

棕眉山岩鹀的代谢产热特征的初步研究

柳劲松*, 陈明焕, 王 英, 王晓恒, 宋春光

(齐齐哈尔大学 生命科学与工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要: 实验采用封闭式流体压力呼吸计和数字式温度计, 分别测定了环境温度 (T_a) 在 5 ~ 35 °C 范围内棕眉山岩鹀 (*Prunella montanella*) 的耗氧量和体温 (T_b), 由此计算出代谢率 (MR)、热传导率 (C) 和代谢预期比与热传导预期比 (F) 等值, 以探讨该种的代谢产热特征。结果表明: 棕眉山岩鹀在 T_a 为 5 ~ 35 °C 时, T_b 基本维持恒定 (为 41.25 ± 0.12 °C), MR 的最低值为 4.27 ± 0.07 mL O_2 / (g·h); T_a 在 5 ~ 24 °C 时, MR 与之负相关: $MR [mL O_2 / (g \cdot h)] = 10.39 - 0.24 T_a$ (°C); T_a 在 5 ~ 26.5 °C 时, C 最低且基本保持恒定, 平均为 0.26 ± 0.00 mL O_2 / (g·h·°C); T_a 在 24 ~ 30 °C 时, F 值为 1.05, 表明该种具有较好的体温调节能力。与热带地区鸟类比较, 棕眉山岩鹀具较高的 MR 和 T_b , 稍高的 C , 符合北方小型鸟类的代谢特点, 能较好的适应冬寒冷、夏炎热的环境。

关键词: 棕眉山岩鹀; 代谢率; 热传导; 产热调节

中图分类号: Q959.837 文献标识码: A 文章编号: 0254 - 5853(2004)02 - 0117 - 05

Metabolic Thermogenesis of Siberian Accentor (*Prunella montanella*)

LIU Jin-song*, CHEN Ming-huan, WANG Ying,
WANG Xiao-heng, SONG Chun-guang

(College of Life Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: To study the characteristics of energy metabolism, metabolic rate (MR), body temperature (T_b), and thermal conductance (C) were determined at a temperature range of 5 - 35 °C in 5 male and 3 female Siberian accentors (*Prunella montanella*) from Qiqihar City of Heilongjiang Province from April to June in 2003. MR was measured by using closed circuit respirometer, T_b was measured by insertion of a digital thermometer into the cloaca, and C was calculated using the formula: $C = MR / (T_b - T_a)$, where T_a is ambient temperature. With a temperature range of 5 - 35 °C, Siberian accentors can keep their T_b s stable 41.25 ± 0.12 °C. The mean minimum MR was 4.27 ± 0.07 mL O_2 / (g·h). C was 0.26 ± 0.00 mL O_2 / (g·h·°C) with a temperature range of 5 - 26.5 °C. Within this range of temperatures, MR increased with the declining in T_a , and the relationship between MR and T_a can be described as: $MR [mL O_2 / (g \cdot h)] = 10.39 - 0.24 T_a$ (°C) for Siberian accentors. The ecophysiological characteristics of Siberian accentors were high level in MR and T_b , relative higher in C . These properties might make them adapt to their environments and survive at relatively colder areas.

Key words: *Prunella montanella*; Metabolic rate; Thermal conductance; Thermoregulation

动物能量代谢的生理生态特征对决定物种的分布和丰富度、繁殖成功和适合度等起重要的决定作用, 并与动物的生活史和生态行为特征密切相关 (Weathers, 1979; Willimas & Tieleman, 2000)。代谢率 (metabolic rate, MR) 作为动物能量代谢水平

的一个重要衡量指标, 几十年来一直受到生理生态学家、环境生理学家和比较生理学家的重视 (Dutenhoffer & Swanson, 1996; Liknes & Swanson, 1996; Maddocks & Geiser, 1999; Swanson, 1995)。鸟类的代谢产热特征与能量利用和分配、生活史对

* 收稿日期: 2003 - 10 - 14; 接受日期: 2004 - 01 - 17

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: liujinsongh@sina.com

策及其进化途径等密切相关,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, 1997; Burton & Weathers, 2003)。迄今为止,已对温带、热带和荒漠等地带鸟类代谢率的适应性进行了研究,发现鸟类的代谢率与气候有着广泛的联系。如生活在寒冷环境中的鸟类有较高的代谢率和体温;而在湿热和沙漠环境中生活的鸟类代谢率较低,这一特征具有广泛的适应意义 (Maddocks & Geiser, 1999; McNab, 2000)。

棕眉山岩鹀 (*Prunella montanella*) 属雀形目 (Passeriformes) 岩鹀科 (Prunellidae), 在亚洲东部及西伯利亚等地繁殖, 在朝鲜半岛及中国黄河流域越冬, 在齐齐哈尔市地区为旅鸟; 在冬季主要以草籽和谷物为食, 夏季以昆虫为主要食物 (MacKinnon & Phillipps, 2000)。由于北方地区气候比较寒冷, 生存在此的棕眉山岩鹀应具有相对较高的代谢水平。为了进一步认识鸟类能量代谢的特点, 了解棕眉山岩鹀的代谢产热特征, 我们测定了不同环境温度条件下棕眉山岩鹀的体温、代谢率和热传导的变化, 通过代谢率与体温调节的分析, 探讨其对北方环境的某些适应性特征。

1 材料与方法

1.1 实验动物

棕眉山岩鹀 (*Prunella montanella*) 8 只 (5♂, 3♀), 体重为 13.05 ± 0.40 g (11.48 ~ 14.73 g), 于 2003 年 4 ~ 5 月捕自黑龙江省齐齐哈尔市地区。标记并分笼 (每笼 1 只) 饲养于齐齐哈尔大学动物实验室。在自然光照, 室温平均为 21 °C (15 ~ 29 °C) 的环境条件下自由取食和饮水, 适应一周后用于实验。

1.2 代谢测定

代谢率 (MR) 以每小时单位体重的耗氧量表示 [$\text{mL O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$]。耗氧量采用封闭式流体压力呼吸测定仪测定 (Górecki, 1975)。实验时间为 2003 年 4 月 3 日至 6 月 24 日, 共设置 5、6、10、12、17、18、20、24、26、30、32.5 和 35 °C 12 组测定温度 (温度范围在 5 ~ 35 °C), 各温度组的变化控制在 ± 0.5 °C 以内, 水浴控制呼吸室温度。呼吸室体积为 3.6 L, 用硅胶和 KOH 吸收呼吸室内的 CO_2 和水分。MR 在每天 14:00 ~ 20:00 测定。动物实验前禁食 4 h, 放入呼吸室内适应 1 h, 然后每

隔 5 min 记录 1 次耗氧量, 共测定 1 h 的耗氧量; 选择 2 个连续的、稳定的最低值计算 MR。每次实验前后称量动物的体重并测定泄殖腔温度作为动物的体温 (T_b)。泄殖腔温度采用数字式温度计 (北京师范大学司南仪器厂生产), 插入泄殖腔内 1.5 cm 测定。

1.3 热传导 (C) 和代谢预期比与热传导预期比 (F 值)

按照牛顿冷却定律简化公式: $C = MR / (T_b - T_a)$ (Ashoff, 1981), 计算每个温度点动物的热传导率, 式中 C 为热传导 [$\text{mL O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$], MR 是代谢率 [$\text{mL O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$], T_b 为体温 (°C), T_a 是环境温度 (°C)。

F 值的计算依照 McNab (1970) 的公式: $F = MR / \text{期望 } MR / C / \text{期望 } C$, 其中 MR 和 C 分别为最小代谢率和热传导的实测值; 期望 MR 和期望 C 分别是 Ashoff & Pohl (1970) 和 Aschoff (1981) 的体重预期值。

1.4 统计分析

采用 SAS 统计软件包做相关统计处理: T_b 、 MR 、 C 对 T_a 做线性回归分析, 各温度组之间的差异性用重复性测量方差分析 (Repeated measure ANOVA), 文中数据以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示, $P < 0.05$ 即认为差异显著。

2 结果

2.1 体温

在环境温度为 5 ~ 35 °C 的范围内, 棕眉山岩鹀的 T_b 基本保持不变, 平均 T_b 为 41.25 ± 0.12 °C (图 1)。在 24 ~ 30 °C 棕眉山岩鹀的 F 值为 1.05;

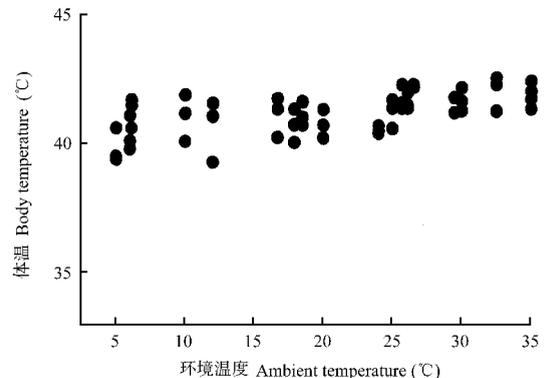


图 1 棕眉山岩鹀在不同环境温度下体温的变化
Fig. 1 Changes of body temperature with ambient temperature in Siberian accentors (*Prunella montanella*)

在 5 ~ 35 °C, F 值随环境温度的升高而降低 (图 2), 二者的回归关系为: $F = 2.91 - 0.07T_a$, ($r^2 = 0.90$, $P < 0.0001$)。

2.2 代谢产热

棕眉山岩鹀在环境温度为 24 ~ 30 °C 的 MR 没有明显的变化 ($t = 0.801$, $df = 17$, $P > 0.05$), 并显著小于环境温度为 20 °C ($t = 5.975$, $df = 20$, $P < 0.001$) 和 32.5 °C ($t = 5.801$, $df = 20$, $P < 0.001$) 时的 MR。在此温度区内, 棕眉山岩鹀的

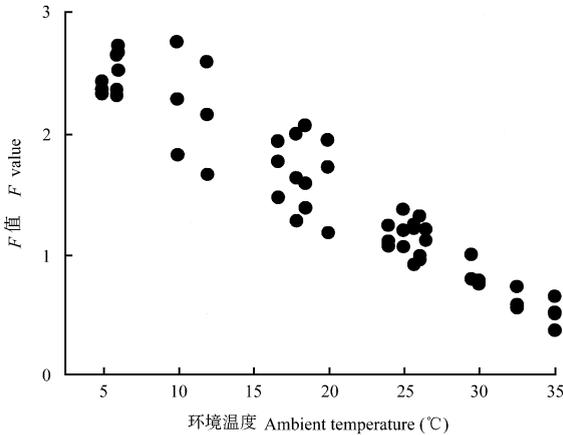


图 2 棕眉山岩鹀在不同环境温度下 F 值的变化

Fig.2 Changes of F value with ambient temperature in Siberian accentors (*Prunella montanella*)

$F = MR$: 期望 MR/C : 期望 C , 据 McNab (1970)

$F = MR$: predicted MR/C : predicted C , according to McNab (1970).

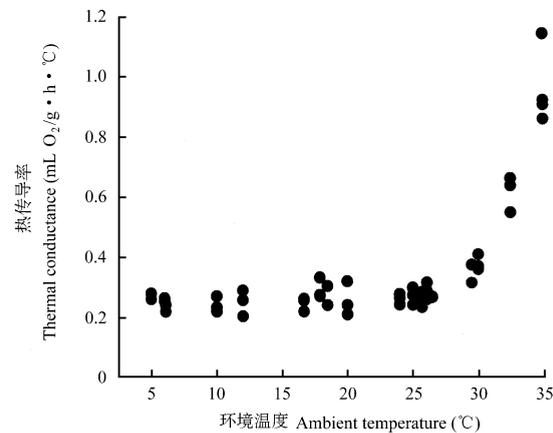


图 4 棕眉山岩鹀在不同环境温度下热传导率的变化

Fig.4 Changes of thermal conductance with ambient temperature in Siberian accentors (*Prunella montanella*)

2.3 热传导

棕眉山岩鹀在环境温度 5 ~ 26.5 °C 时, C 最低

MR 处于最低水平, 其平均值为 $4.27 \pm 0.07 \text{ mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$, 是 Ashoff & Pohl 体重预期值的 168%。在环境温度低于 24 °C 时, 棕眉山岩鹀的 MR 随环境温度的降低而升高, 环境温度在 5 ~ 24 °C 范围内二者的回归方程为: $MR [\text{mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})] = 10.39 - 0.24 T_a$ ($r^2 = 0.86$, $P < 0.0001$)。环境温度超过 30 °C 时, MR 随环境温度升高而增加, 当环境温度在 35 °C 时, MR 达 $6.76 \pm 0.40 \text{ mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 3)。

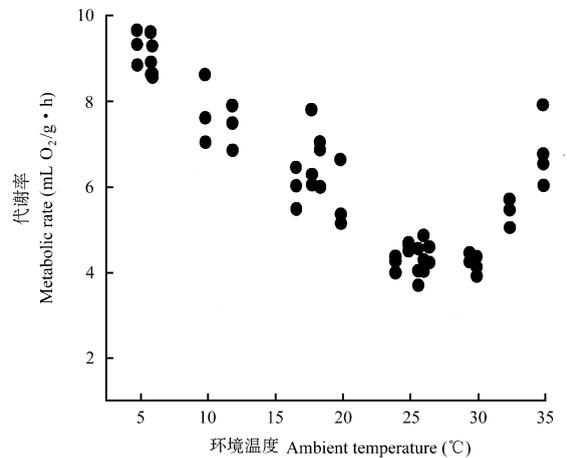


图 3 棕眉山岩鹀在不同环境温度下代谢率的变化

Fig.3 Changes of metabolic rate with ambient temperature in Siberian accentors (*Prunella montanella*)

且基本保持恒定, 平均为 $0.26 \pm 0.00 \text{ mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$, 是 Aschoff 体重预期值的 148%。26.5 °C 以上时, C 随环境温度的升高而升高, 其关系式为: $C [\text{mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{°C})] = -2.99 + 0.11 T_a$, ($r^2 = 0.92$, $P < 0.0001$)。当环境温度升至 35 °C 时, C 达 $0.95 \pm 0.06 \text{ mL O}_2/(\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ (图 4)。

3 讨论

3.1 代谢产热

棕眉山岩鹀的代谢率是体重预期值的 168% (Ashoff & Pohl, 1970), 明显高于热带地区鸟类的体重预期值 (平均为 83%) (Weathers, 1979)。寒冷地区鸟类自身维持的能量代价是比较高的, 动物经常暴露于低温环境中, 产热能力常常维持在较高水平, 高水平的代谢率直接反映了动物对气候的适应 (Liknes et al, 2002; Burton & Weathers, 2003)。Weathers (1979) 总结了小型鸟类一些种

类的代谢率,认为寒冷地区鸟类的代谢率一般高于期望值,而热带地区鸟类的代谢率一般低于期望值。如红顶侏儒雀 (*Pipra mentalis*) 的期望值相应为 85%, 金领侏儒雀 (*Manacus vitellinus*) 为 86%, 普通朱雀 (*Carpodacus erythrinus*) 为 109%, 栗鹀 (*Emberiza rutil*) 为 146%, 鹁岩鹀 (*Prunella rubeculoides*) 为 115%, 黄嘴朱顶雀 (*Acanthis flavirostris*) 为 182% (Bartholomew & Trost, 1970; Weathers, 1979; Deng & Zhang, 1990; Liu et al, 2001a, b)。红顶侏儒雀和金领侏儒雀主要生活在热带潮湿、开放的低洼地带,其热能代谢具备热带鸟类的典型特征 (Bartholomew & Trost, 1970; Weathers, 1979)。普通朱雀和栗鹀繁殖于北方地区,其热能调节具有明显极地动物的代谢特点 (Liu et al, 2001a, b)。鹁岩鹀和黄嘴朱顶雀分布于高海拔地区,其热调节有明显的高寒地区动物代谢的特征 (Deng & Zhang, 1990)。棕眉山岩鹀主要在亚洲东部和俄罗斯的西伯利亚地区繁殖,具有北方动物代谢的特点,因此,低温寒冷可能是导致它们高代谢率的主要原因之一。Weathers (1979) 认为,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毛皮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。

3.2 体温

与哺乳动物相比,鸟类具有相对较高的 T_b , 这与鸟类适于飞翔的高代谢是分不开的。而在鸟类中,小型鸟类的 T_b 又略高于大型鸟类。如:鹤形目 (Gruiformes) 的平均体温是 37.5 °C, 雀形目 (Passeriformes) 是 38.9 °C, 佛法僧目 (Coraciiformes) 是 39.2 °C, 鸛形目 (Cuculiformes) 是 41.3 °C (Prinzinger et al, 1991)。棕眉山岩鹀的平均 T_b 是 41.25 ± 0.12 °C, 相对较高,并且在环境温度改变时 T_b 基本维持恒定 (图 1)。Prinzinger et al (1991) 总结了 1 001 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。此外,鸟类的高 T_b 还可以增加 T_b 与环境温度差值,有利于夏季向外界环境散热,以更好的适应外界环境 (Gill, 2001; Burton & Weathers 2003)。体温是代谢率 (产热) 和热传导 (散热) 相互作用的结果,因此,体温调节与代谢率和热传导的比值紧

密相关。McNab (1970) 以代谢预期比和热传导预期比之间的比率 F 值来表示动物的体温调节能力,并指出体重在 0.1 ~ 0.5 kg 的种类, F 值必须大于或等于 1.0 才能精确地调节体温。棕眉山岩鹀的 F 值为 1.05, 表明有相对较好的体温调节能力。

3.3 热传导

在温暖的环境条件下, C 相对较高,有利散热。当环境温度降低时, C 随之下降并最终达到最大隔热性能。Aschoff (1981) 认为 C 和体重有明显的相关性,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。由于小型鸟类有相对较大的体表面积,毛皮的隔热性能相对较差,因此有较高的热传导率 (Schmidt-Nielsen, 1997)。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 C , 而寒冷地区鸟类的 C 则相对较低。在 5 ~ 26.5 °C, 棕眉山岩鹀的 C 基本保持不变,平均为 0.26 ± 0.00 mL O₂ / (g · h · °C), 是体重预期值的 148% (Aschoff, 1981), 低于分布在热带地区的红顶侏儒雀和黑喉美洲咬鹃 (*Trogon rufus*) (期望值相应为 174% 和 192%) (Bratholomew et al, 1983; Yarbrough, 1971), 高于分布在北方的黑顶山雀 (*Parus atricapillus*) 和黄鹀 (*Emberiza citrinella*) (期望值相应为 109% 和 81%) (Aschoff, 1981), 同小鹀 (*Emberiza pusilla*) 和栗鹀相似 (期望值相应为 138% 和 140%) (Liu et al, 2001b)。夏季北方地区鸟类有稍高的 C 对热量的散失有适应意义。春季鸟类换羽,使羽毛的隔热性能降低,从而使热传导增加,有利于夏季炎热时的身体散热。

总之,棕眉山岩鹀的生理生态学特征符合北方小型鸟类的代谢特点:具有较高的 MR, T_b 相对较高,稍高的 C (有利于夏季散热)。通过良好的物理调节和化学调节能力,保持 T_b 的恒定,以适应冬寒冷、夏炎热的环境。

致谢:中国科学院动物研究所王德华博士和北京师范大学生命科学院李庆芬教授提供 Kalabukhov-Skvortsov 呼吸测定仪;美国加利福尼亚大学 Dr.W.W.Weathers 惠赠部分文献资料,特此致谢。

参考文献：

- Ashoff J. 1981. Thermal conductance in mammals and birds : Its dependence on body size and circadian phase [J]. *Comp. Biochem. Physiol.* , **69A** : 611 - 619.
- Ashoff J , Pohl H. 1970. Der ruheumsatz von vögeln als funktion der tageszeitund der körpergrösse [J]. *J. Ornithol.* , **111** : 38 - 47.
- Bartholomew GA , Trost CH. 1970. Temperature regulation in the speckled moosebird , *Colinus striatus* [J]. *Condor* , **72** : 141 - 146.
- Bartholomew GA , Vleck CM , Bucher TL. 1983. Energy metabolism and nocturnal hypothermia in two tropical passerine frugivores , *Manacus vitellinus* and *Pipra mentalis* [J]. *Physiol. Zool.* , **56** : 370 - 379.
- Burton CT , Weathers WW. 2003. Energetics and thermoregulation of the Gouldian Finch (*Erythrura gouldiae*) [J]. *Emu* , **103** : 1 - 10.
- Deng HL , Zhang XA. 1990. Standard metabolic rate in several species of passerine birds in alpine meadow [J]. *Acta Zool. Sin.* , **36** (4) : 377 - 384. [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.]
- Dutenhoffer MS , Swanson DL. 1996. Relationship of basal to summit metabolic rate in passerine birds and the aerobic capacity model for the evolution of endothermy [J]. *Physiol. Zool.* , **69** : 1232 - 1254.
- Gill FB. 2001. Ornithology (2nd edition) [M]. New York : W. H. Freeman and Company. 115 - 143.
- Górecki A. 1975. Kalabukhov-Skvortsov respirometer and resting metabolic rate measurement [A]. In : Grodziński W. IBP Handbook , No. 24 : Methods for Ecological Bioenergetics [M]. Oxford : Blackwell. 309 - 313.
- Liknes ET , Swanson DL. 1996. Seasonal variation in cold tolerance , basal metabolic rate and maximal capacity for thermogenesis in white-breasted nuthatches *Sitta carolinensis* and downy woodpeckers *Picoides pubescens* , two unrelated arboreal temperate residents [J]. *J. Avian Biol.* , **27** : 279 - 288.
- Liknes ET , Scott SM , Swanson DL. 2002. Seasonal acclimatization in the American goldfinch revisited : To what extent do metabolic rates vary seasonally [J]. *Condor* , **104** : 548 - 557.
- Liu JS , Wang Y , Li HR. 2001a. Preliminary study of standard metabolic rate in scarlet grosbeak (*Carpodacus erythrinus*) [J]. *Chin. J. Zool.* , **36** (3) : 16 - 19. [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.]
- Liu JS , Zhang ZY , Ma H , Hou ZS. 2001b. Characteristics of resting metabolic rate in little bunting (*Emberiza pusilla*) and chestnut bunting (*E. rutila*) [J]. *Acta Zool. Sin.* , **47** (3) : 347 - 350. [柳劲松 , 张智研 , 马红 , 侯增山. 2001b. 小鹀和栗鹀静止代谢率的特征. *动物学报* , **47** (3) : 347 - 350.]
- MacKinnon J , Phillipps K. 2000. A field guide to the birds of China [M]. Oxford : Oxford University Press. 394 - 414.
- Maddocks TA , Geiser F. 1999. The thermoregulatory limits of an Australian passerine , the silveryeye (*Zosterops lateralis*) [J]. *J. Therm. Biol.* , **24** : 43 - 50.
- McNab BK. 1970. Body weight and the energetics of temperature regulation [J]. *J. Biol.* , **53** : 329 - 348.
- McNab BK. 2000. The influence of body mass , climate , and distribution on the energetics of South Pacific pigeons [J]. *Comp. Biochem. Physiol.* , **127A** : 309 - 329.
- Prinzinger R , Prebmar A , Schleucher E. 1991. Body temperature in Birds [J]. *Comp. Biochem. Physiol.* , **99A** : 499 - 506.
- Schmidt-Nielsen K. 1997. Animal Physiology (5th edition) [M]. London : Cambridge University Press.
- Swanson DL. 1995. Seasonal variation in thermogenic capacity of migratory warbling vireos [J]. *Auk* , **112** : 870 - 877.
- Weathers WW. 1979. Climatic adaptation in avian standard metabolic rate [J]. *Oecologia (Berl.)* , **42** : 81 - 89.
- Weathers WW. 1997. Energetics and thermoregulation by small passerines of the humid , lowland tropics [J]. *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 [J]. *J. Exp. Biol.* , **203** : 3153 - 3159.
- Yarborough CG. 1971. The influence of distribution and ecology on the thermoregulation of small birds [J]. *Comp. Biochem. Physiol.* , **39A** : 235 - 266.