

温度对黑线仓鼠能量代谢及开场行为的影响

徐金会 王 硕 薛慧良 徐来祥*

曲阜师范大学生命科学院 曲阜 273165

摘要: 形态、生理及行为的季节性变化是动物生存和繁殖的适应性策略。温度可能是影响啮齿动物季节性繁殖和种群波动的重要气候因子。为了验证环境温度能诱导鼠类体重、能量代谢及行为产生适应性变化的假设,并探究其中的相互关系和意义,通过不同温度处理模拟四季温度,以野生雄性黑线仓鼠(*Cricetulus barabensis*)为研究对象,检测其体重、日食量、静止代谢率(RMR)及开场行为的变化。结果显示:随着处理温度的下降,黑线仓鼠的体重、日食量及静止代谢率均出现显著性或极显著性地增加趋势($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);以体重为协变量的协方差分析表明,日食量和静止代谢率的增加不完全是由体重增加而造成的;高温处理降低了黑线仓鼠的爬行格数($P < 0.01$),低温处理降低了黑线仓鼠的爬行格数和后肢站立次数($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$),并产生明显的颤抖现象。以上研究结果支持环境温度能诱导鼠类体重、能量代谢及行为产生适应性变化的假设。低温同时增加黑线仓鼠能量的摄入水平和维持基本生长的能量支出水平,同时降低动物在陌生环境中的自发活动与探索行为。高温则降低黑线仓鼠能量的摄入和支出水平,同时减少自发活动与探索行为。体重、能量代谢和行为学特征的变化有利于仓鼠度过寒冷的冬季和干热的夏季,同时也与仓鼠的季节性繁殖现象相一致,因此这些特征可能是黑线仓鼠对其寒冷的冬季及干热的夏季生存环境的适应。

关键词: 黑线仓鼠; 温度; 日食量; 静止代谢率; 开场行为

中图分类号: Q955, Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2014)02-154-08

Influence of Temperature on the Energy Metabolism and Open Field Behavior of *Cricetulus barabensis*

XU Jin-Hui WANG Shuo XUE Hui-Liang XU Lai-Xiang*

College of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China

Abstract: Seasonal changes in physiology and behavior are an adaptive strategy for survival and reproduction in small rodents experiencing marked seasonal fluctuation in environmental temperatures, which is also thought to be an important factor driving rodents' seasonal breeding and population fluctuation. The present study is to test the hypothesis whether ambient temperature is a cue to induce adjustments in body mass, energy metabolism and behaviors in rodents. Here, we measured body mass, daily intake, resting metabolic rate (RMR) and open field behavior under different ambient temperature ($5.3 \pm 2.0^\circ\text{C}$, $14.7 \pm 2.0^\circ\text{C}$ and $28.4 \pm 2.0^\circ\text{C}$) in wild male striped hamsters (*Cricetulus barabensis*). Differences in body mass and open field index (total transition, rearing, duration in central area, fecal particles) among low, medium and high temperature groups were examined by one-way ANOVA, followed by least significant difference (LSD) *post hoc* tests. Comparisons

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 31270417)和曲阜师范大学“十二五”计划省级重点建设项目;

* 通讯作者, E-mail: xulx@mail.qfnu.edu.cn;

第一作者介绍 徐金会,男,副教授;研究方向:动物比较生理学与分子生态学; E-mail: xujinhui@mail.qfnu.edu.cn。

收稿日期: 2013-08-27, 修回日期: 2013-11-12

of body mass before and after treatment were analyzed using paired-samples *t*-test. Effects of temperature on daily intake and RMR were examined using analysis of covariance (ANCOVA) with body mass as a covariate. The results showed that: ① Low temperature and medium temperature significantly increased body mass from 27.059 ± 0.217 g to 28.056 ± 0.184 g ($t_{11} = -6.291$, $P < 0.05$) and 26.292 ± 0.339 g to 27.113 ± 0.341 g ($t_{11} = -8.027$, $P < 0.05$), respectively, while high temperature had no significant effect ($t_{11} = 1.796$, $P > 0.05$). ② Temperature treatment had a significant effect on daily intake and RMR. Daily intake in low, medium and high temperature group was 3.122 ± 0.094 g, 2.447 ± 0.087 g and 1.948 ± 0.090 g, respectively, and difference between groups was significant ($F_{2,32} = 36.576$, $P < 0.001$). RMR was 4.104 ± 0.086 ml/(g · h), 3.638 ± 0.079 ml/(g · h) and 3.006 ± 0.082 ml/(g · h), respectively. RMR was significantly increased in low temperature group ($F_{2,32} = 39.233$, $P < 0.001$). ③ Different temperature caused a different effect on the open field behavior of striped hamsters. Total transition of low, medium and high temperature group was 158 ± 6 , 187 ± 5 and 103 ± 3 respectively, total transition in medium group was significant increased compared to high and low temperature group. Rearing was 78 ± 4 , 91 ± 5 and 97 ± 5 respectively, rearing in low temperature group was also extremely significant decreased compared to medium and high group ($F_{2,32} = 4.233$, $P < 0.05$). While the difference of duration in central area and fecal between the groups were not significant. Moreover, striped hamsters in low temperature had obvious shaking behavior. Together, these data support our hypothesis that ambient temperature is a cue to induce adjustments in body mass, energy metabolism and behavior in hamsters. Low temperature increased energy intake and energy expenditure which sustains the basic growth in striped hamsters. Meanwhile, spontaneous activity and exploring behavior in unfamiliar environment reduce in low temperature, thus reduce energy consumption and heat loss. On the contrary, the striped hamsters reduce the energy intake and expenditure in high temperature, which decrease the cost of thermoregulation. The spontaneous activity and exploring behavior also reduce, which may reduce the heat generated by the muscle contraction. These energy metabolism and behavior properties benefit to the survival of hamsters in cold winters and hot, dry summer, also it is consistent with the seasonal breeding of hamsters. So, these properties in striped hamsters may closely relate to their living habits, characterized by a cold winter and hot, dry summer.

Key words: Striped hamster (*Cricetulus barabensis*); Temperature; Daily intake; Resting metabolism rate; Open field behavior

季节性生长繁殖是温带地区的动物对季节变化作出的适应性反应,是动物对生存和生殖的适应策略,其变化包括形态、生理和行为等多方面(Zhu et al. 2012)。环境因素在调节动物的生理和行为中起重要作用(Zhang et al. 2006),温度是影响物种分布的关键因子之一。温度对动物的影响也体现在形态、生理和行为等多方面,因此环境温度在一定程度上决定了特定的物种分布(马瑞俊等 2005)。相关研究涉及到动物的摄食量和体重(Ebling et al. 2008, Taylor et al. 2013)、能量代谢(Chen et al. 2012, Gangwisch 2013)、行为(Yaskin

2011)、免疫(Kusumoto et al. 2007)等多个方面。比如,对布氏田鼠(*Lasiopodomys brandtii*)的研究证实,环境温度是诱导体重和代谢变化的重要因素(Zhang et al. 2006)。黑线仓鼠(*Cricetulus barabensis*)的代谢率在冬季高于夏季,其热中性区也是冬季宽于夏季(Zhao et al. 2010b),这些生态生理特征与其寒冷的冬季及干热的夏季生境有关。黑线仓鼠在冬季有更高的静止代谢率(resting metabolism rate, RMR)和非颤抖性产热能力(nonshivering thermogenesis, NST),加上更厚重的皮毛减少热量散失,从而增加其对季节性温度变化的适

应 (Zhao et al. 2010a)。

动物的形态、生理和行为是相互关联的,同时存在物种和生境之间的差异。比如体重是影响代谢率的重要因素 (宋志刚等 2002),基础代谢率 (basal metabolic rate, BMR) 的大多数差别可以用体重的变异来解释 (McNab 1992)。一般认为,小型啮齿动物体重的季节性变化表现在夏季或秋季较高而冬春季较低。体重的增加主要是由于摄食量的增加所导致,因而受到食性和生境的影响,而体重下降的主要原因是体脂含量的下降,但在不同的研究中存在物种间的差异。例如,高山姬鼠 (*Apodemus chevrieri*) 夏季体重最高,冬季体重最低,冬季 BMR 下降伴随着能量摄入的增加、NST 和解耦联蛋白 1 (uncoupling proteins 1, UCP1) 增加、体脂含量的减少,说明其不依赖增加基础代谢而是通过增加适应性产热能力来应对冷应激 (Zhu et al. 2012)。黑线毛足鼠 (*Phodopus sungorus*) 则在秋季表现出摄食量、体重、体脂含量的下降 (Braulke et al. 2010)。动物行为是动物对环境和生理功能的适应,行为有时缓解生理变异,有时则是变异的起因 (约翰·斯派塞等 2007)。开场实验可以评价实验动物在新异环境中自主行为、探究行为与紧张度,为动物的生理功能提供行为学解释。

黑线仓鼠是我国华北农田的优势害鼠之一。我国华北地区季节交替明显,多种环境因子随季节发生改变,气温变化尤其明显,黑线仓鼠也是典型的季节性繁殖动物 (朱盛侃等 1991, 鲍伟东等 2001)。在农田生态系统中,黑线仓鼠具有出生率高,寿命短等特点,在哺乳动物中属于典型的“r-对策”者,更容易受到周围环境的影响,其体形小、相对体表面积大,加之较高的代谢率、较高的体温和热传导率、较窄的热中性区、中等的非颤抖性产热能力 (Song et al. 2003, Liu et al. 2004),使其对温度变化较为敏感,是研究环境温度影响动物形态、生理、行为及分布的适宜实验用动物。

本研究为了验证环境温度能诱导黑线仓鼠体重、能量代谢及行为产生适应性变化的假设。

通过不同温度处理模拟四季温度,以雄性黑线仓鼠为研究对象,检测动物体重、日食量、RMR 及开场行为的变化,初步分析体重变化与生理和行为的关联性,以探究黑线仓鼠对季节性温度变化的适应对策。在全球气候变暖的背景下,不同地区温度升高并不均衡,这即增加了生境的异质性 (Moisselin et al. 2002),也为预测动物的季节性生长繁殖增加了不确定因素。因此,进一步阐明不同地域不同动物的季节性变化,以及环境温度在此过程中的作用具有较高的科学意义。本研究在前人对温度影响鼠类体重和能量代谢研究基础上,引入行为学指标分析,研究结果将为探究温度影响黑线仓鼠季节性生长繁殖的机制奠定基础,同时也为农田害鼠的综合防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 动物采样 实验所用野生黑线仓鼠于 2011 年 11 月上旬以铁笼活捕法捕捉于山东省临沂市沂南县蒲汪镇的农田中 (35°31'03.09"N, 118°39'08.33"E)。该地区属于温带大陆性季风气候,四季分明,气温随季节变化明显。捕获个体驯养于曲阜师范大学生命科学学院动物饲养房,PE 塑料饲养盒单个饲养,饲喂复合鼠饲料块,自由饮水,自然光照,适应 30 d 后用于分组实验。

1.2 动物分组与温度处理 选取体重相近的雄性成年黑线仓鼠共计 36 只,平均体重 (26.78 ± 1.15) g,随机分为 3 组,每组 12 只。根据山东省近 20 年的气象资料,综合考虑黑线仓鼠的耐受力等因素,分别将 3 组仓鼠饲养于模拟冬季气温 (5.3 ± 2.0) °C、春秋季节气温 (14.7 ± 2.0) °C 和夏季气温 (28.4 ± 2.0) °C 的环境中,并分别将其定义为低温组、中温组 and 高温组。饲养房温度以管道供暖和空调结合来实现,温度处理持续 15 d,自然光照。

1.3 体重与能量代谢的检测 温度处理前后将动物放置小铁丝笼内,待其安静后测量动物体重。两周温度处理的最后 3 d,仍以复合鼠饲料块为食物,按照常规方法 (宛新荣等

2007)测定黑线仓鼠的日食量,以衡量其能量摄入水平。RMR 可以反映动物能量支出情况(Zhao 2011),以每小时每克体重耗氧毫升数 $[\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{h})]$ 表示,耗氧量的测量采用封闭式流体压力呼吸仪,水浴 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 控制呼吸室温度在热中性区内,测定时间在 9:00 ~ 12:00 时,以控制代谢节律的影响,具体方法参照徐金会等(2003)进行。

1.4 开场行为的测定 参照王维刚等(2011)方法进行。开场实验箱为 50 cm × 50 cm × 40 cm 的黑色箱,底部画有虚拟的 16 个小正方形,分成沿侧壁的外周格(12 个小方格),其余的中央格(4 个小正方形),正上空有视频录像系统。行为视频记录时间在 20:00 ~ 22:00 时,红光条件下,使用摄像机的夜摄功能视频记录小鼠 20 min 内的爬行格数(3 只爪均进入的方格数,为水平运动得分)、后肢站立次数(包括前肢扶壁和悬空次数,为垂直得分)、在中央格停留的总时间、粪便颗粒数,并观察动物是否出现颤抖现象。实验结束后用毛巾蘸取低浓度酒精擦拭箱底,等待其挥发消散,避免留有气味影响其他动物的实验结果。视频录像经 JWatcher™ 软件和人工分析进行统计。

1.5 数据分析 数据处理采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 多重比较 t -检验;各组内温度处理前后体重的比较采用配对样本 t -检验。为消除体重差异的影响,以体重作协变量,对日食量和 RMR 进行单因素协方差分析(one-way ANCOVA)。所有统计分析借助 SPSS18.0 统计软件包完成,数据正态性和方差齐性分别用 Kolmogorov-Smirnov 和 Levene 检验。文内数据以平均值 ± 标准误 (Mean ± SE)

表示。 $P < 0.05$ 即认为有统计学差异, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结 果

2.1 体重与能量代谢的变化 温度处理对黑线仓鼠体重的影响见表 1。单因素方差分析表明,温度处理对动物体重产生了不同影响。处理前各组动物体重无差异,而处理后 3 组动物体重出现了显著性差异,低温组体重显著高于其他两组($F_{2,32} = 4.898, P < 0.05$)。对温度处理前后动物体重的配对样本 t -检验显示,低温和中温处理使体重显著性地增加($t_{11} = -6.291, P < 0.05$; $t_{11} = -8.027, P < 0.05$),而高温处理对动物体重影响不显著($t_{11} = 1.796, P > 0.05$)。

鉴于温度处理对动物体重产生了显著性影响,为消除体重差异对实验结果的影响,以体重作协变量,对日食量和静止代谢率(RMR)两个指标进行单因素协方差分析(表 2)。将各组动物体重调整到 27.32 g 后,各组动物的日食量和 RMR 表现出组间的极显著性差异(日食量: $F_{2,32} = 36.576, P < 0.001$; RMR: $F_{2,32} = 39.233, P < 0.001$),说明这种差异不完全是由体重差异造成的。综上所述,随着处理温度的下降,黑线仓鼠的体重、日食量和 RMR 均出现显著性地增加趋势。

2.2 开场行为的变化 温度处理对黑线仓鼠开场行为的影响结果见表 3。

温度处理对黑线仓鼠开场行为各参数也产生了不同的影响:黑线仓鼠爬行格数存在极显著的组间差异($F_{2,32} = 80.334, P < 0.01$),表现为中温组 > 低温组 > 高温组;黑线仓鼠后肢

表 1 温度处理对黑线仓鼠体重的影响

Table 1 Effect of temperature treat on body mass of *Cricetulus barabensis*

项目 Item	低温组 Low temperature	中温组 Medium temperature	高温组 High temperature	P 值 P value
处理前体重 Pre body mass (g)	27.059 ± 0.217 ^a	26.292 ± 0.339 ^a	27.008 ± 0.397 ^a	0.193
处理后体重 After body mass (g)	28.056 ± 0.184 ^b	27.113 ± 0.341 ^c	26.792 ± 0.338 ^{ac}	0.014

平均数有不同上标字母者表示显著性差异(t -检验, $P < 0.05$)。

Means sharing the different superscript letters indicate a significant difference (t -test, $P < 0.05$).

表 2 温度处理对黑线仓鼠的日食量和静止代谢率的影响

Table 2 Effect of temperature treat on daily intake and resting metabolism rate of *Cricetulus barabensis*

项目 Item	低温组 Low temperature	中温组 Medium temperature	高温组 High temperature	P 值 P value
日食量 Daily intake (g)	3.122 ± 0.094 ^A	2.447 ± 0.087 ^B	1.948 ± 0.090 ^C	0.000
静止代谢率 [ml/(g·h)] Resting metabolism rate	4.104 ± 0.086 ^A	3.638 ± 0.079 ^B	3.006 ± 0.082 ^C	0.000

每行平均数有不同上标字母者表示显著性差异 (t -检验, $P < 0.05$), 上标大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。调整体重为 27.32 g。

Within each row, means sharing the different superscript letters indicate a significant difference (t -test, $P < 0.05$). Values with different capital letter superscripts means extremely significant difference ($P < 0.01$). The adjusted body mass is 27.32 g.

表 3 温度处理对黑线仓鼠开场行为的影响

Table 3 Effect of temperature treat on open field behavior of *Cricetulus barabensis*

项目 Item	低温组 Low temperature	中温组 Medium temperature	高温组 High temperature	P 值 P value
爬行格数 Total transition	158 ± 6 ^A	187 ± 5 ^B	103 ± 3 ^C	0.000
后肢站立次数 Rearing	78 ± 4 ^a	91 ± 5 ^b	97 ± 5 ^b	0.023
中央格停留时间 Duration in central area (s)	27 ± 3	35 ± 3	33 ± 3	0.256
粪便颗粒数 Fecal particles	6 ± 2	8 ± 4	6 ± 3	0.339
颤抖 Shiver	有 YES	无 NO	无 NO	

每行平均数有不同上标字母者表示显著性差异 (t -检验, $P < 0.05$), 上标小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 上标大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Within each row, means sharing the different superscript letters indicate a significant difference (t -test, $P < 0.05$). Values with different lowercase superscripts means significant difference ($P < 0.05$), while different capital letter superscripts means extremely significant difference ($P < 0.01$).

站立次数表现出低温组显著低于中温组和高温组 ($F_{2,32} = 4.233$, $P < 0.05$); 中央格停留时间虽然低温组 > 高温组 > 中温组, 但差异未达显著性水平 ($F_{2,32} = 1.419$, $P > 0.05$); 粪便颗粒数也无组间差异 ($F_{2,32} = 1.118$, $P > 0.05$)。实验还观察到低温组黑线仓鼠有明显的颤抖现象。

3 讨论

对黑线仓鼠的体重监测显示, 低温组体重显著性增加, 中温组体重平稳小幅上升, 而高温组体重略有下降。上述变化不同于对长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) 及布氏田鼠的研究 (Li et al. 2005, 张志强等 2007)。除了鼠种间

本身可能存在差异之外, 对长爪沙鼠和布氏田鼠的研究还包含了光周期的变化, 且对实验用鼠的处理温度、处理时间有差异, 这些因素都有可能影响动物的体重变化。低温处理使黑线仓鼠体重显著性地增加, 这与一般小型啮齿动物冬季体重较低的研究结果并不一致。其中的主要原因应该是食物因素。在自然条件下, 动物冬季食物资源一般是匮乏的 (Huitu et al. 2003, Korslund et al. 2006, 刘伟等 2009), 为了抵御低温, 除了摄食之外, 动物主要通过分解身体内的脂肪来满足代谢需求并维持体温恒定, 分解代谢大于合成代谢, 因而体脂含量的下降使体重降低。而在实验条件下, 由于食物资源充足, 黑线仓鼠可以通过日食量的增加来

满足低温时能量代谢的增加,其合成代谢大于分解代谢,因此体重增加。实验解剖时的初步观察也发现,低温组黑线仓鼠皮下脂肪较其他两组明显偏多,也可以印证此结论。

日食量可基本代表能量摄入水平,研究结果体现出黑线仓鼠对能量的需求情况,即低温组能量需求较多,中温组次之,高温组能量需求相对较少。值得注意的是,本研究检测的黑线仓鼠日进食量较以往的研究略少,其主要原因可能是食物的不同,本研究所使用的饲料为标准复合鼠饲料(热值 18 kJ/g)不同于以往研究使用的草籽等饲料(侯希贤等 1989)。

RMR 反映动物能量支出情况。低温组和高温组黑线仓鼠 RMR 分别为 (4.139 ± 0.067) ml/(g · h) 和 (2.980 ± 0.072) ml/(g · h), 与研究者为冬季 $[3.89 \pm 0.13 \text{ ml}/(\text{g} \cdot \text{h})]$ 和夏季 $[2.58 \pm 0.07 \text{ ml}/(\text{g} \cdot \text{h})]$ 黑线仓鼠的研究结果相近(Zhao et al. 2010b)。黑线仓鼠 RMR 表现出低温组 > 中温组 > 高温组的趋势,这与已有的研究结果相似(杨明等 2009)。低温组高代谢水平有利于维持体温和脏器的功能,中温组和高温组的低代谢水平说明用于维持体能的能量减少,其余的能量可用于生长发育过程中机体的构建或用于贮存。至于低温使 RMR 增加的原因是否与褐色脂肪组织的线粒体细胞色素氧化酶活性急剧增加(王德华等 1996)有关,尚待进一步研究确定。另外,本研究检测不同温度时的 RMR 远低于按文献提出的 BMR 与温度 (T_a) 的回归方程 $\text{BMR} [\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{h})] = 9.60 - 0.22 T_a (\text{°C})$ (柳劲松等 2003) 的计算值,尤其是在偏离热中性区时,其原因可能与动物地理分布导致的生理变异有关。

开场实验是一个研究动物在新异环境中自发活动与探索行为的实验。爬行格数反映了动物的运动行为和兴奋性,温度处理使黑线仓鼠爬行格数产生极显著的组间差异,高温组爬行格数显著低于其他两组,其生理意义可能是减少产热;低温组爬行格数虽然低于中温组,但低温组黑线仓鼠一般在 10 ~ 15 min 内出现明显颤抖,提示动物兴奋性虽然不高,但通过颤

抖性产热可以抵御低温风险。后肢站立的次数代表动物对陌生环境的适应能力,低温组后肢站立次数显著低于其他两组,显示其对陌生环境的适应能力低,这也与黑线仓鼠冬季迁移扩散较少、繁殖停滞相一致。中央格停留时间是动物空间认知能力的反映,排出粪便的颗粒数提示动物的紧张程度,这两项指标之间无显著性差异,提示温度处理对动物空间认知能力和紧张程度影响不大。动物本身存在一种危机评估机制,使其在探索和获取周围环境信息的过程中能够衡量该行为可能对自身所造成的损失和收益(Lima et al. 1999)。开场实验结果在一定程度上说明,黑线仓鼠在面临环境胁迫时,能采取不同的应对策略,比如在极端温度时(尤其是在冬季低温时)其自发活动和探索行为都下降,以增加在不利环境中生存的可能。

以上研究结果支持环境温度能诱导鼠类体重、能量代谢及行为产生适应性变化的假设。体重的变化主要还是受食物的影响。动物摄取食物以提供机体生长、发育、活动所需要的能量,这是动物生存的最基本条件。而能量摄入、处理和分配的速率与效率是影响动物存活能力的重要因子(Karasov 1986)。自然选择有利于那些保证能耗与能量摄入相平衡的生活史对策。随着环境的改变,动物可能会采取不同的能量摄入和分配的策略。尤其是小型哺乳动物,由于体形的原因,受温度影响更大,因而其能量策略的改变会更明显。研究表明,动物能量摄入和分配模型将摄取的能量分为用于存储的能量、活动消耗的能量、用于维持生命活动的能量以及用于构建生物机体的能量,若是这些分支能量有一部分发生显著的改变,必然会对其他部分的能量或是能量的摄入带来显著的变化(Chen et al. 2008)。在低温条件下 RMR 较高,提示用以维持生命的能耗较多,若没有更充足的食物供应,则其用于其他方面的能量支出应该减少。研究结果发现,低温同时增加黑线仓鼠的能量摄入水平和维持基本生长的能量支出水平,从而增加产热能力,同时降低动物在陌生环境中的自发活动与探索行为,以此

来减少能量消耗和热量散失。高温则减少黑线仓鼠的自发活动与探索行为,降低肌肉产热,同时降低能量的摄入和支出水平,从而降低产热能力,减少进食量,这些结果与 Chen 等 (2008) 的研究基本符合,提示动物在夏季用于生长和生殖的能量支出不会增加。研究结果还显示,相对高温组而言,低温对黑线仓鼠的体重、能量代谢和行为影响更明显,这也与自然条件下,黑线仓鼠存在春秋繁殖高峰,夏季较低,而冬季最低的研究结果相吻合(邢林等 1991, Wang et al. 2003)。因此,这些能量代谢和行为特征可能是黑线仓鼠对寒冷冬季及干热夏季生存环境的适应。

目前,已有大量的研究证明,全球气候变暖所带来的温度升高和极端天气频发对野生动物造成了多方面影响(Hersteinsson et al. 1992, Forchhamer et al. 1998, Sparks et al. 2002),黑线仓鼠也不能例外。一些崭新的科学问题也不断呈现在人们面前,比如黑线仓鼠是否会向纬度/海拔更高的地区扩散?其季节性繁殖的动态是否发生变化?其种群密度是否会爆发?等等。因此,进一步研究温度影响黑线仓鼠繁殖的调控机制,更准确地预测黑线仓鼠种群动态变化,探究环境因素与有害生物种群爆发的关系,也将成为今后研究的热点之一。

参 考 文 献

- Braulke L J, Heldmaier G, Berriel Diaz M, et al. 2010. Seasonal changes of myostatin expression and its relation to body mass acclimation in the Djungarian hamster, *Phodopus sungorus*. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology A*, 313(9): 548 – 556.
- Chen H, Zuo W Y, Melanie E M, et al. 2008. Energy uptake and allocation during ontogeny. *Science*, 322(5902): 736 – 739.
- Chen J F, Zhong W Q, Wang D H. 2012. Seasonal changes in body mass, energy intake and thermogenesis in Maximowicz's voles (*Microtus maximowiczii*) from the Inner Mongolian grassland. *Journal of Comparative Physiology B*, 182(2): 275 – 285.
- Ebling F J P, Barrett P. 2008. The regulation of seasonal changes in food intake and body weight. *Journal of Neuroendocrinology*, 20(6): 827 – 833.
- Forchhamer M C, Post E, Srenseth N C. 1998. Breeding phenology and climate. *Nature*, 391(1): 29 – 30.
- Gangwisch J E. 2013. Seasonal variation in metabolism: evidence for the role of circannual rhythms in metabolism? *Hypertension Research*, 36(5): 392 – 393.
- Hersteinsson P, MacDonald D W. 1992. Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes *Vulpes vulpes* and *Alopex lagopus*. *Oikos*, 64(3): 505 – 515.
- Huitu O, Koivula M, Korpimäki E, et al. 2003. Winter food supply limits growth of northern vole populations in the absence of predation. *Ecology*, 84(8): 2108 – 2118.
- Karasov W H. 1986. Energetics, physiology and vertebrate ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 1(4): 101 – 104.
- Korslund L, Steen H. 2006. Small rodent winter survival: snow conditions limit access to food resources. *Journal of Animal Ecology*, 75(1): 156 – 166.
- Kusumoto K, Saitoh T. 2007. Optimal conditions for immune function in the grey-sided vole, *Clethrionomys rufocanus*: temperature and immunization period. *Mammal Study*, 32(1): 45 – 48.
- Li X S, Wang D H. 2005. Seasonal adjustments in body mass and thermogenesis in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*): the roles of short photoperiod and cold. *Journal of Comparative Physiology B*, 175(8): 593 – 600.
- Lima S L, Bednekoff P A. 1999. Temporal variation in danger drives anti-predator behavior: the predation risk allocation hypothesis. *The American Naturalist*, 153(6): 649 – 659.
- Liu J S, Wang D H, Sun R Y. 2004. Metabolism and thermoregulation in three species of rodent from Northeastern China. *Journal of Thermal Biology*, 29(3): 177 – 183.
- McNab B K. 1992. A statistical analysis of mammalian rates of metabolism. *Functional Ecology*, 6(6): 672 – 679.
- Moisselin J M, Schneider M, Canellas C, et al. 2002. Climate change over France during the 20th century, a study of long-term homogenized data of temperature and rainfall. *La Météorologie*, 38: 45 – 56.
- Song Z G, Wang D H. 2003. Metabolism and thermoregulation in the striped hamster *Cricetulus barabensis*. *Journal of Thermal Biology*, 28(6/7): 509 – 514.
- Sparks T H, Menzel A. 2002. Observed changes in seasons: an overview. *International Journal of Climatology*, 22(14): 1715 – 1725.
- Taylor J R, Rychlik L, Churchfield S. 2013. Winter reduction in body mass in a very small, nonhibernating mammal: consequences for heat loss and metabolic rates. *Physiological and Biochemical Zoology*, 86(1): 9 – 18.

- Wang D H, Pei Y X, Yang J C, et al. 2003. Digestive tract morphology and food habits in six species of rodents. *Folia Zoologica*, 52(1): 51 - 55.
- Yaskin V A. 2011. Seasonal changes in hippocampus size and spatial behavior in mammals and birds. *Biology Bulletin Reviews*, 1(3): 279 - 288.
- Zhang X Y, Wang D H. 2006. Energy metabolism, thermogenesis and body mass regulation in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*) during cold acclimation and rewarming. *Hormones and Behavior*, 50(1): 61 - 69.
- Zhao Z J, Cao J, Liu Z C, et al. 2010a. Seasonal regulations of resting metabolic rate and thermogenesis in striped hamster (*Cricetulus barabensis*). *Journal of Thermal Biology*, 35(8): 401 - 405.
- Zhao Z J, Cao J, Meng X L, et al. 2010b. Seasonal variations in metabolism and thermoregulation in the striped hamster (*Cricetulus barabensis*). *Journal of Thermal Biology*, 35(1): 52 - 57.
- Zhao Z J. 2011. Energy budget during lactation in striped hamsters at different ambient temperatures. *The Journal of Experimental Biology*, 214(6): 988 - 995.
- Zhu W L, Yang S C, Zhang L, et al. 2012. Seasonal variations of body mass, thermogenesis and digestive tract morphology in *Apodemus chevrieri* in Hengduan mountain region. *Animal Biology*, 62: 463 - 478.
- 鲍伟东, 王德华, 王祖望, 等. 2001. 内蒙古库布齐沙地和呼和浩特平原黑线仓鼠种群繁殖特征的比较. *动物学杂志*, 36(1): 15 - 18.
- 侯希贤, 张鹏利, 王玉平, 等. 1989. 黑线仓鼠的食物和食量. *中国鼠类防制杂志*, (3): 155 - 158.
- 刘伟, 张毓, 王溪, 等. 2009. 高原鼠兔冬季的食物选择. *兽类学报*, 29(1): 12 - 19.
- 柳劲松, 王德华, 孙儒泳. 2003. 东北地区黑线仓鼠的代谢产热特征及其体温调节. *动物学报*, 49(4): 451 - 457.
- 马瑞俊, 蒋志刚. 2005. 全球气候变化对野生动物的影响. *生态学报*, 25(11): 3061 - 3066.
- 宋志刚, 王德华. 2002. 哺乳动物基础代谢率的主要影响因素. *兽类学报*, 22(1): 53 - 60.
- 宛新荣, 刘伟, 王广和, 等. 2007. 浑善达克沙地小毛足鼠的食量与食性动态. *生态学杂志*, 26(2): 223 - 227.
- 王德华, 孙儒泳, 王祖望, 等. 1996. 根田鼠冷驯化过程中的适应性产热特征. *动物学报*, 42(4): 368 - 376.
- 王维刚, 刘震泽, 吴文婷, 等. 2011. 小鼠动物实验方法系列专题(七)——旷场实验在小鼠行为分析中的应用. *中国细胞生物学学报*, 33(11): 1191 - 1196.
- 邢林, 冯云水, 卢浩泉. 1991. 山东农田黑线仓鼠种群数量动态及预测预报的初步研究. *山东科学*, 4(2): 5 - 8.
- 徐金会, 安书成, 郜发道. 2003. 棕色田鼠消化道形态变化与能量需求的关系. *动物学报*, 49(1): 32 - 39.
- 杨明, 刁颖, 彭霞, 等. 2009. 冷驯化和复温过程中黑线仓鼠产热的变化. *沈阳师范大学学报*, 27(2): 129 - 133.
- 约翰·斯派塞, 凯文·加斯顿: 王燕燕, 盛连喜译. 2007. 生理多样性及其生态学内涵. 上海: 世界图书出版公司, 42.
- 张志强, 张丽娜, 王德华. 2007. 渐变的光周期和温度对布氏田鼠能量代谢和身体成分的影响. *兽类学报*, 27(1): 18 - 25.
- 朱盛侃, 秦知恒. 1991. 安徽淮北农区大仓鼠和黑线仓鼠种群动态的研究. *兽类学报*, 11(2): 99 - 108.