

自愿转轮运动对雄性长爪沙鼠体重和能量代谢的影响

胡振东^{1, 2} 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 淮北煤炭师范学院体育系, 淮北 235000)

摘要: 运动是影响动物能量平衡和体重变化的重要因素之一。为研究自愿转轮运动对体重和能量代谢的影响, 我们监测了8周自愿转轮运动过程中, 雄性长爪沙鼠的体重、能量摄入、消化率、静止代谢率(RMR)和非颤抖性产热(NST)的变化, 以及8周后的体脂含量、血清甲状腺激素(T₃、T₄)和瘦素(leptin)水平的变化等。结果发现, 8周自愿转轮运动增加了长爪沙鼠的体重和能量摄入以及血清瘦素水平(血清瘦素浓度比对照组高27%), 但对消化率、RMR和褐色脂肪组织的线粒体蛋白浓度等没有明显影响。尽管体脂含量和血清T₃和T₄没有显著差异, 但运动组体脂含量比对照组高33%, 血清T₃和T₄水平分别比对照组低10%和38%。血清瘦素浓度与体脂重量呈正相关。因此, 自动转轮运动并没有降低动物的体重和体脂含量, 但瘦素和甲状腺素在雄性长爪沙鼠能量代谢和能量平衡中的作用尚需进一步确定。

关键词: 长爪沙鼠; 自愿转轮运动; 体重; 能量摄入; 瘦素

中图分类号: Q494

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 1050 (2007) 02 - 0123 - 07

Effects of voluntary wheel exercise on body mass and energy metabolism in male Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*)

HU Zhendong^{1, 2}, 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 Department of Physical Education, Huaibei Coal Industry Teachers College, Huaibei 235000, China)

Abstract: In order to explore the effects of voluntary wheel exercise on body mass and energy metabolism in male Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*), we determined the body mass, energy intake, digestibility, resting metabolic rate (RMR), nonshivering thermogenesis (NST), body fat content, serum thyroid hormones (T₃ and T₄) and leptin concentrations in two groups, the control and the exercise group which are treated with 8-week-wheel running exercise. Body mass and energy intake increased in exercise group compared with control. Voluntary wheel exercise had no effects on digestibility, RMR, body fat content, serum leptin levels and T₃ and T₄ concentration, and mitochondrial protein content in brown adipose tissue, but the concentrations of T₃ and T₄ of wheel running gerbils were lower than those in the control by 10% and 38%, respectively, while the leptin levels and body fat mass increased by 27% and 33%, respectively. Serum leptin concentration was correlated positively with body fat mass but not related with energy intake. Altogether, voluntary wheel exercise stimulated the increase in body mass and food intake (exercise induced hyperphagia) but not in body fat contents in male Mongolian gerbils. The potential roles of leptin and thyroid hormones in the regulation of energy metabolism and energy balance in male Mongolian gerbils need to be further studied.

Key words: Body mass; Gross energy intake, Leptin, Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*), Voluntary wheel exercise

小型哺乳动物体重的稳定依赖于能量摄入和能量消耗之间的平衡 (Jequier and Tappy, 1999)。近年来, 动物在自愿转轮运动 (Voluntary wheel exer-

cise) 条件下的能量代谢和体重调节机理受到了较多关注。与强迫踏车运动 (treadmill) 和游泳运动模型相比, 自愿转轮运动是动物在正常的活动时间

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170151, 30430140)

作者简介: 胡振东 (1966 -), 男, 副教授, 从事生理学教学和研究工作. E-mail: huzhd2005@sina.com

收稿日期: 2006 - 11 - 08; 修回日期: 2007 - 01 - 26

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

和已经熟悉的环境中,没有外力逼迫而自愿进行运动,因此,观察到的结果更接近动物的实际情况 (Ishihara *et al.*, 1998)。目前,关于自愿转轮运动对啮齿动物体重影响的研究主要集中在实验鼠 (Nara *et al.*, 1999; Kimura *et al.*, 2004; Levin and Dunn-Meynell, 2004; Yuan *et al.*, 2004; Kawaguchi *et al.*, 2005),而对野生鼠的研究较少,有关的研究结果并不一致。有研究发现,自愿转轮运动使动物的摄食量增加或短暂抑制,体重下降 (Miyasaka *et al.*, 2003; Levin and Dunn-Meynell, 2004; Yuan *et al.*, 2004; Coutinho *et al.*, 2006);也有研究发现,自愿转轮运动使动物的摄食量增加或不变,体重维持恒定 (Bartness and Wade, 1985; Miyasaka *et al.*, 2003; Kimura *et al.*, 2004);还有研究发现,动物的摄食量增加,体重就增加 (Sandretto and Tsai, 1988; Gattermann *et al.*, 2004)。

瘦素 (leptin) 主要是由白色脂肪细胞分泌、肥胖基因编码、分子量为 16 kD 的蛋白类激素 (Zhang *et al.*, 1994),在体重调节过程中,主要以脂肪信号 (Adipose signal) 的形式,起到降低体重、抑制摄食和促进产热的作用 (Friedman and Hallas, 1998)。瘦素作为影响体重和能量代谢的关键信号之一,在啮齿动物中也受自愿转轮运动的影响 (Kimura *et al.*, 2004; Coutinho *et al.*, 2006)。一些研究发现,自愿转轮运动能显著降低血清瘦素浓度,其浓度与体脂含量显著正相关 (Kimura *et al.*, 2004; Levin and Dunn-Meynell, 2004; Coutinho *et al.*, 2006)。迄今,关于整合研究运动对能量代谢、产热和瘦素等方面影响的报道较少。

长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) 是内蒙古草原的代表性啮齿动物,主要以植物的种子为食,主要分布在沙化地区和农牧交错区。长爪沙鼠具有代谢率和热传导率较高、热中性区较宽等代谢特点 (Wang *et al.*, 2000)。关于影响长爪沙鼠体重调节、瘦素和能量摄入的研究已有一些报道,如光周期 (李兴升等, 2003; Zhao and Wang, 2006)、冷驯化 (李兴升等, 2004)、季节性变化 (Li and Wang, 2005a) 等对长爪沙鼠体重调节的影响。本实验研究了自愿转轮运动对室内繁殖饲养的雄性长爪沙鼠的体重、能量代谢和血清瘦素等方面的影响。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用长爪沙鼠为捕自内蒙古太仆寺旗野生个体的室内繁殖后代。实验前动物单只饲养于塑料鼠笼 (30 cm × 15 cm × 20 cm) 中,饲养温度为 23 ± 1℃,光照为 16L:8D,喂以北京科澳协力饲料有限公司生产的标准鼠饲料块,自由取食和饮水。

选取成年雄性长爪沙鼠 16 只,体重范围在 54.8 ~ 63.4 g (平均值 ± 标准误: 59.5 ± 0.7 g)。随机分为运动组和对照组,每组 8 只,单只饲养于鼠笼 (30 cm × 20 cm × 19 cm) 中,其中运动组鼠笼内带有一直径 17 cm 的转轮 (实验开始前将转轮锁定)。动物在鼠笼内适应 2 周后,将运动组转轮解除锁定,动物可自愿进行转轮运动。实验持续 8 周,每天测量体重;摄食量在实验第 1 周的第 1 ~ 3 d 和 4 ~ 6 d 共测定 2 次,此后每周测定 1 次;静止代谢率 (resting metabolic rate, RMR) 每周测定 1 次。为减少对动物的干扰,仅在实验开始和结束时测定非颤抖性产热。实验结束时,处死动物,收集血清和相关组织样品,待测血清瘦素和 T₃、T₄ 含量、体脂含量及线粒体蛋白等产热指标。

1.2 代谢率的测定

静止代谢率 (RMR) 采用封闭式流体压力呼吸计在动物的热中性区内 (30 ± 1℃) 测定,水浴控温,呼吸室容积为 3.6 L,用 KOH 和干燥硅胶分别吸收呼吸室内的 CO₂ 和水分。动物放入呼吸室内适应 1 h,稳定后开始记录耗氧量。每隔 5 min 记录 1 次,连续测定 60 min,选取稳定的 2 个连续的最低值计算 RMR。每次测定前后称量动物体重。非颤抖性产热 (nonshivering thermogenesis, NST) 在 25℃ (± 1℃) 测定,采用皮下注射去甲肾上腺素 (norepinephrine, NE) 诱导。NE 注射剂量以 Heldmaier (1971) 的公式: $NE (mg/kg) = 6.6W^{-0.458}$ 计算 (W 为动物体重, g)。注射 NE 后将动物迅速放回呼吸室中,每 5 min 记录 1 次耗氧量,连续测定 60 min,取稳定的两个连续的最大值计算 NST 值。耗氧量校对到标准状态下 (STP) (王德华和王祖望, 1990; 王建梅和王德华, 2006)。

1.3 能量摄入的测定

用食物平衡法进行有关测定。定时定量给动物喂食并称量动物体重,3 d 为一个周期 (Liu *et al.* 2002; Li and Wang, 2005b)。3 d 后小心收集剩余食物和粪便。每次收集在 15:00 ~ 16:00 之间进行。收集的食物和粪便样品,在 65℃ 的烘箱中干燥至恒重,手工分离剩余食物和粪便。取部分样品

(重量在 0.7 ~ 1.0 g 之间, ± 1 mg), 用 PARR1281 氧弹热量计 (美国 PARR 公司生产) 测定热值。

总能量摄入 (Gross energy intake, GEI, kJ/d)、消化能 (Digestible energy intake, DEI, kJ/d)、消化率 (Digestibility) 等参数的计算公式为 (Drozd, 1975; Liu *et al.*, 2003; Grodzinski and Wunder, 1975):

总能量摄入 (kJ/d) = 摄入干物质重量 (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) = 能量摄入 (kJ/d) - 粪便能 (kJ/d);

消化率 (%) = 消化能 (kJ/d) / 能量摄入 (kJ/d) $\times 100\%$ 。

1.4 体重和体脂含量的测定

体重用电子天平称量 (± 0.1 g)。体脂含量采用索氏抽提法测定。将去除内脏的动物尸体 (内脏器官上的脂肪保留) 置于 60℃ 烘箱中干燥至恒重, 粉碎后混匀, 称取 2 g 左右的样品, 包在干燥滤纸中, 放入含有乙醚的抽提瓶中, 在 70℃ 的水浴上回流约 5 h。抽提完毕, 将滤纸包晾干, 于烘箱中烘干、称重, 抽提前后的重量差即为样品中的脂肪重量。根据公式: 体脂重量 (g) = [样品中的脂肪重量 (g) / 样品重量 (g)] \times 胴体干重 (g); 体脂含量 (%) = 体脂重量 (g) / 胴体干重 (g) $\times 100\%$ 。

1.5 血清激素浓度的测定

断头处死动物、取血, 自然凝集 1 h 后, 于 4℃、4 000 r/min 离心 30 min, 取血清置于 -20℃ 保存备用。血清瘦素浓度采用 125 I—多物种瘦素放射免疫分析试剂盒 (美国 Linco 公司生产) 测定; 血清甲状腺激素 (T_3 和 T_4) 浓度采用 T_3 / T_4 125 I 放射免疫分析试剂盒 (购自北京中国原子能研究所) 测定。瘦素和甲状腺激素测定的批内差和批间差均小于 5%。已经证明 Leptin 和 T_3 / T_4 试剂盒适合于长爪沙鼠 (李兴升等, 2004; Zhao and Wang, 2006)。

1.6 线粒体蛋白含量的测定

将 0.1 g 左右 BAT 剪碎, 加入 0.5 ml 提取液 (250 mM 蔗糖, 5 mM Tris base, 1 mM $MgCl_2$, 0.5 mM EDTA 和 0.5 mg/ml 牛血清白蛋白, pH 7.4) 匀浆, 倒入 1.5 ml 离心管中, 再用 1 ml 提取

液冲洗 2 次。匀浆液于 3 000 r/min 离心 7 min, 取上清; 再在 10 000 r/min 条件下离心 10 min, 取沉淀; 用 0.5 ml 提取液悬浮后, 再在 10 000 r/min 下离心 10 min, 取沉淀; 然后按与组织重量 1:1 的比例用提取液悬浮沉淀 (Wiesinger *et al.*, 1989)。线粒体蛋白含量用 Folin - 酚法测定。以牛血清白蛋白作标准, 用分光光度计 (Beckman 公司, 型号 DU 800) 在 500 nm 波长读取数值 (Lowry *et al.*, 1951; Zhao and Wang, 2005)。

1.7 统计分析

数据采用 SPSS13.0 for Windows 软件包进行统计分析。数据经正态分布和方差齐性检验, 符合参数检验条件。体重、能量摄入、RMR、NST、瘦素、体脂含量和线粒体蛋白含量等的组间差异采用独立样本 *t* 检验; NST 组内差异采用配对样本 *t* 检验; 血清瘦素与体脂含量、能量摄入和体重等的关系采用 Pearson 相关分析。为去除体重的影响, 对能量摄入、RMR 和 NST 值用体重的 0.67 次幂进行校正 (Hayssen and Lacy, 1985; Li and Wang, 2005b)。文内结果用平均值 \pm 标准误表示, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 体重

实验前运动组和对照组长爪沙鼠的体重差异不显著 ($P > 0.05$)。运动开始时 (0 d) 组间差异亦不显著 ($t = 0.215$, $P > 0.05$)。随着运动时间的延长, 运动组体重逐渐增加, 在第 21 ~ 26 d 及第 36 ~ 56 d 显著高于对照组 ($P < 0.05$)。实验结束时运动组体重显著高于对照组 ($t = -2.690$, $P < 0.05$, 图 1)。

2.2 能量摄入

实验开始前, 运动组与对照组的总能量摄入 ($kJ/g^{0.67} \cdot d$)、消化能 ($kJ/g^{0.67} \cdot d$) 和消化率 (%) 组间无显著差异 ($P > 0.05$)。实验开始后, 运动组长爪沙鼠的总能量摄入和消化能逐渐增加, 从第 3 周开始显著高于对照组 ($P < 0.05$, 图 2, A、B); 实验结束时 (第 8 周), 运动组长爪沙鼠的总能量摄入和消化能均显著高于对照组 33% (总能量摄入: $t = 1.231$, $P < 0.05$, 图 2, A; 消化能: $t = 0.954$, $P < 0.05$, 图 2, B)。运动组长爪沙鼠的消化率在整个实验期间与对照组无显著差异 ($P > 0.05$, 图 2, C)。

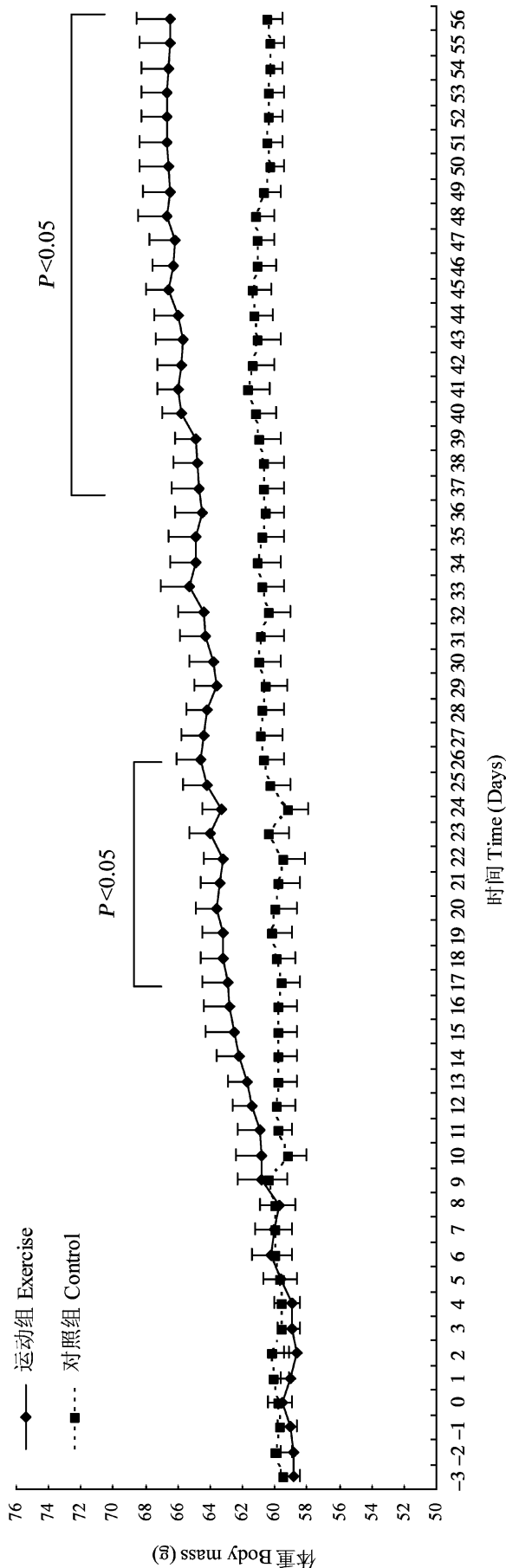


图1 自愿转轮运动对长爪沙鼠体重的影响
Fig. 1 Effect of voluntary wheel exercise on the body mass in male Mongolian gerbils

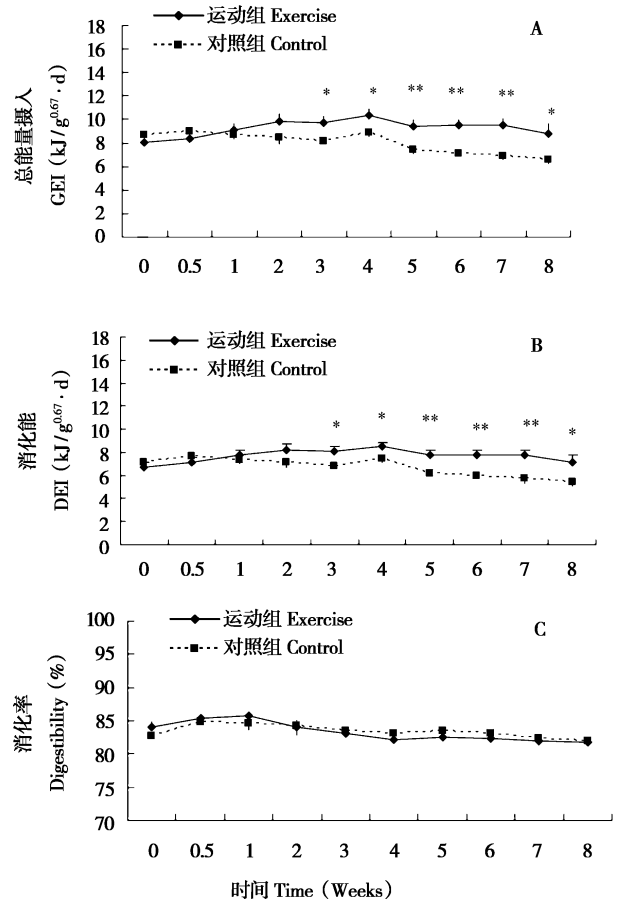


图2 自愿转轮运动对长爪沙鼠总能量摄入、消化能和消化率的影响
Fig. 2 Effect of voluntary wheel exercise on the gross energy intake (GEI), digested energy intake (DEI) and digestibility in male Mongolian gerbils

2.3 静止代谢率 (RMR)

实验开始前, 运动组长爪沙鼠的 RMR ($\text{mlO}_2/\text{g}^{0.67} \cdot \text{h}$) 与对照组无显著差异 ($t = 0.061, P > 0.05$)。运动开始后运动组长爪沙鼠的 RMR 与对照组也无显著差异 ($P > 0.05$, 图3)。

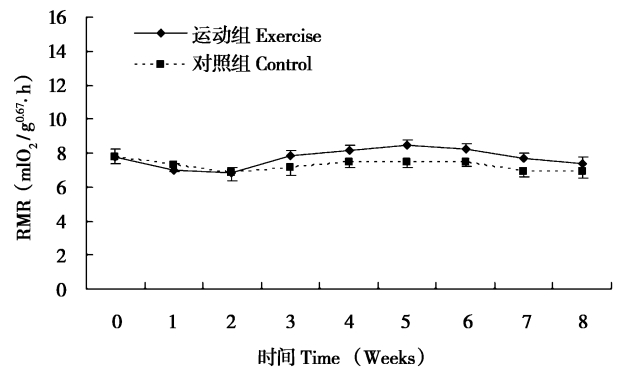


图3 自愿转轮运动对长爪沙鼠静止代谢率 (RMR) 的影响
Fig. 3 Effect of voluntary wheel exercise on the resting metabolic rate (RMR) in male Mongolian gerbils

2.4 非颤抖性产热 (NST)

NST ($\text{mlO}_2/\text{g}^{0.67} \cdot \text{h}$) 运动开始前和运动第 8 周后, 组间都没有差异 (运动前: $t = 1.664$, $P > 0.05$; 第 8 周: $t = 0.623$, $P > 0.05$)。运动组长爪

沙鼠第 8 周与开始前比较, NST 显著下降了 14% ($t = 2.503$, $P < 0.05$); 而对照组的 NST 则没有变化 ($t = 1.401$, $P > 0.05$, 表 1)。

表 1 自愿转轮运动对长爪沙鼠体脂、瘦素和 NST 的影响

Table 1 Effects of voluntary wheel exercise on the body fat mass, leptin level and NST in male Mongolian gerbils

	运动组 Exercise	对照组 Control	P 值 P value
体重 Body mass (g)	66.8 ± 2.0	60.7 ± 0.8	0.014
体脂重量 Body fat mass (g)	6.61 ± 1.17	4.27 ± 0.55	0.096
体脂含量 Body fat content (%)	32.19 ± 3.76	24.18 ± 2.38	0.094
血清瘦素浓度 Serum leptin levels (ng/ml)	31.00 ± 8.24	24.37 ± 5.38	ns
NST (mlO_2/h)			
初始值 Initial	297.55 ± 11.12	277.71 ± 7.47	ns
终止值 Final	280.64 ± 18.30	271.87 ± 10.81	ns
P 值 P value	ns	ns	
NST ($\text{mlO}_2/\text{g}^{0.67} \cdot \text{h}$)			
初始值 Initial	19.59 ± 0.78	18.06 ± 0.47	ns
终止值 Final	16.77 ± 0.87	17.49 ± 0.74	ns
P 值 P value	0.041	ns	

2.5 体脂和瘦素含量

8 周自愿转轮运动后, 虽然没有监测到运动组长爪沙鼠体脂重量 (g)、体脂含量 (%) 和血清瘦素浓度 (ng/ml) 与对照组之间有显著差异, 但运动组比对照组分别提高了 55%、33% 和 27% (表 1)。血清瘦素浓度与体脂重量 ($R^2 = 0.850$, $n = 16$, $P < 0.001$, 图 4) 和体重 ($R^2 = 0.282$, $n = 16$, $P < 0.05$) 显著正相关。血清瘦素浓度与第 8 周能量摄入 ($\text{kJ}/\text{g}^{0.67} \cdot \text{d}$) 之间不相关 ($R^2 = 0.0006$, $n = 16$, $P > 0.05$)。

2.6 甲状腺激素和 BAT 线粒体蛋白含量

实验结束时, 运动组长爪沙鼠的血清甲状腺激素 T_3 和 T_4 浓度与对照组之间无显著差异 ($P > 0.05$, 表 2), 但运动组 T_3 和 T_4 浓度分别比对照组

低 10% 和 38%。BAT 重量、线粒体蛋白总量和单位组织含量等指标在运动组和对照组长爪沙鼠间也无显著差异 ($P > 0.05$, 表 2)。

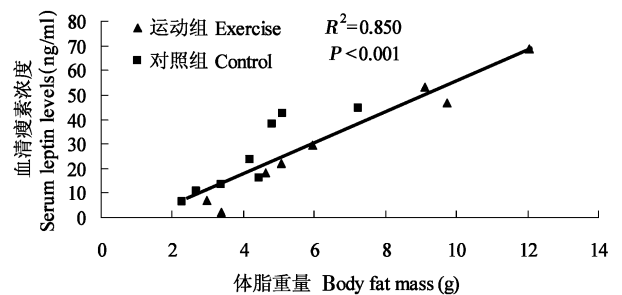


图 4 长爪沙鼠血清瘦素与体脂含量的相关关系

Fig. 4 The relationship between serum leptin levels and body fat content in male Mongolian gerbils

表 2 自愿转轮运动对长爪沙鼠血清 T_3 、 T_4 水平和褐色脂肪组织 (BAT) 线粒体蛋白含量的影响

Table 2 The effects of voluntary wheel exercise on serum T_3 and T_4 levels and mitochondrial (Mt) protein content of brown adipose tissue (BAT) in male Mongolian gerbils

	运动组 Exercise	对照组 Control	P 值 P value
T_3 ($\text{ng} \cdot \text{ml}^{-1}$)	1.45 ± 0.15	1.61 ± 0.25	ns
T_4 ($\text{ng} \cdot \text{ml}^{-1}$)	40.41 ± 6.30	64.95 ± 18.89	ns
褐色脂肪组织重量 BAT mass (g)	0.225 ± 0.019	0.187 ± 0.010	ns
线粒体蛋白浓度 Mt protein content			
mg/g tissue	11.85 ± 0.69	13.08 ± 0.80	ns
mg in whole tissue	2.61 ± 0.18	2.44 ± 0.19	ns

3 讨论

自愿转轮运动对不同动物的体重会产生不同程

度的影响。叙利亚仓鼠 (*Mesocricetus auratus*) 在 5 周自愿转轮运动过程中, 在第 8 ~ 29 d 出现 10 g 左右的体重下降, 但在第 30 ~ 35 d 体重又恢复到对

照水平 (Coutinho *et al.*, 2006), 但 Pieper 等 (1999) 则发现经 18 周的自愿转轮运动, 叙利亚仓鼠的体重没有产生变化。8 周自愿转轮运动使草原田鼠 (*Microtus pennsylvanicus*) 体重显著降低 (Kerbeshian and Bronson, 1996)。14 周自愿转轮运动对黑线毛足鼠 (*Phodopus sungorus sungorus*) 体重无显著影响 (Bartness and Wade, 1985)。大多数研究发现, 在大鼠和小鼠中, 自愿转轮运动抑制了动物的体重增长, 但这种抑制持续时间一般不到一周, 之后体重又恢复到对照水平, 但在整个自愿转轮运动期间, 运动组的体重低于对照组 (Lattanzio and Eikelboom, 2003; Yuan *et al.*, 2004)。我们的研究表明, 8 周自愿转轮运动后, 长爪沙鼠的体重显著增加, 运动最初几天没有出现类似大、小鼠的体重增长抑制现象。自愿转轮运动对长爪沙鼠体重的促进作用是一个逐步的过程, 到第 7 周后体重趋于稳定。Gattermann 等 (2004) 也发现自愿转轮运动增加了雄性叙利亚仓鼠的体重。

动物体重的稳定取决于能量摄入和能量消耗之间的平衡。在自愿转轮运动过程中, 动物可以通过增加能量摄入来补偿由于运动导致的能量消耗增加, 从而维持体重的稳定 (Bartness and Wade, 1985); 但也可能会由于能量消耗增加 (如 RMR 升高) (Sullo *et al.*, 2004)、体脂含量下降 (Yuan *et al.*, 2004; Coutinho *et al.*, 2006)、摄食抑制 (Afonso and Eikelboom, 2003; Lattanzio and Eikelboom, 2003; Yuan *et al.*, 2004) 或摄食虽增加但不足以弥补能量消耗的增加 (Coutinho *et al.*, 2006) 等原因, 从而导致体重下降。Gattermann 等 (2004) 发现, 自愿转轮运动使叙利亚仓鼠摄食量显著增加, 体脂含量无显著变化, 而体重则显著增加, 并认为体重增加的原因之一可能是自愿转轮运动对动物身体健康状况的改善。Alessio 等 (2005) 也认为, 自愿转轮运动对大鼠的健康有益。本研究中, 自愿转轮运动使长爪沙鼠的总能量摄入增加, 消化能也相应增加, 但消化率没有发生显著变化; 同时自愿转轮运动没有影响长爪沙鼠的自身维持消耗 (RMR)。虽然运动组长爪沙鼠的 NST 稍有降低, 但运动组与对照组之间在 BAT 重量和 BAT 线粒体蛋白浓度和整体 NST 能力等方面, 并没有差异。但很明显, 长爪沙鼠的能量摄入的增加超过了能量消耗的增加, 因而体重增加。对于野生啮齿动物而言, 自愿运动是一种比较温和的锻炼, 不同于长期剧烈运动, 因而适度的运动训练可以改善动物

的食欲和身体状态。

甲状腺激素 (T_3 和 T_4) 具有增加能量支出和刺激代谢产热的作用。但自愿转轮运动并没有导致长爪沙鼠血清 T_3 和 T_4 的浓度发生改变, 这与 NST 和 RMR 的相对稳定是相一致的。尽管组间差异不显著, 但自愿转轮运动使长爪沙鼠的血清 T_3 和 T_4 浓度趋于降低, 这是否与其 NST 的降低有关尚需进一步证明。

瘦素具有降低体重和抑制摄食的作用 (Friedman and Hallas, 1998)。研究发现, 自愿转轮运动条件下, 动物的血清瘦素浓度下降、摄食增加, 血清瘦素浓度与体脂含量存在显著的正相关 (Coutinho *et al.*, 2006)。在本研究中, 8 周转轮运动后, 运动组比对照组长爪沙鼠的体脂含量增加 33%, 总能量摄入增加 33% (没有监测到显著差异, 也可能与样本数较小有关)。自愿转轮运动导致雄性长爪沙鼠体重增加可能与运动诱导的过量摄食有关, 血清瘦素并没有起到“饥饿信号”作用导致摄食增加。在自愿转轮运动条件下, 瘦素可能参与了长爪沙鼠能量代谢和能量平衡的调节过程。本实验室的其它研究发现, 在冷驯化条件下长爪沙鼠的血清瘦素浓度与能量摄入显著负相关 (李兴升等, 2004), 而单独光周期驯化则没有发现这种相关性 (Zhao and Wang, 2006)。

总之, 8 周的自愿转轮运动显著增加了雄性长爪沙鼠的体重和能量摄入, 但对 RMR、NST、消化率、体脂含量、血清瘦素水平和甲状腺激素 (T_3 和 T_4) 含量等指标没有显著影响。血清瘦素和甲状腺激素在雄性长爪沙鼠的能量代谢和能量平衡的调节过程中的作用需进一步确定。

致谢: 感谢中国科学院动物研究所生理生态学研究组全体成员在实验过程中给予的帮助和对文稿的修改。

参考文献:

- Afonso V M, Eikelboom R. 2003. Relationship between wheel running, feeding, drinking, and body weight in male rats. *Physiol Behav*, **80** (1): 19 - 26.
- Alessio H M, Hageman A E, Nagy S, Philip B, Bymes R N, Woodward J L, Callahan P, Wiley R L. 2005. Exercise improves biomarkers of health and stress in animals fed ad libitum. *Physiol Behav*, **84** (1): 65 - 72.
- Bartness T J, Wade G N. 1985. Body weight, food intake and energy regulation in exercising and melatonin-treated Siberian hamsters. *Physiol Behav*, **35** (5): 805 - 808.
- Coutinho A E, Fediuc S, Campbell J E, Riddell M C. 2006. Metabolic

- effects of voluntary wheel running in young and old Syrian golden hamsters. *Physiol Behav*, **87**: 360 – 367.
- Drozd A. 1975. Metabolic Cages for Small Rodents. In: Grodzinski R Z, Klekowski, Duncan eds: *Methods for Ecological Bioenergetics*, IBP handbook 24. Oxford: Blackwell Scientific Press, 346 – 351.
- Friedman J M, Hallas J L. 1998. Leptin and the regulation of body weight in mammals. *Nature*, **395**: 763 – 770.
- Gattermann R, Weinandy R, Fritzsche P. 2004. Running-wheel activity and body composition in golden hamsters (*Mesocricetus auratus*). *Physiol Behav*, **82** (2–3): 541 – 544.
- Grodzinski W, Wunder B A. 1975. Ecological Energetics of Small Mammals. In: Golley F B, Petruszewicz K, Ryszkowski L eds. *Small Mammals: Their Productivity and Population Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 173 – 204.
- Hayssen V, Lacy R C. 1985. Basal metabolic rates in mammals: taxonomic differences in the allometry of BMR and body mass. *Comp Biochem Physiol*, **81**: 741 – 754.
- Heldmaier G. 1971. Nonshivering thermogenesis and body size in mammals. *J Comp Physiol*, **73**: 222 – 248.
- Ishihara A, Roy R R, Ohira Y, Ibata Y, Edgerton V R. 1998. Hypertrophy of rat plantaris muscle fibers after voluntary running with increasing loads. *J Appl Physiol*, **84** (6): 2183 – 2189.
- Jequier E, Tappy L. 1999. Regulation of body weight in humans. *Physiol Rev*, **79**: 451 – 480.
- Kawaguchi M, Scott K A, Moran T H, Bi S. 2005. Dorsomedial hypothalamic corticotropin-releasing factor mediation of exercise-induced anorexia. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, **288** (6): R1800 – 1805.
- Kereshian M C, Bronson F H. 1996. Running-induced testicular recrudescence in the meadow vole: role of the circadian system. *Physiol Behav*, **60** (1): 165 – 170.
- Kimura M, Tateishi N, Shiota T, Yoshie F, Yamauchi H, Suzuki M, Shibasaki T. 2004. Long-term exercise down-regulates leptin receptor mRNA in the arcuate nucleus. *Neuroreport*, **15** (4): 713 – 716.
- Larue-Achagiotis C, Rieth N, Gubern M, Laury M C, Louis-Sylvestre J. 1995. Exercise-training reduces BAT thermogenesis in rats. *Physiol Behav*, **57**: 1013 – 1017.
- Lattanzio S B, Eikelboom R. 2003. Wheel access duration in rats: I. Effects on feeding and running. *Behav Neurosci*, **117** (3): 496 – 504.
- Levin B E, Dunn-Meynell A A. 2004. Chronic exercise lowers the defended body weight gain and adiposity in diet-induced obese rats. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, **286** (4): R771 – 778.
- Li X S, Wang D H, Yang J C. 2003. Effect of photoperiod on body weight and energy metabolism in Brandt's voles (*Microtus brandti*) and Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Acta Theriologica Sinica*, **23** (4): 304 – 311. (in Chinese)
- Li X S, Wang D H, Yang M. 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. 2005a. Seasonal adjustments of body weights and thermogenesis in Mongolian gerbils: roles of short photoperiod and cold. *J Comp Physiol, B*, **175**: 593 – 600.
- Li X S, Wang D H. 2005b. Regulation of body weight and thermogenesis in seasonally acclimatized Brandt's voles (*Microtus brandti*). *Hormones and Behavior*, **48**: 321 – 328.
- Liu H, Wang D H, Wang Z W. 2002. Maximum metabolizable energy intake in the Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*). *J Arid Environ*, **52**: 405 – 411.
- Liu H, Wang D H, Wang Z W. 2003. Energy requirements during reproduction in female Brandt's voles (*Microtus brandti*). *J Mammal*, **84**: 1410 – 1416.
- Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, Randall R J. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem*, **193**: 265 – 275.
- Miyasaka K, Ichikawa M, Kawanami T, Kanai S, Ohta M, Sato N, Ebisawa H, Funakoshi A. 2003. Physical activity prevented age-related decline in energy metabolism in genetically obese and diabetic rats, but not in control rats. *Mech Ageing Dev*, **124** (2): 183 – 190.
- Nara M, Kanda T, Tsukui S, Inukai T, Umeda T, Inoue S, Kobayashi I. 1999. Reduction of leptin precedes fat loss from running exercise in insulin-resistant rats. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*, **107** (7): 431 – 434.
- Pieper D R, Loboock C A, Lichten E M, Malaczynski J. 1999. Dehydroepiandrosterone and exercise in golden hamsters. *Physiol Behav*, **67** (4): 607 – 710.
- Sandretto A M, Tsai A C. 1988. Effects of fat intake on body composition and hepatic lipogenic enzyme activities of hamsters shortly after exercise cessation. *Am J Clin Nutr*, **47** (2): 175 – 179.
- Sullo A, Brizzi G, Maffulli N. 2004. Triiodothyronine deiodinating activity in brown adipose tissue after short cold stimulation test in trained and untrained rats. *Physiol Res*, **53**: 69 – 75.
- Wang D H, Wang Z W. 1990. Strategies for survival of small mammals in a cold alpine environment II. Seasonal changes in the capacity of nonshivering thermogenesis in *Ochotona curzoniae* and *Microtus oeconomus*. *Acta Theriologica Sinica*, **10** (1): 40 – 53. (in Chinese)
- Wang D H, Wang Y S, Wang Z W. 2000. Metabolism and thermoregulation in the Mongolian gerbil *Meriones unguiculatus*. *Acta Theriol*, **45** (2): 183 – 192.
- Wang J M, Wang D H. 2006. Comparison of nonshivering thermogenesis induced by dosages of norepinephrine from 3 allometric equations in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*). *Acta Theriologica Sinica*, **26** (1): 84 – 88. (in Chinese)
- Wiesinger H, Heldmaier G, Buchberger A. 1989. Effect of photoperiod and acclimation temperature on nonshivering thermogenesis and GDP-binding of brown fat mitochondria in the Djungarian hamster *Phodopus s. sungorus*. *Pflugers Arch*, **413**: 667 – 672.
- Yuan Q, Fontenele-Neto J D, Fricker L D. 2004. Effect of voluntary exercise on genetically obese *Cpe^{fat/fat}* mice: quantitative proteomics of serum. *Obes Res*, **12** (7): 1179 – 1188.
- Zhang Y, Proenca R, Maffei M, Barone M, Leopold L, Friedman J M. 1994. Positional cloning of the mouse obese gene and its human homologue. *Nature*, **372**: 425 – 432.
- Zhao Z J, Wang D H. 2005. Short photoperiod enhances thermogenic capacity in Brandt's voles. *Physiol Behav*, **85**: 143 – 149.
- Zhao Z J, Wang D H. 2006. Effect of photoperiod on body mass, energy balance and thermogenesis in Mongolian gerbils. *Therm Biol*, **31**: 323 – 331.
- 王德华, 王祖望. 1990. 小哺乳动物在高寒环境中的生存对策: II. 高原鼠兔和根田鼠非颤抖性产热 (NST) 的季节性变化. *兽类学报*, **10** (1): 40 – 53.
- 王建梅, 王德华. 2006. 不同去甲肾上腺素剂量下布氏田鼠非颤抖性产热比较. *兽类学报*, **26** (1): 84 – 88.
- 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.