谢率(metabolic rate, MR)以每小时整体质量的耗氧量表示(ml O₂ · h⁻¹)。耗氧量采用封闭式流体压力呼吸测定仪测定(Górecki, 1975)。共设置0℃、6.5℃、10.5℃、16.5℃、20℃、22.5℃、25℃、27.5℃和30℃的9组测定温度(0℃为5只动物,其他每组均为9只动物)。用水浴控制实验温度,每个温度点偏差控制在±0.5℃以内;呼吸室体积为3.6L,其内的CO₂和水分用NaOH和硅胶吸收。MR在每天的18:00—21:00测定。实验前鸟禁食4h,单只放入铁丝制成的代谢笼内,使其保持静止状态,再放入呼吸室内适应1h。然后每隔5min记录1次耗氧量,共测定1h。选择3个连续、稳定的最低值计算MR。

1.3 热传导和体质量预期值

按照牛顿冷却定律简化公式: $C = MR / (T_b - T_a)$ (Aschoff, 1981),计算每个温度点动物的热传导。式中, C 为热传导(thermal conductance)(ml O₂ · g⁻¹ · h⁻¹ · °C⁻¹), MR 是代谢率(ml O₂ · h⁻¹), T_b (body temperature)为体温(°C), T_a (ambient temperature)是环境温度(°C)。 MR 和热传导的体质量预期值分别依照Aschoff和Pohl(1970)(鸣禽类: $BMR = 0.03177W^{0.726}$, W 为体质量(g), BMR 为代谢率(J ·

h^{-1})和 Aschoff(1981)(鸣禽类: $C = 0.576W^{-0.461}$, W 为体质量(g), C 为热传导($\text{ml O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)的公式计算。

1.4 统计分析

利用 SPSS 统计软件包进行相关统计处理。利用 Origin 软件绘图。对不同环境温度下的珠颈斑鸠代谢率进行 t 检验分析。文中数据以平均值 \pm 标准误差($\text{mean}\pm\text{SE}$)表示, $P < 0.05$ 即认为有显著差异。

2 结果与分析

2.1 体温与环境温度的关系

在环境温度为 6.5°C 时,珠颈斑鸠的体温达到最高;在 $0^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$,珠颈斑鸠的体温基本上维持恒定,测得其平均体温为(40.74 ± 0.1) $^\circ\text{C}$ (图1)。

2.2 代谢产热与环境温度的关系

环境温度 20°C 时,珠颈斑鸠的代谢率(MR)与 22.5°C 时的 MR 有显著差异($df = 16, t = 2.969, P = 0.009$),而 22.5°C 的 MR 分别与 25°C 和 27.5°C 时的 MR 没有差异($df = 16, t = 1.371, P = 0.189$; $df = 16, t = 1.383, P = 0.186$), 27.5°C 的 MR 与 30°C 的 MR 也没有差异($df = 16, t = 1.051, P = 0.309$),但是 22.5°C 的 MR 与 30°C 的 MR 有差异($df = 16, t = 2.350, P = 0.032$),因此认为环境温度在 $22.5^\circ\text{C} \sim 27.5^\circ\text{C}$ 范围内珠颈斑鸠的 MR 基本保持不变是最低代谢率即基础代谢率(BMR), $22.5^\circ\text{C} \sim 27.5^\circ\text{C}$ 为珠颈斑鸠的热中性区。以动物整体质量作单位,其 MR 为:(160.48 ± 6.05) $\text{ml O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$,是体质量预期值的 65%(图2)。在低于 25°C 时,MR 随环境温度的降低而增加,MR 与环境温度呈负相关回归方程为: $MR(\text{ml O}_2 \cdot \text{h}^{-1}) = (323.02 \pm 10.18) - (6.47 \pm 0.66)T_a(^\circ\text{C})$ ($r = 0.818, P < 0.0001$)。

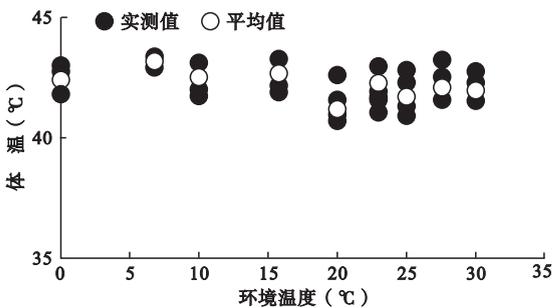


图1 珠颈斑鸠在不同环境温度下体温的变化
Fig.1 Changes of body temperature with ambient temperature in *Streptopelia chinensis*

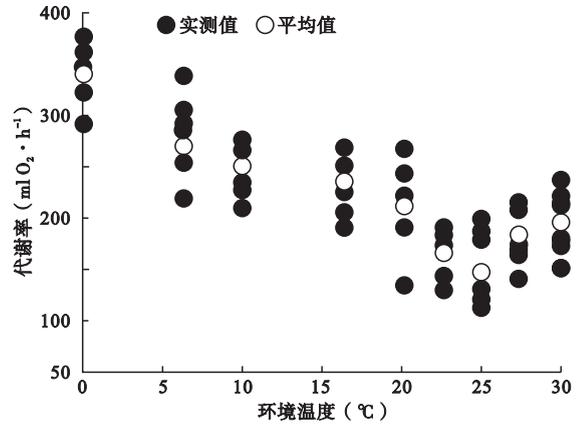


图2 珠颈斑鸠在不同环境温度下代谢率的变化
Fig.2 Changes of metabolic rate with ambient temperature in *Streptopelia chinensis*

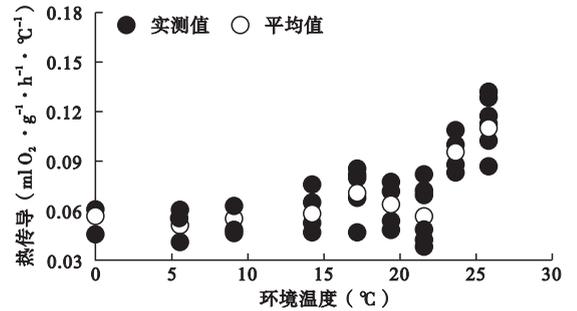


图3 珠颈斑鸠在不同环境温度下热传导的变化
Fig.3 Changes of thermal conductance with ambient temperature in *Streptopelia chinensis*

2.3 热传导率与环境温度的关系

环境温度在 $0^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$,热传导值(C)最低且基本保持恒定,平均为(0.07 ± 0.01) $\text{ml O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,是体质量预期值的 122%。在 25°C 以上热传导与环境温度呈正相关回归方程为: $C = (-0.24 \pm 0.04) + (0.01 \pm 0.00)T_a(^\circ\text{C})$ ($r = 0.877, P < 0.0001$)(图3)。

3 讨论

3.1 代谢率

作为动物能量消耗的重要参数,BMR 与动物的许多生活史特征、生态特征和行为特征密切相关。气候是决定种内和种间个体能量消耗水平最重要的因素之一(Schleucher,2002;McNamara *et al.*,2004)。高纬度地区鸟类的代谢率高于预期值,而热带地区鸟类的 BMR 往往低于预期值(Weathers,1979;Bech & Nicol,1999;Burton & Weathers,2003)。在本研究中,珠颈斑鸠的 BMR 为 $160.48 \text{ ml O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$,是体质量预

期值的65%,明显低于高纬度地区鸟类如普通朱雀(*Carpodacus erythrinus*)109%(柳劲松等,2001b)、鹁岩鸚(*Prunella rubeculoides*)115%(邓合黎和张晓爱,1990)、棕眉山岩鸚(*P. montanella*)168%(柳劲松等,2004)、北朱雀(*C. roseus*)和燕雀(*Fringilla montifringilla*)118%和135%(Liu *et al.*,2004);而与格尔丹雀(*Erythrura gouldiae*)81%(Burton & Weathers,2003)、七彩文鸟(*Chloebia gouldiae*)80%(Marschall & Prinzing,1991)、灰背舞雀(*Saltator coerulescens*)65%、黑脸白眉舞雀(*S. orenocensis*)68%(Bosque *et al.*,1999)、白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)79%(Zhang *et al.*,2006)相似。鹁岩鸚生活在中国青藏高原及周边地带,夏季平均气温为8.7℃,其热调节有明显的高海拔地区动物代谢的特征(邓合黎和张晓爱,1990)。普通朱雀、棕眉山岩鸚、北朱雀和燕雀繁殖于西伯利亚等北方地区,其热能调节具有明显高纬度地区和寒冷地带动物的代谢特点(柳劲松等,2001b,2004;Liu *et al.*,2004)。格尔丹雀生活在美国加利福尼亚和其他湿热地区,七彩文鸟生活在潮湿的热带环境中,灰背舞雀和黑脸白眉舞雀主要生活在潮湿、开阔的低洼地带,白头鹎主要分布在东南沿海及长江以南地区,这些鸟类的热能代谢具有热带鸟类的典型特征。热带地区鸟类较低的BMR是对热胁迫和保持水分的一种适应策略(Williams & Tieleman,2000;Tieleman *et al.*,2002)。本文所研究的珠颈斑鸠主要生活在东南亚国家及中国的南方地带,具有南方湿热地带动物代谢的特点,较低的代谢率是其适应环境的一种策略。

3.2 体温与热传导

体温(T_b)是代谢率和热传导相互作用的结果。鸟类是恒温动物,这是动物演化历史上一个极为重要的进步性事件。恒温动物具有较高而稳定的新陈代谢水平和调节产热、散热能力,从而使体温保持在相对恒定的、稍高于环境温度的水平(Schmidt-Nielsen,1997)。Prinzing等(1991)总结了1001种不同状态下鸟类的 T_b ,认为鸟类由于飞翔而具有相对较高的代谢率,较高的 T_b 是对高代谢的生理适应,是长期进化的结果。本文所研究的珠颈斑鸠在环境温度的变化下通过自身的代谢调节, T_b 基本保持稳定为(40.7±0.1)℃,其较高的 T_b 既是适应飞翔的高代谢的保证,也可以增加 T_b 与环境温度差值,有利于夏季向外界环境散热(Gill,2001;Burton & Weathers,2003),以便有利于在较热的南方地带生存。

Weathers(1997)总结了小型鸟类中一些种类的代谢率,认为一般热带地区的鸟类有相对较高的热传导(C),而寒冷地区鸟类的 C 则相对较低。在环境温度0℃~25℃,珠颈斑鸠的热传导0.07 ml O₂·g⁻¹·h⁻¹·℃⁻¹是体质量预期值的122%。热传导反应了鸟类静止时的能量消耗水平受到环境温度的影响程度。对于热带鸟类来说,较高的热传导有利于向环境散热,避免出现过热现象,即较高的热传导是热带鸟类对炎热环境的一种适应特征。Aschoff(1981)认为 C 和体质量有明显的相关性,这主要是体表面积比率(surface volume ratio)的不同、毛皮隔热性能的变化和代谢率的差异等原因造成的。本实验珠颈斑鸠的热传导相对较高,适应暖温带的炎热环境。

3.3 热中性区(thermal neutral zone, TNZ)

按照IUPS(1987)的定义,TNZ是环境温度的一个范围,在这个范围内动物的温度调节仅仅通过控制热量的散失,而不需要代谢产热调节和蒸发散热调节。在TNZ内,代谢率与环境温度无关。动物具有较高的代谢率,低的下临界值,及较宽的热中性区是其适应寒冷环境的典型特征;具有较高的热传导和较窄的热中性区是其生活在热带区域的有利条件(Schmidt-Nielsen,1997)。珠颈斑鸠的热中性区在22.7℃~27.5℃,其热中性区与普通朱雀26.7℃~36.5℃,栗鹀25℃~32.5℃(柳劲松等,2001a,2001b),太平鸟18℃~27℃(李铭等,2005)相比较窄。这些都是北方典型的雀形目鸟类,它们较宽的热中性区是适应寒冷环境的典型特征。Tieleman等(2002)认为,高的下临界温度对适应干旱环境是有益的,特别是在保水方面。珠颈斑鸠较高的热传导和较窄的热中性区有利于散热,是适应热带地区的特征之一。

总之,珠颈斑鸠的热生物学特征是,较低的代谢率,较高的体温,较高的热传导率,通过良好的理化调节,适应低纬度湿热地区的环境。

参考文献

- 陈小勇, 罗兰, 刘乃发, 等. 1999. 大石鸡的静止代谢率. 动物学报, **45**(1): 114-116.
 邓合黎, 张晓爱. 1990. 高寒草甸几种雀形目鸟类的标准代谢(SMR). 动物学报, **36**(4): 377-384.
 李铭, 柳劲松, 寒宏磊, 等. 2005. 太平鸟与灰头鹀代谢产热特征及体温调节. 动物学研究, **26**(3): 287-293.
 李世纯, 刘炳谦, 刘喜悦. 1979. 麻雀雏鸟体温调节的发育. 动物学报, **25**(4): 395-370.

- 柳劲松, 陈明焕, 王 英, 等. 2004. 棕眉山岩鹳的代谢产热特征的初步研究. *动物学研究*, **25**(2): 117-121.
- 柳劲松, 王 岩, 李豁然. 2001a. 普通朱雀标准代谢率的初步研究. *动物学杂志*, **36**(3): 16-19.
- 柳劲松, 张智研, 马 红, 等. 2001b. 小鹀和栗鹀静止代谢率的特征. *动物学报*, **47**(3): 347-350.
- 钱国桢, 徐宏发. 1986. 绿翅鸭和琵嘴鸭的换羽及静止代谢率. *动物学报*, **32**(1): 68-73.
- Abelenda M, Ledesma A, Bial E, et al. 2003. Leptin administration to cold acclimated rats reduce both food intake and brown adipose tissue thermogenesis. *Journal of Thermal Biology*, **28**: 525-530.
- Aschoff J, Pohl H. 1970. Der ruheumsatz von vögeln als funktion der tageszeit und der körpergröße. *Journal of Ornithology*, **111**: 38-47.
- Aschoff J. 1981. Thermal conductance in mammals and birds: Its dependence on body size and circadian phase. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **69**: 611-619.
- Bech C, Nicol SC. 1999. Thermoregulation and ventilation in the tawny frogmouth, *Podargus strigoides*: A low-metabolic avian species. *Australian Journal of Zoology*, **47**: 143-153.
- Bing C, Frankish HM, Pickavance L, et al. 1998. Hyperphagia in cold-exposed rats is accompanied by decreased plasma leptin but unchanged hypothalamic NPY. *American Journal of Physiology*. **274**: R62-R68.
- Bosque C, Pacheco MA, Siegel RB. 1999. Maintenance energy costs of two partially folivorous tropical passerines. *Auk*, **116**: 246-252.
- Burton CT, Weathers WW. 2003. Energetics and thermoregulation of the Gouldian Finch (*Erythrura gouldiae*). *Emu*, **103**: 1-10.
- Corp N, Gorman ML, Speakman JR. 1997. Seasonal variation in the resting metabolic rate of male wood mice *Apodemus sylvaticus* from two contrasting habitats 15 km apart. *Journal of Comparative Physiology B*, **167**: 229-239.
- Gill FB. 2001. Ornithology. New York: W. H. Freeman and Company.
- Górecki A. 1975. Kalabukhov-Skvortsov respirometer and resting metabolic rate measurement// Grodzifski W, ed. IBP Handbook No. 24. Methods for Ecological Bioenergetics, London: Oxford: 309-313.
- Haysseen V, Lacy RC. 1985. Basal metabolic rates in mammals: Taxonomic difference in the allometry of BMR and body mass. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **81**: 741-754.
- Heldmaier G. 1989. Seasonal acclimatization of energy requirements in mammals: Functional significance of body weight control, hypothermia, torpor and hibernation// Weiser W, ed. Energy transformations in cells and organisms. New York: Georg Thieme: 130-139.
- Heusner AA. 1991. Size and power in mammals. *Journal of Experimental Biology*, **160**: 25-54.
- Liknes ET, Scott SM, Swanson DL. 2002. Seasonal acclimatization in the American goldfinch revisited: To what extent do metabolic rates vary seasonally. *Condor*, **104**: 548-557.
- Liu JS, Wang DH, Wang Y, et al. 2004. Energetics and thermoregulation of the *Carpodacus roseus*, *Fringilla montifringilla* and *Acanthis flammea*. *Acta Zoologica Sinica*, **50**: 357-363.
- Lovegrove BG. 2003. The influence of climate on the basal metabolic rate of small mammals: A slow-fast metabolic continuum. *Journal of Comparative Physiology B*, **173**: 87-112.
- Marschall U, Prinzing R. 1991. Vergleichende ökophysiologie von fünf prachtfinkenarten (Estrildidae). *Journal of Ornithology*, **132**: 319-324.
- McNab BK. 2008. An analysis of the factors that influence the level and scaling mammalian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **151**: 5-28.
- McNab BK. 2009. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **152**: 22-45.
- McNamara JM, Ekman J, Houston AI. 2004. The effect of thermoregulatory substitution on optimal energy reserves of small birds in winter. *Oikos*, **105**: 192-196.
- Prinzing R, Prebmar A, Schleucher E. 1991. Body temperature in Birds. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **99**: 499-506.
- Reynolds PS, Lee RM. 1996. Phylogenetic analysis of avian energetics: Passerines and non-passerines do not differ. *American Naturalist*, **147**: 735-759.
- Schleucher E. 2002. Metabolism, body temperature and thermal conductance of fruit doves (Aves: Columbidae, Treronidae). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **131**: 417-428.
- Schmidt-Nielsen K. 1997. Animal Physiology. London: Cambridge University Press.
- Stokkan KA. 1992. Energetics and adaptation to cold in ptarmigan in winter. *Ornis Scandinavica*, **22**: 366-370.
- Swanson DL, Weinacht DP. 1997. Seasonal effects on metabolism and thermoregulation in northern bobwhite. *Condor*, **99**: 478-489.
- Tieleman BI, Williams JB, Buschur ME. 2002. Physiological adjustments to arid mesic environments in larks (Alaudidae). *Physiological and Biochemical Zoology*, **75**: 305-313.
- Voltura MB, Wunder BA. 1998. Effects of ambient temperature, diet quality, and food restriction on body composition dynamics of the prairie vole *Microtus ochrogaster*. *Physiological Zoology*, **71**: 321-328.
- Weathers WW. 1979. Climatic adaptation in avian standard metabolic rate. *Oecologia*, **42**: 81-89.
- Weathers WW. 1997. Energetics and thermoregulation by small passerines of the humid, lowland tropics. *Auk*, **114**: 341-353.
- Willimas JB, Tieleman BI. 2000. Flexibility in basal metabolic rate and evaporative water loss among hoopoe larks exposed to different environmental temperature. *Journal of Experimental Biology*, **203**: 3153-3159.
- Yuni LPEK, Rose RW. 2005. Metabolism of winter-acclimatized New Holland honeyeaters *Phylidonyris novaehollandiae* from Hobart, Tasmania. *Acta Zoologica Sinica*, **51**: 338-343.
- Zhang YP, Liu JS, Hu XJ, et al. 2006. Metabolism and thermoregulation in two species of passerines from southeastern China in summer. *Acta Zoologica Sinica*, **52**: 641-647.

作者简介 张 婷,女,1984 生,硕士研究生。主要从事动物生理生态研究。E-mail: sillya0321@126.com
责任编辑 刘丽娟