

# 横断山两种小型哺乳动物的蒸发失水与体温调节

朱万龙<sup>1</sup> 杨永宏<sup>2</sup> 贾婷<sup>1</sup> 练硝<sup>1</sup> 王政昆<sup>1\*</sup> 龚正达<sup>3</sup> 郭宪国<sup>4</sup>

(1 云南师范大学生命科学学院, 生物能源持续开发利用教育部工程研究中心, 昆明 650092)

(2 云南省环境保护局, 昆明 650032)

(3 大理学院基础医学部媒介与病原生物研究所, 大理 671000) (4 云南流行病防治研究所, 大理 671000)

**摘要:** 在实验室条件下测定了大绒鼠和高山姬鼠在不同温度下的蒸发失水与能量代谢。结果表明: 大绒鼠和高山姬鼠的热中性区分别为 22.5~30℃ 和 25~30℃; 平均体温分别为 36.12℃ 和 36.17℃; 大绒鼠和高山姬鼠的基础代谢率 (BMR) 分别为  $2.99 \pm 0.48 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$  和  $4.24 \pm 0.50 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ ; 大绒鼠和高山姬鼠的平均最小热传导 ( $C_m$ ) 分别为  $0.26 \pm 0.038 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  和  $0.32 \pm 0.034 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ; 大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水随着温度增高而增加, 大绒鼠的蒸发失水在 30℃ 达高峰值, 为  $10.32 \text{ mg H}_2\text{O}/\text{g} \cdot \text{h}$ , 高山姬鼠在 35℃ 达高峰值, 为  $14.57 \text{ mg H}_2\text{O}/\text{g} \cdot \text{h}$ ; 大绒鼠和高山姬鼠的热散失占总产热的比率随着温度增高而增加, 大绒鼠在 30℃ 达到最大为 34.6%, 高山姬鼠在 35℃ 达到最大为 37.5%。这些结果很可能反映出横断山小型啮齿类动物的特征, 即体温相对较低, 代谢水平较高, 热传导也较高, 蒸发失水在总产热中占有重要的地位。

**关键词:** 大绒鼠; 高山姬鼠; 蒸发失水; 体温调节

中图分类号: Q494

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2008) 01-0065-10

## Evaporative water loss and body temperature regulation in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

ZHU Wanlong<sup>1</sup>, YANG Yonghong<sup>2</sup>, JIA Ting<sup>1</sup>, LIAN Xiao<sup>1</sup>, WANG Zhengkun<sup>1\*</sup>, GONG Zhengda<sup>3</sup>, GUO Xianguo<sup>4</sup>

(1 School of Life Science of Yunnan Normal University, Engineering Research Center of Sustainable Development and Utilization of Biomass Energy Ministry of Education, Kunming 650092, China)

(2 Yunnan Environmental Protection Bureau, Kunming 650032, China)

(3 Laboratory of Vector and Pathogen Faculty of Basic Medicine, Dali 671000 China)

(4 Yunnan Provincial Institute of Epidemic Disease Control and Research, Dali 671000, China)

**Abstract:** The evaporative water loss (WEL) and energy metabolism were measured in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri* in laboratory. The thermal neutral zone (TNZ) of *Eothenomys miletus* was 22.5–30℃ and of *Apodemus chevrieri* was 25–30℃. Mean body temperature were for two species were 36.12℃ and 36.17℃. Basal metabolic rates (BMR) were  $2.99 \pm 0.48 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$  and  $4.24 \pm 0.50 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ , respectively. Average minimum thermal conductance ( $C_m$ ) was  $0.26 \pm 0.038 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  and  $0.32 \pm 0.034 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ . Evaporative water loss in *E. miletus* and *A. chevrieri* increased when the temperature enhanced, the maximal evaporative water loss was  $10.32 \text{ mg H}_2\text{O}/\text{g} \cdot \text{h}$  in 30℃ in *E. miletus*, and was  $14.57 \text{ mg H}_2\text{O}/\text{g} \cdot \text{h}$  in 35℃ in *A. chevrieri*. Percentage of evaporative heat loss to total heat production (EHL/HP) increased when the temperature enhanced, the maximal EHL/HP was 34.6% in 30℃ in *E. miletus*, and in *A. chevrieri* was 37.5% in 35℃. The results may reflect features of small rodents in the Hengduan mountains region; both *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri* have high levels of basal metabolic rate and high levels of total thermal conductance, compared with the predicted values based on their body masses while their body temperatures are relatively low. Evaporative water loss plays an important role in temperature regulation.

**Key words:** *Apodemus chevrieri*; Body temperature regulation; Evaporative water loss; *Eothenomys miletus*

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30260021, 30560026); 云南省自然科学基金资助项目 (03C0032M); 云南省科技强省重点项目 (2007C00021)

**作者简介:** 朱万龙 (1983–), 男, 硕士研究生, 主要从事动物生理生态学研究。

**收稿日期:** 2007-08-17; **修回日期:** 2007-11-24

\* 通讯作者, correspondence author, E-mail: wz\_k\_930@yahoo.com.cn

能量代谢水平对物种的分布、丰富度、繁殖和适合度等起重要的决定作用 (Bozinovic and Rosenmann, 1989; Bozinovic, 1992; 王德华和王祖望, 2000)。小型哺乳动物的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理功能 (McNab, 1997; Arends and MacNab, 2001; 宋志刚和王德华, 2002)。蒸发失水对于动物热量平衡起着主要的作用 (Ronald *et al.*, 1997), 尤其对于沙漠中生活的动物 (Bozinovic and Contreras, 1990; Tieleman *et al.*, 2003)。保水能力对于生活在干燥环境中的动物的生存适应具有重要的意义 (Williams, 1980; Marilyn *et al.*, 2001; McNab, 2002; Tieleman *et al.*, 2003)。关于小型哺乳动物蒸发失水的研究大多数集中于沙漠啮齿动物 (Minnich, 1970; Crowe, 1972; Marilyn *et al.*, 2001; Scantlebury *et al.*, 2003; Pablo *et al.*, 2004; Terence *et al.*, 2005; Bozinovic and Gallardo, 2006), 国内也有一些报道 (奚家星和孙儒泳, 1973; 蔡正纬和黄文几, 1982; 肖增祐和孙儒泳, 1988; 王德华等, 1993; 王德华和王祖望, 2000)。

横断山地区海拔相对高差较大, 岭谷众多, 地形因素制约水分和温度的分配, 使得该地区具有地形多样性和气候多样性的特点 (余有德等, 1989; 龚正达等, 2001), 这些可能会导致小型哺乳动物出现特殊的生理生态特征, 而关于横断山小型哺乳动物肺皮蒸发失水的研究迄今尚未见报道。

大绒鼠 (*Eothenomys miletus*) 是亚洲横断山脉地区的特有类群 (郑少华, 1993), 在田鼠亚科中占有特殊的地位, 是滇西纵谷型鼠疫的主要动物宿主, 是当地主要害鼠。高山姬鼠 (*Apodemus chevrieri*) 又名齐氏姬鼠, 属于姬鼠亚属, 是典型的东洋界种类, 在中国主要分布在横断山区以及周围地带, 是横断山地区鼠疫自然疫源地的主要宿主之一。本文测定了大绒鼠和高山姬鼠的肺皮蒸发失水代谢和体温调节。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物

实验动物于 2006 年 11 月捕自云南省大理白族自治州剑川县石笼村海拔 2 590 m 的农田中。该地区位于云岭山的中部 (属断山), 北  $26^{\circ}15'$  ~  $26^{\circ}45'$ , 东经  $99^{\circ}4'$  ~  $99^{\circ}5'$ , 境内最高峰为雪

邦山 (海拔 4 295 m)。西部山区平均海拔在 3 000 m 以上, 地势高差悬殊, 山脉南北走向。年平均气温  $9.1^{\circ}\text{C}$ , 1 月份平均最低气温为  $-4.0^{\circ}\text{C}$ , 7 月份平均最高温度为  $24.1^{\circ}\text{C}$ , 低于同纬度平原地区; 气温随海拔高度的增加而显著降低。该地区干湿季节分明, 常冬无夏, 表现出显著的温带季风气候特征 (王政昆等, 1999)。

动物在云南师范大学生命科学学院 (昆明) 动物实验室饲养, 置于饲养小白鼠的透明塑料盒内 ( $260\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ), 无巢料, 每盒最多饲养 4 只, 自然光照; 每日喂以浸泡过的玉米, 用塑料瓶供水, 每日喂以少量绿色新鲜蔬菜。大绒鼠共 46 只 (雄性 26 只, 雌性 20 只), 高山姬鼠共 44 只 (雄性 23 只, 雌性 21 只), 均为健康的成年个体。

### 1.2 代谢测定

实验采用 Kalabukhov-Skvrtsov 封闭式压力呼吸仪进行测定 (Gorecki, 1975)。实验温度用上海博迅医疗设备厂生产的 SPX-300 型人工气候箱控制, 温度控制在  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 实验进行 1.5 h (前 0.5 h 使动物适应呼吸室环境, 记录 1 h), 在呼吸室前端接装有变色硅胶的 U 形管, 保证进入呼吸室的空气为干空气。实验前后均称体重, 用北京师范大学司南仪器厂生产的数字式体温计插入直肠约 3 cm 测量动物的体温, 并以实验后体温作为动物在该温度下的体温, 每次测温探头在直肠内静置约 45 s 左右读数; 动物实验前一般饥饿 2 ~ 4 h, 然后测定静止代谢率。

### 1.3 蒸发失水 (evaporative water loss, EWL)

在呼吸室前端接装有变色硅胶的 U 形管, 控制呼吸室的空气为干空气, 将预先称重 (精确至 0.1 mg) 并盛有干燥硅胶的 “U” 型管接在呼吸室后面, 用江苏金坛亿通电子有限公司生产的 TMP-1500 型大气采样机进行测定, 连续测定 30 min, 流量控制在  $0.5 \sim 1\text{ L/min}$ , 呼吸室底部放有石蜡油, 防止动物在实验期间排尿对实验造成影响, 实验前后干燥剂的重量差即为 EWL。详见《动物生态学实验指导》(北京师范大学和华东师范大学编, 1983)。

### 1.4 热传导 (thermal conductance, C)

测定不同环境温度下动物的热传导, 按 McNab (1980) 的公式计算:  $C = \text{RMR} / (T_b - T_a)$ , 式中 RMR 为静止代谢率 ( $\text{mlO}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ ),  $T_b$  为肛温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  为环境温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 1.5 F 值

F 值的计算参考 McNab (1970) 的公式,  $F = (\text{BMR}/\text{Kleiber 期望 BMR}) / (\text{C}/\text{Bradly 期望 C})$ , 其中 BMR 和 C 分别为基础代谢率和热传导的实测值; 期望 BMR 和期望 C 分别为 Kleiber (1961) 及 Bradly 和 Deavers (1980) 的体重预期值。

### 1.6 干燥热传导 (dry thermal conductance)

按下式计算 (Deavers and Hudson, 1981):  $C_{\text{dry}} = (\text{RMR} - \text{EWL}) / (T_b - T_a)$ , 式中 EWL 按蒸发 1 mg 水散失 2.417 J 的热量, 1 ml  $\text{O}_2 = 20.09 \text{ J}$  的关系式换算,  $T_b$  为肛温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  为环境温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 1.7 代谢水产生和蒸发失水比率 (metabolic water production/ evaporative water loss, MWP/EWL)

MWP/EWL 比率是对啮齿类动物水的利用效率评价的一个重要指标 (Arturo *et al.*, 2000)。MWP 按消耗 1 ml  $\text{O}_2 = 0.62 \text{ mg}$  代谢水 (Schmidt-Nielsen 1979) 换算。

### 1.8 数据处理

数据采用 Sigmaplot10.0, SPSS for Windows15.0 统计软件包进行处理, 包括协方差分析、重复测量的方差等, 结果以平均值  $\pm$  标准误 (mean  $\pm$  SE) 表示。BMR 期望值计算为 Kleiber (1961) 体重预期值。C 的期望值分别为 Herried 和 Kessel (1967) 及 Bradly 和 Deavers (1980) 的体重预期值。

## 2 结果

### 2.1 体温和耗氧量

干空气中, 大绒鼠的体温 ( $T_b$ ) 与环境温度 ( $T_a$ ) 的关系:  $T_b (^{\circ}\text{C}) = 34.53 + 0.1T_a$  ( $r = -0.716$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 42$ ); 高山姬鼠的体温 ( $T_b$ ) 与环境温度 ( $T_a$ ) 的关系:  $T_b (^{\circ}\text{C}) = 33.71 + 0.1T_a$  ( $r = -0.787$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 42$ ) (图 1)。

干空气中, 大绒鼠在  $25^{\circ}\text{C}$  以下随  $T_a$  下降而耗氧量增加 (图 2), 其耗氧量与  $T_a$  呈线性关系。大绒鼠的耗氧量在  $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内两者的回归方程为:  $\text{RMR} (\text{mlO}_2/\text{g} \cdot \text{h}) = 7.88 - 0.17T_a$  ( $r = -0.805$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。采用  $W^{0.73}$  矫正体重差异对 RMR 的影响后, 在  $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内两者的回归方程为:  $\text{RMR} (\text{mlO}_2/\text{g} \cdot \text{h}) = 22.01 - 0.48T_a$  ( $r = -0.819$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。对各个温度点进行重复测量设计的方差分析结果表明: 当  $T_a$  在  $22.5 \sim 30^{\circ}\text{C}$  时, 大绒

鼠 RMR 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 因此大绒鼠的热中性区为  $22.5 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。热中性区以内, 大绒鼠的基础代谢率为  $2.9906 \pm 0.4766 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ , 为 Kleiber (1961) 体重预期值的  $226.8 \pm 0.4\%$ 。在热中性区, 经过协方差分析, 大绒鼠 BMR 与体重显著相关:  $\text{BMR} = 19.8683W^{-0.4832}$  ( $r = -0.7383$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 18$ )。

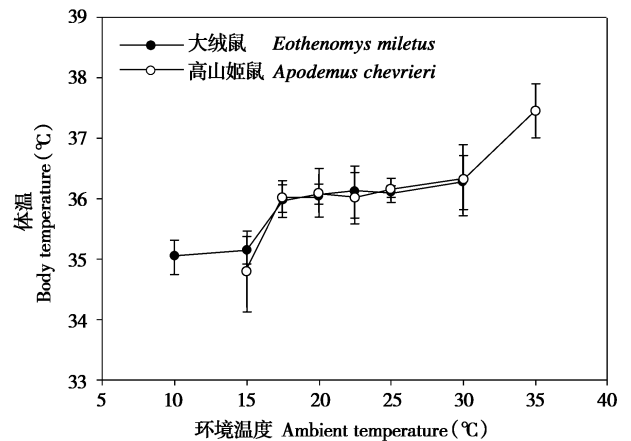


图 1 不同温度下大绒鼠和高山姬鼠的体温变化

Fig. 1 The body temperature in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

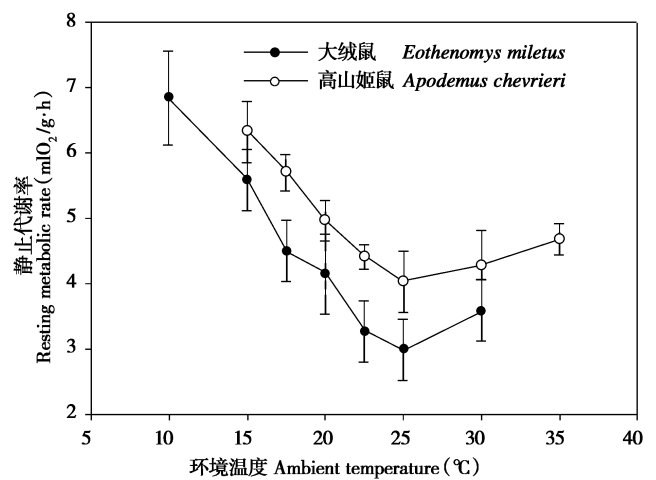


图 2 不同温度下大绒鼠和高山姬鼠的代谢率

Fig. 2 The Metabolic rate (RMR) in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

干空气中, 高山姬鼠在  $25^{\circ}\text{C}$  以下随  $T_a$  下降而耗氧量增加 (图 2), 其耗氧量与  $T_a$  呈线性关系。高山姬鼠的耗氧量在  $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$  范围内两者的回归方程为:  $\text{RMR} (\text{ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}) = 7.54 - 0.11T_a$  ( $r = -0.759$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。采用  $W^{0.73}$  矫正体重差异对 RMR 的影响后, 在  $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$  范围内两者的回归方程为:  $\text{RMR} (\text{ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}) = 19.45 -$

$0.28T_a$  ( $r = -0.791$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。对各个温度点进行重复测量设计的方差分析结果表明: 当  $T_a$  在  $25 \sim 30^\circ\text{C}$  时, 高山姬鼠 RMR 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 因此高山姬鼠的热中性区为  $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 。热中性区以内, 高山姬鼠的基础代谢率为  $4.2362 \pm 0.4957 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$ , 为 Kleiber (1961) 体重预期值的  $296.6 \pm 0.3\%$ 。在热中性区, 经过协方差分析, 高山姬鼠 BMR 与体重显著相关:  $\text{BMR} = 29.6487W^{-0.5736}$  ( $r = -0.8986$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 12$ )。

## 2.2 热传导及 F 值

热中心区 (thermal neutral zone, TNZ) ( $25^\circ\text{C}$ ) 以下, 大绒鼠热传导 (C) 基本维持稳定, 与  $T_a$  不相关, 平均值为  $0.2587 \pm 0.0376 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  (图 3), 为 Herried 等 (1967) 体重期望值的  $174.4 \pm 24.4\%$ , 为 Bradly 和 Deavers (1980) 体重期望值  $173.01 \pm 23.81$  (表 1), 当温度高于  $25^\circ\text{C}$ , C 随着环境温度的升高而迅速上升。在  $10 \sim 30^\circ\text{C}$ , 大绒鼠的热传导 (C) 与温度 ( $T_a$ ) 的回归关系为:  $R = 0.06 + 0.01 T_a$  ( $R = -0.6034$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。

TNZ ( $25^\circ\text{C}$ ) 以下, 高山姬鼠热传导 (C) 基

本维持稳定, 与  $T_a$  不相关, 平均值为  $0.3187 \pm 0.0339 \text{ ml O}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  (图 3), 为 Herried 等 (1967) 体重期望值的  $181.2 \pm 20.3\%$ , 为 Bradly 和 Deavers (1980) 体重期望值  $184.3 \pm 20.2\%$  (表 2), 当温度高于  $25^\circ\text{C}$ , C 随着环境温度的升高而迅速上升。在  $15 \sim 35^\circ\text{C}$ , 高山姬鼠的热传导与环境温度的回归关系为:  $R = -0.48 + 0.05 T_a$  ( $R = -0.7593$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。

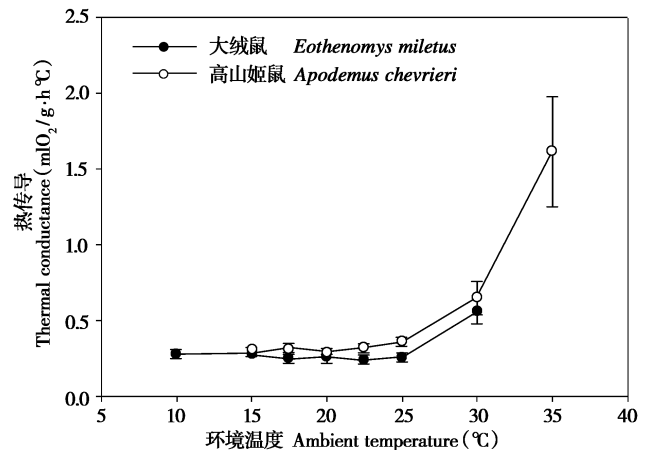


图 3 不同温度下大绒鼠和高山姬鼠的热传导

Fig. 3 The thermal conductance (C) in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

表 1 大绒鼠的能学特征

Table 1 Energetic parameters in *Eothenomys miletus*

参数 Parameter	实测值 Measured	期望值 * Predicted *	实测值占期望值的百分比 Percent of predicted
体重 BM (g)	44.93		
基础代谢率 BMR (ml O <sub>2</sub> /g·h)	2.9906	1.3254	226.77
热传导 C (ml O <sub>2</sub> /g·h·°C)	0.2587	0.1494	174.35
体温 T <sub>b</sub> (°C)	35.84		

\* 期望值计算公式:  $\text{BMR} = 3.42W^{-0.25}$  (Kleiber, 1961);  $C = 1.0W^{-0.5}$  (Herried *et al.*, 1967)

表 2 高山姬鼠的能学特征

Table 2 Energetic parameters in *Apodemus chevrieri*

参数 Parameter	实测值 Measured	期望值 * Predicted *	实测值占期望值的百分比 Percent of predicted
体重 BM (g)	32.61		
基础代谢率 BMR (ml O <sub>2</sub> /g·h)	4.2362	1.4262	296.6
热传导 C (ml O <sub>2</sub> /g·h·°C)	0.3187	0.1732	181.2
体温 T <sub>b</sub> (°C)	36.01		

\* 期望值计算公式:  $\text{BMR} = 3.42W^{-0.25}$  (Kleiber, 1961);  $C = 1.0W^{-0.5}$  (Herried *et al.*, 1967)

热中性区内, 大绒鼠的 F 值为  $0.9879 \pm 0.3094$  ( $N = 18$ ), 在  $10 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内, 大绒鼠的 F 值随温度上升而下降, F 值与  $T_a$  显著相关:  $F =$

$3.87 - 0.1T_a$  ( $r = -0.9898$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ ); 热中性区内, 高山姬鼠的 F 值为  $1.0991 \pm 0.3265$  ( $N = 12$ ), 在  $15 \sim 35^\circ\text{C}$  范围内, 高山姬鼠的 F 值

随温度上升而下降,  $F$  值与  $T_a$  显著相关:  $F = 4.04 - 0.11T_a$  ( $r = -0.9873$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ );

### 2.3 大绒鼠和高山姬鼠不同温度下的蒸发失水

干空气中, 大绒鼠的蒸发失水 (EWL) 在 TNZ 以下基本维持在相对稳定的水平 (图 4), 平均为  $6.6846 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , TNZ 以内及超过 TNZ, EWL 逐渐增加,  $30^\circ\text{C}$  达高峰值, 为  $10.3209 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 动物不能长时期忍受, 出现死亡情况,  $10 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内, EWL 与  $T_a$  显著正相关, 关系式为:  $\text{EWL} (\text{mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}) = 3.49 + 0.20T_a$  ( $r = -0.808$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。

干空气中, 高山姬鼠的蒸发失水 (EWL) 在 TNZ 以下基本维持在相对稳定的水平 (图 4), 平均为  $7.9659 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , TNZ 以内及超过 TNZ, EWL 逐渐增加,  $35^\circ\text{C}$  达高峰值, 为  $14.5739 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 动物不能长时期忍受, 出现死亡情况,  $10 \sim 35^\circ\text{C}$  范围内, EWL 与  $T_a$  显著正相关, 关系式为:  $\text{EWL} (\text{mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}) = 1.11 + 0.37T_a$  ( $r = -0.972$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。

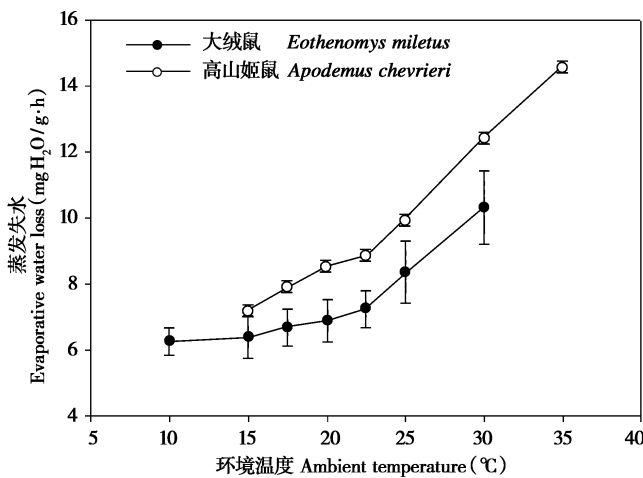


图 4 不同温度下的大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水

Fig. 4 EWL in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

### 2.4 大绒鼠和高山姬鼠蒸发失水与产热的关系

干空气中, 大绒鼠的蒸发失水与代谢率的比率 (Ratio of evaporative water loss to metabolic rate, EWL/RMR) 随  $T_a$  增加而增加 (图 5), 关系式为:  $\text{EWL/RMR} (\text{mg H}_2\text{O/mlO}_2) = -0.40 + 0.11T_a$  ( $r = 0.963$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ ); 高山姬鼠的蒸发失水与代谢率的比率 (EWL/RMR) 随  $T_a$  增加而增加 (图 5), 关系式为:  $\text{EWL/RMR} (\text{mg H}_2\text{O/mlO}_2) = -0.39 + 0.10T_a$  ( $r = -0.991$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ )。

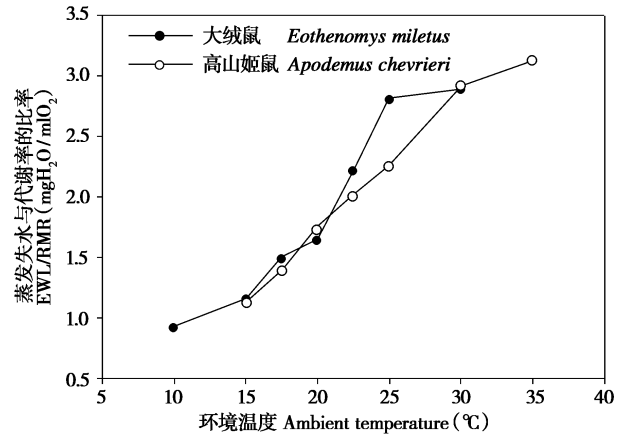


图 5 大绒鼠和高山姬鼠在不同温度下的蒸发失水与代谢率的比率  
Fig. 5 EWL/RMR in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

干空气中, 大绒鼠干燥热传导 ( $C_{dry}$ ) 的变化在  $22.5 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内, 干燥热传导随  $T_a$  增加而增加 (图 6), 关系式为:  $C_{dry} (\text{mlO}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = -0.48 + 0.03T_a$  ( $r = -0.949$ ,  $P > 0.05$ ,  $n = 6$ )。高山姬鼠干燥热传导 ( $C_{dry}$ ) 的变化在  $20 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内, 干燥热传导随  $T_a$  增加而增加 (图 6), 关系式为:  $C_{dry} (\text{mlO}_2/\text{g} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = -1.11 + 0.06T_a$  ( $r = -0.886$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 6$ )。

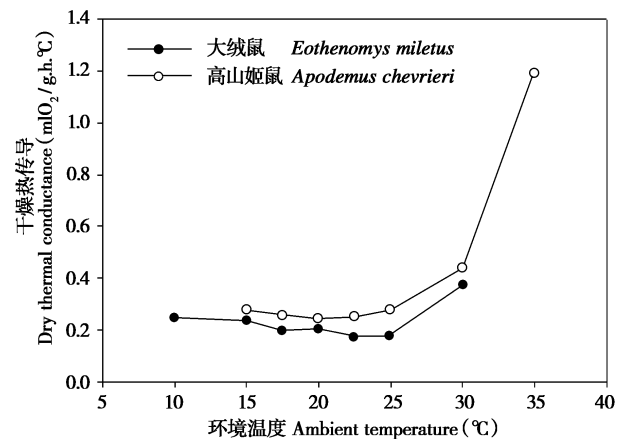


图 6 大绒鼠和高山姬鼠在不同温度下的干燥热传导

Fig. 6 Dry C in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

在干空气中, 大绒鼠的代谢水产生和蒸发失水比率 MWP/EWL 随温度 ( $T_a$ ) 升高而降低 (图 7), 两者的回归方程为:  $\text{MWP/EWL} (\%) = 1.05 - 0.027T_a$  ( $r = -0.961$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ ); 高山姬鼠的代谢水产生和蒸发失水比率 MWP/EWL 同样随温度 ( $T_a$ ) 升高而增加, 两者的回归方程为:  $\text{MWP/EWL} (\%) = 1.03 - 0.026T_a$  ( $r = 0.991$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 6$ )。

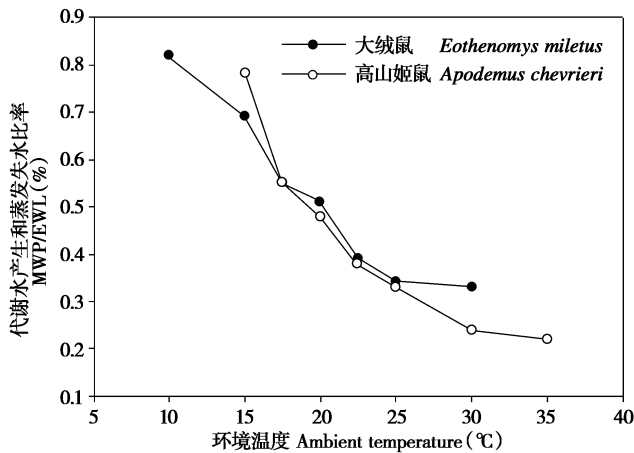


图7 大绒鼠和高山姬鼠在不同温度下的代谢水产生和蒸发失水比率  
Fig. 7 MWP/EWL in different temperatures in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

在干空气中,大绒鼠的蒸发热散失占总产热的比率 (Percentage of evaporative heat loss to total heat production, EHL/HP) 随温度 ( $T_a$ ) 升高而增加 (图8), 两者的回归方程为:  $EHL/HP (\%) = -0.05 + 0.01T_a$  ( $r = -0.963$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 6$ ); 高山姬鼠的蒸发热散失占总产热的比率 (EHL/HP) 同样随温度 ( $T_a$ ) 升高而增加, 两者的回归方程为:  $EHL/HP (\%) = -0.05 + 0.01T_a$  ( $r = 0.916$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 6$ )。

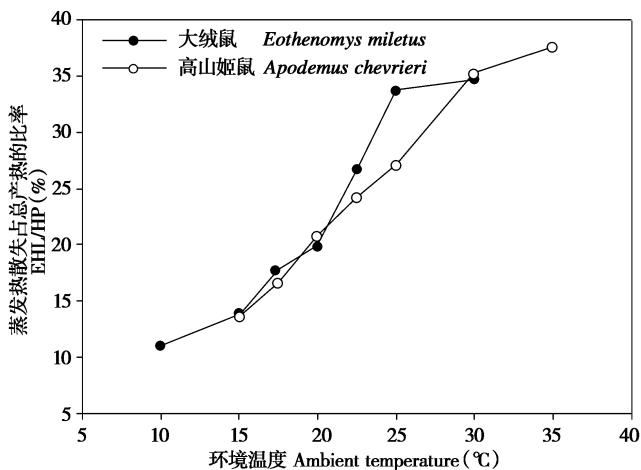


图8 大绒鼠和高山姬鼠在不同温度下的蒸发热散失占总产热的比率  
Fig. 8 EHL/HP (%) in different temperature in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*

### 3 讨论

大多数沙漠啮齿动物的体温为  $37^{\circ}\text{C}$  或低于  $37^{\circ}\text{C}$ , 而大多数非沙漠啮齿动物的体温要高于  $37^{\circ}\text{C}$  (Wang *et al.*, 2000), Bradly 和 Deavers (1980)

总结了 36 种非田鼠类动物的体温, 平均为  $37.3^{\circ}\text{C}$ , 而 6 种田鼠平均体温为  $38.4^{\circ}\text{C}$ 。大多数田鼠类的体温较高, 并且在  $2 \sim 34^{\circ}\text{C}$  范围内维持体温恒定 (Wunder, 1985), 如地中海田鼠 (*Macro-tus guentheri*)  $38.3^{\circ}\text{C}$ 、黑田鼠 (*M. agrestis*)  $37.6^{\circ}\text{C}$  (Lovegrove, 2005)。大绒鼠的体温 ( $36.1^{\circ}\text{C}$ ) 较大多数啮齿动物低 (Gordon, 1993), 体温在  $17.5 \sim 30^{\circ}\text{C}$  之间维持恒定, 维持体温稳定的环境温度范围较窄, 而高山姬鼠的体温 ( $36.17^{\circ}\text{C}$ ) 也较低, 体温在  $17.5 \sim 30^{\circ}\text{C}$  之间维持恒定, 这可能是对横断山区的一种适应, 因为横断山区的气候年温差小, 日温差大, 因此两种动物在体温调节上可能保留了与当地相适应的特征, 即低的体温可以减少与环境之间的温差, 节省热能 (王德华和王祖望, 2000; 王海等, 2006)。同时, 高山姬鼠的体温比大绒鼠的略高, 与之前王海等 (2006) 报道相符。另外, 大绒鼠和高山姬鼠在  $30^{\circ}\text{C}$  会出现热死亡, 较之前报道的  $32.5^{\circ}\text{C}$  低, 这可能与在干燥环境中进行实验有关, 干空气中, 大绒鼠和高山姬鼠在高温条件下大量地蒸发失水, 为了减少身体的蒸发失水, 导致在高温下体温调节的困难, 因此大绒鼠和高山姬鼠在  $30^{\circ}\text{C}$  即出现热死亡。

动物的 BMR 与其地理分布的气候带、栖息环境等密切相关 (McNab, 1986; Lovegrove, 2000; Rezende *et al.*, 2004; Karasov and McWilliams, 2005)。Corp 等 (1996) 的研究发现栖息地相距 15 km 的林姬鼠 (*Apodemus sylvaticus*) 的静止代谢率会产生差异。一般热带动物的 BMR 比温带动物的要低, 温带动物的 BMR 比寒带动物的低。生活在寒冷地带, 特别是极地气候的大多数动物具有较高的 BMR (McNab, 1987); 青藏高原高寒地区的小哺乳动物与热带和亚热带地区的小哺乳动物相比, BMR 水平较高 (王德华和王祖望, 2000)。我们的实验结果显示横断山地区大绒鼠和高山姬鼠的代谢率较高, 大绒鼠和高山姬鼠的 BMR 分别为 Kleiber (1961) 体重预期值的  $226.8 \pm 0.4\%$  和  $296.6 \pm 0.3\%$ , 显著高于沙漠地区的宽齿姬鼠 (*Apodemus mystacinus*) ( $92\%$ ) (Haim, 1982)、黄喉姬鼠 (*A. flavicollis*) ( $105\%$ ) (Haim *et al.*, 1986)、赫山姬鼠 (*A. hermonensis*) ( $136\%$ ) (Haim *et al.*, 1993)。同时高于很多北方低海拔地区的种类, 如草原田鼠 (*Microtus pennsylvanicus*) (其 BMR 为 Kleiber (1961) 的  $141\%$ )、橙腹田鼠 (*M. ochrogaster*) ( $129\%$ )、里氏田

鼠 (*M. richardsoni*) (131%)、麻省田鼠 (*M. breweri*) (110.4%) 等 (Wunder, 1985; Kurta and Ferkin, 1991), 也高于高寒地区的根田鼠 (214%) (王德华和王祖望, 2000)。这可能与大绒鼠和高山姬鼠的适应特征有关。虽然大绒鼠和高山姬鼠分布的纬度低于北方的种类, 但是海拔却与根田鼠等北方种类相近, 随着海拔高度的增加, 低温胁迫逐渐增加, 这种效应相当于纬度的增加 (王海等, 2006), 因此两种动物出现了高代谢特征。此外, 由于横断山区日温差较大, 大绒鼠和高山姬鼠每天经历高温和低温的胁迫, 又因为其 NST 产热能力相对低 (王政昆等, 1999), 导致了它们在此环境中采用了高代谢率的对策来应对低温胁迫。大绒鼠和高山姬鼠生活在冬季无冰雪覆盖, 食物资源丰富的环境中, 这为它们高能量消耗提供了条件, 使它们可以采用比较浪费的能量利用对策。

另外, 大绒鼠和高山姬鼠的代谢水平较高, 而低于之前的报道 (王海等, 2006), 这可能与实验的空气湿度有关。研究发现, 生活在干旱环境中的动物, 由于食物缺乏, 因此能量、水分的存储对于这些动物的生存非常重要 (Marilyn *et al.*, 2001), 降低基础代谢率可能是解决能量和水分存储的一个策略 (French, 1993; Haim and Izhaki, 1995; Irene *et al.*, 2003)。一般情况下, 沙漠动物的 BMR 比非沙漠动物要低, 如 Goyal 和 Gosh (1983) 曾报道沙漠啮齿类的 BMR 最大值和平均值分别比期望值低 37% 和 16%, 而非沙漠啮齿类 BMR 分别比期望值高 88% 和 34% (Degen, 1997)。这可能说明空气湿度对两种动物的代谢率有一定的影响。

在 10 ~ 25℃ 大绒鼠和高山姬鼠的热传导基本保持不变, 分别为 Herried 和 Kessel (1967) 体重期望值的  $174.4 \pm 24.4\%$  和  $181.2 \pm 20.3\%$ , 明显比典型的北方田鼠类高, 接近热带种类的水平, 如中缅树鼩的 199.9% (王政昆等, 1994)。一方面说明它们的生活习性导致其热散失较高, 另一方面与其栖息地昼夜温差较大有关, 横断山区独特的地理和气候条件, 使得大绒鼠和高山姬鼠经受的低温胁迫较多, 对高温的耐受性较弱, 于是出现了过热的温度或热传导显著增加的环境温度较低 (王海等, 2006)。

McNab (1970) 以代谢预期比和热传导预期比之间的比率 (F 值) 来表示单位体温调节能力 (McNab, 1970), 可以作为衡量不同温度下动物产热与散热之间的相对大小。大绒鼠和高山姬鼠热

中性区内的 F 值分别为  $0.9879 \pm 0.3094$  和  $1.0991 \pm 0.3265$ , 低于许多北方鼠类, 如草原田鼠 (1.57), 橙腹田鼠 (1.58, 1.43) 和里氏田鼠 (1.54) 等, 但比一些热带种类高 (Kurta and Ferkin, 1991; 王政昆等, 1999), 这说明两种动物维持体温恒定的能力有限, 在低温和高温下体温的稳定性差。

不同温度下动物的蒸发失水不同。关于蒸发失水与温度的关系的相应研究已经有很多报道 (Greogry and Snyder, 1975; Williams, 1980; Chessman, 1984; Ganey *et al.*, 1993; Amey and Grigg, 1995; Wolf and Walsberg, 1996; Gilead and Berry, 2001; Buttermar and Thomas, 2003; Tirado *et al.*, 2007)。在本实验中, 大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水随着温度的升高而上升。大绒鼠在 10℃ 时的蒸发失水量为  $6.2750 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 之后随着温度增高而增加, 30℃ 达到最大值为  $10.3209 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 是 10℃ 的 1.64 倍, 经单因子方差分析多重比较, 10 ~ 22.5℃ 的蒸发失水差异不显著, 22.5 ~ 30℃ 时与之前差异显著; 高山姬鼠在 10℃ 时的蒸发失水量为  $7.1647 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 之后随着温度增高一直增加, 35℃ 达到最大值为  $14.5739 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 是 10℃ 的 2.03 倍, 经单因子方差分析多重比较, 高山姬鼠与大绒鼠的蒸发失水不同, 除 20℃ 和 22.5℃ 差异不显著外, 其它温度点差异显著。在对长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) 和金黄地鼠 (*Mesocricetus auratus*) 的蒸发失水的研究中发现, 在 10 ~ 30℃ 范围内, 长爪沙鼠和金黄地鼠的肺皮蒸发失水量随温度上升呈指数式增加 (肖增祐和孙儒泳, 1988)。在根田鼠的研究中也发现, 一定温度范围内根田鼠的肺皮蒸发失水量随着温度的增加而增大 (王德华和王祖望, 2000)。

从蒸发失水量与体重的关系上也可以看出, 单位体重蒸发失水量大绒鼠和高山姬鼠的也高于一般干旱地区以种子为食的啮齿类动物 (Arturo *et al.*, 2000)。经研究发现 (Hinds and MacMillen, 1985; Arturo *et al.*, 2000), 干旱地区以种子为食的啮齿类动物的蒸发失水量与体重的关系为:  $\text{EWL} = 5.968M^{-0.416}$ , 由此公式推得大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水量分别为  $1.2645 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$  和  $1.6439 \text{ mg H}_2\text{O/g} \cdot \text{h}$ , 低于实验测得值。这可能与横断山区地理、气候条件有关, 即横断山区地处低纬度高海拔地区, 日温差较大, 同时, 由于纬度较低, 太阳辐射较同纬度低海拔地区高 (文传甲,

1989)。

蒸发失水在动物的总产热中占有重要的地位(王德华和王祖望, 2000)。MWP/EWL 比率是啮齿类动物水利用效率评价的一个重要指标(Arturo *et al.*, 2000), 当  $MWP/EWL = 1$  即  $MWP = EWL$  时, 环境温度对于动物的生存至关重要(MacMillen and Hinds, 1983)。大绒鼠和高山姬鼠的 MWP/EWL 比率与温度呈负相关关系, 在其它研究中也有类似报道(MacMillen and Hinds, 1983; Arturo *et al.*, 2000)。大绒鼠和高山姬鼠的 EWL/RMR 比率随着温度的升高而变大。两种动物的干燥热传导趋势也基本相同。大绒鼠蒸发热散失占总产热的比率在  $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$  之间所占的比例越来越大, 到  $30^{\circ}\text{C}$  时达到最大为 34.6%; 高山姬鼠的蒸发热散失占总产热的比率在  $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$  所占的比例越来越大, 到  $35^{\circ}\text{C}$  时达到最大为 37.5%, 可见蒸发失水热散失在两种动物的总产热中具有很重要的地位。在根田鼠的研究中蒸发热散失占总产热的比率最大为 48.3% (王德华和王祖望, 2000)。

此外, 由图 7 中可以发现, 从  $15^{\circ}\text{C}$  到  $30^{\circ}\text{C}$  的温度范围内, 大绒鼠和高山姬鼠的蒸发热散失占总产热的比率相近, 而且趋势也基本相同, 这可能与它们的分布适应有关。由于这两种动物都生活在横断山区, 可能有共同的生存适应特征, 因此在面对干燥胁迫时, 在水代谢方面有着相似的应对机制。

结果表明, 干燥环境下的不同温度确实影响大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水与体温调节, 可能反映出了横断山区低纬度高海拔、日温差大、太阳辐射较同纬度低海拔地区高(文传甲, 1989)的特征。而大绒鼠和高山姬鼠的蒸发失水和体温调节也可能反映了横断山区小型啮齿类动物的特征, 即体温相对较低、代谢水平较高、热传导也较高、蒸发失水在动物总产热中占有重要的地位。

## 参考文献:

- Amey A P, Grigg G C. 1995. Lipid-reduced evaporative water loss in two arboreal hylid frogs. *Comparative Biochemistry and Physiology*, **111** (2): 283 - 291.
- Arends A, MacNab B K. 2001. The comparative energetics of 'caviomorph' rodents. *Comp Biochem Physiol*, **130A**: 105 - 122.
- Arturo Cortés, Mario Rosenmann, Francisco Bozinovic. 2000. Water economy in rodents: evaporative water loss and metabolic water production. *Rev Chil Hist Nat*, **73** (2): 311 - 321.
- Bozinovic F, Rosenmann M. 1989. Maximum metabolic rates of rodents: physiological and ecological consequences on distribution limits. *Funct Ecol*, **3**: 173 - 181.
- Bozinovic F, Contreras L C. 1990. Basal rate of metabolism and temperature regulation of two desert herbivorous octodontid rodents: *Octomys mimax* and *Tympanoctomys barrerae*. *Oecologia*, **84**: 567 - 570.
- Bozinovic F. 1992. Rate of basal metabolism of grazing rodents from different habitats. *J Mamm*, **73** (2): 379 - 384.
- Bozinovic F, Gallardo P. 2006. The water economy of South American desert rodents: from integrative to molecular physiological ecology. *Comparative Biochemistry and Physiology*, **142**: 163 - 172.
- Bradley S R, Deavers D R. 1980. A re-examination of the relation between thermal conductance and body weight in mammals. *Comp Biochem Physiol*, **8**: 472 - 478.
- Buttemer William A, Thomas Craig. 2003. Influence of temperature on evaporative water loss and cutaneous resistance to water vapour diffusion in the orange-thighed frog (*Litoria xanthomera*). *Aust J Zool*, **51** (2): 111 - 118.
- Cai Z W, Huang W J. 1982. The pulmocutaneous water loss of the buff-breast rat and the ratlike hamster and its relationship with their geographical distribution. *Acta Ecological Sinica*, **2** (3): 291 - 302. (in Chinese)
- Chessman B C. 1984. Evaporative water loss from three South-Eastern Australian species of water turtle. *Australian Journal of Zoology*, **32** (5): 649 - 655.
- Corp N, Gorman M L, Speakman J R. 1996. Seasonal variation in the resting metabolic rate of male wood mice *Apodemus sylvaticus* from two contrasting habitats 15 km apart. *J Comp Physiol*, **167**: 229 - 239.
- Deavers D R, Hudson J W. 1981. Temperature regulation in two rodents (*Clethrionomys gapperi* and *Peromyscus leucopus*) and a shrew (*Blarina brevicauda*) inhabiting the same environment. *Physiol Zool*, **54**: 94 - 108.
- Degen A A. 1997. *Ecophysiology of Small Desert Mammals*. Berlin: Springer-Verlag, 163 - 236.
- French A R. 1993. Physiological ecology of the heteromyidae: economics of energy and water utilization. In: Genoways H H, Brown J H eds. *Biology of the Heteromyidae*. Special Pub. No 10, American Society of Mammalogists, Utah, 509 - 538.
- Ganey Joseph L, Balda Russell P, King Rudy M. 1993. Metabolic rate and evaporative water loss of Mexican Spotted and Great Horned Owls. *Wilson Bulletin*, **105** (4): 645 - 656.
- Gorecki A. 1975. Kalabukhov-skvortsov respirometer and resting metabolic rate measurement. In: Grodzinski W, Klekowski R Z, Duncan A eds. *IBP Handbook No. 24, Methods for Ecological Bioenergetics*. Published for the International Biological Programme by Blackwell Scientific Publications, Edinburgh and Melbourne, 309 - 313.
- Gilead Michaeli, Berry Pinshow. 2001. Respiratory water loss in free-flying pigeons. *The Journal of Experimental Biology*, **204**: 3803 - 3814.
- Gong Z D, Wu H Y, Duan X D, Zhang Y Z, Liu Q. 2001. The species diversity and distribution trends of small mammals in Hengduan Mountains, Yunnan. *Biodiversity Science*, **9** (1): 73 - 79.



- (in Chinese)
- Gordon C J. 1993. Temperature Regulation in Laboratory Rodents. Cambridge: Cambridge University Press, 1 – 276.
- Goyal S P, Gosh P K. 1983. Body weight exponents of metabolic rate and minimal thermal conductance in burrowing desert rodents. *J Arid Environ*, **6**: 43 – 52.
- Geogry K Snyder. 1975. Respiratory metabolism and evaporative water loss in a small tropical lizard. *Journal of Comparative Physiology*, **104** (1): 13 – 18.
- Crowe John H. 1972. Evaporative water loss by tradigrades under controlled relative humidities. *Biol Bull*, **142**: 407 – 416.
- Haim A. 1982. Effects of long scotophase and cold acclimation on heat production in two diurnal rodents. *Journal of Comparative Physiology*, **148B**: 77 – 81.
- Haim A, Pelaot I, Sela A. 1986. Comparison of ecophysiological parameters between two *Apodemus* species coexisting in the same habitat. In: Dubinsky Z, Steinberger Y eds. Environmental Quality and Ecosystem Stability, Vol. IIIA, 33 – 40. Ramat-Gan: Bar-Illan University Press, 444.
- Haim A, Rubal A, Harari J. 1993. Thermoregulatory strategies of two *Apodemus* species inhabiting a cold environment on Mount Hermon. In: Carey C, Florant G L, Wunder B W, Horwitz B eds. Life in the Cold, 91 – 97. Boulder: Westview Press, 575.
- Haim A, Izhaki I. 1995. Comparative physiology of thermoregulation in rodents: adaptations to arid and mesic environments. *Journal of And Environments*, **31**: 431 – 440.
- Herreid C F, Kessel B. 1967. Thermal conductance in birds and mammals. *Comp Biochem Physiol*, **21**: 405 – 414.
- Hinds D E, MacMillen R E. 1985. Scaling of energy metabolism and evaporative water loss in heteromyid rodents. *Physiological Zoology*, **58**: 282 – 298.
- Irene Tieleman B, Joseph B Williams, Paulette Bloomer. 2003. Adaptation of metabolism and evaporative water loss along an aridity gradient. *Proc Biol Sci*, **270** (1511): 207 – 214.
- Karasov W H, McWilliams S R. 2005. Digestive constraints in mammalian and avian ecology. Reprinted from: Physiological and Ecological Adaptations to Feeding in Vertebrates, 87 – 112.
- Kleiber M. 1961. The Fire of Life: an Introduction to Animal Energetics. New York: John Wiley and Sons.
- Kurta A, Ferkin M. 1991. The correlation of demography and metabolic rate: a test using the vole (*Microtus breweri*) and the meadow vole (*Microtus pennsylvanicus*). *Oecologia*, **87**: 102 – 105.
- Lovegrove B G. 2000. The zoogeography of mammalian basal metabolic rate. *Am Nat*, **1** (156): 201 – 219.
- Lovegrove B G. 2005. Seasonal thermoregulatory responses in mammals. *J Comp Physiol*, **175**: 231 – 247.
- Marilyn R Banta, Dale W Holcombe. 2001. The effects of thyroxine on metabolism and water balance in a desert-dwelling rodents, Murrin's kangaroo rat (*Dipodomys merriami*). *Journal of Comparative Physiology B*, **172**: 17 – 25.
- McNab B K. 1970. Body weight and the energetics of temperature regulation. *J Biol*, **53**: 329 – 348.
- McNab B K. 1980. On estimating thermal conductance in endotherms. *Physiol Zool*, **53**: 145 – 156.
- McNab B K. 1986. The influence of food habits on the energetics of eutherian mammals. *Ecological Monographs*, **56** (1): 1 – 19.
- McNab B K. 1987. The evolution of mammalian energetics. In: Calow P ed. Evolutionary Physiological Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 219 – 236.
- McNab B K. 1997. On the utility of mammalian rates of basal rate of metabolism. *Physiol Zool*, **70**: 718 – 720.
- MacMillen R E, Hinds D S. 1983. Water regulatory efficiency in heteromyid rodents: a model and its application. *Ecology*, **64**: 152 – 164.
- Minnich John E. 1970. Evaporative water loss from the desert iguana, *Dipsosaurus dorsalis*. *Copeia*, **3**: 575 – 578.
- Pablo Sabat, Roberto F Nespole, Francisco Bozinovic. 2004. Water economy of three Cincloides (Furnariidae) species inhabiting marine and freshwater ecosystems. *Revista Chilena de Historia Natural*, **77**: 219 – 225.
- Ronald L Ariagno, Steven F Glotzbach, Roger B Baldwin, David M Receptor, Susan M Bowley, Robert J Moffat. 1997. Dew-point hygrometry system for measurement of evaporative water loss in infants. *Journal of Applied Physiology*, **82** (3): 1008 – 1017.
- Rezende E L, Bozinovic F, Garalnd T Jr. 2004. Climatic adaptation and the evolution of basal and maximum rates of metabolic in rodents. *Evolution*, **58** (6): 1361 – 1374.
- Scantlebury M, Shanas U, Speakman J R, Kupshtein H, Afik D, Haim A. 2003. Energetics and water economy of common spiny mice *Acomys cahirinus* from north-and south-facing slopes of a Mediterranean valley. *Functional Ecology*, **17**: 178 – 185.
- Schmidt-Nielsen K. 1979. Desert animals: physiological problems of heat and water. *Dover Publication*, 277.
- Sun Z G, Wang D H. 2002. Relationship between metabolic rates and body composition in the Mongolia gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Acta Zoologica Sinica*, **48** (4): 445 – 451. (in Chinese)
- Terence J Dawson, Kirsten J McTavish, Adam J Munn, Joanne Hollo-way. 2005. Water use and the thermoregulatory behavior of kangaroos in arid regions: insights into the colonization of arid rangelands in Australia by the Eastern Grey Kangaroo (*Macropus giganteus*). *J Comp Physiol B*, **176**: 45 – 53.
- Tieleman B I, Williams J B, Buschur M B, Brown K. 2003. Phenotypic variation of larks along an aridity gradient: are desert birds more flexible? *Ecology*, **84**: 1800 – 1815.
- Tirado C, Cortes A, Bozinovic F. 2007. Metabolic rate, thermoregulation and water balance in *Lagidium viscacia* inhabiting the arid Andean plateau. *Journal of Thermal Biology*, **32**: 220 – 226.
- Wang D H, SUN R Y, Wang Z W. 1993. Evaporative water loss and thermoregulation in plateau pika (*Ochotona curzoniae*). *Acta Theriologica Sinica*, **13**: 104 – 113. (in Chinese)
- Wang D H, Wang Z W. 2000. Body temperature regulation and evaporative water loss in root vole (*Microtus oeconomus*). *Acta Theriologica Sinica*, **20** (1): 37 – 47. (in Chinese)
- Wang D H, Wang Z W. 2000. Metabolism and thermoregulation in the

- Mongolian gerbil *Meriones unguiculatus*. *Acta Theriol*, **45** (2): 183 – 192.
- Wang H, Tang X M, Liu C Y, Wang Z K. 2006. Thermoregulatory and thermogenic properties in *Eothenomys miletus* and *Apodemus chevrieri*. *Acta Theriologica Sinica*, **26** (2): 144 – 151. (in Chinese)
- Wang Z K, Sun R Y, LI Q F, Fang J M. 1994. Characteristics of the resting metabolic rate of tree shrew, *Tupaia belangeri*. *Journal of the Beijing Normal University (Nature Science)*, **30** (3): 408 – 414.
- Wang Z K, Liu L, Liang Z Q, LI Q F, Sun R Y. 1999. Thermogenic characteristics and body temperature regulation in the oriental voles (*Eothenomys miletus*). *Acta Theriologica Sinica*, **19** (4): 276 – 286. (in Chinese)
- Wen C J. 1989. Influence of the relief on conditions of water and heat in the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, **7** (1): 65 – 73. (in Chinese)
- Williams R Welch. 1980. Evaporative water loss from endotherms in thermally and hygrically complex environments: an empirical approach for interspecific comparisons. *J Comp Physiol*, **139**: 135 – 143.
- Wolf B, Walsberg G. 1996. Respiratory and cutaneous evaporative water loss at high environmental temperatures in a small bird. *J Exp Biol*, **2**: 451 – 457.
- Wunder B A. 1985. Energetics and thermoregulation. In: Tamarin R H ed. *Biology of New World Microtus*, 812 – 843.
- Xi J X, Sun R Y. 1973. A study of the evaporative water losses of the Brown and Sulphur-Bellied rats. *Acta Zoologica Sinica*, **19** (3): 272 – 282. (in Chinese)
- Xiao Z H, Sun R Y. 1988. A study on pulmo-cutaneous evaporative water losses of Mongolian gerbil and Golden hamster. *Acta Theriologica Sinica*, **8** (1): 49 – 54. (in Chinese)
- Yu Y D, Liu L H, Zhang J H. 1989. Vegetation regionalization of the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, **7** (1): 47 – 55. (in Chinese)
- 王海, 杨晓密, 刘春燕, 王政昆. 2006. 大绒鼠和高山姬鼠的体温调节和产热特征. *兽类学报*, **26** (2): 144 – 151.
- 王德华, 孙儒泳, 王祖望. 1993. 高原鼠兔蒸发失水的地位及热能调节. *兽类学报*, **13**: 104 – 113.
- 王德华, 王祖望. 2000. 高寒地区根田鼠的体温调节和蒸发失水. *兽类学报*, **20** (1): 37 – 47.
- 王政昆, 孙儒泳, 李庆芬, 房继明. 1994. 中缅树鼩静止代谢率研究. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, **30** (3): 408 – 414.
- 王政昆, 刘璐, 梁子卿, 李庆芬, 孙儒泳. 1999. 大绒鼠体温调节和产热特征. *兽类学报*, **19** (4): 276 – 286.
- 文传甲. 1989. 横断山区地形对水热条件的影响. *山地研究*, **7** (1): 65 – 73.
- 北京师范大学, 华东师范大学编. 1983. 动物生态学实验指导. 北京: 高等教育出版社.
- 宋志刚, 王德华. 2002. 长爪沙鼠的代谢率与器官的关系. *动物学报*, **48** (4): 445 – 451.
- 余有德, 刘伦辉, 张建华. 1989. 横断山区植被分区. *山地研究*, **7** (1): 47 – 55.
- 肖增祜, 孙儒泳. 1988. 长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) 和金黄地鼠 (*Mesocricetus auratus*) 的肺皮蒸发失水量研究. *兽类学报*, **8** (1): 49 – 54.
- 郑少华. 1993. 川黔地区第四纪啮齿动物化石. 北京: 科学出版社.
- 奚家星, 孙儒泳. 1973. 褐家鼠和社鼠肺皮蒸发失水量的初步研究. *动物学报*, **19** (3): 272 – 282.
- 龚正达, 吴厚永, 段兴德, 冯锡光, 张云智, 刘泉. 2001. 云南横断山区小型兽类物种多样性与地理分布趋势. *生物多样性*, **9** (1): 73 – 79.
- 蔡正纬, 黄文几. 1982. 大仓鼠和黄胸鼠的肺皮蒸发失水及其和地理分布的关系. *生态学报*, **2** (3): 291 – 302.