

冷驯化条件下高山姬鼠能量对策的初步研究

姜文秀 王蓓 王睿 王政昆*

(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
云南省能源与环境生物技术重点实验室 昆明 650092)

摘要: 为进一步了解横断山区小型哺乳动物的能量代谢对策, 本文主要研究了横断山的外来物种——高山姬鼠 (*Apodemus chevrieri*) 持续冷暴露 28 d 的能量变化。结果表明, 随着冷驯化时间延长, 体重和体温降低; 摄入能、消化能和可代谢能增加, 至 21 d 后这 3 项指标又下降; BMR 和 NST 增加, 并且 28 d 后它们分别是对照组的 187.19% 和 155.97%; (NST - BMR)/BMR 比值 7 d 时增加到 1.02, 21 d 后下降至 0.53, 并保持稳定。因此, 在持续冷暴露下, 高山姬鼠采取适当降低体重和体温、增加能量摄入、增加 BMR 和 NST 产热等途径来维持能量代谢平衡, 但是 NST 在产热中的作用逐渐降低。这种能量模式很可能代表了一种外来小型啮齿动物对于在横断山生存独特的能量适应策略。

关键词: 高山姬鼠; 冷驯化; 能量收支; BMR; NST

中图分类号: Q958, Q955 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263(2009)04-142-08

The Energy Strategies of the *Apodemus chevrieri* during Cold Exposure

JIANG Wen-Xiu WANG Bei WANG Rui WANG Zheng-Kun*

(School of Life Sciences of Yunnan Normal University, Engineering Research Center of Sustainable Development and Utilization of Biomass Energy Ministry of Education, The Key Laboratory of Biomass Energy and Environment Biological Technology in Yunnan Province, Kunming 650092, China)

Abstract: *Apodemus chevrieri* is an exotic species inhabiting Hengduan Mountains. In order to study its adaptive energy strategies under low temperature of the wood mice, we measured energy budget, BMR and NST during cold exposure for 28 days. During cold exposure, its body mass and temperature decreased gradually, while energy intake, digested energy and metabolizable energy intake increased gradually and achieved the highest value after 21 days. BMR and NST increased and reached to 187.19%, 155.97% respectively of the control after 28 days. The ratio of (NST - BMR)/BMR was 1.02 after 7 days and then dropped to 0.53 in 21 days, and then kept at a steady level. During cold exposure, *A. chevrieri* reduced its body mass and temperature, and increased energy intake, digested energy, assimilated energy and thermogenesis properties of BMR and NST in order to maintain the balance of energy metabolism. In the early stage of the cold acclimation, the NST was dominant in the thermogenesis, but as the time continued further, it reduced. It was possible that the pattern of the energy budget in *A. chevrieri* during cold acclimation is also the character of other rodents inhabiting Hengduan Mountains.

Key words: *Apodemus chevrieri*; Cold exposure; Energy budget; BMR; NST

小型啮齿动物的能量代谢对策决定了生态系统的物种分布和丰富度, 并对动物本身的繁殖成功率、生存适应能力等起重要作用^[1]。能量获取及消耗之间的平衡是生命存活和繁殖的关键, 而能量平衡依赖于食物摄入与消化、产

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 30560026), 科技强省重点项目 (No. 2007C000Z1);

* 通讯作者, E-mail: wzk_930@yahoo.com.cn;

第一作者介绍 姜文秀, 女, 硕士研究生; 研究方向: 动物生理生态; E-mail: jiangwenxiu2007@163.com。

收稿日期: 2008-11-08, 修回日期: 2009-04-03

热、生长、繁殖及其他活动的能量分配之间的平衡^[2]。能量分配模式决定了动物的能量收支以及生理适应机制^[3],是理解动物生存适应模式和进化途径的关键^[4]。

温度作为自然环境中最重要的影响因子之一,对动物的体重、能量摄入和产热等有显著的影响^[5]。寒冷是野生小型哺乳动物冬季经常遇到的环境压力,在长期进化过程中,各物种形成了适应于低温环境的生存对策:如有些动物在冬季来临之前,将体温调节到接近于环境温度、进入冬眠状态、降低代谢率,并减少能量消耗;而另一些动物则是通过增加代谢率和产热能力来弥补低温环境下的体热丢失,以维持恒定的体温^[6]。

姬鼠属(*Apodemus*)是分布于欧亚大陆温带最常见的小型啮齿动物,是研究生物地理分布特征和适应模式最好的材料之一。高山姬鼠(*A. chevrieri*)属于姬鼠属,起源于古北界,为我国特有种。分子地理学研究表明高山姬鼠是黑线姬鼠(*A. agrarius*)分化出来的一个近缘种^[7]。黑线姬鼠广泛分布于欧亚大陆,而高山姬鼠多分布于横断山及附近地区^[8],因此高山姬鼠在横断山独特的地理和气候条件下形成的能量适应策略,很可能代表了外来物种在此环境下形成的特殊的适应模式。国外对低温环境下动物能量对策的研究多关注北方哺乳动物,国内主要有长爪沙鼠(*Meriones unguiculatus*)^[9-12]、布氏田鼠(*Lasiopodomys brandtii*)^[13-15]等,这些研究均表明低温可导致许多小型哺乳动物生理生态特征发生变化。目前有关高山姬鼠生理生态特征的研究包括体温调节和产热特征^[16]、冷驯化能量收支^[17]、身体能值^[18]、冷驯化肝脏线粒体呼吸^[19]和蒸发失水^[20]。本实验在前人研究的基础上,综合研究冷驯化条件下高山姬鼠的能量收支、基础代谢率(basal metabolic rate, BMR)、非颤抖性产热能力(nonshivering thermogenesis, NST)特征,以了解该物种对横断山特殊环境的生存适应机理。

1 材料与方法

1.1 实验动物生存环境 实验动物于 2007 年

11 月捕自云南省剑川县石龙村海拔 2 590 m 的农田中。该地区位于云岭山脉的中部(属横断山),北纬 26°15' ~ 6°45',东经 99°40' ~ 99°55',境内玉龙雪山最高峰海拔 5 596 m,西部山区平均海拔高度在 3 000 m 以上,地势高差悬殊,山脉南北走向。年平均气温 9.1℃,1 月平均最低温度为 - 4.0℃,7 月平均最高温度为 24.1℃,低于同纬度平原地区,气温随海拔的增加而显著降低。该地区干湿季节分明,常冬无夏,表现出明显的温带季风气候特征。

1.2 实验动物处理 动物捕获后带回云南师范大学生命科学学院(昆明)动物实验室饲养,置于透明塑料笼内(26 cm × 16 cm × 15 cm)单只饲养,无巢材,自然光照。每日喂以浸泡过的玉米,食物和饮水自取,动物适应一周后开始正式实验。实验动物共 45 只(雄 25 只,雌 20 只),平均体重为(39.30 ± 1.18)g,实验动物随机分为对照组(0 d)和冷驯化组(7 d、14 d、21 d、28 d),每组 9 只。冷驯化条件是(5 ± 1)℃,光照条件为 12D 12L。实验动物均为非繁殖期成年个体。

1.2.1 能量收支测定 采用食物平衡法测定动物的能量收支^[21]。单只动物放入代谢笼内(20 cm × 15 cm × 15 cm),无巢材。适应一周后,分别于 0 d、7 d、14 d、21 d、28 d 测量能量收支。每次投喂食物前测量体重,精确到 0.01 g。用数字式体温计(北京师范大学司南仪器厂生产)插入直肠约 3 cm 测量动物的体温,每次测温探头在直肠内静置 45 s 左右读数(精确到 0.1℃)。投食次日手工仔细分离剩余食物和粪便,置于 65℃真空干燥箱干燥至恒重,称重(精确到 0.01 g)。测量体重和体温、投喂食物、收集剩余食物及粪便均在上午 10:00 ~ 11:00 时完成。相同冷驯化时间条件下,各指标连续测定 2 次。用全自动氧弹式热量计(YX-ZR/Q 型,长沙友欣仪器制造有限公司生产)测定热值,计算摄入能、消化能和可代谢能。随尿损失的能按消化能的 2% 计算,各参数分别用以下公式计算^[22]:

摄入能(kJ/d) = 摄入干物质量(g/d) × 食物

热值 (kJ/g)

粪便能 (kJ/d) = 粪便干重 (g/d) × 粪便热值 (kJ/g)

消化能 (kJ/d) = 摄入能 (kJ/d) - 粪便能 (kJ/d)

可代谢能 (kJ/d) = 消化能 (kJ/d) - 尿能 (kJ/d) = 消化能 (kJ/d) × 98 %

1.2.2 耗氧量的测定 耗氧量采用 Kalabukhov-Skvortsov 封闭式流体压力呼吸仪测定,呼吸室体积为 3.6 L,实验中产生的二氧化碳及水用氢氧化钠和硅胶吸收,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 (± 0.5)。耗氧量在 25 °C 下测定(此温度为高山姬鼠的热中性区^[16]),所有测定均在 10:00 ~ 18:00 时完成,所有气体体积均校正到标准状态下,即 0 和 1 个标准大气压。动物禁食 5 h 后,用铁丝笼固定放入呼吸室适应不少于 30 min,待动物稳定后开始实验。BMR 测定连续 60 min,每间隔 5 min 记录一次,选取连续稳定的两个最低值计算 BMR。在 25 °C 下,用注射去甲肾上腺素 (norepinephrine, NE) 诱导得到的最大耗氧量作为最大的 NST^[22]。在 BMR 测定结束后,皮下注射与动物体重相应的 NE,注射后 15 ~ 30 min 内出现的连续稳定的两个最大值计算最大 NST。NE 注射剂量的确定用浓度梯度法进行预备实验,最终确定 NE 较适注射剂量为 0.8 mg/kg 体重^[23]。每次代谢实验前后测定动物体重(精确到 0.1 g)和肛温,肛温用数字温度计(北京师范大学司南仪器厂生产)在直肠内 3 cm 处测定。

1.3 统计分析 采用 SPSS 13.0 软件包进行统计分析。相同冷驯化时间条件下,摄食量、摄入能、粪便能、消化能和可代谢能连续测定两次,对以上指标的影响采用重复测量方差分析 (repeated measures); 体温、体重、摄入能、粪便能、消化能和可代谢能与冷驯化时间的关系用 One-way ANOVA 分析和 Dunncan 多组比较。 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著,结果均以平均值 \pm 标准误 (Mean \pm SE) 表示。

2 结果

重复测量方差分析结果表明,相同冷驯化时间条件下,连续两次测定的摄入能 ($F_{(1,4)} = 2.28, P > 0.05$)、消化能 ($F_{(1,4)} = 1.90, P > 0.05$)、可代谢能 ($F_{(1,4)} = 0.90, P > 0.05$)、粪便能 ($F_{(1,4)} = 1.05, P > 0.05$) 差异均不显著,说明可以根据本实验设计测定高山姬鼠不同冷驯化时间的能量收支。

2.1 体重和体温的变化情况 随着冷驯化时间的增加,高山姬鼠的体重逐渐降低,体重降低量与对照组 (0 d) 比较差异极显著 (One-way ANOVA, $F_{(4,38)} = 4.136, P < 0.01$); 冷驯化 28 d 平均体重比对照组低 (6.35 ± 0.07) g ($n = 18$) (图 1)。在冷驯化时间内,高山姬鼠的体温先减小,在 21 d 达到最低,之后维持在一个相对平稳的状态;冷驯化组与对照组 (0 d) 比较,差异极显著 (One-way ANOVA, $F_{(4,38)} = 13.83, P < 0.01$), 驯化 28 d 平均体温比对照组低 (0.78 ± 0.06) ($n = 18$) (图 2)。

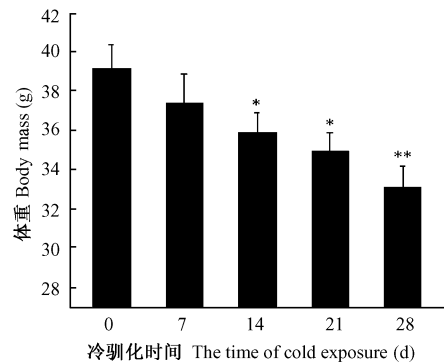


图 1 冷驯化中高山姬鼠的体重变化

Fig. 1 The change of body mass in *Apodemus chevrieri* during cold exposure

与 0 d 比较, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, compared with 0 day.

2.2 能量收支情况 用 One-way ANOVA 和 Dunncan 多组比较分别对高山姬鼠的摄入能、消化能、可代谢能和粪便能进行分析,结果显示,高山姬鼠的每日摄入能、每日消化能和每日可代谢能均随冷驯化时间的延长而增加,28 d

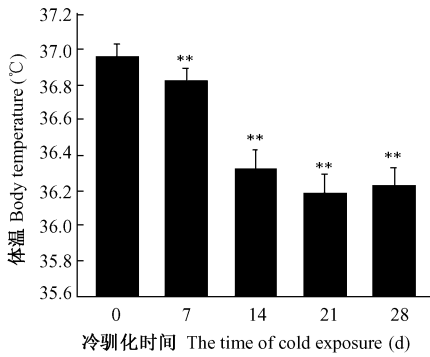


图2 冷驯化中高山姬鼠的体温变化

Fig. 2 The change of temperature in *Apodemus chevrieri* during cold exposure
与 0 d 比较 ** $P < 0.01$ 。
** $P < 0.01$, compared with 0 day.

时有一定的下降;冷驯化组与对照组(0 d)比较,每日摄入量差异极显著($F_{(4,38)} = 8.24, P < 0.01$),每日消化能差异极显著($F_{(4,38)} = 8.58, P < 0.01$),每日可代谢能差异极显著($F_{(4,38)} = 8.58, P < 0.01$);粪便能随冷驯化时间的增加差异不显著($F_{(4,38)} = 0.68, P > 0.05$)(图3)。

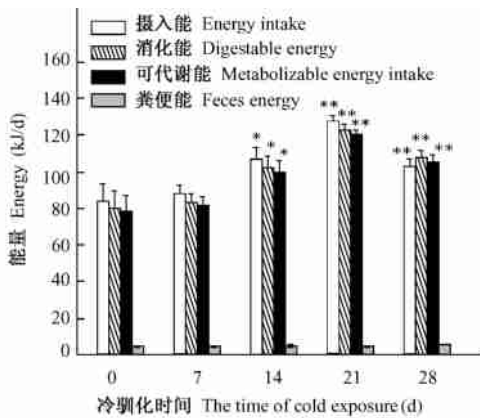


图3 冷驯化中高山姬鼠摄入量、消化能、可代谢能、粪便能变化

Fig. 3 Energy intake, digestible energy, metabolizable energy intake and feces energy in *Apodemus chevrieri* during cold exposure
与 0 d 比较, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。
* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, compared with 0 day.

2.3 产热特征

2.3.1 BMR 和 NST 的变化情况 随着冷驯化

时间的延长,高山姬鼠的 BMR 增加,速度逐渐变大,冷驯化 28 d 后达到最大,经 One-way ANOVA 分析显示,对照组与冷驯化组差异极显著($F_{(4,38)} = 30.16, P < 0.01$)(图4),驯化 28 d 组 BMR 是对照组的 187.19%。BMR 与冷驯化天数(D)之间的回归关系为: $BMR = 2.04 + 0.07D (R^2 = 0.79, P < 0.01, n = 45)$ 。高山姬鼠的 NST 与 BMR 的变化情况相似:随着冷驯化时间的增加 NST 稳步增大,冷驯化组与对照组差异极显著($F_{(4,38)} = 13.84, P < 0.01$)(图4),驯化 28 d 组是对照组的 155.97%。NST 与冷驯化时间(D)的回归关系为 $NST = 4.03 + 0.07D (R^2 = 0.64, P < 0.01, n = 45)$ 。

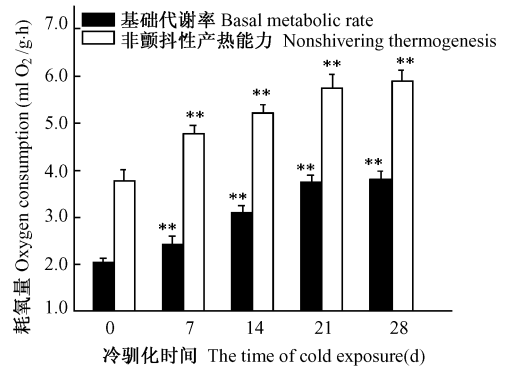


图4 冷驯化对高山姬鼠基础代谢率和非颤抖性产热的影响

Fig. 4 The change of cold exposure on basal metabolic rate (BMR) and nonshivering thermogenesis (NST) in *Apodemus chevrieri* during cold exposure
与 0 d 比较, ** $P < 0.01$ 。
** $P < 0.01$, compared with 0 day.

2.3.2 (NST - BMR)/BMR 的变化情况 随着冷驯化时间的延长,高山姬鼠的 (NST - BMR)/BMR 的比值 7 d 时增加到 1.02,随后下降,21 d 时降至最低 0.53,最后趋于稳定;经 One-way ANOVA 分析显示,与对照组比较(0 d),冷驯化 7 d 和 14 d 的 (NST - BMR)/BMR 差异均不显著($P > 0.05$),21 d 和 28 d 差异均显著($P < 0.01$)(图5)。

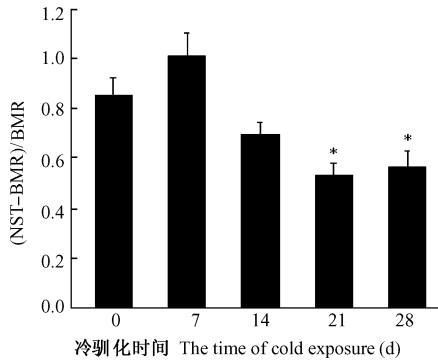


图5 冷驯化对高山姬鼠(NST-BMR)/BMR的影响

Fig. 5 The effects of cold exposure on (NST-BMR)/BMR of *Apodemus chevrieri* during cold exposure

与0 d比较, * $P < 0.05$ 。

* $P < 0.05$, compared with 0 day.

3 讨论

3.1 体重和体温 生活于温带地区的小型哺乳动物在严寒的冬季往往要面临许多环境因子的胁迫,主要包括由低温而导致的能量消耗(如产热)的增加和可利用食物资源(食物数量和质量)的相对减少^[24]。与之相适应,体重也表现出较强的可塑性^[11]。哺乳动物体重变化与其提高对冷环境的适应能力有关^[25]。在本实验中,高山姬鼠在冷驯化条件下体重明显降低,在第28 d时比对照组降低了(6.35 ± 0.07) g。其他一些小型啮齿动物在低温胁迫下体重也有类似的改变,如橙腹田鼠(*Microtus ochrogaster*)^[5]、草原田鼠(*M. pennsylvanic*)和林姬鼠(*A. sylvaticus*)^[26]。高山姬鼠生活的横断山属于典型的低纬度高海拔地区,当外界环境温度降低时,高山姬鼠体重的降低可能导致了总体代谢率和总能量的减低,减少了能量的消耗,从而增强生存能力。

低温对动物许多生理参数均有显著影响,体温也不例外。许多小型哺乳动物在冷胁迫下,体温有降低的现象,如北方小沙鼠(*Gerbillus campestris*)^[27]和大绒鼠(*Eothenomys miletus*)^[28]。本实验中,冷驯化后高山姬鼠的体温也显著降低,驯化21 d时体温降低了(0.78 ± 0.06),支持了王蓓^[17]先前的研究结果。高山姬鼠生活

于低纬度高海拔地区,白天太阳辐射强、温度高,夜间温度低,昼夜温差大,适当降低体温,对这些有较强穴居性、每天都要经历高温和低温两种胁迫的种类而言,有利于减少它们的热量散失、降低用于体温调节的能量。

3.2 冷驯化条件下高山姬鼠的能量收支 能量摄入、利用以及分配效率对小型哺乳动物的生存具有重要意义^[29]。低温是影响动物个体能量平衡的重要因子^[30],长期的低温胁迫,可导致动物个体的能量消耗达到极限,从而促使能量输入增加,食物利用效率及产热能力均增强^[31]。因此,在冷胁迫条件下,一些动物通过增加能量的摄入和动用体内储存的能量来补偿寒冷所致能量消耗的增加。我们对高山姬鼠的研究支持了这一观点。同时很多啮齿类动物也采用相同的策略,如布氏田鼠^[14]、拉布拉多白足鼠(*Peromyscus maniculatus*)、黑田鼠(*M. agrestis*)^[32]和中缅树鼯(*Tupaia belangeri*)^[33]。高山姬鼠主要分布于亚热带向温寒带过渡地区,并且多生活在农田边缘,即使在较寒冷的冬季食物资源也不十分匮乏。较稳定的环境,食物资源的可获得性,使高山姬鼠通过加大摄食量来补偿因低温引起的能量消耗的增加成为了可能。

3.3 冷驯化对高山姬鼠BMR的影响 基础代谢率是生理生态学中的重要指标,能反映不同物种和同物种不同个体之间的能量消耗水平,在动物适应环境的过程中具有重要的意义,它受温度、食物和动物活动性等多个因素的影响^[34]。低温导致动物体表热量的丢失,内温动物为维持恒定的体温,需增加产热,BMR的增加被认为是一种对冷胁迫的适应性调节^[35]。在我们的研究中,冷驯化28 d后高山姬鼠的BMR比对照组增加87.19%,这表明它通过提高BMR来适应低温环境。这种策略也被布氏田鼠(71%)^[13]、中缅树鼯(87.9%)^[36]和大绒鼠(73.7%)^[28]采用。在许多小型哺乳动物中BMR的变化也与季节有关,秋冬季比夏季高,如布氏田鼠高35%^[37]、长爪沙鼠高20.5%^[38]。不论是季节驯化还是室内驯化,BMR随季节或

室内温度的变化而变化的现象说明温度是影响 BMR 变化的一个重要因子。研究发现,BMR 的增加主要归因于摄食量的增加和由此引起的动物相关器官重量或长度的增加,特别是胃肠质量或长度的增加^[39]。

3.4 冷驯化对高山姬鼠 NST 的影响 非颤抖性产热(NST)是小型哺乳动物适应严寒有效而经济的产热方式,在小型哺乳动物抵抗低温胁迫、提高低温生存能力上具有重要的意义,寒冷已被认为是刺激 NST 的强有力因素^[40]。研究表明,NST 有季节性变化,秋冬季也比夏季高,如布什田鼠(69%)^[37]、长爪沙鼠(57.5%)^[38]、高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)(24.6%)^[41]、三趾跳鼠(*Dipus sagitta*)(82%)、子午沙鼠(*M. meridianus*)(27%)、小毛足鼠(*Phodopus roborovskii*)(61%)和黑线仓鼠(*Cricetulus barabensis*)(42%)^[42]。除此外,在冷暴露下许多小型啮齿动物的 NST 也显著增加,如布氏田鼠(63.8%)^[13]、中缅树鼯(69.7%)^[36]和大绒鼠(62%)、长爪沙鼠(67%)、达乌尔黄鼠(*Spermophilus dauricus*)(84%)和高原鼠兔(39%)^[43]。本实验中,冷驯化后高山姬鼠的 NST 比对照组增加了 55.97%,对于非冬眠的高山姬鼠来说,冬季气温降低、食物来源减少,提高 NST 可部分缓解体温调节过程中对能量的要求,减轻动物为获取高质量食物所带来的一系列生存压力,并能够使动物在低温环境中维持相对恒定的体温。

3.5 (NST - BMR)/BMR 的变化 小型哺乳动物中产热主要包括两大类,即专性产热和兼性产热,BMR 是专性产热,NST 是兼性产热^[44]。有学者提出南方种和北方种对寒冷的产热适应模式不同,南方种以增加 BMR 产热为主,而北方种以增加 NST 产热为主^[43]。在冷驯化 28 d 下,主要分布于热带和亚热带的中缅树鼯 NST 的作用小于 BMR (BMR 增加 68%,NST 增加 59%),相反,北方种布氏田鼠(34%,91%)和达乌尔黄鼠(12%,84%)以 NST 产热为主^[43]。在本研究中,横断山的高山姬鼠 BMR 增加 87.19%,NST 增加 55.79%;其(NST - BMR)/

BMR 的值先增加到 1.02 又降至 0.53,后维持在一个相对较平稳状态。这些表明冷胁迫初期,高山姬鼠以 NST 产热为主,但随冷驯化时间的延长,NST 对产热的贡献降低。高山姬鼠这种不同于中缅树鼯,也不同于布氏田鼠的产热方式,原因可能与姬鼠属的扩散途径和生态适应有关:姬鼠属在经历了向西迁移和对外辐射后^[45],高山姬鼠在横断山及其附近地区栖居下来,在横断山独特的气候条件下,高山姬鼠可能已形成独特的能量适应对策。布氏田鼠和高山姬鼠同属于北方起源种,所以在冷暴露初期均以 NST 产热为主,但北方种布氏田鼠的生活环境需长时间面对低温,大量 NST 产热能长期有效地维持体温;而高山姬鼠生活的横断山年温差较小,在生存竞争中主要面对的是昼夜温差的巨大变化,所以适当提高 BMR 的产热作用可能更有利于生存适应。尽管动物提高 BMR 的代价是昂贵的,但横断山相对宽泛的食物资源和非强烈的季节变化,高山姬鼠可能通过增加食物的摄入来维持能量收支的相对平衡。

4 结 论

在持续冷暴露下,横断山的外来物种高山姬鼠采取了一系列的能量策略来维持代谢水平的恒定:适当降低体重,可节约用于体温调节的能量;放宽体温的调节范围,减小身体与环境间的温度梯度,减少散热;增加 BMR 和 NST 产热,维持相对较恒定的体温。高山姬鼠主要生活于农田边缘,食物资源相对丰富,即使在较寒冷的冬季,食物资源也不十分匮乏,因此,在一定范围内增加能量摄入,可有效补偿用于产热和维持自身生理活动而增加的能量消耗。除此外,在横断山年平均气温较低的气候条件下,增大 NST 产热是一种有效的维持体温恒定的方式;但横断山区的另一个气候特征是年温差小、昼夜温差较大,所以高山姬鼠适当提高基础代谢率可能更有利于体温的调节和维持正常的身体机能活动。因此,古北界物种——高山姬鼠为了适应横断山独特的气候特征,形成了上述与典型的北方小型啮齿动物既相似又不同的

能量适应策略,这种能量适应模式也可能存在于横断山区其他外来小型啮齿动物中。

参 考 文 献

- [1] Bozinovic F, Rosenmann M. Maximum metabolic rates of rodents: physiological and ecological consequences on distribution limits. *Functional Ecology*, 1989, **3**: 173 ~ 181.
- [2] Karasov W H. Energetic, physiology and vertebrate ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 1986, **1**: 101 ~ 104.
- [3] McNab B K. Energy expenditure and conservation in frugivorous and mixed diet carnivorans. *Journal of Mammalogy*, 1995, **76**(1): 206 ~ 222.
- [4] Godzinski W, Wunder A. Ecological energetics of small mammals. In: Colley F B, Petruszewicz K, Ryszkowski L eds. *Small Mammals: Their Productivity and Population Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1975, 173 ~ 204.
- [5] Voltura M B, Wunder B A. Effects of ambient temperature, diet quality, and food restriction on body composition dynamics of the prairie vole *Microtus ochrogaster*. *Physiological Zoology*, 1998, **71**(3): 321 ~ 328.
- [6] 李庆芬,刘小团,黄晨西等.长爪沙鼠冷驯化过程中褐色脂肪组织产热特性及解偶联蛋白基因表达. *动物学报*, 2001, **47**(4): 388 ~ 393.
- [7] Suzuki H, Filippucci M, Chelomina G N, et al. A biogeographic view of *Apodemus* in Asia and Europe inferred from nuclear and mitochondrial gene sequences. *Biochemical Genetics*, 2008, **46**: 329 ~ 346.
- [8] 方喜业编著.中国鼠疫自然疫源地.北京:人民卫生出版社,1990,238.
- [9] 刘小团,李庆芬,黄晨西等.长爪沙鼠冷驯化过程中甲状腺激素的变化. *兽类学报*, 2001, **21**(2): 132 ~ 136.
- [10] 杨明,李庆芬,黄晨西.冷暴露长爪沙鼠下丘脑-垂体-肾上腺轴对产热的调节. *动物学报*, 2003, **49**(5): 571 ~ 577.
- [11] 李兴升,王德华,杨明.冷驯化条件下长爪沙鼠血清瘦素浓度的变化及其与能量收支和产热的关系. *动物学报*, 2004, **50**(3): 334 ~ 340.
- [12] 张志强,刘全生,李纪元等.长爪沙鼠褐色脂肪组织和肝脏产热特征的季节性变化. *动物学报*, 2006, **52**(6): 1 034 ~ 1 041.
- [13] Liu J S, Yang M, Sun R Y, et al. Adaptive thermogenesis in Brandt's vole (*Lasiopodomys brandtii*) during cold and warm acclimation. *Journal of Thermal Biology*, 2009, **34**: 60 ~ 69.
- [14] Zhang X Y, Wang D H. Energy metabolism, thermogenesis and body mass regulation in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*) during cold acclimation and rewarming. *Hormone and Behavior*, 2006, **50**(1): 61 ~ 69.
- [15] Zhang X Y, Wang D H. Thermogenesis, food intake and serum leptin in cold-exposed lactating Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*). *The Journal of Experimental Biology*, 2007, **210**: 512 ~ 521.
- [16] 王海,杨晓密,刘春燕等.大绒鼠和高山姬鼠的体温调节和产热特征. *兽类学报*, 2006, **26**(2): 44 ~ 51.
- [17] 王蓓,徐伟江,姜文秀等.高山姬鼠冷驯化过程中的能量收支. *兽类学报*, 2007, **27**(4): 395 ~ 402.
- [18] 王蓓,刘春燕,练硝等.横断山区高山姬鼠身体能值的适应性调. *动物学杂志*, 2008, **43**(5): 139 ~ 143.
- [19] 朱万龙,王海,贾婷等.冷驯化对大绒鼠和高山姬鼠肝脏线粒体呼吸的影响. *四川动物*, 2008, **27**(3): 371 ~ 377.
- [20] Zhu W L, Yang Y H, Jia T, et al. Evaporative water loss and energy metabolic in two small mammals, voles (*Eothenomys miletus*) and mice (*Apodemus chevri*), in Hengduan mountains region. *Journal of Thermal Biology*, 2008, **33**: 324 ~ 331.
- [21] Rosenmann M, Morrison P. Maximum oxygen consumption and heat loss facilitation in small homeotherms by H_2O_2 . *American Journal of Physiology*, 1974, **226**: 490 ~ 495.
- [22] Drozd A. Metabolic cages for small rodents. In: Godzinski W, Klekowski R Z, Duncan A eds. *Methods for Ecological Bioenergetics*. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1975, 346 ~ 351.
- [23] 李庆芬,李宁,孙儒泳.布氏田鼠对低温的适应性产热. *兽类学报*, 1994, **14**(4): 286 ~ 293.
- [24] Bing C, Frankish H M, Pickavance L, et al. Hyperphagia in cold exposed rats is accompanied by decreased plasma leptin but unchanged hypothalamic NPY. *American Journal of Physiology*, 1998, **274**: 62 ~ 68.
- [25] Swanson D L. Are summit metabolism and thermogenic endurance correlated in winter-acclimatized passerine birds? *Journal of Comparative Physiology*, 2001, **171**: 475 ~ 481.
- [26] Corp N, Gorman M L, Speakman J R. Daily energy expenditure of free living male wood mice in different habitats and seasons. *Functional Ecology*, 1999, **13**(5): 1 365 ~ 2 435.
- [27] Oufara S H, Barre J L, Rouanet C J. Adaptation to extreme ambient temperatures in cold acclimated gerbils and mice. *American Journal of Physiology*, 1987, **253**: 39 ~ 45.
- [28] 朱万龙,贾婷,李宗翰等.冷驯化条件下大绒鼠的产热特征和能量代谢. *动物学报*, 2008, **54**(4): 590 ~ 601.
- [29] Townsend C R. Bioenergetics: linking ecology, biochemistry and evolutionary theory. *Trends in Ecology and Evolution*, 1987, **2**: 3 ~ 4.
- [30] Koteja P, Krol E, Stalinski J. Maximum cold and lactation induced rate of energy assimilation in *Acomys cahirinus*.

- Polish Ecological Studies*, 1994, **20**: 369 ~ 374.
- [31] Kotejia P. Limits to the energy budget in a rodent, *Peromyscus maniculatus*: The central limitation hypothesis. *Physiological Zoology*, 1996, **69**: 981 ~ 993.
- [32] Abelenda M, Ledesma A, Bial E, et al. Leptin administration to cold acclimated rats reduce both food intake and brown adipose tissue thermogenesis. *Journal of Thermal Biology*, 2003, **28**: 525 ~ 530.
- [33] 张武先,王政昆,徐伟江等.冷驯化对中缅树鼯能量代谢的影响. *兽类学报*, 2002, **22**(2): 123 ~ 129.
- [34] Terblanche J S, Janion C, Chown S L. Variation in scorpion metabolic rate and rate-temperature relation: implications for the fundamental equation of the metabolic theory of ecology. *Journal of Evolutionary Biology*, 2007, **20**: 1 602 ~ 1 612.
- [35] Lovegrove B G. The influence of climate on the basal metabolic rate of small mammals: a slow-fast metabolic continuum. *Journal of Comparative Physiology*, 2003, **173**: 87 ~ 112.
- [36] 张武先,王政昆,念永坤等.冷驯化对中缅树鼯产热能力的影响. *动物学研究*, 2001, **22**(4): 287 ~ 291.
- [37] Li X S, Wang D H. Regulation of body weight and thermogenesis in seasonally acclimatized Brandt 's voles (*Microtus brandti*). *Hormones and Behaviour*, 2005, **48**: 321 ~ 328.
- [38] Li X S, Wang D H. Seasonal adjustments in body mass and thermogenesis in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*): the roles of short photoperiod and cold. *Journal of Comparative Physiology*, 2005, **175**: 593 ~ 600.
- [39] Speakman J R, Johnson M S. Relationships between resting metabolic rate and morphology in lactating mice: what tissues are the major contributors to resting metabolism? In: Heldmaier G, Klingenspor M eds. *Life in the Cold*. Berlin: Springer-Verlag Press, 2000, 497 ~ 486.
- [40] Jansky L. Nonshivering thermogenesis and its thermoregulatory significance. *Biological Reviews*, 1973, **48**: 85 ~ 132.
- [41] Wang J M, Zhang Y M, Wang D H. Seasonal thermogenesis and body mass regulation in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*). *Oecologia*, 2006, **149**: 373 ~ 382.
- [42] 鲍伟东,王德华,王祖望等.内蒙古库布齐沙地四种啮齿动物非颤抖性产热的季节变化. *兽类学报*, 2001, **21**(2): 101 ~ 106.
- [43] Li Q F, Sun R Y, Huang C X, et al. Cold adaptive thermogenesis in small mammals from different geographical zones of China. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2001, **129**: 949 ~ 961.
- [44] Himms-Hagen J. Brown adipose tissue thermogenesis: role in thermoregulation, energy regulation and obesity. In: Schonbaum E, Lomax P eds. *Thermoregulation: Physiology and Biochemistry*. New York: Pergamon Press, 1990, 327 ~ 414.
- [45] Suzuki H, Sato J J, Tsuchiya K, et al. Molecular phylogeny of wood mice (*Apodemus*, Muridae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 2003, **80**: 469 ~ 481.

欢迎订阅《动物学杂志》

《动物学杂志》是中国科学院动物研究所、中国动物学会主办的科技期刊,亦是中國自然科学核心期刊。主要报道动物学领域的最新研究成果,介绍有创见的新思想、新学说、新技术、新方法。报道范围既有宏观生态研究,又有微观实验技术。报道层次既有科学前沿性、资料性的,也有技术性、知识性的。稿件内容涉及范围广,实用性强,主要栏目有:研究报告、珍稀濒危动物、技术与方法、研究简报和快讯、科技动态等等。读者对象为动物科学领域的研究、教学、技术、管理人员及广大业余爱好者。

近年,《动物学杂志》各项统计指标有了很大的提高,是国内各大数据库及国外著名数据库英国《动物学记录》、美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》收录的源期刊。

《动物学杂志》双月刊,16开,112页,2009年每册定价35元,全年210元,国内外公开发行。国内邮发代号:2-422;国外发行代号(Code No.):BM58。全国各地邮局均可订阅。如未能在当地邮局订到,可与编辑部直接联系。本刊对在校学生及个人订户7折优惠(直接与编辑部联系订阅)。

地址:北京市朝阳区北辰西路1号院5号中国科学院动物研究所内《动物学杂志》编辑部

邮编:100101;电话:(010)64807162;

E-mail: journal@ioz.ac.cn。网址:bird.chinajournal.net.cn; dwxzz.ioz.ac.cn。

欢迎投稿、欢迎订阅、欢迎刊登广告。