

三种啮齿类动物前肢挖掘效率分析

储昭灿 李金钢* 李月明

(陕西师范大学生命科学院 西安 710062)

摘要:以甘肃鼯鼠(*Myospalax cansus*)、棕色田鼠(*Lasiopodomys mandarinus*)和小鼠(*Mus musculus*)为对象,对其尺骨、桡骨和肱三头肌结构进行了比较,并通过力学模型,对这三种生活类型鼠类前肢的挖掘效率进行分析。结果显示,甘肃鼯鼠肘关节位置大幅度前移,尺骨鹰嘴特化突出,形成更加省力的骨学杠杆基础,其中甘肃鼯鼠的鹰嘴尺骨比例达0.40,棕色田鼠和小鼠的鹰嘴尺骨比例分别约为0.19和0.18。此外,甘肃鼯鼠提供挖掘动力的肱三头肌近体端长头覆盖整个肩胛骨下缘,外侧头和内侧头覆盖神经沟到肱骨肘关节髁附近区域,远体端扁腱附着于尺骨鹰嘴,整块肌肉非常发达,棕色田鼠和小鼠均无此特化现象。说明甘肃鼯鼠前肢结构更加适应地下掘土生活,其挖掘效率远大于棕色田鼠和小鼠。

关键词:甘肃鼯鼠,前肢骨骼,适应性进化,挖掘效率

中图分类号:Q955 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2007)02-17-04

Analysis of Digging Efficiency of the Forelimbs of Three Rodents

CHU Zhao-Can LI Jin-Gang* LI Yue-Ming

(College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In order to study the adaptive evolution of the fossorial life of rodent, three different phenotypic rodents including typical subterranean rodent *Myospalax cansus*, semi-subterranean rodent *Lasiopodomys mandarinus* and surface-dwelling rodent *Mus musculus* were selected to analysis their digging efficiency in this study. We constructed their digging efficiency through a simple dynamic model by comparing the morphological characters of ulna, radius and triceps brachii which provide the digging impetus. The result demonstrates that the elbow joint of *Myospalax cansus* shifts forward a lot, and its ulna olecranon especially extrude, which response for forming a more advantageous dynamics lever and contributing to a better digging efficiency than *L. mandarinus* and *Mus musculus*. Agree with the results, the olecranon proportion of *Myospalax cansus* is about 0.4, *L. mandarinus* and *Mus musculus* 0.19 and 0.18 respectively. In addition, the long head of the *Myospalax cansus*'s triceps brachii overlays the whole inferior border of the scapula, the lateral head and medial head start from sulcus of radial nerve and almost overlay humerus, and the triceps brachii attaches to ulna olecranon by a tendon. The whole muscle of *Myospalax cansus* is well developed, which is significantly stronger than *L. mandarinus*'s and *Mus musculus*'s. The results indicated that *Myospalax cansus* adapts to the fossorial life better because of the specialization of its forelimbs.

Key words: *Myospalax cansus*; Bones of forelimbs; Adaptive evolution; Digging efficiency

动物的生存方式及其所付出的代价和其自身对相应环境的适应关系非常密切^[1],不同生境中的动物都会在环境压力下产生一定的适应性进化。地下鼠终生生活于地下隧道中,很少到地上活动,成功地避开了取食竞争,也拥有了更大的逃避空间^[2,3]。但地下黑暗和低氧生活

环境给其觅食活动带来了一定的困难。在长期

基金项目 国家自然科学基金资助项目(No.30670360);

* 通讯作者, E-mail: jingang@snnu.edu.cn;

第一作者介绍 储昭灿,男,硕士研究生,研究方向:动物生理生态学, E-mail: chuzhaocan@stu.snnu.edu.cn

收稿日期:2006-10-19,修回日期:2006-12-30

的适应进化过程中,它们产生了许多特化特征,以适应这种独特的生活方式。甘肃鼯鼠(*Myospalax cansus*)是一种严格营地下生活的啮齿动物,挖掘活动频繁,其地下洞道结构复杂,掘土量非常大^[4]。已有学者对鼯鼠洞道工程学、洞道结构、空间格局作过研究^[5,6],但对甘肃鼯鼠前肢掘土效率的力学分析未见报道。

本文以典型地下生活鼠甘肃鼯鼠、非严格地下生活鼠棕色田鼠(*Lasiopodomys mandarinus*)和地面生活鼠小鼠(*Mus musculus*)为研究对象,对三者前肢骨骼及肱三头肌的结构进行力学分析。比较不同生境中鼠类的掘土效率,探讨这三种鼠类挖掘洞道的躯体力学及其对所处环境的一个适应对策,从力学分析角度,探讨甘肃鼯鼠能高效挖掘洞道的理论依据。

1 材料与方法

甘肃鼯鼠 6 只,体重(199.26 ± 9.89) g;棕色田鼠 6 只,体重(34.93 ± 1.72) g;小鼠 6 只,体重(34.88 ± 0.66) g。其中,甘肃鼯鼠捕自陕西省延安市青化砭地区,棕色田鼠捕自河南省灵宝市郊区,ICR 小鼠购买于西安交通大学医学院动物实验中心。

所用样本均为健康成体,雌雄不限。动物乙醚麻醉后称重,断头处死,取前肢剥除皮肤,逐块取下上臂肌,记录甘肃鼯鼠、棕色田鼠、小鼠肱三头肌的起止点。电子天平称量肱三头肌鲜重,并计算肱三头肌鲜重和体重比 m_t/m_b 。剥除肌肉组织,游标卡尺测量尺骨长度(L_u)、

桡骨长度(L_r)和尺骨鹰嘴长度(L_o)。

以肱三头肌尺骨鹰嘴附着点到近体端起点中心位置之间连线为肱三头肌收缩力方向,以挖掘时腕关节处所受阻力为 F_r ,垂直地面向上,肱骨肘关节头中心为支点,肱三头肌提供动力为 F_m ,尺桡骨与地面任意夹角为 θ ,阻力臂 R_r ,动力臂 R_m ,阻力矩 M_r ,动力矩 M_m 。

F_r 和 F_m 之间的力学计算公式^[7,8]:

$$\text{阻力矩 } M_r = F_r R_r = F_r L_r \text{Cos}\theta$$

$$\text{动力矩 } M_m = F_m R_m = F_m L_o \text{Cos}\theta$$

$$F_m = F_r L_r / L_o$$

数据采用 SPSS 10.0 软件,单因素方差分析进行组间差异比较,结果以 Mean ± SD 表示,显著性水平为 0.05。

2 结果分析

2.1 骨学特征 甘肃鼯鼠前肢肘关节位置大幅度前移,尺骨鹰嘴伸长特化,鹰嘴尺骨比例(L_o/L_u)达 0.40 左右;棕色田鼠、小鼠鹰嘴尺骨比例分别约为 0.19 和 0.18。甘肃鼯鼠的鹰嘴尺骨比例和棕色田鼠、小鼠的鹰嘴尺骨比例存在极显著差异($P < 0.01$);棕色田鼠和小鼠的鹰嘴尺骨比例存在显著差异($P < 0.05$) (表 1)。另外甘肃鼯鼠尺、桡骨相对短粗,棕色田鼠和小鼠均无此特化现象(图 1)。

2.2 肌群特征 甘肃鼯鼠的前肢臂肌肌群与棕色田鼠和小鼠存在显著差异,在掘土过程中提供收缩力的肱三头肌表现尤为明显。

表 1 甘肃鼯鼠、棕色田鼠、小鼠尺桡骨相关参数

Table 1 Parameters of ulna and radius of *Myospalax cansus*, *Lasiopodomys mandarinus* and *Mus musculus*

种类 Species	桡骨(L_r) Radius(mm)	尺骨(L_u) Ulna(mm)	尺骨鹰嘴(L_o) Olecranon(mm)	鹰嘴比例 Olecranon proportion
甘肃鼯鼠 <i>Myospalax cansus</i>	18.73 ± 0.24	31.00 ± 0.40	12.28 ± 0.18	0.396 1 ± 0.006 6 ^a
棕色田鼠 <i>Lasiopodomys mandarinus</i>	12.02 ± 0.19	14.50 ± 0.23	2.75 ± 0.07	0.189 5 ± 0.009 0 ^b
小鼠 <i>Mus musculus</i>	11.96 ± 0.11	14.54 ± 0.13	2.58 ± 0.02	0.177 4 ± 0.001 8 ^c

检验水平 0.05,不同上标字母示显著性差异。

Test level at 0.05 means with different superscript letters are significantly different in the same column.

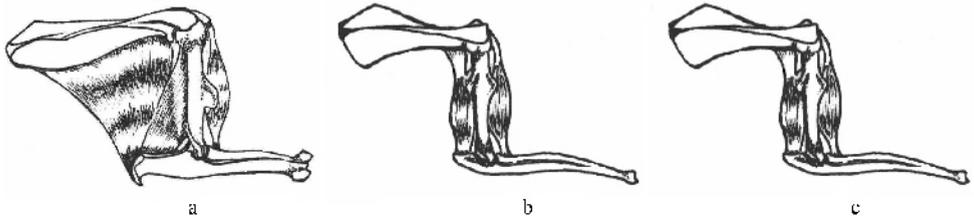


图 1 甘肃鼯鼠 (a) 棕色田鼠 (b) 小鼠 (c) 前肢肘关节位置及肱三头肌起止点比较

Fig. 1 Comparison of the elbow joint position and the attachment sites of triceps brachii among *Myospalax cansus* (a) , *Lasiopodomys mandarinus* (b) and *Mus musculus* (c)

甘肃鼯鼠肱三头肌近体端起点长头覆盖整个肩胛骨下缘, 外侧头和内侧头分离不明显, 自桡神经沟直到肱骨肘关节附近, 远体端止于尺骨鹰嘴, 整块肌肉非常发达(图 1 :a)。棕色田鼠和小鼠肱三头肌近体端长头起自肩胛骨关节盂附近, 外侧头起自肱骨桡神经沟外上方, 内侧头起自桡神经沟内下方, 外侧头和内侧头分离明显, 肌腹远体端以扁腱止于尺骨鹰嘴(图 1 b c)。甘肃鼯鼠肱三头肌近体端附着点明显变大, 这可能是长期大量掘土所致^[9]。棕色田鼠和小鼠不具备此特征。

甘肃鼯鼠、棕色田鼠和小鼠的 m_t/m_b 分别约为 0.012、0.004 和 0.003。甘肃鼯鼠的 m_t/m_b 约为棕色田鼠的 2.8 倍、小鼠的 4 倍。甘肃鼯鼠的 m_t/m_b 与棕色田鼠、小鼠相比, 存在极显著差异 ($P < 0.01$) ; 棕色田鼠和小鼠的 m_t/m_b 也存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.3 甘肃鼯鼠前肢挖掘效率分析 依前肢掘

土力学模型, 如挖掘阻力一定, 从 $F_m = F_r L_r/L_o$ 来看, 鼠类 L_r/L_o 值越小, 即鹰嘴尺骨比例 (L_o/L_u) 越大, 肱三头肌收缩所提供的挖掘动力越小。

对上述三种鼠类进行前肢挖掘力学分析, 结果显示甘肃鼯鼠前肢骨骼构造符合这样的省力效应(图 2)。甘肃鼯鼠的鹰嘴尺骨比例分别为棕色田鼠的 2.1 倍、小鼠的 2.2 倍。在遇到相同挖掘阻力时, 棕色田鼠肱三头肌所提供的收缩力约为甘肃鼯鼠的 2.9 倍; 小鼠约为甘肃鼯鼠的 3.1 倍。说明甘肃鼯鼠在掘土过程中省力效应明显。

此外, 甘肃鼯鼠肱三头肌发达, 鲜重占体重的 1.2% 左右, 这与前肢骨骼变化协调一致。鹰嘴尺骨比例明显增大, 有利于肌肉附着, 为甘肃鼯鼠掘土行为提供更加省力的杠杆基础和强大的肌力。

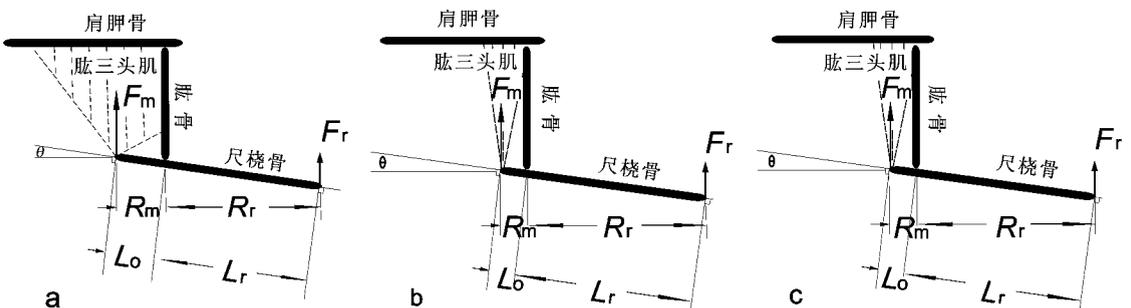


图 2 甘肃鼯鼠 (a) 棕色田鼠 (b) 和小鼠 (c) 前肢骨骼结构力学分析

Fig. 2 Structural mechanical analysis of forelimbs skeleton of *Myospalax cansus* (a) , *Lasiopodomys mandarinus* (b) and *Mus musculus* (c)

3 讨论

地下鼠营造地下洞道,成功地回避了取食竞争,也拥有了更大的逃避空间,但地下黑暗和低氧的环境给其觅食活动带来了一定的困难。频繁的挖掘,是一项高耗能的活动,怎样最有利地挖掘,减少能量消耗是地下鼠类面临的重要问题。地下鼠类前肢特殊结构给予一种有益的启示。甘肃鼯鼠是我国黄土高原上一种特有的地下鼠,其前肢骨骼和相关肌肉以及前足爪都十分发达^[3,10,11]。由于营严格的地下生活,挖掘几乎是其惟一的取食方式,前足爪是其挖掘的主要工具^[4],其前肢的使用频率和强度都明显加大。其次,地下鼠所生活的洞道一般为低 O₂、高 CO₂ 环境^[3,12],迫使其必须提高挖掘效率,消耗最少的氧气完成比较耗能的活动,以协调能量付出和收益之间的关系。甘肃鼯鼠形成的这种十分有利的前肢骨学杠杆有重要的生态学意义,结合肱三头肌近体端附着点的变化,使其在活动过程中使肌力方向大约和肱骨平行,可以最有效地克服阻力,减少氧耗。

小鼠、棕色田鼠和甘肃鼯鼠在前肢骨骼和肌肉上表现出的差异与生活方式密切相关,充分表现了生物体器官结构和功能相适应的特征。小鼠由小家鼠驯养而来,小家鼠完全在地面取食,仅挖掘自己的栖息洞,挖掘能力较弱。棕色田鼠也通过挖掘获得食物,但挖掘取食并不是获得食物的惟一方式,其地上活动时间占很大比例,并具有开放的洞道,也不会面临低氧带来的压力,但其挖掘频率高于小鼠,鹰嘴尺骨比例也出现增大趋势,肱三头肌占体重之比明显大于小鼠。甘肃鼯鼠在长期的地下生活中,前肢产生的适应性变化最突出,能够很好地适应地下生活环境。这三种不同生境中的动物前肢鹰嘴尺骨比例和肱三头肌占体重比例的变化,从小鼠到棕色田鼠再到甘肃鼯鼠依次出现明显增大的趋势,这和它们所选择生境的差异是一致的。其中,甘肃鼯鼠对地下生活的适应是多方面的,主要挖掘器官——前肢在结构上的变化仅是一个方面。其视听感觉、能量代谢

方面,在低氧条件下的实际挖掘效价等等,也应该与地面生活鼠类存在显著适应性进化差异,需要进一步的研究来证实。

综上所述,这三种不同生境中的啮齿类动物前肢骨骼和肱三头肌结构存在明显的差异,甘肃鼯鼠这一典型地下鼠类相较于半地下鼠类棕色田鼠和地面鼠类小鼠来讲,具备高效率的掘土能力,为其占据地下这一特殊生态位提供了保障。研究结果也充分显示,从地面生活类型鼠类到营严格地下生活的鼠类,它们的前肢鹰嘴尺骨比例出现依次增大的趋势,提供挖掘动力的肱三头肌也随之出现发达趋势。这与动物会在相应环境选择条件下产生一定的适应性进化是一致的。

参 考 文 献

- [1] 苏建平.高原鼯鼠挖掘取食活动的能量代价及其最佳挖掘取食行为. *兽类学报*, 1992, 12(2): 117~125.
- [2] Andersen D C. Below-ground herbivory in natural communities: a review emphasizing fossorial animals. *Q Rev Biol*, 1987, 62(3): 261~286.
- [3] Lacey E A, Patton J L, Cameron G N. *Life Underground: the Biology of Subterranean Rodents*. Chicago: University of Chicago Press, 2000, 1~145.
- [4] 曹志东, 王春梅. 甘肃鼯鼠的生物学特性研究. *甘肃农业科技*, 1994(5): 32~33.
- [5] 李晓晨, 李娜, 王冬. 鼯鼠洞道结构的建筑工程学分析. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(3): 86~90.
- [6] 樊乃昌, 谷守勤. 中华鼯鼠(*Myosorex cansus*)的洞道结构. *兽类学报*, 1981, 1(1): 67~72.
- [7] Polk J D. Adaptive and phylogenetic influences on musculoskeletal design in cercopithecine primates. *J Exp Biol*, 2002, 205(21): 3399~3412.
- [8] 李晓晨, 王廷正. 棕色田鼠与甘肃鼯鼠咀嚼肌结构和功能的比较. *兽类学报*, 1999, 19(4): 308~314.
- [9] Zumwalt A. The effect of endurance exercise on the morphology of muscle attachment sites. *J Exp Biol*, 2006, 209(3): 444~454.
- [10] Nevo E. *Mosaic Evolution of Subterranean Mammals: Regression, Progression and Global Convergence*. Oxford: Oxford University Press, 1999, 1~413.
- [11] 张堰铭, 刘季科. 地下鼠生物学特征及其在生态系统中的作用. *兽类学报*, 2002, 22(5): 144~154.
- [12] Shams I, Avivi A, Nevo E. Oxygen and carbon dioxide fluctuations in burrows of subterranean blind mole rats indicate tolerance to hypoxia-hypercapnic stresses. *Comp Biochem Physiol*, 2005, 142(3): 376~382.