

八哥的代谢产热特征及体温调节

林琳^① 王丽华^② 柳劲松^{②*}

(^① 杭州师范大学生命与环境科学学院 杭州 310036; ^② 温州大学生命与环境科学学院 温州 325035)

摘要: 采用封闭式流体压力呼吸计和数字式温度计,在环境温度(T_a)5.0~37.5℃范围内,测定了成体八哥(*Acridotheres cristatellus*)的代谢率(MR)和体温(T_b),并计算出每个温度点的热传导(C),以及 MR 和 C 的体重预期值等指标,探讨其代谢产热特征。在 T_a 为5.0~37.5℃时,八哥的体温基本维持恒定,平均为(41.4±0.1)℃,热中性区(TNZ)为25.0~32.5℃,基础代谢率(BMR)为(125.33±2.08) ml O₂/h,是体重预期值的60%; T_a 在5.0~25.0℃范围内, MR [ml O₂/h]与 T_a (℃)呈负相关,回归方程为: $MR = 365.30 - 10.07T_a$; T_a 在10.0~25.0℃时, C 最低且基本恒定,平均为(0.06±0.00) ml O₂/(g·h·℃),是体重预期值的100%。八哥具有较低的基础代谢率,相对较高的热传导和体温,符合南方小型鸟类的代谢特征。

关键词: 八哥; 基础代谢率; 热传导; 体温

中图分类号: Q958, Q945 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2010)05-47-07

Metabolism and Thermoregulation in Crested Mynas (*Acridotheres cristatellus*)

LIN Lin^① WANG Li-Hua^② LIU Jin-Song^{②*}

(^① School of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036;

^② School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In order to understand the ecophysiological characteristics of the crested mynas (*Acridotheres cristatellus*) inhabiting in relative warm area, the metabolic rates (MR), body temperatures (T_b), and thermal conductance (C) at temperature range of 5.0–37.5℃ was measured. Adult mynas were live-trapped by mist net in the Wenzhou city, Zhejiang Province (27°29' N, 120°51' E) from September to November 2008. Eight crested mynas (four males and four female) were used in this experiment. Body masses to the nearest 0.1 g were determined immediately upon capture with a Sartorius balance (model BT25S). The mean body mass of crested mynas was 117.7 ± 3.4 g. Birds were transported to the laboratory and caged (50 cm × 30 cm × 20 cm) under natural photoperiod and temperature. Food and water were supplied *ad lib*. MR was measured by using closed circuit respirometer, and temperature was controlled by water bath (±0.5℃), T_b was measured by insertion of a digital thermometer (Beijing Normal University Instruments Co) into the cloaca, and C was calculated at each temperature below the thermal neutral zone using the formula: $C = MR / (T_b - T_a)$, where T_a is ambient temperature. The thermal neutral zone of mynas was 25.0–32.5℃. The mean metabolic rates within thermal neutral zone of crested mynas were 125.33 ± 2.08 ml O₂/h, which are 60% of the expected

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 30670324, 30870377)部分资助;

* 通讯作者, E-mail: ljs@wzu.edu.cn;

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

收稿日期:2010-01-12,修回日期:2010-04-24

value from their body mass. Mean T_{bs} of mynas were $41.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$. C_s of mynas were $0.06 \pm 0.00 \text{ ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 100% of the expected value based on their body mass. Below the lower critical temperatures MR increased with declining T_a and the regression equations relating MR to T_a was described as: $MR [\text{ml O}_2 / \text{h}] = 365.30 - 10.07T_a (^\circ\text{C})$. The ecophysiological characteristics of crested mynas are: low basal metabolic rate, relatively high body temperature and high thermal conductance. These properties might make them acclimatized to their environments and survive at relative warm temperature areas for this species.

Key words: Crested Myna (*Acridotheres cristatellus*); Basal metabolic rate; Thermal conductance; Body temperature

动物的生存与外界环境变化有着紧密的联系,环境中的各种因子直接或间接影响动物的生长、发育和繁殖等,如环境中四季气候的大幅度变化,较为显著的直接或间接引起温度、光周期、降水量及其他环境因子的变化,从而影响环境中生存的动物^[1],使得动物为适应环境季节变化而在形态、行为、生理功能上作出相应的改变。在生理功能适应中,动物的能量代谢适应扮演着重要的角色,对决定物种的分布、丰富度、繁殖成功率及适合度等起着重要的决定作用,且与动物的生活史和生态行为特征密切相关^[2-3]。一直以来,对于动物如何分配能量用于保温、活动、生长及繁殖、进化等方面都是生态生理学家和进化生理学家等关注的重点^[4]。

鸟类是生态系统中一个重要的组成部分,种类和数量众多,在维持生态稳定方面有着关键作用。鸟类对环境条件的变化较为敏感,所以维持最适能量平衡成为其主要的生存对策之一。作为恒温动物,鸟类的体温与环境温度之间差异的维持主要是其代谢产生热量与热传导流失热量流动平衡的结果^[5-6]。在能量代谢的研究中,代谢率(metabolic rate, MR)是动物能量代谢水平的一个重要衡量指标,其中基础代谢率(basal metabolic rate, BMR)是恒温动物清醒时,维持正常生理机制及身体各项基本功能所需的最小产热速率和最小能量值。增加 BMR 是小型鸟类抵御寒冷的一种重要策略^[7-9]。迄今为止,研究发现,鸟类的代谢率与环境变化有着广泛的联系^[1]。寒冷地区的鸟类其代谢率和体温较高,而湿热或沙漠地区的鸟类代谢率较低^[10-16]。代谢水平的高低直接反应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^[5, 17-19]。

八哥(*Acridotheres cristatellus*)隶属雀形目(Passeriformes)椋鸟科(Sturnidae),主要分布于亚洲,在中国南方为常见鸟类,主要分布在陕西南部至长江以南各省,以及台湾等地区^[20]。为进一步探讨鸟类能量代谢特征,我们测定了不同实验温度下,八哥的代谢率及热传导的变化,试图从能量代谢水平探讨八哥在环境温度变化下的生存适应。

1 材料与方法

1.1 实验动物 8只成体八哥(4♂,4♀)于2008年9~11月捕于浙江省温州市地区($27^\circ 29' \text{N}$, $120^\circ 51' \text{E}$),该地区气候温暖,年平均温度 18°C ,其中有7个月(3~9月)的极端温度超过 37°C ^[17]。将捕获的八哥标记并单笼($50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)饲养于温州大学动物实验室,自然光照、室温环境下饮水、取食,适应一周后用于实验。实验前平均体重为(117.7 ± 3.4)g($102.2 \sim 129.5$ g)。

1.2 代谢率测定 测定代谢率的实验温度共设置9组,分别为 5.0°C 、 10.0°C 、 15.0°C 、 20.0°C 、 25.0°C 、 30.0°C 、 32.5°C 、 35.0°C 、 37.5°C 。鸟的代谢率以单位时间耗氧量表示 $[\text{ml O}_2 / \text{h}]$ 。耗氧量采用封闭式流体压力呼吸计测定^[21],呼吸室体积为3.6 L,用KOH和硅胶吸收呼吸室内的 CO_2 和水分。呼吸室实验温度为 $5.0 \sim 37.5^\circ\text{C}$,用水浴控制呼吸室温度在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。 MR 的测定每天在8:00~16:00时进行。实验前将鸟禁食4 h后,放入呼吸

室内适应 1 h,每隔 5 min 记录一次,选择两个连续的、稳定的最低值计算 MR ,共测定 1 h 的耗氧量。每只个体都经历从低温到高温的全部实验过程,每次实验前后称量鸟的体重并测定泄殖腔温度。泄殖腔温度的测定采用北京师范大学司南仪器厂生产的数字式温度计,插入直肠内 1.5 cm 测定,读数时间不超过 30 s。

1.3 热传导和体重预期值 根据牛顿冷却定律简化公式: $C = \text{单位体重 } MR / (T_b - T_a)^{[22]}$, 分别计算各个实验温度下鸟的热传导值,式中, C 为热传导 [$\text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$],单位体重 MR 为单位体重代谢率 [$\text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$], T_b 为体温 ($^\circ\text{C}$), T_a 为环境温度 ($^\circ\text{C}$)。代谢率的体重预期值根据 Aschoff 等^[23]的鸣禽类公式: $\text{BMR} = 0.133 W^{0.726}$ 进行计算,式中, BMR 为基础代谢率 (kJ/h), W 为体重 (g)。而热传导的体重预期值根据 Aschoff^[22]的鸣禽类公式: $C = 0.576 W^{-0.461}$ 进行计算,式中, C 为热传导 [$\text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$], W 为体重 (g)。

1.4 统计分析 利用 SPSS 统计软件包进行回归分析等有关统计处理, T_b 、 MR 和 C 对 T_a 做线性回归分析,利用 Origin 软件绘图。各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,显著性水平为 $P = 0.05$ 。

2 结 果

2.1 体温的变化 在环境温度 5.0 ~ 37.5 $^\circ\text{C}$ 范围内,八哥体温基本保持不变,无明显差异 ($P > 0.05$),为 $(41.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ (图 1)。

2.2 代谢率的变化 在环境温度 25.0 ~ 32.5 $^\circ\text{C}$ 范围内,各温度组间八哥的代谢率无显著差异 ($P > 0.05$),但显著低于环境温度为 20.0 $^\circ\text{C}$ ($P < 0.05$) 和 35.0 $^\circ\text{C}$ ($P < 0.05$) 时的代谢率。因此,25.0 ~ 32.5 $^\circ\text{C}$ 范围为八哥的热中性区 (thermal neutral zone, TNZ),其中 25.0 $^\circ\text{C}$ 和 32.5 $^\circ\text{C}$ 分别为其下临界温度和上临界温度。在此温度范围内,八哥的代谢率处于最低水平,即 BMR,为 $(125.33 \pm 2.08) \text{ml O}_2/\text{h}$,根据 $1 \text{ml O}_2 = 2.008 \times 10^{-2} \text{kJ}$ 换算求得该 BMR 是体重

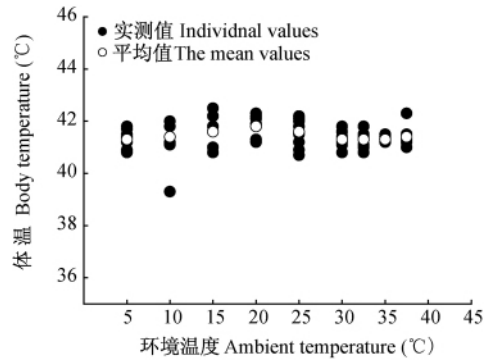


图 1 八哥在不同环境温度下体温的变化

Fig.1 Changes of body temperatures with ambient temperatures in *Acridotheres cristatellus*

预期值的 60%。而在 5.0 ~ 25.0 $^\circ\text{C}$ 温度范围内,八哥的代谢率随温度的降低而增加,两者关系的回归方程为 $MR [\text{ml O}_2/\text{h}] = 365.30 - 10.07T_a$ ($r^2 = 0.935$, $P < 0.001$); 在 32.5 ~ 37.5 $^\circ\text{C}$ 温度范围内,八哥代谢率随温度的增加而增加,并在环境温度升为 37.5 $^\circ\text{C}$ 时,代谢率达 $(238.50 \pm 4.35) \text{ml O}_2/\text{h}$ (图 2)。

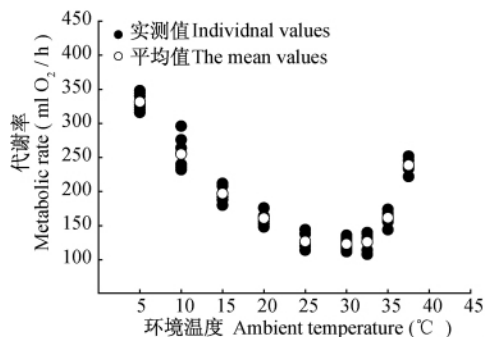


图 2 八哥在不同环境温度下代谢率的变化

Fig.2 Changes of metabolic rates with ambient temperatures in *Acridotheres cristatellus*

2.3 热传导的变化 八哥在环境温度 10.0 ~ 25.0 $^\circ\text{C}$ 时,热传导最低且保持恒定 ($P > 0.05$),平均为 $(0.06 \pm 0.00) \text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,是体重预期值的 100%。环境温度高于 25.0 $^\circ\text{C}$,热传导随环境温度的升高而升高,其回归方程为: $C [\text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})] = -0.86 + 0.0357T_a$ ($r^2 = 0.648$, $P < 0.001$)。当环境温度升至 37.5 $^\circ\text{C}$ 时,热传导达到 $(0.549 \pm 0.027) \text{ml O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ (图 3)。

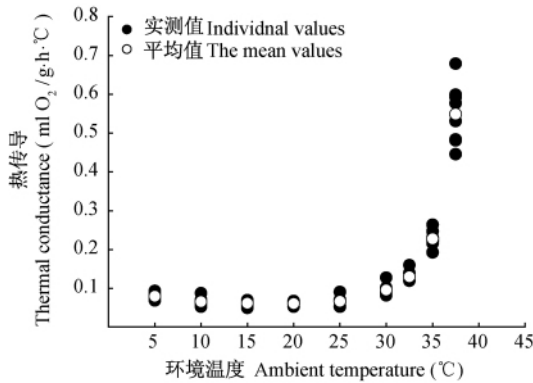


图3 八哥在不同环境温度下热传导的变化

Fig.3 Changes of thermal conductance with ambient temperatures in *Acridotheres cristatellus*

3 讨论

3.1 能量代谢 由于飞翔的关系,鸟类的BMR比哺乳动物高出30%~40%,且其代谢率的变化与生活环 境密切相关^[24-26]。Weathers^[24]认为生活在寒冷地带的小型鸟类的BMR一般较预期值要高,而生活在热带地区小型鸟类的BMR一般要低于预期值。Kendeigh等^[27]认为“北方”鸟类(“北方”鸟类在40°N以上地区繁殖)的代谢率高出“南方”鸟类(“南方”鸟类的繁殖地低于40°N)代谢率的3%~17%。根据Kendeigh等^[27]的“南北方”鸟类的分类标准,八哥属于“南方”鸟类,其BMR是体重预期值的60%^[23]。这一结果与其他“南方”雀形目鸟类相似,如画眉^[13]、红顶侏儒雀和金领侏儒雀^[28]、环喉雀^[29]、格尔丹雀^[30]等(表1),但明显低于“北方”鸟类,如黄眉鹀和红胁绣眼鸟^[13]、北朱雀、燕雀和白腰朱顶雀^[12]、鹁岩鹀和棕颈雪雀^[31]及黑顶山雀^[24](表1)。八哥表现出了“南方”鸟类BMR一般较预期值低的典型特征(表1)。

鸟类的能量代谢水平与诸多环境因素相关^[35-36],其中温度是环境中一个重要因子。在低温条件下,小型鸟类行为、表型及生理上会发生相应的变化以提高耐寒性从而适应低温,其中主要通过增加皮毛、提高皮肤脂肪含量等来增加隔热性和产热量来实现。但是小型鸟类较

小的体积限制了其羽毛隔热的增加,使得增加产热代谢成为其抵御寒冷的主要方式^[24]。在本研究中,5.0~25.0°C范围内,八哥代谢率随着温度的降低而明显增加,证实了这一观点。Chamane等^[37]报道了红翅棕鸟(*Onychognathus morio*)冬季的代谢率较夏季的高,表明其依靠该方式以应对寒冷及维持体温。另外,如三趾滨鹀(*Calidris alba*)^[7]、白脸鼻鹀(*Ptilopsis granti*)^[38]、黑颈天鹅(*Cygnus melanocoryphus*)^[39]等中型鸟类的产热适应与小型鸟类类似,进一步证明了增加代谢率是鸟类适应寒冷环境的一种重要调节方式^[40]。

3.2 热传导和体温 由于动物体表面积、毛皮隔热性能变化及代谢率的差异等因素,导致动物的热传导和体重呈显著的相关性^[41]。小型鸟类因具有相对较大的体表面积,毛皮隔热性有限,散热量相对较大,因此具有相对较高的热传导^[22],而其热传导却易受外界环境温度变化的影响。当环境随温度升高时,热传导也随之升高,从而达到散热的目的;相反,当环境温度下降时,热传导也随之下降并最终达到最大的隔热性能。一般情况下,寒冷地区鸟类的热传导相对较低,而热带地区鸟类的热传导相对较高^[25]。本研究中,在10.0~25.0°C温度范围内,八哥的热传导为(0.064 ± 0.001) ml O₂ / (g·h·°C),是体重预期值的100%,表明了其具有相对较高的热传导,以适应南方温暖的环境条件。这与其他“南方”鸟类的报道相似,如橙颊梅花雀(*Estrilda melpada*)热传导是体重预期值的135%^[29],画眉和红嘴相思鸟相应为215%和243%^[13],格尔丹雀为128%^[29],壮丽果鹀(*Ptilinopus superbus*)为117%^[42],白头鹀和丝光棕鸟分别为126%和129%^[34]。而太平鸟和灰头鹀(分别为153%和157%)^[33]、黄眉鹀和红胁绣眼鸟(均为149%)^[13]等“北方”鸟类也具有相对较高的热传导,以促进夏季身体的散热。在环境温度为25.0~37.5°C范围内,八哥的热传导随着温度的升高而增大,以增加散热作用(图3),这一结果表明相对较高的热传导有利于鸟类适应温暖、炎热的环境,也说明

表 1 不同地带鸟类 BMR 的比较

Table 1 Comparison of observed and predicted rates of BMR in different habitats

物种 Species	体重 Body mass (g)	基础代谢率 BMR (ml O ₂ /h)	代谢预期比 (%) Expectation ratio	来源 Reference
寒温带 Temperate				
栗鸫 <i>Emberiza rutila</i>	15.3	61.08	146	[10]
小鸫 <i>E. pusilla</i>	11.3	47.35	181	[10]
棕眉山岩鹟 <i>Prunella montanella</i>	13.5	57.65	168	[11]
北朱雀 <i>Carpodacus roseus</i>	22.5	96.75	118	[12]
燕雀 <i>Fringilla montifringilla</i>	18.0	75.42	135	[12]
白腰朱顶雀 <i>Acanthis flammea</i>	11.6	51.62	191	[12]
黄眉鸫 <i>E. chrysophrys</i>	15.9	58.04	128	[13]
红胁绣眼鸟 <i>Zosterops erythropleura</i>	9.2	43.15	230	[13]
黑顶山雀 <i>Parus atricapillus</i>	13.8	62.38	140	[24]
鸫岩鹟 <i>Prunella rubeculoides</i>	22.2	93.46	115	[31]
棕颈雪雀 <i>Montifringilla ruficollis</i>	22.8	84.82	101	[31]
普通朱雀 <i>Carpodacus erythrinus</i>	24.2	101.88	109	[32]
太平鸟 <i>Bombycilla garrulus</i>	64.9	151.22	110	[33]
灰头鸫 <i>E. sspodocephala</i>	15.1	71.25	151	[33]
热带 Tropical				
画眉 <i>Garrulax canorus</i>	47.1	167.21	60	[13]
红嘴相思鸟 <i>Leiothrix lutea</i>	21.6	91.58	120	[13]
红顶侏儒雀 <i>Pipra mentalis</i>	12.3	34.81	85	[28]
金领侏儒雀 <i>Manacus vitellinus</i>	15.5	41.85	86	[28]
环喉雀 <i>Amadina fasciata</i>	17.2	38.36	74	[29]
爪哇禾雀 <i>Padda oryzivora</i>	25.4	55.12	80	[29]
七彩文鸟 <i>Chloebia gouldiae</i>	15.5	38.75	80	[29]
格尔丹雀 <i>Erythrura gouldiae</i>	17.1	42.41	81	[30]
白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i>	25.6	73.10	79	[34]
丝光椋鸟 <i>Sturnus sericeus</i>	64.9	160.64	90	[34]
八哥 <i>Acridotheres cristatellus</i>	117.7	125.33	60	本研究 This study

代谢率的体重预期值根据 Aschoff 等^[23]的鸣禽类公式。代谢预期比 (%) = (观测值/预期值) × 100%。

Predicted by the appropriate equation of Aschoff and Pohl^[23]. % predicted = (observed/predicted) × 100%.

热传导在鸟类热量平衡调节中有着重要的作用。

体温是代谢产热和热传导散热相互作用的结果。与哺乳动物相比,鸟类具有较高的代谢率^[1],从而相对应的使得鸟类的体温较哺乳动物体温要高出 1.87 ~ 2.43℃^[43]。雀形目、佛法僧目(Coraciiformes)和鸱形目(Cuculiformes)等中小型鸟类的体温略高于鹤形目(Gruiformes)等大型鸟类体温^[43]。在本研究中,八哥的平均体温为(41.4 ± 0.1)℃,相对较高,从而增加了体温与环境温度的差值,有利于其在较为温暖的南方环境中的散热能力,以更好地适应外界环境。本研

究发现,随着环境温度的降低,八哥通过增加其代谢率而增加产热,降低热传导以减少散热,反之,八哥减少代谢率,增加热传导,以提高散热,从而使八哥体温基本维持恒定(图 1),表明该物种具有较好的体温调节能力。这与画眉和黄眉鸫^[13]、太平鸟和灰头鸫^[33]、白头鹎和丝光椋鸟^[34]、蓝枕鼠鸟(*Urocolius macrourus*)^[44]和红背鼠鸟(*Colius castanotus*)^[45]等小型鸟类相似,而有些鸟类的体温会随着环境温度的降低而降低,如非洲花蜜鸟(*Nectarinia chalybea*)^[46],说明了不同鸟类对环境的相对适应。

3.3 热中性区(TNZ) 热中性区是恒温动物

通过热量获得和散失的被动调节而维持其基础代谢率的温度范围。在 TNZ 范围内,动物的温度调节不需要代谢产热和蒸发散热,代谢率基本与环境温度无关。在炎热地区,较高的热传导率和较窄的 TNZ 有利于生活在该地区的动物的生存适应^[41]。与“北方”鸟类相比,“南方”鸟类的 TNZ 相对较为狭窄,下临界温度也较高,体现了其在炎热环境的适应特点。在本研究中,八哥的 TNZ 为 25.0 ~ 32.5℃,与“北方”鸟类,如太平鸟(18 ~ 27℃)和灰头鹀(20 ~ 26℃)^[33]、棕眉山岩鹀(24 ~ 30℃)^[11]、黄眉鹀(25 ~ 30℃)和红胁绣眼鸟(25.0 ~ 27.5℃)^[13]、北朱雀(22.5 ~ 27.5℃)、燕雀(25 ~ 30℃)和白腰朱顶雀(25 ~ 28℃)^[12]相比,其上下临界温度相对较高,这一点与其他“南方”及干旱地区的鸟类,如红嘴相思鸟(30.0 ~ 32.5℃)^[13]、拟戴胜百灵(*Alaemon alaudipes*)(32.7 ~ 37.5℃)和图氏沙百灵(*Eremalauda dunni*)(31.5 ~ 43.6℃)^[47]相似,而相对较高的上下临界温度有利于鸟类减少水分的蒸发和降低能量消耗,在鸟类保持水分和维持能量方面有着重要的适应意义。八哥的 TNZ 范围相对较窄,表现出了“南方”鸟类热中性区特点^[47]。

总之,八哥具有相对较低的 BMR、较高的体温和热传导等南方地区小型鸟类的代谢特点,通过良好的物理和化学调节能力,保持体温恒定,以适应环境的变化。

致谢 感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 呼吸测定仪。

参 考 文 献

[1] McNab B K. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comp Biochem Physiol A*, 2009, 152: 22 - 45.

[2] McKechnie A E, Freckleton R P, Jetz W. Phenotypic plasticity in the scaling of avian basal metabolic rate. *Proc R Soc Lond B*, 2006, 273: 931 - 937.

[3] 张国凯, 方媛媛, 姜雪华, 等. 白头鹎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*, 2008, 43(4): 13 - 19.

[4] Zheng W H, Li M, Liu J S, et al. Seasonal acclimatization of metabolism in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*). *Comp Biochem Physiol A*, 2008, 151: 519 - 525.

[5] Swanson D L. Cold hardiness and summit metabolism in North American kinglets during fall migration. *Acta Zool Sin*, 2007, 53: 600 - 606.

[6] Swanson D L, Sabirzhanov B, Vande-Zande A, et al. Seasonal variation of myostatin gene expression in pectoralis muscle of house sparrows (*Passer domesticus*) is consistent with a role in regulating thermogenic capacity and cold tolerance. *Physiol Biochem Zool*, 2009, 82: 121 - 128.

[7] AL-Mansour M I. Seasonal variation in basal metabolic rate and body composition within individual sanderling bird *Calidris alba*. *J Biol Sci*, 2004, 4: 564 - 567.

[8] McKechnie A E, Wolf B O. The allometry of avian basal metabolic rate: good predictions need good data. *Physiol Biochem Zool*, 2004, 77: 502 - 521.

[9] Barceló G, Salinas J, Cavieres G, et al. Thermal history can affect the short-term thermal acclimation of basal metabolic rate in the passerine *Zonotrichia capensis*. *J Therm Biol*, 2009, 34: 415 - 419.

[10] 柳劲松, 张智研, 马红, 等. 小鹀和栗鹀静止代谢率特征的研究. *动物学报* 2001 47(3): 347 - 350.

[11] 柳劲松, 陈明焕, 王英, 等. 棕眉山岩鹀的代谢产热特征的初步研究. *动物学研究* 2004 25(2): 117 - 121.

[12] Liu J S, Wang D H, Wang Y, et al. Energetics and thermoregulation of the *Carpodacus roseus*, *Fringilla montifringilla* and *Acanthis flammea*. *Acta Zool Sin*, 2004, 50: 357 - 363.

[13] Liu J S, Wang D H, Sun R Y. Climatic adaptations in metabolism of four species of small birds in China. *Acta Zool Sin*, 2005, 51: 24 - 30.

[14] Klaassen M, Oltrogge M, Trost L. Basal metabolic rate, food intake, and body mass in cold-and warm-acclimated Garden Warblers. *Comp Biochem Physiol A*, 2004, 137: 639 - 647.

[15] Tieleman B I, Williams J B, Buschur M E, et al. Phenotypic variation of larks along an aridity gradient: are desert birds more flexible? *Ecology*, 2003, 84: 1800 - 1851.

[16] Doucette L I, Geiser F. Seasonal variation in thermal energetics of the Australian owl-nightjar (*Aegotheles cristatus*). *Comp Biochem Physiol A*, 2008, 151: 615 - 620.

[17] Zheng W H, Liu J S, Jiang X H, et al. Seasonal variation on metabolism and thermoregulation in Chinese bulbul. *J Therm Biol*, 2008, 33: 315 - 319.

[18] Lindsay C V, Downs C T, Brown M. Physiological variation in Amethyst Sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in winter. *J Exp Biol*, 2009,

- 212: 483 – 493.
- [19] Lindsay C V , Downs C T , Brown M. Physiological variation in Amethyst Sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in summer. *J Therm Biol* , 2009 , 34 : 190 – 199.
- [20] Zheng G M , Zhang C Z. Birds in China. Beijing: China Forestry Publishing House , 2002.
- [21] Górecki A. Kalabukhov-Skvortsov respirometer and resting metabolic rate measurement // Grodziński W , Klekowski R Z , Duncan A. Methods for Ecological Bioenergetics. Oxford: Blackwell Scientific , 1975 , 309 – 313.
- [22] Aschoff J. Thermal conductance in mammals and birds: Its dependence on body size and circadian phase. *Comp Biochem Physiol A* , 1981 , 69 : 611 – 619.
- [23] Aschoff J , Pohl H. Der ruheumsatz von vögeln als funktion der tageszeit und der körpergröße. *J Ornithol* , 1970 , 111 : 38 – 47.
- [24] Weathers W W. Climatic adaptation in avian standard metabolic rate. *Oecologia (Berl.)* , 1979 , 42 : 81 – 89.
- [25] Weathers W W. Energetics and thermoregulation by small passerines of the humid , lowland tropics. *Auk* , 1997 , 114 : 341 – 353.
- [26] Steiger S S , Kelley J P , Cochran W W , et al. Low metabolism and inactive lifestyle of a tropical rain forest bird investigated via heart-rate telemetry. *Physiol Biochem Zool* , 2009 , 82 : 580 – 589.
- [27] Kendeigh S C , Blem C R. Metabolic adaptation to local climate in birds. *Comp Biochem Physiol A* , 1977 , 48 : 175 – 187.
- [28] Bartholomew G A , Vleck C M , Bucher T L. Energy metabolism and nocturnal hypothermia in two tropical passerine frugivores , *Manacus vitellinus* and *Pipra mentalis*. *Physiol Zool* , 1983 , 56 : 370 – 379.
- [29] Marschall U , Prinzing R. Vergleichende Ökophysiologie von fünf Prachtfinkenarten (Estrildidae). *J Ornithol* , 1991 , 132 : 319 – 323.
- [30] Burton C T , Weathers W W. Energetics and thermoregulation of the Gouldian Finch (*Erythrura gouldiae*). *J Emu* , 2003 , 103 : 1 – 10.
- [31] 邓合黎 , 张晓爱. 高寒草甸几种雀形目鸟类的标准代谢 (SMR). *动物学报* , 1990 , 36 (4) : 377 – 384.
- [32] 柳劲松 , 王岩 , 李豁然. 普通朱雀标准代谢率的初步研究. *动物学杂志* , 2001 , 36 (3) : 16 – 19.
- [33] 李铭 , 柳劲松 , 韩宏磊 , 等. 太平鸟和灰头鸫的代谢产热特征及体温调节. *动物学研究* , 2005 , 26 (3) : 287 – 293.
- [34] Zhang Y P , Liu J S , Hu X J , et al. Metabolism and thermoregulation in two species of passerines from south-eastern China in summer. *Acta Zool Sin* , 2006 , 52 : 641 – 647.
- [35] Lovegrove B G. The influence of climate on the basal metabolic rate of small mammals: a slow-fast metabolic continuum. *J Comp Physiol B* , 2003 , 173 : 87 – 112.
- [36] Bech C , Rønning B , Moe B. Individual variation in the basal metabolism of Zebra finches *Taeniopygia guttata*: no effect of food quality during early development. *Int Congr Ser* , 2004 , 1275 : 306 – 312.
- [37] Chamane S C , Downs C. Seasonal effects on metabolism and thermoregulation abilities of the Red-winged Starling (*Onychognathus morio*). *J Therm Biol* , 2009 , 34 : 337 – 341.
- [38] Smit B , Brown M , Downs C T. Thermoregulatory responses in seasonally acclimatized captive Southern White-faced Scops-owls. *J Therm Biol* , 2008 , 33 : 76 – 86.
- [39] Nespolo R F , Artacho P , Verdugo C , et al. Short-term thermoregulatory adjustments in a south American anseriform , the black-necked swan (*Cygnus melanocoryphus*). *Comp Biochem Physiol A* , 2008 , 150 : 366 – 368.
- [40] Madlonado K E , Cavieres G , Veloso C , et al. Physiological responses in rufous-collared sparrows to thermal acclimation and seasonal acclimatization. *J Comp Physiol B* , 2009 , 179 : 335 – 343.
- [41] Schmidt-Nielsen K. Animal Physiology. London: Cambridge University Press , 1997 , 169 – 214.
- [42] Schleucher E. Energy metabolism in an obligate frugivore , the superb fruit-dove (*Ptilinopus superbus*). *Aust J Zool* , 1999 , 47 : 169 – 179.
- [43] Prinzing R , Prebmar A , Schleucher E. Body temperature in birds. *Comp Biochem Physiol A* , 1991 , 99 : 499 – 506.
- [44] Prinzing R. Energy metabolism , body-temperature and breathing parameters in nontorpid blue-naped mousebirds *Urocolius macrourus*. *J Comp Physiol B* , 1988 , 157 : 801 – 806.
- [45] Prinzing R , Göppel R , Lorenz A , et al. Body temperature and metabolism in the Red-backed Mousebird (*Colius castaneus*) during fasting and torpor. *Comp Biochem Physiol A* , 1981 , 69 : 689 – 692.
- [46] Leon B I , Nicolson S W. Metabolic rate and body temperature of an African sunbird , *Nectarinia chalybea*: Daily rhythm and the effect of ambient temperature. *S Afr J Zool* , 1997 , 32 : 31 – 36.
- [47] Tieleman B I , Williams J B , Buschur M E. Physiological adjustments to arid and mesic environments in larks (Alaudidae). *Physiol Biochem Zool* , 2002 , 75 : 305 – 313.