

甘肃鼯鼠与 SD 大鼠骨骼肌低氧适应的比较

高媛^① 熊晓毅^① 谢惠春^{①②} 何建平^{①*}

① 陕西师范大学生命科学学院 西安 710062; ② 青海师范大学生命科学学院 西宁 810008

摘要:运用组织学和紫外分光光度法,对常氧、低氧 2 周和 4 周的甘肃鼯鼠(*Myospalax cansus*)及 SD 大鼠(*Rattus norvegicus*)骨骼肌形态结构、乳酸脱氢酶(LDH)、琥珀酸脱氢酶(SDH)活力及肌红蛋白(Mb)浓度进行测定。结果显示,甘肃鼯鼠骨骼肌形态结构在常氧、低氧 2 周及 4 周后变化不明显;SD 大鼠随低氧时间延长发生显著变化,低氧 2 周后,肌纤维明显萎缩,间隙增大,结构较紊乱;低氧 4 周后,肌纤维破裂,呈细丝状,不规则,大小不一致,肌节紊乱。甘肃鼯鼠 LDH 活性随低氧时间增长逐渐降低,但无显著性差异($P > 0.05$);在不同时间低氧处理后,甘肃鼯鼠前后肢的 LDH 活性均极显著低于 SD 大鼠($P < 0.01$);常氧条件下,甘肃鼯鼠前后肢 SDH 活性低于 SD 大鼠,但无显著差异($P > 0.05$),低氧 2 周及 4 周后,与 SD 大鼠呈极显著差异($P < 0.01$);常氧条件下,甘肃鼯鼠前后肢 Mb 浓度均显著高于 SD 大鼠($P < 0.05$),低氧 2 周及 4 周后,极显著高于 SD 大鼠($P < 0.01$)。结果表明,甘肃鼯鼠骨骼肌较 SD 大鼠有着更强的低氧耐受力。

关键词:甘肃鼯鼠;SD 大鼠;骨骼肌;琥珀酸脱氢酶;乳酸脱氢酶;肌红蛋白

中图分类号:Q958.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2012)03-122-07

Comparison of Skeletal Muscle Hypoxia Adaptation between Gansu Zokor (*Myospalax cansus*) and SD Rat

GAO Yuan^① XIONG Xiao-Yi^① XIE Hui-Chun^{①②} HE Jian-Ping^{①*}

①College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062;

②College of Life Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: Activity of lactate dehydrogenase (LDH) and succinate dehydrogenase (SDH) as well as the concentration of myoglobin (Mb) in Gansu Zokors (*Myospalax cansus*) and SD rats (*Rattus norvegicus*) under normoxia, 2 weeks and 4 weeks of hypoxia were measured through histological and UV spectrophotometer methods. The results showed no significant difference in Gansu Zokor skeletal muscle morphology among different groups, but a significant morphology change in SD rats was observed; After 2 weeks of hypoxia, the muscle fiber was significantly atrophied, the gap was increased, and the structure was more disordered. After 4 weeks of hypoxia, the muscle fiber was broken down, and sarcomere was disordered. Activity of LDH also showed no difference after different hypoxia adaptations in the Gansu Zokor ($P > 0.05$); but compared to SD rat, activity of LDH in the Gansu Zokor was significantly lower after different hypoxia adaptations ($P < 0.01$). The activity of SDH in the Gansu Zokor was lower than that of SD rat, but with no significant difference ($P > 0.05$), after 2 or 4 weeks of hypoxia, the enzyme activity was significantly lower than that of SD rat ($P < 0.01$). The

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 30670360);

* 通讯作者, E-mail: hejianping@snnu.edu.cn;

第一作者介绍 高媛,女,硕士研究生;研究方向:动物生理学;E-mail: gaoyuanalt@stu.snnu.edu.cn。

收稿日期:2011-12-01,修回日期:2012-03-01

concentrations of Mb in the Gansu Zokor were higher than those in the SD rat in different hypoxia adaptation groups ($P < 0.05$) ($P < 0.01$). We conclude that Gansu Zokor is much more tolerable to hypoxia than SD rat.

Key words: Gansu Zokor (*Myospalax cansus*); SD rat (*Rattus norvegicus*); Skeletal muscle; Lactate dehydrogenase; Succinate dehydrogenase; Myoglobin

地下鼠(subterranean rodents)终生营地下生活,由于长期处于黑暗、低氧和高二氧化碳洞道环境,在形态结构、生理、生态及行为等方面都表现出许多特殊的适应地下生活特性,具有趋同的形态学特征,一般身体紧凑,颈短、尾短、前后足相关的肌肉强大而有力,适于地下洞道掘土活动^[1-3]。

骨骼肌是构成哺乳动物机体分布最多的组织,在动物活动中起极其重要的作用,人(*Homo sapiens*)及大部分哺乳动物必须通过骨骼肌的收缩和舒张完成躯体运动^[4]。机体运动是一个耗能过程,供能方式主要包括有氧代谢和无氧代谢 2 种,其中前一过程的标志性酶为琥珀酸脱氢酶(succinate dehydrogenase, SDH),而后一过程的关键酶为乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH),琥珀酸脱氢酶活性高低及含量决定三羧酸循环速度,直接影响动物有氧供能,乳酸脱氢酶主要通过促进糖酵解为机体快速运动提供能量^[5],其活性与组织细胞内的氧分压密切相关。肌红蛋白(myoglobin, Mb)是存在于心肌和骨骼肌中具储氧作用的蛋白质,在相同氧分压下其结合氧的能力是血红蛋白(hemoglobin, Hb)的 6 倍^[6],它通过与氧可逆性结合为肌细胞来储存或转运氧,肌细胞内 Mb 含量反映了肌肉组织氧的供应。有研究表明,营地下洞道生活的高原鼯鼠(*Myospalax baileyi*)心肌、骨骼肌、肝和肾中乳酸脱氢酶活性均明显低于地面生活的高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)和实验大鼠(*Rattus norvegicus*)相应脏器中的乳酸脱氢酶活性^[7],其心重量与体重的比、血液中红细胞数和血红蛋白含量、心肌和骨骼肌中肌红蛋白含量也都明显高于世居高原的地面动物,如高原鼠兔、高原牦牛(*Bos grunniens*)以及实验动物 SD 大鼠^[8]。

甘肃鼯鼠(*M. cansus*)是我国黄土高原特有

的地下鼠,其前肢骨骼、骨骼肌及前足爪都十分发达^[9],在长期低氧洞道生活条件下,产生了一些特化的结构,如前肢鹰嘴尺骨比例增大,提供挖掘动力的肱三头肌也显现出发达的趋势^[10-11]。本实验以甘肃鼯鼠、SD 大鼠为研究对象,对低氧条件下两者骨骼肌显微结构及 LDH、SDH 活性、Mb 浓度变化进行比较研究,旨在进一步探讨地下鼠骨骼肌低氧适应特征。

1 材料与方法

1.1 实验动物 实验用健康成年甘肃鼯鼠 48 只,体重 200 ~ 280 g,雌雄各半,采自陕西省延安市,饲以胡萝卜;健康成年 SD 大鼠 48 只,体重 200 ~ 280 g,雌雄各半,购自陕西省中医研究所,饲以鼠粮、供水。2 种动物均置于动物饲养箱内,以锯末作笼垫,棉花作巢材,室温(21 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,适应 1 周后开始实验。

1.2 实验方法

1.2.1 低氧处理模型 甘肃鼯鼠和 SD 大鼠各分 3 组,每组 16 只。常氧对照组($n = 16$),自由呼吸室内空气,正常饲养;慢性低氧 2 周组($n = 16$),动物分别置于低氧舱内,氧气浓度 14.5%,每日低氧 10 h,剩余时间常氧饲养,连续低氧 2 周;慢性低氧 4 周组($n = 16$),氧气浓度 14.5%,每日低氧 10 h,剩余时间常氧饲养,连续低氧 4 周。JRC-1020 型热磁氧分析仪(北京均方理化科技研究所)监控舱内氧浓度,低氧时正常供食、供水。

1.2.2 骨骼肌显微结构 甘肃鼯鼠和 SD 大鼠在低氧处理完成后,立即在同一时间进行取样。方法:乙醚麻醉,迅速取前、后肢腓肠肌,切成 $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 的组织块,置于 10% 中性福尔马林液 4°C 固定 24 h。常规石蜡包埋,切片厚 $6 \mu\text{m}$,H. E 染色。NIKON (F1650K/AD-1260B 型)显微镜观察并摄影。

1.2.3 酶活性测定 甘肃鼯鼠和 SD 大鼠在低氧处理完成后,立即在同一时间进行取样。方法:乙醚麻醉,迅速取其前、后肢骨骼肌,锡纸包裹后液氮冷冻 5 min, -70°C 冰箱保存。制备匀浆液时剔除脂肪组织、滤纸吸净血污,剪碎,称取 1.000 g,按 1:9(即 1 g 肌肉加 9 ml 生理盐水)稀释制成 10% 匀浆液,组织放入玻璃匀浆器,加入 4°C 预冷 1 ml Trizol 试剂,快速研磨成肌肉匀浆液。移入 1.5 ml Eppendorf 管, 4°C 10 000 r/min 离心 20 min,弃沉淀,取上层匀浆液移入另一 Eppendorf 管冷冻保存。用 UV21601 紫外线可见分光光度计(南京东迈仪器有限公司)测量吸光度值并按公式计算酶活性。乳酸脱氢酶(LDH)测定试剂盒、琥珀酸脱氢酶(SDH)测定试剂盒及考马斯亮兰蛋白测定试剂盒购自南京建成科技有限公司。

1.2.4 骨骼肌肌红蛋白测定 甘肃鼯鼠和 SD 大鼠在低氧处理完成后,立即在同一时间进行取样。方法:乙醚麻醉,迅速取其前、后肢腓肠肌,称取 0.2 g,用冰冻生理盐水洗净残血,滤纸吸干,剪碎加入 10 倍体积 Tris-HCl 缓冲液($\text{pH} = 7.2$),匀浆后高速离心(4°C 10 000 g) 10 min,取上清液,用紫外分光光度法按文献^[12]的方法测定肌红蛋白浓度。

1.3 数据统计及分析 实验数据的处理采用 SPSS 13.0 统计分析,进行单因素方差分析,结果用平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示。 $P < 0.05$ 为显著性差异水平, $P < 0.01$ 为极显著性差异水平。

2 结果

2.1 低氧适应后甘肃鼯鼠与 SD 大鼠骨骼肌显微结构的变化 常氧下,SD 大鼠与甘肃鼯鼠前肢骨骼肌肌纤维排列有序,肌膜完整且清晰,肌横纹规则整齐,形态大小较一致,核较大,肌纤维呈圆柱状,排列整齐,胞浆染色均匀;核位于肌膜下(图版 I:1,2)。

低氧 2 周后,SD 大鼠骨骼肌肌纤维明显萎缩,肌纤维间隙增大,结构较紊乱,胞浆染色较均匀;甘肃鼯鼠骨骼肌肌纤维无明显变化(图

版 I:3,4)。低氧 4 周后,SD 大鼠骨骼肌肌纤维破裂,呈细丝状,不规则,大小不一致,肌纤维结构明显紊乱,部分区域可见单个肌纤维断裂,肌节紊乱;细胞排列紧密,界限不清,核相对稀疏,同时出现细胞核染色质浓缩、靠近核膜现象;甘肃鼯鼠骨骼肌肌纤维无明显变化(图版 I:5,6)。

2.2 甘肃鼯鼠与 SD 大鼠 LDH、SDH 活性变化 甘肃鼯鼠和 SD 大鼠 LDH、SDH 活性在常氧及低氧 2 周、4 周后变化见表 1。在本实验中,由于 SD 大鼠前肢与后肢之间 LDH、SDH 活性及 Mb 浓度均无明显差异,而甘肃鼯鼠前肢与后肢之间有明显差异,因此在表中并未区分 SD 大鼠前后肢,只区分甘肃鼯鼠前后肢。

甘肃鼯鼠 LDH 活性随低氧时间增长逐渐降低,但无显著性差异($P > 0.05$);常氧组、低氧 2 周及 4 周组,甘肃鼯鼠前肢 LDH 活性极显著高于后肢($P < 0.01$)。雌性 SD 大鼠 LDH 活性随低氧时间增长逐渐升高,但较常氧组无显著性差异($P > 0.05$),雄性逐渐降低,较常氧组有显著性差异($P < 0.01$)。不同低氧时间处理后,甘肃鼯鼠前后肢 LDH 活性均极显著低于 SD 大鼠($P < 0.01$)。

随低氧时间增长,甘肃鼯鼠 SDH 活性呈现先降低后升高的趋势,但无显著差异($P > 0.05$);常氧组、低氧 2 周及 4 周组,甘肃鼯鼠雌性与雄性之间,前肢与后肢之间 SDH 活性均无显著差异($P > 0.05$)。SD 大鼠 SDH 活性随低氧时间的增长逐渐升高,但无显著差异($P > 0.05$)。常氧条件下,甘肃鼯鼠前后肢 SDH 活性低于 SD 大鼠,但无显著差异($P > 0.05$),低氧 2 周及 4 周后,呈极显著差异($P < 0.01$)。

2.3 甘肃鼯鼠、SD 大鼠 Mb 浓度比较 甘肃鼯鼠与 SD 大鼠的 Mb 浓度在常氧及低氧 2 周、4 周后变化见表 2。甘肃鼯鼠骨骼肌 Mb 浓度随低氧时间的增长先升高后降低,但无显著性差异($P > 0.05$);常氧组、低氧 2 周及 4 周组,甘肃鼯鼠前后肢之间 Mb 浓度无显著性差异($P > 0.05$),前肢雌性显著高于雄性($P < 0.01$),后肢无性别差异。SD 大鼠 Mb 浓度随低

表 1 甘肃鼯鼠前、后肢与 SD 大鼠乳酸脱氢酶及琥珀酸脱氢酶活性 (Mean \pm SD, U/mg prot)
Table 1 Activities of LDH and SDH in forelimb and hind legs of Gansu Zokor and SD rat

		常氧	低氧 Hypoxia	
		Normoxia	2 周 2 weeks	4 周 4 weeks
乳酸脱氢酶 Lactate dehydrogenase	♀ 甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	7 953.00 \pm 367.29 ^{aa,cc}	7 314.97 \pm 613.10 ^{aa,cc}	5 958.51 \pm 601.75 ^{aa,cc}
	♀ 甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	5 151.18 \pm 61.68 ^{bb}	4 787.62 \pm 56.72 ^{bb}	3 778.41 \pm 50.71 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	14 310.34 \pm 2 210.65	15 423.90 \pm 2616.78	18 463.76 \pm 1 227.10
	♂ 甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	8 026.95 \pm 973.01 ^{aa,cc}	6 990.72 \pm 209.84 ^{aa,cc}	6 823.67 \pm 301.58 ^{aa,cc}
	♂ 甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	4 812.55 \pm 54.21 ^{bb}	4 383.38 \pm 205.26 ^{bb}	4 131.61 \pm 142.77 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	21 363.89 \pm 1 154.91	13 611.30 \pm 69.29	9 788.62 \pm 497.29 ^{dd}
琥珀酸脱氢酶 Succinate dehydrogenase	♀ 甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	7.84 \pm 2.62	4.18 \pm 2.53 ^{aa}	5.27 \pm 0.17 ^{aa}
	♀ 甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	6.66 \pm 3.85	6.50 \pm 0.49 ^{bb}	7.46 \pm 0.72 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	19.49 \pm 0.24	23.63 \pm 0.43	25.86 \pm 2.19
	♂ 甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	5.84 \pm 0.97	5.49 \pm 0.61 ^{aa}	5.55 \pm 0.55 ^{aa}
	♂ 甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	5.87 \pm 0.36	5.63 \pm 1.77 ^{bb}	8.36 \pm 0.44 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	16.14 \pm 0.55	17.74 \pm 2.40	18.58 \pm 0.08

aa,bb,cc 及 dd 表示有极显著差异 ($P < 0.01$)。a. 甘肃鼯鼠前肢与 SD 大鼠比较; b. 甘肃鼯鼠后肢与 SD 大鼠比较; c. 甘肃鼯鼠前肢与后肢比较; d. 低氧 4 周组与常氧组比较。

a. Comparison of forelimb legs of Gansu Zokor with SD rat; b. Comparison of hind legs of Gansu Zokor with SD rat; c. Comparison between forelimb legs and hind legs in Gansu Zokor; d. Comparison between four weeks hypoxia and normoxia.

表 2 甘肃鼯鼠前后肢与 SD 大鼠肌红蛋白浓度 (Mean \pm SD, g/L)

Table 2 Concentrations of Mb in forelimb and hind legs of Gansu Zokor and SD rat

		常氧	低氧 Hypoxia	
		Normoxia	2 周 2 weeks	4 周 4 weeks
♀	甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	523.38 \pm 3.63 ^{a,ee}	546.85 \pm 4.03 ^{aa,ee}	319.08 \pm 13.89 ^{aa,ee}
	甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	479.12 \pm 32.61 ^b	503.69 \pm 2.27 ^{bb}	291.52 \pm 12.39 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	226.78 \pm 8.29	218.81 \pm 15.58	189.26 \pm 0.77
♂	甘肃鼯鼠前肢 Forelimb legs of Gansu Zokor	443.05 \pm 8.81 ^a	493.05 \pm 6.86 ^{aa}	266.28 \pm 7.48 ^{aa}
	甘肃鼯鼠后肢 Hind legs of Gansu Zokor	477.79 \pm 32.29 ^b	504.02 \pm 8.15 ^{bb}	281.56 \pm 2.42 ^{bb}
	SD 大鼠 SD rat	287.93 \pm 39.94	261.97 \pm 11.59	191.25 \pm 24.56

a, b 表示有显著差, $P < 0.05$; ee, aa, bb 表示有极显著差异, $P < 0.01$ 。

a. 甘肃鼯鼠前肢与 SD 大鼠比较; b. 甘肃鼯鼠后肢与 SD 大鼠比较; e. 甘肃鼯鼠雌性前肢与雄性前肢比较。

a. Comparison of forelimb legs of Gansu Zokor with SD rat; b. Comparison of hind legs of Gansu Zokor with SD rat; e. Comparison between female forelimb legs and male counterparts in Gansu Zokor.

氧时间增长逐渐降低, 但无显著性差异 ($P > 0.05$), 且无性别差异。常氧条件下, 甘肃鼯鼠前后肢 Mb 浓度显著高于 SD 大鼠 ($P < 0.05$),

低氧 2 周及 4 周后, 极显著高于 SD 大鼠 ($P < 0.01$)。

3 讨论

在本实验中,由于 SD 大鼠前肢与后肢之间 LDH、SDH 活性及 Mb 浓度均无明显差异,而甘肃鼯鼠前肢与后肢之间有明显差异,因此并未区分 SD 大鼠前后肢,只区分甘肃鼯鼠前后肢。

低氧作为一种环境刺激因子,对动物机体生命活动过程有广泛影响。有机体在接受短暂或长期低氧暴露或低氧训练后将发生一系列反应或适应性变化,包括机体氧运输、氧利用、葡萄糖转运、血管生成、血管舒张功能及有关代谢酶活性变化等。正常情况下,骨骼肌纤维在经历不同低氧适应后,其排列有序的形态结构可能会遭到破坏^[13-14]。

本实验结果表明,甘肃鼯鼠 LDH 活性随低氧时间增长逐渐降低,SDH 活性随低氧时间增长先降低后升高,Mb 浓度随低氧时间的增长先升高后降低,但这些变化均无显著性差异,说明甘肃鼯鼠在低氧适应过程中,其骨骼肌代谢变化不明显,其高含量的肌红蛋白保证了骨骼肌氧供应,使其在缺氧环境中仍然能够为组织细胞提供充足的氧^[8]。所以,甘肃鼯鼠骨骼肌对无氧代谢依赖不高,主要靠有氧代谢来提供能量,应答低氧刺激。因此在不同低氧时间后,骨骼肌 LDH、SDH 活性均没有明显的变化,骨骼肌所含肌红蛋白浓度对低氧刺激能快速做出应答,以便维持自身活动的需求。不同时间低氧处理后,甘肃鼯鼠雌性及雄性前肢 LDH 活性显著高于后肢,这与甘肃鼯鼠长期洞道生活有关,在洞道环境生活,前肢要不断挖掘,大量的高强度运动使得前肢比后肢发达,前肢骨骼肌无氧代谢水平高,LDH 活性高于后肢,适应前肢快速、大量短时的运动,这样可以消耗最少的氧完成较耗能的活动,协调能量付出和收益之间的关系^[11]。甘肃鼯鼠骨骼肌在不同低氧适应后形态结构并未发生明显变化,说明甘肃鼯鼠骨骼肌对低氧环境能较快适应,仅在代谢水平发生变化就可适应这种慢性的低氧,其组织结构不会发生明显变化。

SD 雌性大鼠 LDH 活性及 SDH 活性随低氧时间增长逐渐升高,肌红蛋白含量却逐渐减少。说明 SD 大鼠一旦机体缺氧,肌红蛋白生产能力逐渐丢失,由于不能获得足够多的氧,导致体内缺氧,迫使机体同时加速体内无氧酵解及有氧代谢过程来迅速为组织细胞提供能量,以维持机体正常生命活动的进行,导致骨骼肌 LDH 及 SDH 活性逐渐升高^[15-16],但这种变化很难适应低氧环境,所以,随着低氧时间的延长骨骼肌形态也发生显著变化^[13]。说明 SD 大鼠在低氧适应过程中,骨骼肌组织结构发生变化,不利于低氧环境下的运动。

不同时间低氧处理后,甘肃鼯鼠 LDH 及 SDH 活性均显著低于 SD 大鼠,Mb 浓度显著高于 SD 大鼠,甘肃鼯鼠骨骼肌纤维结构并未发生明显变化,而 SD 大鼠骨骼肌纤维结构发生了较大的损伤。说明 2 种生活环境不同的啮齿动物,骨骼肌代谢在低氧适应过程中表现出不同的发展趋势。甘肃鼯鼠长期适应地下洞道生活,尽管其生活环境缺氧,但它的组织细胞仍然能得到丰富的氧供应,并非处于缺氧状态。这可能与其骨骼肌中高含量的肌红蛋白有关,肌红蛋白不仅能为它的高强度地下挖掘活动提供足够的氧,而且减轻了心的负担,避免了由于剧烈活动产生大量乳酸对其他组织器官的损伤作用^[8],所以它对无氧代谢的依赖不高,骨骼肌主要靠有氧代谢来供能,在低氧刺激后骨骼肌的 LDH、SDH 活性及 Mb 浓度基本维持在较为稳定的水平。而与其形成鲜明对比的是 SD 大鼠在慢性低氧处理后,骨骼肌 LDH 及 SDH 活性逐渐升高,Mb 浓度逐渐降低,与甘肃鼯鼠呈极显著差异。说明在静息状态下,甘肃鼯鼠骨骼肌的无氧及有氧代谢活动均显著低于 SD 大鼠,并且甘肃鼯鼠长期适应低氧,对低氧刺激不敏感,在实验过程中可能会顺利启动自身整体协调的低氧适应机制,在各个器官稳定的情况下,维持在低氧条件下的生存。由此可见,甘肃鼯鼠应对极端环境的能力明显强于 SD 大鼠。

参 考 文 献

- [1] Lacey E A, Patton J L, Cameron G N. Life Underground: The Biology of Subterranean Rodents. Chicago and London: The University of Chicago Press, 2000: 1 - 85.
- [2] Patton J L, Bryliski P V. Pocket gophers in alfalfa fields: Causes and consequences of habitat-related body size variation. *American Naturalist*, 1987, 130(4): 493 - 506.
- [3] Nevo E. Adaptive convergence and divergence of subterranean mammals. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1979, 10(1): 269 - 308.
- [4] 姚泰. 生理学. 北京: 人民卫生出版社, 2001: 34 - 35.
- [5] 魏登邦, 马建宾. 高原鼯鼠和小白鼠心肌及骨肌肌红蛋白含量与乳酸脱氢酶活性的比较研究. *青海大学学报: 自然科学版*, 2001, 19(2): 20 - 21.
- [6] 柴旦, 周兆年. 急性低氧对外体培养乳鼠心肌细胞肌红蛋白的影响. *生理学报*, 1997, 49(5): 497 - 503.
- [7] 刘国富, 温得启, 胡晓梅. 高原鼠兔和高原鼯鼠乳酸脱氢酶同工酶的初步研究. *兽类学报*, 1985, 5(3): 223 - 228.
- [8] 魏登邦, 魏莲. 高原鼯鼠的红细胞、血红蛋白及肌红蛋白的测定结果. *青海大学学报: 自然科学版*, 2001, 19(4): 1 - 2, 12.
- [9] 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(2): 144 - 154.
- [10] 魏登邦, 魏莲, 张建梅, 等. 地下鼠对洞道环境适应机制的研究进展. *青海大学学报: 自然科学版*, 2007, 25(5): 54 - 57.
- [11] 储昭灿, 李金钢, 李月明. 三种啮齿类动物前肢挖掘效率分析. *动物学杂志*, 2007, 42(2): 17 - 20.
- [12] 陈铭, 杨欣, 周兆年. 心肌肌红蛋白含量的生化测定方法. *中国应用生理学杂志*, 1998, 14(3): 283 - 284.
- [13] 刘旭东, 周里. 骨骼肌组织对低氧应激的反应和适应. *西安体育学院学报*, 2008, 25(2): 72 - 75.
- [14] Salminen A, Vihko V. Autophagic response to strenuous exercise in mouse skeletal muscle fibers. *Virchows Archiv B; Cell Pathology Zell-Pathologie*, 1984, 45(1): 97 - 106.
- [15] 王荣辉, 刘桂华, 胡琪, 等. 低氧训练对大鼠骨骼肌乳酸脱氢酶和苹果酸脱氢酶活性的影响. *北京体育大学学报*, 1998, 21(3): 31 - 33.
- [16] 毛杉杉, 潘同斌, 王瑞元. 高住低训对大鼠骨骼肌 SDH 与 LDH 活性的影响. *中国运动医学杂志*, 2005, 24(5): 551 - 554.

图 版 说 明

SD 大鼠与甘肃鼯鼠骨骼肌肌纤维结构比较, $\times 40$, 标尺 = 50 μm

1: 常氧组雌性 SD 大鼠前肢骨骼肌组织结构, 肌纤维排列有序, 呈圆柱状, 排列整齐, 胞浆染色均匀; 2: 常氧组雌性甘肃鼯鼠前肢骨骼肌组织结构, 肌纤维之间排列有序, 呈圆柱状, 排列整齐, 胞浆染色均匀; 3: 低氧 2 周雌性 SD 大鼠前肢骨骼肌组织结构, 肌纤维明显萎缩, 间隙增大, 结构较紊乱; 4: 低氧 2 周雌性甘肃鼯鼠前肢骨骼肌组织结构, 无明显变化; 5: 低氧 4 周雌性 SD 大鼠前肢骨骼肌组织结构, 肌纤维破裂, 呈细丝状, 不规则, 大小不一致, 肌节紊乱; 6: 低氧 4 周雌性甘肃鼯鼠前肢骨骼肌组织结构, 无明显变化。

Explanation of Plate

Comparison of skeletal muscle fiber structure between Gansu Zokor and SD rat, $\times 40$, Bar = 50 μm

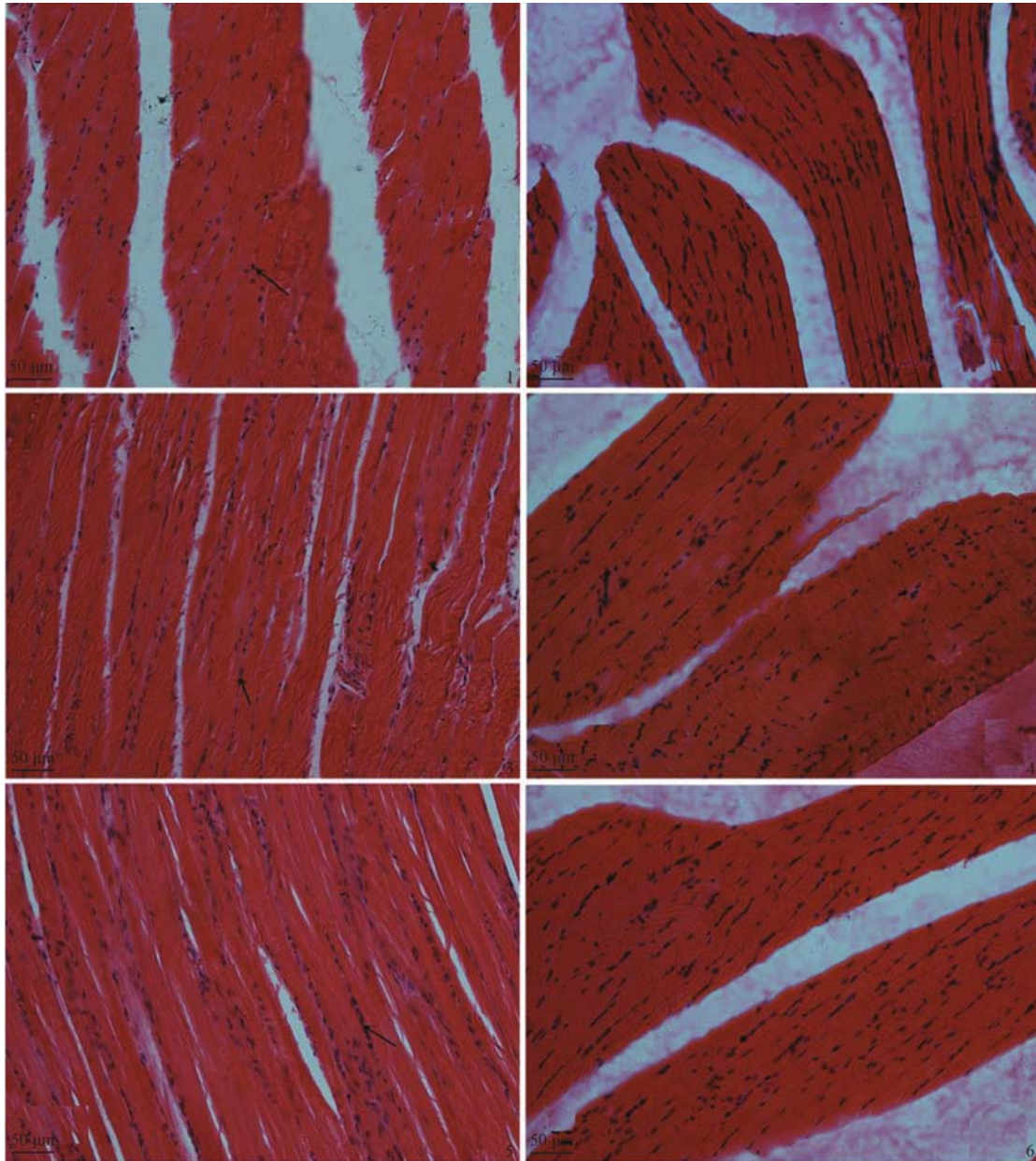
1: The female SD rat forelimb skeletal structure under normoxia; the muscle fibers arranged in order and showed cylindrical shape, with uniform cytoplasmic staining; 2: The female Gansu Zokor forelimb skeletal structure under normoxia; muscle fibers arranged in order, showed cylindrical shape, with uniform cytoplasmic staining; 3: The female SD rat forelimb skeletal structure after 2 weeks of hypoxia; the muscle fibers were significantly atrophied, the gap was increased, and the structure was more disordered; 4: The female Gansu Zokor forelimb skeletal structure after 2 weeks of hypoxia, showing no significant difference; 5: The female SD rat forelimb skeletal structure after 4 weeks of hypoxia; fibers were broken down, and sarcomere was disordered; 6: The female Gansu Zokor forelimb skeletal structure after 4 weeks of hypoxia, showing no significant difference.

高媛等:甘肃鼯鼠与SD大鼠骨骼肌低氧适应的比较

图版 I

GAO Yuan *et al.*: Comparison of Skeletal Muscle Hypoxia Adaptation between Gansu Zokor
(*Myospalax cansus*) and SD Rat

Plate I



图版说明见文后