

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

张志强^{1,2,3} 张丽娜^{1,3} 王德华^{1*}

(1 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100080)

(2 安徽农业大学动物科技学院, 合肥 230036) (3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为探讨在同时逐渐缩短光照时间和降低温度的过程中, 动物能量代谢水平和身体成分的适应性变化, 我们以成年雄性布氏田鼠为对象, 测定了温度为 20℃ 和光周期为 12L: 12D (对照组), 以及从温度为 20℃ 和长光照条件 (16L: 8D) 逐渐转换到温度为 4℃ 和短光照条件 (8L: 16D) 的过程中 (实验组), 其体重、静止代谢率和能量摄入的变化, 以及经过 8 周驯化后身体器官和组织重量的变化。结果发现: 实验组动物的体重增长率低于对照组。在驯化期间, 静止代谢率无组内和组间差异。实验组动物的干物质摄入、能量摄入和消化能等组内差异不明显, 但对照组动物在驯化的第 8 周显著降低。实验组动物的能量摄入水平在驯化后显著升高; 小肠和胃的干重, 以及小肠和心脏等器官的湿重也都显著高于对照组。结果表明, 布氏田鼠能够采取降低体重、增加能量摄入和调整体内某些器官和组织重量的方式来适应变化的环境条件。

关键词: 光照周期; 环境温度; 布氏田鼠; 能量代谢; 身体成分

中图分类号: Q494

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2007) 01-0018-08

Effects of reducing photoperiod and temperature on energy metabolism and body composition in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*)

ZHANG Zhiqiang^{1,2,3}, ZHANG Lina^{1,3}, WANG Dehua^{1*}

(1 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 College of Animal Science and Technology, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

(3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the adaptive changes in energy metabolism and body composition in response to a gradual reduction in both ambient temperature and photoperiod, male adult Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*) were raised under the conditions of 20℃ and 12L: 12D photoperiod (control group). The treatment group was changed from 20℃ and 16L: 8D photoperiod to 4℃ and 8L: 16D photoperiod (treatment group) over a period of five weeks and then maintained at those conditions for a further 3 weeks. Changes in body mass, resting metabolic rates (RMR), energy intake, and wet and dry mass of organs and tissues were measured at the end of the acclimation. The growth rate of body mass in treatment voles was lower than control. RMR showed no significant differences either within or between groups. No significant differences were detected in dry matter intake, energy intake, and digestible energy intake in treatment voles during the whole acclimation period, while these parameters were significantly reduced within control voles at the end of acclimation, and were significantly lower than those in treatment voles. Small intestine and stomach dry mass, as well as the wet mass of small intestine, heart, lung, liver and kidney, were significantly higher in treatment voles than in controls, but no significant differences were found in the mass of other organs and tissues. These results suggest that reducing body mass and increasing energy intake, together with adjusting the mass of some organs and tissues, are important physiological changes in Brandt's voles to adapt the changing environmental conditions.

Key words: Body composition; Brandt's vole; Energy metabolism; Photoperiod; Temperature

在季节性环境中, 光周期逐渐缩短和环境温度 逐渐降低是冬季即将来临的重要信号 (Heldmaier

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30430140, 30570230); 中国科学院动物行为学海外创新团队资助项目 (CXTDS 2005-4)

作者简介: 张志强 (1973-), 男, 讲师, 主要从事脊椎动物生理生态学研究。

收稿日期: 2006-04-28; 修回日期: 2006-09-06

* 通讯作者, correspondence author, E-mail: wangdh@ioz.ac.cn

et al., 1985; Heldmaier *et al.*, 1989)。在短光照条件下, 一些动物的体重明显增加, 如环颈旅鼠 (*Dicrostonyx groenlandicus*, Nagy *et al.*, 1995), 而黑线毛足鼠 (*Phodopus sungorus*, Klingenspor *et al.*, 2000) 和布氏田鼠 (*Lasiopodomys brandtii*, Zhao and Wang, 2005; Li and Wang, 2005) 则显著下降。光周期对布氏田鼠和长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) 的静止代谢率 (Resting metabolic rate, RMR) 和能量摄入水平均无明显影响, 但体重对光周期的反应具有时段性 (李兴升等, 2003), 而后来的研究发现, 单独的短光照也能显著提高长爪沙鼠 (Zhao and Wang, 2006a) 和布氏田鼠 (Zhao and Wang, 2006b) 的能量摄入水平。在冷驯化条件下, 无论是实验啮齿类, 还是野生小型哺乳动物, 它们产热器官的重量和身体成分都会发生适应性变化, 如布氏田鼠 (李庆芬等, 1994) 和根田鼠 (*Microtus oeconomus*, 王德华等, 1996) 等; 能量摄入水平亦随之增加, 如大鼠 (Abelenda *et al.*, 2003) 和长爪沙鼠 (李兴升等, 2004) 等。短光照与低温共同作用可进一步提高布氏田鼠 (李庆芬等, 1995)、棉鼠 (*Sigmodon hispidus*, Tomasi and Michell, 1996)、高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 和根田鼠 (Wang *et al.*, 1999) 等物种的褐色脂肪组织 (Brown adipose tissue, BAT) 和肝脏的重量。Deveci 和 Egginton (2002) 在褐家鼠 (*Rattus norvegicus*) 和金色中仓鼠 (*Mesocricetus auratus*) 中模拟了夏季至冬季光周期和温度转变过程中动物的器官重量和身体成分的适应性变化。目前在野生小型哺乳动物中尚未见到相关研究。

布氏田鼠是典型的温带草原群居性鼠种, 在自然环境中每年面临长达 5~6 个月的寒冷时期。目前, 关于温度 (李庆芬等, 1994; 王煜等, 2001; Li and Wang, 2005; Zhang and Wang, 2006)、光周期 (李兴升等, 2003; Zhao and Wang, 2005, 2006) 和食物质量 (陈竞峰等, 2006) 对其产热能力和能量代谢水平的影响, 已有较多报道。温度和光周期对产热能力的交互作用也有过研究 (李庆芬等, 1995)。在室外季节驯化条件下, 布氏田鼠以降低体重、提高非颤抖性产热能力和增加能量摄入来抵御寒冷 (Li and Wang, 2005)。在本实验中, 我们在室内条件下模拟光周期和温度从夏季到冬季的转变过程, 对其体重、RMR、能量摄入和身体成分等进行了测定, 以分析布氏田鼠在变化的环境条件下逐渐适应的生理生态学机制。

1 材料和方法

1.1 实验动物

实验用布氏田鼠为 2000 年 5 月捕自内蒙古锡林郭勒盟, 在实验室内饲养、繁殖的个体。共选用成年雄鼠 13 只, 动物被随机分为实验组 (7 只) 和对照组 (6 只), 平均体重分别为 43.9 ± 1.1 g (SE) 和 41.6 ± 2.2 g。放入代谢笼中单独饲养, 喂以北京科澳协力饲料有限公司生产的标准兔饲料, 动物可自由取食和饮水。在光照为 12L:12D, 温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 的条件下适应 3 周后, 开始正式实验。实验组动物第 1 周的光周期为 16L:8D, 温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 以后每周光周期递减 2 h, 温度降低 $4 \pm 1^\circ\text{C}$, 至第 5 周光周期为 8L:16D, 温度为 $5 \pm 1^\circ\text{C}$, 在这样的条件下延续至第 8 周末 (图 1)。对照组动物则一直处于光周期为 12L:12D, 温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 的环境条件下。实验于 2004 年 1 月至 3 月进行。

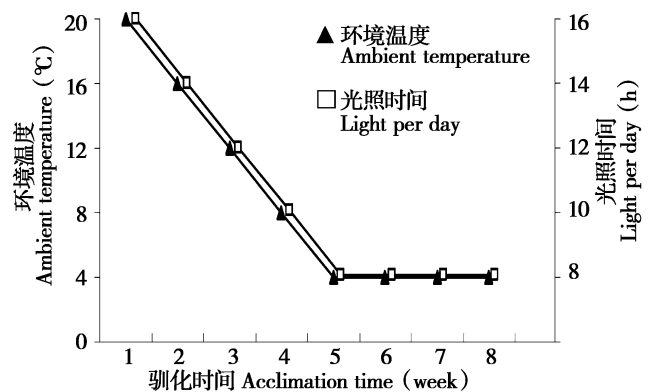


图 1 8 周实验过程中光照时间和环境温度的变化

Fig. 1 Reducing ambient temperature (from 20°C to 4°C) and light (from 16L:8D to 8L:16D) during experiment for 8 weeks

1.2 体重和 RMR 的测定

驯化期间, 在每周的第 7 天测定一次 RMR, 并在测定前后分别称量体重 (± 0.1 g)。RMR 采用封闭式流体压力呼吸仪在布氏田鼠的热中性区内测定 ($30 \pm 1^\circ\text{C}$) (李庆芬等, 1994; Wang *et al.*, 2003), 水浴控温, 呼吸室体积为 3.6 L, 用 KOH 和干燥硅胶吸收呼吸室内的 CO_2 和水分。实验前动物在呼吸室内适应 1 h, 待动物稳定后, 开始记录耗氧量, 每隔 5 min 记录 1 次, 连续测定 1 h。选取 2 个连续稳定的最低值来计算 RMR。代谢率 (耗氧量) 值均校对为标准状态 (0°C , 1 个大气压) 下。

1.3 能量摄入

能量摄入采用食物平衡法, 用代谢笼测定

(宋志刚和王德华, 2001; 李兴升等, 2003)。每天08:00~09:00定时给动物投喂足量食物。7天为一个周期, 在每周的第7天定时收集剩余食物和粪便, 在58℃烘箱中干燥至恒重, 手工分离剩余食物和粪便, 称重。取部分样品(0.5~1.0 g, ± 1 mg), 用美国PARR公司生产的PARR1281氧弹热量计测定其热值。仪器操作按说明书进行, 每次测定前以苯甲酸作为标准对仪器进行校对。能量参数的计算公式如下(Liu *et al.*, 2003):

摄入能(kJ/d) = 摄入干物质量(g/d) \times 食物热值(kJ/g)

粪便能(kJ/d) = 粪便干重(g/d) \times 粪便热值(kJ/g)

消化能(kJ/d) = 摄入能(kJ/d) - 粪便能(kJ/d)

消化率(%) = 消化能(kJ/d) / 摄入能(kJ/d) $\times 100\%$

1.4 器官解剖

在第8周测定RMR后, 于次日处死动物。迅速取出肩胛间BAT、肝脏、肺、心脏、附睾、贮精囊、胸腺、肾上腺、胃、盲肠、小肠、结肠、肾脏(一对)和睾丸(一对), 以及肾脏和睾丸周围的白色脂肪组织, 并称重(± 1 mg, 胸腺和肾上腺 ± 0.1 mg), 包于锡箔纸中, 于58℃烘至恒重。

1.5 数据统计

利用SPSS for Windows 10.0软件包对数据进行统计分析。用Kolmogorov-Smirnov测验进行正态性检验, 对消化率的原始数据进行了反正弦(Arcsin)的平方根转化, 对其余不呈正态分布的数据, 全部取自然对数进行标准化。为了去除体重的影响, 首先计算每个时间点的RMR、干物质摄入、摄入能和消化能与体重之间的线性回归方程, 再利用回归方程计算预测值, 然后计算残差(残差 = 实测值 - 预测值)。实验组与对照组动物的体重、消化率和残差值的组内差异用多重比较(Least significant differences, LSD), 组间差异用独立样本 t 检验(Independent sample t test)进行检验。器官重量的比较, 以体重为协变量, 用单因素协方差分析(One-way ANCOVA)进行分析。文中数据均以平均值 \pm 标准误(Means \pm SE)表示, 显著性全部为双尾检验, $P < 0.05$ 被认为差异显著。

2 结果

2.1 体重

驯化开始时实验组和对照组动物的体重分别为 53.7 ± 3.1 g和 51.0 ± 3.2 g, 没有明显差异($t = -0.605$, $df = 11$, $P = 0.557$)。经过8周驯化后, 也无显著性差异($t = 1.554$, $df = 11$, $P = 0.148$), 但分别比驯化开始时增加了15.7%和24.9%。对照组动物的体重有上升的趋势, 至第7周时达到最大值($F_{(7, 35)} = 20.134$, $P = 0.000$)。实验组动物的体重基本维持稳定($F_{(7, 42)} = 0.977$, $P = 0.461$)。除在驯化的第7周对照组动物的体重显著高于实验组外($t = 3.318$, $df = 11$, $P = 0.005$), 其它时间段无显著性差异($P > 0.05$; 图2和表1)。

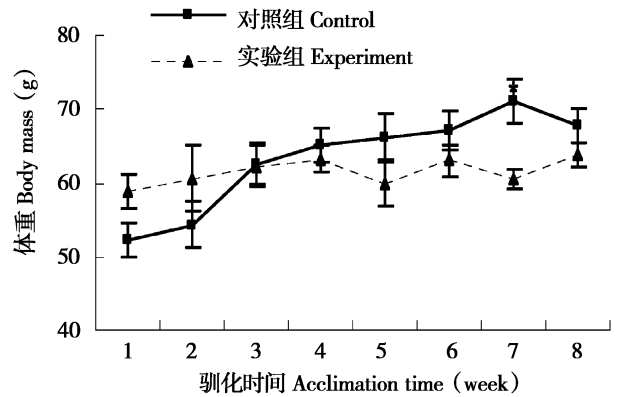


图2 光周期和温度的渐变对布氏田鼠体重的影响

Fig. 2 Effects of reducing photoperiod and ambient temperature on body mass in Brandt's voles

2.2 RMR

实验组($F_{(7, 42)} = 0.402$, $P = 0.895$)和对照组($F_{(7, 35)} = 1.167$, $P = 0.347$)动物的RMR组内均无显著性差异, 组间差异也不显著($P > 0.05$; 图3)。

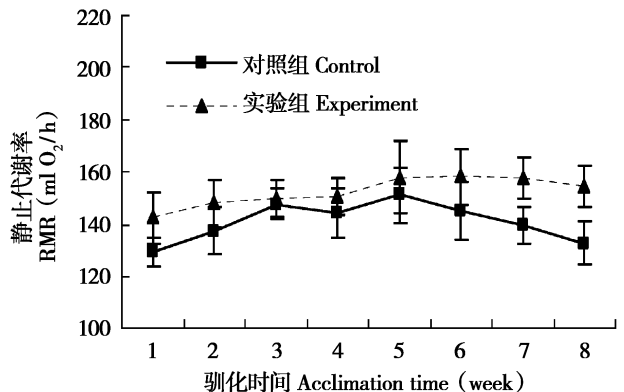


图3 光周期和温度的渐变对布氏田鼠静止代谢率的影响

Fig. 3 Effects of reducing photoperiod and ambient temperature on resting metabolic rate (RMR) in Brandt's voles

表 1 渐变的光周期和温度对布氏田鼠体重、干物质摄入、摄入能、消化能和消化率的影响

Table 1 Effects of reducing photoperiod and temperature on the body mass (BW), dry matter intake (DMI), energy intake (EI), digested energy (DE) and digestibility in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*)

	驯化时间 Acclimation time (week)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
对照组 Control								
样本数 Sample size	6	6	6	6	6	6	6	6
体重 BW (g)	52.2 ± 2.4 ^d	54.3 ± 3.2 ^d	62.6 ± 2.8 ^c	65.2 ± 2.4 ^b	66.1 ± 3.2 ^{abc}	67.1 ± 2.6 ^b	71.1 ± 2.9 ^a	67.9 ± 2.3 ^{ab}
干物质摄入 DMI (g/d)	9.6 ± 0.7 ^{ab}	10.8 ± 0.5 ^{ab}	13.0 ± 0.6 ^a	13.0 ± 0.6 ^a	12.4 ± 0.7 ^{ab}	13.0 ± 0.3 ^{bc}	13.2 ± 0.8 ^{bc}	11.9 ± 0.6 ^c
摄入能 EI (kJ/d)	164.4 ± 12.2 ^{abc}	184.9 ± 8.3 ^{ab}	203.8 ± 9.7 ^{ab}	201.6 ± 9.4 ^a	189.8 ± 10.4 ^{ab}	198.4 ± 5.1 ^b	204.2 ± 13.3 ^{ab}	184.0 ± 14.9 ^c
消化能 DE (kJ/d)	116.5 ± 11.8 ^{abc}	139.6 ± 7.3 ^a	141.3 ± 8.5 ^{abc}	139.1 ± 7.8 ^{ab}	137.3 ± 8.6 ^{bd}	144.4 ± 5.4 ^{ac}	141.4 ± 7.7 ^{cd}	126.7 ± 9.2 ^d
消化率 Digestibility (%)	70.3 ± 3.1 ^{ab}	75.8 ± 3.6 ^{ab}	69.1 ± 1.2 ^b	68.9 ± 1.1 ^{ab}	72.3 ± 1.6 ^{ab}	72.8 ± 1.6 ^a	69.5 ± 9.6 ^{ab}	69.1 ± 1.7 ^{ab}
对照组 Control								
样本数 Sample size	7	7	7	7	7	7	7	7
体重 BW (g)	58.8 ± 2.3 ^c	60.6 ± 4.4 ^{abc}	62.3 ± 2.9 ^{ab}	63.3 ± 1.9 ^{ab}	59.9 ± 3.1 ^{abc}	63.0 ± 2.2 ^{abc}	60.5 ± 1.4 ^b	63.7 ± 1.6 ^{ac}
摄入干物质 DMI (g/d)	12.0 ± 0.5 ^a	13.0 ± 1.1 ^a	12.9 ± 1.1 ^a	14.1 ± 1.0 ^a	14.6 ± 1.6 ^a	14.9 ± 0.6 ^a	16.1 ± 1.0 ^a	15.5 ± 1.3 ^a
摄入能 EI (kJ/d)	205.3 ± 9.1 ^a	222.7 ± 19.3 ^a	221.1 ± 19.1 ^a	242.0 ± 16.6 ^a	249.2 ± 27.0 ^a	254.9 ± 10.2 ^a	274.3 ± 15.5 ^a	264.8 ± 21.6 ^a
消化能 DE (kJ/d)	139.0 ± 6.8 ^{ab}	155.1 ± 15.9 ^{ab}	157.6 ± 14.9 ^{ab}	174.0 ± 15.6 ^b	172.9 ± 18.1 ^a	169.8 ± 5.5 ^{ab}	182.7 ± 15.1 ^{ab}	177.5 ± 17.7 ^{ab}
消化率 Digestibility (%)	67.8 ± 2.2 ^{abc}	69.2 ± 1.7 ^{abc}	71.1 ± 1.6 ^a	71.5 ± 2.2 ^{ab}	69.9 ± 1.5 ^{ab}	66.8 ± 9.0 ^{abc}	66.2 ± 1.9 ^c	66.6 ± 1.1 ^{bc}

表中数值以平均值 ± 标准误表示，同一行中上标字母不同表示差异显著

Values are means ± SE. Significant differences ($P < 0.05$) are indicated by different superscripts in the same row

2.3 能量摄入

实验组动物的干物质摄入 ($F_{(7,42)} = 0.269$, $P = 0.962$)、摄入能 ($F_{(7,42)} = 0.219$, $P = 0.979$)、消化能 ($F_{(7,42)} = 1.129$, $P = 0.364$) 和消化率 ($F_{(7,42)} = 1.550$, $P = 0.177$) 等组内差异都不显著，而对照组动物的干物质摄入 ($F_{(7,35)} = 3.797$, $P = 0.004$)、摄入能 ($F_{(7,35)} = 2.411$, $P = 0.040$) 和消化能 ($F_{(7,35)} = 3.240$, $P = 0.009$) 则在驯化后显著降低，但消化率 ($F_{(7,35)} = 1.605$, $P = 0.167$) 的组内差异不显著 (表 1)。实验组动物的干物质摄入 (图 4A) 和摄入能 (图 4B) 在第 1 周和第 6 至 8 周，消化能 (图 4C) 在第 4 至 8 周都显著高于对照组 ($P < 0.05$)，但消化率在第 6 周

显著低于对照组 ($P < 0.05$)，其它时期两组间没有明显差异 ($P > 0.05$)。

2.4 器官和组织重量

实验组动物小肠 ($F_{(1,10)} = 6.810$, $P = 0.026$) 和胃的干重 ($F_{(1,10)} = 7.982$, $P = 0.018$)，以及小肠 ($F_{(1,10)} = 9.642$, $P = 0.011$)、心脏 ($F_{(1,10)} = 8.931$, $P = 0.014$)、肺 ($F_{(1,10)} = 5.243$, $P = 0.045$)、肝脏 ($F_{(1,10)} = 10.702$, $P = 0.008$) 和肾脏 ($F_{(1,10)} = 5.783$, $P = 0.037$) 的湿重都显著高于对照组，实验组动物肩胛间 BAT ($F_{(1,10)} = 1.528$, $P = 0.245$) 和结肠 ($F_{(1,10)} = 2.856$, $P = 0.122$) 的湿重均大于对照组，但差异不显著。其它器官的干重和湿重也无显著性差异 (表 2)。

表 2 渐变的光周期和温度对布氏田鼠器官和组织重量的影响 (平均值 \pm 标准误)Table 2 Effects of reducing photoperiod and temperature on the organ and tissue masses in Brandt's voles (*Lasiodopomys brandtii*) (Means \pm SE)

	对照组 Control	实验组 Treatment
样本大小 Sample size	6	7
心脏湿重 Heart wet mass (g)	0.296 \pm 0.012	0.343 \pm 0.011 [*]
心脏干重 Heart dry mass (g)	0.082 \pm 0.008	0.085 \pm 0.003
肺湿重 Lung wet mass (g)	0.321 \pm 0.020 [*]	0.298 \pm 0.022
肺干重 Lung dry mass (g)	0.072 \pm 0.008	0.071 \pm 0.005
肝脏湿重 Liver wet mass (g)	2.430 \pm 0.110	2.652 \pm 0.077 [*]
肝脏干重 Liver dry mass (g)	0.858 \pm 0.056	0.845 \pm 0.020
IBAT 湿重 IBAT wet mass (g)	0.267 \pm 0.025	0.286 \pm 0.006
IBAT 干重 IBAT dry mass (g)	0.140 \pm 0.024	0.176 \pm 0.004
肾脏湿重 Kidney wet mass (g)	0.672 \pm 0.043	0.768 \pm 0.030 [*]
肾脏干重 Kidney dry mass (g)	0.179 \pm 0.007	0.197 \pm 0.008
KWAT 湿重 KWAT wet mass (g)	0.791 \pm 0.262	0.286 \pm 0.027
KWAT 干重 KWAT dry mass (g)	0.498 \pm 0.140	0.262 \pm 0.025
睾丸湿重 Testes wet mass (g)	0.999 \pm 0.039	0.954 \pm 0.049
睾丸干重 Testes dry mass (g)	0.145 \pm 0.008	0.158 \pm 0.014
TWAT 湿重 TWAT wet mass (g)	1.047 \pm 0.226	0.781 \pm 0.085
TWAT 干重 TWAT dry mass (g)	0.693 \pm 0.103	0.688 \pm 0.086
胃湿重 Stomach wet mass (g)	0.410 \pm 0.018	0.471 \pm 0.015
胃干重 Stomach dry mass (g)	0.084 \pm 0.010	0.102 \pm 0.003 [*]
小肠湿重 Small intestine wet mass (g)	1.040 \pm 0.043	1.299 \pm 0.067 [*]
小肠干重 Small intestine dry mass (g)	0.199 \pm 0.010	0.237 \pm 0.012 [*]
盲肠湿重 Caecum wet mass (g)	0.713 \pm 0.044	0.829 \pm 0.032
盲肠干重 Caecum dry mass (g)	0.116 \pm 0.008	0.127 \pm 0.005
结肠湿重 Colon wet mass (g)	0.543 \pm 0.026	0.605 \pm 0.023
结肠干重 Colon dry mass (g)	0.101 \pm 0.008	0.110 \pm 0.004

* 表示差异显著 ($P < 0.05$)。BAT: 褐色脂肪组织; IBAT: 肩胛间 BAT; WAT: 白色脂肪组织; TWAT: 睾丸周围的 WAT; KWAT: 肾脏周围的 WAT

The asterisk represents significant differences ($P < 0.05$). BAT: Brown adipose tissue; IBAT: Interscapular BAT; WAT: White adipose tissue; TWAT: WAT around testes; KWAT: WAT around kidneys.

3 讨论

体重是反映动物营养状态的一个重要指标,其稳定性依赖于能量摄入和能量消耗之间的平衡。我们的结果表明,随着光照时间的缩短和环境温度的逐渐降低,实验组布氏田鼠的体重增长率低于对照组,经 8 周驯化后体重明显比对照组降低,但同时能量摄入水平显著升高。在季节性环境中,大多数小型哺乳动物的体重在冬季会降低以减少总能量的消耗,如欧鼯 (*Clethrionomys glareolus*)、加氏鼯 (*Clethrionomys gapperi*) 和金色中仓鼠 (Klaus *et al.*, 1988; Merritt and Zegers, 1991; Concannon *et al.*, 2001) 等。当从长光照转入短光照时,环颈旅鼠的体重明显增加 (Nagy *et al.*, 1995), 而黑线毛足鼠则显著下降 (Klingenspor *et al.*, 2000), 这主要与摄入能的降低有关 (Knopper and Boily, 2000)。Larkin 等 (1991) 发现,大鼠的体重在短光照条件下比长光照时低,并认为这是由于长光照条件下大鼠对能量

进行了重新分配并使之在体内得以储存的结果,与摄入能无关。在驯化的前 2 周,实验组布氏田鼠的体重有增加的趋势,在第 1 周时摄入能显著高于对照组,由于此时的温度与对照组相同,说明体重的增加主要是由长光照引起的。Zhao 和 Wang (2005) 的研究也表明,在 4 周的光周期驯化过程中,长光照布氏田鼠的体重在第 17 天之后显著高于短光照者。在驯化后期,尽管实验组布氏田鼠的体重增长受到抑制,但摄入能和消化能仍显著高于对照组,能量摄入可能主要用于维持体重平衡和抵御寒冷。而在室外季节驯化条件下,布氏田鼠的体重在冬季明显下降,同时能量摄入水平显著上升 (Li and Wang, 2005), 这与本实验的结果相似。布氏田鼠是典型的温带草原群居性鼠种,不冬眠,其生活环境的气候条件变化剧烈,夏季短暂温暖,冬季漫长严寒 (宛新荣等, 1998)。冷驯化对布氏田鼠的体重无明显影响 (李庆芬等, 1994, 1995), 低温和短光照的交互作用能抑制其体重增长 (李庆芬等, 1995)。布氏田鼠

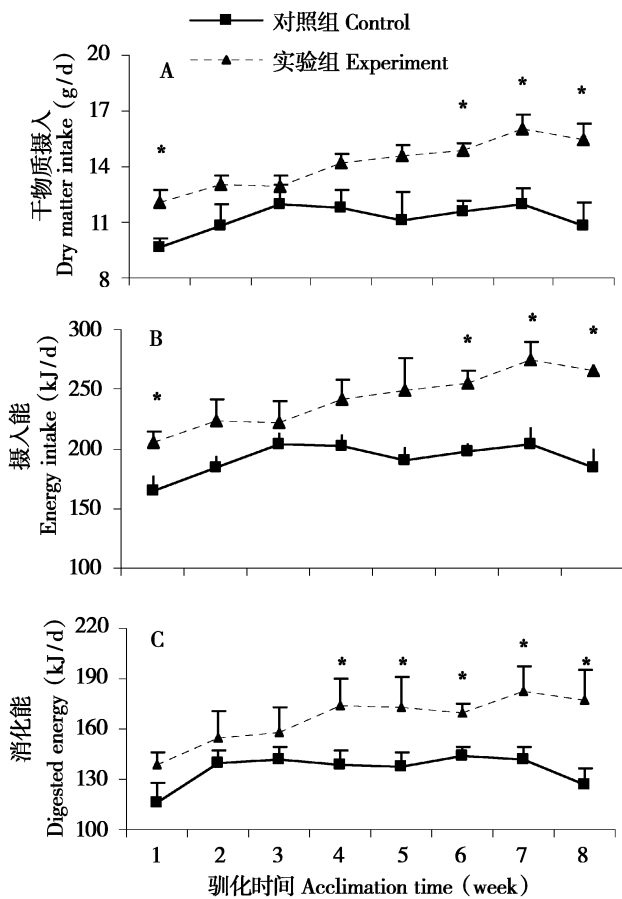


图4 光周期和温度的渐变对布氏田鼠干物质摄入(A)、摄入能(B)和消化能(C)的影响

Fig. 4 Effects of reducing photoperiod and ambient temperature on dry matter intake (A), energy intake (B) and digested energy (C) in Brandt's voles

可能以光周期作为冬季即将来临的环境信号(Zhao and Wang, 2005, 2006b),低温则能进一步加强这种信号作用。当面临持续的短光照和低温环境时,其摄食和消化水平提高,以降低体重和增加食物摄入的方式来维持自身的能量平衡。

在8周的驯化过程中,布氏田鼠的RMR没有显著变化,这与室外季节驯化的研究结果一致(Li and Wang, 2005)。在自然环境中,大多数小型哺乳动物在秋、冬季的RMR要比夏季高(Lovegrove, 2005),但也有些动物维持不变,如高原鼠兔(Wang *et al.*, 1999)等。李庆芬等(1995)认为,低温和短光照都能显著影响布氏田鼠的RMR,两者的交互作用能进一步加强此作用。Zhao和Wang(2005)也认为,短光照对布氏田鼠的RMR有显著效应。而在温和的环境条件下,即使长时间处于低温和短光照条件下,布氏田鼠的RMR仍然保持稳定,说明它对逐渐变化的环境条件具有较强的耐受性,不需要通

过提高自身的代谢水平来适应环境的变化。布氏田鼠冬季生境的地表温度可达 $-25^{\circ}\text{C} \sim -42^{\circ}\text{C}$,其隧道内温度亦在 -20°C 左右(施大钊和海淑珍, 1996)。我们设置的最低温度值为 4°C ,也许环境温度的进一步降低将会导致其RMR升高。

我们的结果表明,实验组布氏田鼠小肠和胃、心脏、肝脏、肺和肾脏等器官的重量都高于对照组,但睾丸、肾上腺和胸腺的重量无显著差异。在 30°C 和 6°C 条件下驯化4周的大鼠,其肝脏、肠、胃和心脏等的重量也显著增加(Heroux and Gridgeman, 1958)。Deveci和Egginton(2002)对褐家鼠和金色中仓鼠的研究表明,在渐变的光周期和温度条件下,两种鼠心脏和肺的重量明显增加。布氏田鼠是非冬眠动物,一年之中有5~6个月生活于寒冷环境中,心脏重量的增加有利于抵御严寒。消化道的形态与食物的质量和成分有关,食物质量和能量胁迫对橙腹田鼠(*Microtus ochrogaster*)消化道的形态有明显影响。当面临低温胁迫时,其小肠的长度和重量增加,当取食高纤维食物时,盲肠的长度和重量增加(Gross *et al.*, 1985)。在自然环境中,布氏田鼠的食性存在季节变化(王桂明等,1992)。在小肠和胃的干重增加的同时,布氏田鼠的摄入能和消化能也大幅度提高,说明消化道容积的增加,提高了处理和消化食物的能力。

此外,布氏田鼠肩胛间BAT的含量比对照组高,但差异不显著,而肝脏的湿重却显著高于对照组。在渐变的光周期和温度条件下,金色中仓鼠肩胛间BAT的重量前4周增加,后4周则下降(Deveci and Egginton, 2002)。与其他组织相比,在冷驯化期间BAT的增重是最明显的,大鼠肩胛间BAT增加了30%,其它部位的BAT增加了14%,金色中仓鼠则分别增加了35%和120%(Deveci and Egginton, 2002)。布氏田鼠在冷暴露10 d及20 d时BAT的重量增加迅速,但30 d时有所下降(李庆芬等, 1994)。在静止状态下,肝脏产热可占总体产热的25%左右(Schmidt-Nielsen, 1997)。Li等(2001)的研究表明,在冷驯化条件下,中缅树鼩(*Tupaia belangeri*)和大绒鼠(*Ethnomys miletus*)肝脏占体重的百分比显著上升,而布氏田鼠、长爪沙鼠和达乌尔黄鼠(*Spermophilus dauricus*)肝脏的重量并不增加,但除长爪沙鼠外,其余几种动物肝脏细胞水平的产热能力都明显提高。在光照时间缩短和环境温度降低的条件下,布氏田鼠的肝脏重量显著增加,表明肝脏对产热调节也有贡献。

总之,当环境温度和光照时间同步缩减时,布氏田鼠能及时调整生理功能和形态特征。当面临长期的环境胁迫时,降低体重、提高能量摄入水平、增大消化道容积和心脏等内脏器官的重量,是布氏田鼠抵御环境胁迫、满足自身能量需求和提高生存能力的重要方式。

参考文献:

- Abelenda M, Ledesma A, Rial E, Puerta M. 2003. Leptin administration to cold-acclimated rats reduces both food intake and brown adipose tissue thermogenesis. *Journal of Thermal Biology*, **28**: 525 – 530.
- Chen J F, Zhong W Q, Wang D H. 2005. Effects of tannic acid food on energy metabolism in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*). *Acta Theriologica Sinica*, **25**: 326 – 332. (in Chinese)
- Concannon P, Levac K, Rawson R, Tennant B, Bensadoun. 2001. Seasonal changes in serum leptin, food intake, and body weight in photoentrained woodchucks. *American Journal of Physiology*, **281**: R951 – R959.
- Deveci D, Egginton S. 2002. The effects of reduced temperature and photoperiod on body composition in hibernator and non-hibernator rodents. *Journal of Thermal Biology*, **27**: 467 – 478.
- Gross J E, Wang Z W, Wunder B A. 1985. Effects of food quality and energy needs: changes in gut morphology and capacity of *Microtus ochrogaster*. *Journal of Mammalogy*, **66**: 661 – 667.
- Heldmaier G, Böchler H, Buchberger A, Lynch G R, Puchalski W, Steinlechner S, Wiesinger H. 1985. Seasonal acclimation and thermogenesis. In: Gilles R ed. *Circulation, Respiration and Metabolism*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. 431 – 501.
- Heldmaier G, Steinlechner S, Ruf T, Wiesinger H, Klingenspor M. 1989. Photoperiod and thermoregulation in vertebrates: body temperature and thermogenic acclimation. *Journal of Biological Rhythms*, **4**: 251 – 265.
- Heroux O, Gridgeman N T. 1958. The effect of cold acclimation on the size of organs and tissues of the rat, with special reference to modes of expression of results. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, **36**: 209 – 216.
- Klaus S, Heldmaier G, Ricquier D. 1988. Seasonal acclimation of bank voles and wood mice: nonshivering thermogenesis and thermogenic properties of brown adipose tissue mitochondria. *Journal of Comparative Physiology B*, **158**: 157 – 164.
- Klingenspor M, Niggemann H, Heldmaier G. 2000. Modulation of leptin sensitivity by short photoperiod acclimation in the Djungarian hamster *Phodopus sungorus*. *Journal of Comparative Physiology B*, **170**: 37 – 43.
- Knopper L D, Boily P. 2000. The energy budget of captive Siberian hamsters, *Phodopus sungorus*, exposed to photoperiod changes: mass loss is caused by a voluntary decrease in food intake. *Physiological and Biochemical Zoology*, **73**: 517 – 522.
- Larkin L M, Moore B J, Stem J S, Horwitz B A. 1991. Effects of photoperiod on body weight and food intake and energy expenditure in young rats. *Life Sciences*, **62**: 913 – 919.
- Li Q F, Huang C X, Liu X T. 1995. Effects of photoperiod and temperature on thermogenesis in Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Acta Zoologica Sinica*, **41**(4): 362 – 369. (in Chinese)
- Li Q F, Li N, Sun R Y. 1994. The adaptive thermogenesis of Brandt's voles (*Microtus brandtii*) during cold exposure. *Acta Theriologica Sinica*, **14**(4): 286 – 293. (in Chinese)
- Li Q F, Sun R Y, Huang C X, Wang Z K, Liu X T, Hou J J. 2001. Cold adaptive thermogenesis in small mammals from different geographical zones of China. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **129**: 949 – 961.
- Li X S, Wang D H, Yang J C. 2003. Effects of photoperiod on body weights and energy metabolism in Brandt's voles and Mongolian gerbils. *Acta Theriologica Sinica*, **23**(4): 304 – 311. (in Chinese)
- Li X S, Wang D H, Yang J C. 2004. Effects of cold acclimation on body weight, serum leptin level, energy metabolism and thermogenesis in the Mongolian gerbil *Meriones unguiculatus*. *Acta Zoologica Sinica*, **50**(3): 334 – 340. (in Chinese)
- Li X S, Wang D H. 2005. Regulation of body weight and thermogenesis in seasonally acclimatized Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Hormones and Behavior*, **48**: 321 – 328.
- Liu H, Wang D H, Wang Z W. 2003. Energy requirement during reproduction in female Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Journal of Mammalogy*, **84**(4): 1410 – 1416.
- Lovegrove B G. 2005. Seasonal thermoregulatory responses in mammals. *Journal of Comparative Physiology B*, **175**: 231 – 247.
- Merritt J F, Zegerts D A. 1991. Seasonal thermogenesis and body mass dynamics of *Clethrionomys gapperi*. *Canadian Journal of Zoology*, **69**: 2771 – 2777.
- Nagy T R, Gower B A, Stetson M H. 1995. Endocrine correlates of seasonal body mass dynamics in the collared lemming *Dicrostonyx groenlandicus*. *American Zoologist*, **35**: 246 – 258.
- Schmidt-Nielsen K. 1997. Temperature regulation. In: Schmidt-Nielsen K. *Animal Physiology: adaptation and environment* (5th edition). Cambridge: Cambridge University Press.
- Shi D Z, Hai S Z. 1996. Observation on Brandt's vole at low temperature in experimental condition. *Acta Theriologica Sinica*, **16**(4): 291 – 296. (in Chinese)
- Song Z G, Wang D H. 2001. Maximum energy assimilation rate in Brandt's vole *Microtus brandtii* from Inner Mongolia grassland. *Acta Theriologica Sinica*, **21**(4): 271 – 278. (in Chinese)
- Tomasi T E, Mitchell D A. 1996. Temperature and photoperiod effects on thyroid function and metabolism in cotton rats (*Sigmodon hispidus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **113**: 267 – 274.
- Wan X R, Wang M J, Zhong W Q. 1998. Ecology and management of Brandt's voles (*Microtus brandtii*). In: Zhang Z B, Wang Z W eds. *Ecology and Management of Rodent Pests in Agriculture*. Beijing: China Ocean Press, 209 – 220.
- Wang D H, Sun R Y, Wang Z W, Liu J S, Chen Z. 1996. Adaptive thermogenic properties during cold exposure in root voles (*Microtus oeconomus*). *Acta Zoologica Sinica*, **42**(4): 368 – 376. (in Chinese)

- Wang D H, Sun R Y, Wang Z W, Liu J S. 1999. Effects of temperature and photoperiod on thermogenesis in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) and root voles (*Microtus oeconomus*). *Journal of Comparative Physiology B*, **169**: 77–83.
- Wang D H, Wang Z W, Wang Y S, Yang J C. 2003. Seasonal changes of thermogenesis in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*) and Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **134** (Supplement 1, Abstract): S96
- Wang G M, Zhou Q Q, Zhong W Q, Wang G H. 1992. Food habits of Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Acta Theriologica Sinica*, **12** (1): 57–64. (in Chinese)
- Wang J M, Zhang Y M, Wang D H. 2006. Seasonal thermogenesis and body mass regulation in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*). *Oecologia*, **149**: 373–382.
- Wang Y, Huang C X, Li Q F, Sun R Y. 2001. The recruitment of brown adipose tissue and expression of uncoupling protein gene in Brandt's vole during cold exposure. *Zoological Research*, **22**: 41–45. (in Chinese)
- Zhang X Y, Wang D H. 2006. Energy metabolism, thermogenesis and body mass regulation in Brandt's voles (*Lasiopodomus bandtii*) during cold acclimation and rewarming. *Hormones and Behavior*, **50**: 61–69.
- Zhao Z J, Wang D H. 2005. Short photoperiod enhances thermogenic capacity in Brandt's voles. *Physiology and Behavior*, **85**: 143–149.
- Zhao Z J, Wang D H. 2006a. Effects of photoperiod on energy budgets and thermogenesis in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Journal of Thermal Biology*, **31**: 323–331.
- Zhao Z J, Wang D H. 2006b. Short photoperiod influences energy intake and serum leptin level in Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Hormones and Behavior*, **49**: 463–469.
- 王桂明, 周庆强, 钟文勤, 王广和. 1992. 布氏田鼠的食性. 兽类学报, **12**(1): 57–64.
- 王煜, 黄晨西, 李庆芬, 孙儒泳. 2001. 布氏田鼠冷暴露中褐色脂肪组织的增补及解偶联蛋白基因表达. 动物学研究, **22**: 41–45.
- 王德华, 孙儒泳, 王祖望, 柳劲松, 陈志. 1996. 根田鼠冷驯化过程中的适应性产热特征. 动物学报, **42**(4): 369–376.
- 宋志刚, 王德华. 2001. 内蒙古草原布氏田鼠的最大同化能. 兽类学报, **21**(4): 271–278.
- 李兴升, 王德华, 杨明. 2004. 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, **50**(3): 334–340.
- 李兴升, 王德华, 杨俊成. 2003. 光周期对布氏田鼠和长爪沙鼠体重和能量代谢的影响. 兽类学报, **23**(4): 304–311.
- 李庆芬, 李宁, 孙儒泳. 1994. 布氏田鼠对低温的适应性产热. 兽类学报, **14**(4): 286–293
- 李庆芬, 黄晨西, 刘小团. 1995. 光周期和温度对布氏田鼠产热的影响. 动物学报, **41**(4): 362–369.
- 陈竞峰, 钟文勤, 王德华. 2005. 单宁酸对布氏田鼠能量代谢的影响. 兽类学报, **25**(4): 326–332.
- 宛新荣, 钟文勤, 王梦军. 1998. 内蒙古典型草原重要害鼠的生态学及控制对策. 见: 张知彬, 王祖望主编. 农业重要害鼠的生态学和控制对策. 北京: 海洋出版社, 209–220.
- 施大钊, 海淑珍. 1996. 布氏田鼠在低温条件下的实验观察. 兽类学报, **16**(4): 291–296.