

过度跳跃训练对生长期大鼠骨生物力学性质的影响

杨国敏

(上海体育学院 研究生部, 上海 200438)

摘 要:研究过度训练对生长期大鼠骨生物力学性质的影响。对生长期大鼠采用跳跃训练的方法,建立过度跳跃训练模型。8周后测定大鼠的体重、血红蛋白、血尿素氮和血清睾酮、皮质醇等指标,同时测定其股骨生物力学性质。结果:(1)大鼠过度跳跃训练模型建立成功;(2)大鼠股骨纵轴方向成长受到了明显抑制;(3)大鼠股骨抵抗破坏和变形的能力降低,其脆性增大强度降低。结论:过度跳跃训练使大鼠股骨生物力学性质出现明显下降。

关 键 词:过度跳跃训练; 大鼠; 股骨; 生物力学性质

中图分类号: G804.68 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2004)03-0131-04

The influence to the biomechanical character of bone of the rat in growing period after excessively training

YANG Guo-min

(Graduate Department, Shanghai Institute of Physical Education, Shanghai 200438, China)

Abstract: The research discussed the influence to bone biomechanical character of the rat in growing period after excessively training. establish excessively training model of through jump training of the rat in growing period. measuring the index include weight, hemoglobin, blood urea nitrogen, and testosterone, Cortisol of the Rat after 8 weeks and measured the biomechanical character of Femur at the same time. Result: (1) successively establish the rat excessively training model of jumping; (2) the growing of Femur of the rat was obviously restrained in y-axis; (3) ability of resisting destroy and distortion of the Femur of the rat depressed, and its brittleness increased and intensity descended. Conclusion: excessively training of jumping make the biomechanical character of femur of rat appearing the obvious descent.

Key words: excessively jumping training; rat; femur; biomechanical character

对一些跳跃动作较多的运动项目,青少年运动员在激烈的训练和比赛中,其下肢骨往往要承受剧烈的应力刺激。训练的早期化使青少年运动员身体承受的负荷量相对增加,这种长期、过度的机械应力刺激,往往会超过生长期骨骼所能承受的生理应力范围,无疑将对青少年运动员骨的成长和生物力学性质产生较大影响,且易发生骨的运动损伤。

在运动医学研究中,大多采用跑台或游泳方法建立动物过度训练模型,来研究过度训练对机体各器官系统的损害。采用这两种方法对大鼠呼吸和循环系统有较大影响,适用于对多种器官、系统损害的观察。但骨所受的机械应力刺激较低,因此对骨的影响相对较小。目前竞技体育运动强度相对较大,跑台、游泳等练习不易达到使骨发生过度损害的目的。

关于过度训练对各器官系统的影响,已有许多报道,但有关过度训练对骨成长和生物力学性质影响方面的研究则未见报道。本实验采用对生长期大鼠进行跳跃训练的方法,

建立大鼠过度跳跃训练模型,采用骨生物力学指标对大鼠骨进行生物力学评价与分析,为正确认识过度跳跃训练对青少年运动员骨产生何种影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验动物的选择和饲养

实验采用3周龄SD雄性大鼠24只,体重 (51.72 ± 3.31) g,身长(除尾部) (8.78 ± 0.26) cm,由上海西普尔-必凯实验动物有限公司提供。用标准颗粒固体饲料($w(\text{Ca}) = 1\%$, $w(\text{P}) = 0.6\%$),水为自来水,自由摄取,室温 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 。

1.2 大鼠过度跳跃训练模型的建立及训练方法

大鼠跳跃训练所采用的跳箱,其配电刺激线的底板可自由调节高度。将大鼠放在底板上,由电刺激仪给予 $30 \sim 50$ V间断电刺激,让大鼠进行跳跃,前肢抓住箱的上端。在此模型中,运动强度由箱的高度、运动量由跳跃次数决定。本实

验采用大鼠体长(除尾部)2.3 倍的跳跃高度的运动强度^[1]。

将大鼠按体重随机分为对照组(C 组)、一般跳跃训练组(Ja 组, 50 次/d)、过度跳跃训练组(Jb 组, 50 × n), 每次间隔 5 min, 跳至力竭。力竭的判断标准为, 连续 5 次电刺激无法完成跳跃动作。运动组先进行 1 周预备训练, 学习跳跃运动。在预备训练后头两周逐渐增加跳跃次数和高度, 最后固定跳跃次数如前, 跳跃高度均为大鼠体长的 2.3 倍, 跳跃频率均为 10 跳/min。训练期间每周根据大鼠体长调节跳越高度, 训练时间共 8 周, 每周 6 d。

1.3 动物处死及取材

训练结束, 测量大鼠体重和身长, 右心室抽血处死。将两侧股骨摘出, 测量长度。将股骨用生理盐水浸透的纱布包裹, 装入密闭塑料器皿中, 置于 -20℃ 冰箱内, 测试时于室温下自然解冻^[2]。

1.4 实验指标的测定

(1)一般情况: 观察大鼠精神状态、训练情况及运动能力等变化, 每周记录大鼠体重、身长变化。

(2)血生化指标测定: 采用高铁氰化钾法测定血红蛋白含量, 采用二乙酰-茚法测定血尿素氮含量, 采用放射免疫法测定血清睾酮和皮质醇。

(3)骨三点弯曲力学试验及骨结构力学指标的选择。采用岛津 AG-20KNA 万能材料试验机对左侧股骨进行三点弯曲试验。绘图仪自动描记出载荷-变形曲线并记录弹性载荷 F_e 、最大载荷 F_p 、断裂载荷 F_d 、弹性挠度 f_e 、最大挠度 f_p 、断裂挠度 f_d 及能量吸收 U ^[3-5]。

(4)骨材料力学指标的选择和计算方法。将断裂的左侧股骨用瞬间强力粘合剂粘合, 于断裂处(骨的中点附近)近旁用牙科锯将其锯断, 在细水磨石上磨平截面。对骨截面进行显微摄影, 将骨截面图象输入 586 电脑, 经解析后由程序计算骨截面惯性矩(J_{cx})、拉伸侧最大应力作用点到中性轴距离(y)^[3]。

根据以下公式计算:

①骨弯曲应力 σ : 包括弹性应力 σ_e , 最大应力 σ_p 。

计算公式为: $\sigma = My/J_{cx}$, M 为弯矩, $M = FL/4$; F 为载荷值。

②骨应变 ϵ : 包括弹性应变 ϵ_e , 最大应变 ϵ_p 。

计算公式为: $\epsilon = 12fy/L^2$, f 为挠度, L 为股骨两支点之间的长度。

③骨弹性模量 E : 为弹性应力与弹性应变的比值, 即应力-应变曲线弹性应变阶段曲线的斜率。

计算公式为: $E = \sigma_e/\epsilon_e$ 。

④比能 u : 为应力-应变曲线下的面积^[4]。

1.5 统计学分析

所有指标均以平均值 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 数理统计采用统计软件 SPSS 10.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 组间相互比较采用 LSD 法, 对 F 值明显的指标, 用 t 检验, 对各组均值进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 一般情况变化

(1)一般情况观察: C 组和 Ja 组大鼠神态安祥, 动静如常, 眼睛有神, 毛整齐光洁; 而 Jb 组大鼠神态倦怠, 眼暗淡无光, 易受惊吓, 体毛脱落明显, 体型瘦弱, 有的足趾有损伤。

(2)体重变化: 如表 1 所示, 跳跃训练组(Ja 组)大鼠体重均较对照组(C 组)明显低, 而过度跳跃训练组(Jb 组)又较 Ja 组明显低; 大鼠身长及股骨长度变化情况与体重一致。

表 1 大鼠体重、身长及股骨长度

组别	n/只	体重/g	身长/cm	股骨长度/mm
C	8	302.67 ± 21.28	21.65 ± 0.48	38.03 ± 0.87
Ja	8	244.64 ± 21.35 ¹⁾	20.74 ± 0.64 ¹⁾	36.77 ± 0.74 ¹⁾
Jb	8	169.84 ± 27.48 ¹⁾²⁾	20.14 ± 0.67 ¹⁾²⁾	35.42 ± 0.78 ¹⁾²⁾

1)与对照组 C 相比 $P < 0.05$; 2)与 Ja 组相比 $P < 0.05$

(3)训练情况和运动能力观察: Ja 组大鼠, 完成跳跃动作后, 呼吸急促、心跳加速, 经休息, 能很快正常进食和饮水; 而 Jb 组大鼠, 在跳跃 150 ~ 180 次后, 无法再继续完成跳跃动作, 呼吸短促、心跳更快, 精疲力竭, 需休息较长时间, 才能恢复正常, 进食量明显减少。在训练期间, Jb 组大鼠所能完成的跳跃次数逐渐减少, 在后期仅能完成 130 ~ 150 次左右。

2.2 大鼠血生化指标

由表 2 可看出, Jb 组血红蛋白(Hb)较 C 组和 Ja 组明显低, C 组和 Ja 组无明显差别; Jb 血清睾酮(T)质量浓度较 C 组和 Ja 组明显低, Ja 组较 C 组明显高; Jb 组血尿素氮、血清皮质醇含量较 C 组和 Ja 组明显高, Ja 组与 C 组之间无明显差别。

表 2 实验各组大鼠血生化指标

组别	n/只	$\rho(\text{Hb})/(\text{g} \cdot \text{dL}^{-1})$	$c(\text{BUN})/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{T})/(\text{ng} \cdot \text{dL}^{-1})$	$\rho(\text{C})/(\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1})$
C	8	14.69 ± 0.87	7.83 ± 0.54	62.83 ± 11.87	578.36 ± 42.53
Ja	8	14.23 ± 0.53	8.75 ± 0.68	76.36 ± 14.38 ¹⁾	521.72 ± 36.81
Jb	8	11.71 ± 0.33 ¹⁾²⁾	13.56 ± 0.72 ¹⁾²⁾	48.41 ± 13.35 ¹⁾²⁾	1 164.97 ± 58.53 ¹⁾²⁾

1)与对照组 C 相比 $P < 0.05$; 2)与 Ja 组相比 $P < 0.05$

2.3 各组大鼠股骨结构力学参数比较

由表 3 可以看出弹性载荷 F_e 、断裂载荷 F_d 、最大载荷

F_p 及弹性挠度 f_e 、最大挠度 f_p 和断裂挠度 f_d , Jb 组较 C、Ja 组明显低, C、Ja 组之间无明显差别; 能量吸收(U)Jb 组较 C、

Ja 组明显低,Ja 组较 C 组明显高。

2.4 各组大鼠股骨材料力学参数比较

由表 4 可看出, J_{α} 及 γ ,各组之间相比无显著性差异。

弹性应力 σ_e , Jb 组较 C、Ja 组明显低,Ja 组较 C 组明显高;最

大应力 σ_p 及弹性应变 ϵ_e 、最大应变 ϵ_p 、比能(u),Jb 组较 C、Ja 组明显低,C 与 Ja 组之间无明显差别;弹性模量 E ,Jb 组较 C、Ja 组明显高,C、Ja 组间无明显差别。

表 3 大鼠股骨结构力学参数

		$\bar{x} \pm s$					
组别	n/只	F_e/N	F_p/N	F_d/N	f_e/mm	f_p/mm	f_d/mm
C	8	79.30±6.15 ¹⁾	92.13±5.06 ¹⁾	83.15±5.33 ¹⁾	1.09±0.168 ¹⁾	1.272±0.119 ¹⁾	1.303±0.115 ¹⁾
Ja	8	83.89±6.79 ¹⁾	91.06±7.32 ¹⁾	84.94±5.29 ¹⁾	0.911±0.141 ¹⁾	1.069±0.109 ¹⁾	1.286±0.145 ¹⁾
Jb	8	65.75±7.05	78.64±5.07	65.46±6.21	0.386±0.034	0.601±0.038	0.755±0.042

1)与 Jb 组比较 $P<0.05$;2)与 C 组比较 $P<0.05$

表 4 大鼠股骨材料力学参数

		$\bar{x} \pm s$						
组别	n/只	J_{α}/mm^4	γ/mm	σ_e/MPa	σ_p/MPa	$\epsilon_e/\%$	$\epsilon_p/\%$	E/MPa
C	8	7.077±1.040	1.74±0.07	78.37±5.12 ¹⁾	90.31±6.64 ¹⁾	8.33±1.68 ¹⁾	10.40±1.44 ¹⁾	1 147.89±356.43 ¹⁾
Ja	8	7.417±1.501	1.78±0.12	87.23±6.66 ¹⁾²⁾	94.79±7.80 ¹⁾	8.12±1.62 ¹⁾	8.64±1.66 ¹⁾	1213.67±258.37 ¹⁾
Jb	8	6.694±1.143	1.72±0.07	61.43±8.71	76.95±9.24	2.98±0.36	4.69±0.46	2527.14±921.12

1)与 Jb 组比较 $P<0.05$;2)与 C 组比较 $P<0.05$

3 讨论

3.1 过度跳跃训练模型的建立

至今所进行的关于过度训练对各器官、系统影响方面的研究,大多采用动物跑台或游泳的训练方法,这两种方法对大鼠呼吸和循环系统有较大影响,适用于对多种器官、系统损害的观察。但骨所受的机械应力刺激较低,因此对骨的影响相对较小。目前竞技体育运动强度相对较大,跑台、游泳等练习不易达到使骨发生过度损害的目的。

本研究采用跳跃训练方法,对生长期大鼠进行 8 周跳跃训练。所采用的跳跃训练模型,骨所受机械应力与跳跃高度成比例关系,运动强度可由跳跃高度决定,运动量可由跳跃次数决定。跳跃高度为大鼠体长的 2.3 倍,从肌肉的运动量来看达到了最大跳跃时的 90%,最大力量达到了体重的 6~7 倍,从运动时大鼠的生理负担量来看,连续跳跃 50 次后,资料显示其血乳酸值可达到安静时的 4.4 倍^[1],因此可以认为本研究所采用的训练强度为大强度,用此方法大鼠骨所受机械应力较大,可以达到使骨发生过度训练损伤的目的。

经 8 周跳跃训练后,过度跳跃训练组大鼠体重明显低于对照组和一般跳跃训练组,仅为对照组的 56%;其血红蛋白、血清睾酮含量较对照组和一般跳跃训练组明显低,其尿素氮、血清皮质醇含量较对照组和一般跳跃训练组明显高。

根据大鼠训练史、一般情况及运动能力观察、体重及血液生化指标等进行综合评定,可以认为本实验大鼠过度跳跃训练模型建立是成功的。

3.2 对大鼠股骨生长的影响

Booth and Gould^[6]首先提出“低强度运动对动物骨长轴成长有促进作用,而高强度运动则有抑制作用”。胜田茂等^[6]的研究认为“在临界强度以上的运动,对骨长轴成长有抑制作用,在阈强度至临界强度的范围内,运动对骨长轴成长的促进效果与运动强度相依存”。

从本研究结果看,大鼠的身长和股骨长度,运动组均较对照组明显短,说明所采用的训练方法对大鼠股骨长轴方向的成长产生了抑制作用,这与文献所报告的大强度运动可对动物骨长轴方向成长产生抑制作用的结论是相一致的,可以认为本研究所采用的运动强度超过了临界强度。过度跳跃训练组身长和股骨长度较一般跳跃训练组明显短,说明过度跳跃训练对大鼠骨纵轴成长产生了较大抑制作用。

3.3 对骨生物力学性质的影响

研究证明骨的强度与所受应力成正比,在体育运动中如运动对骨所施加的机械应力适度,即可促进骨的成长和强度的提高,但如运动对骨所施加的机械应力过高,则将抑制骨的成长并使骨强度下降,严重者造成骨的运动损伤^[7]。

骨的力学性质是指骨受力后表现出的性质,包括骨的结构力学性质和材料力学性质。

整骨的载荷-变形曲线可确定其结构力学性能。载荷-变形曲线下的面积为能量吸收,代表引起骨结构断裂所需的能量,又称骨结构韧性,是反映骨结构抵抗骨折的能力^[4]。从实验结果看,过度跳跃训练组,其各项载荷值和挠度值及能量吸收均较其它两组低,因此可以认为经过度跳跃训练后,大鼠股骨的结构力学性能下降,其抵抗骨折的能力下降。

强度和刚度是骨材料力学的重要指标。骨的强度是指骨在载荷作用下抵抗破坏的能力,所谓破坏通常是指断裂或产生过大的塑性变形,要保证骨骼的正常功能,首先要求骨具有足够的强度,能够在载荷作用下不发生破坏。骨的刚度是指骨在载荷作用下抵抗变形的能力,是表征其弹性性质的物理量,骨的刚度要求骨在载荷作用下产生的弹性变形不超过一定的范围。骨的应力-应变曲线是反映骨材料力学特性中骨应力与应变关系的曲线,它可以确定骨组成材料的力学性能。曲线最高点所对应的最大应力称为强度极限,它是衡量骨强度的重要指标。曲线弹性变形区的斜率为弹性模

量,它反映骨质的刚度,是骨对变形的阻力,它并不代表骨强度。应力-应变曲线下的面积为骨材料韧性(比能),它表示引起骨材料断裂所需吸收的能量,受骨矿盐含量、胶原纤维走向等骨基质成分变化的影响,它是很重要的一项力学指标,韧性大的骨质对骨折的抵抗力大^[4]。从实验结果来看,大鼠股骨三点弯曲所受各项应力值和应变值,过度跳跃训练组较其它两组均明显低;代表大鼠股骨刚度的弹性模量,过度跳跃训练组较其它两组明显高;代表骨材料韧性的应力-应变曲线下的面积,过度跳跃训练组较其它两组明显低。因此可以认为经过度跳跃训练后,大鼠股骨的材料力学性能下降,其抵抗骨折的能力下降。大鼠股骨刚度增大,在应力作用下的应变能力下降,即大鼠股骨在低应力应变较小的情况下出现了材料的破坏。

通过以上对关于大鼠股骨生物力学性质变化的分析,可以认为本研究所采用的过度跳跃训练使大鼠股骨生物力学性质出现明显下降。造成这种现象的原因,推测可能为在过度跳跃训练的应激条件下,由于长期反复施加过度的机械应力,造成骨分子的破坏积累而导致骨的微细结构损伤,另外通过神经-体液内分泌机制使构成骨的成分发生改变,骨矿盐含量降低、骨胶原纤维含量等骨基质成分的变化,使大鼠股骨的结构和材料韧性降低,骨的质量随之下降。其具体变化机制有待于进一步研究证实。

本研究结果提示我们在对青少年运动员进行一些跳跃动作较多且对骨纵向应力较大项目训练时,应控制好运动强度和运动量的大小,以免产生过度训练影响骨的生长发育和使骨强度下降而造成骨的运动损伤。

参考文献:

- [1] 戸塚. 高强度ジャンプ・トレーニングがラット骨格肌纤维组成に及ぼす影响[J]. 体育学研究, 1989, 34(2): 134-138.
- [2] 崔伟, 刘成林. 基础骨生物力学(一)[J]. 中国骨质疏松杂志, 1997, 3(4): 82-85.
- [3] 梅村义久ほか. ジャンプトレーニングがラットの骨形态と强度に及ぼす影响[J]. 体力科学, 1996, 45: 311-318.
- [4] 崔伟, 刘成林. 基础骨生物力学(二)[J]. 中国骨质疏松杂志, 1998, 4(1): 90-92.
- [5] 陈一心. 雌性大鼠去势后股骨生物力学变化[J]. 医用生物力学, 1996, 11(1): 51-53.
- [6] 胜田茂ほか. 运动强度の違いがラットの骨成長に及ぼす影响[J]. 体育学研究, 1991, 36: 39-51.
- [7] 曹建中. 老年骨内科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996: 155.

[编辑: 郑植友]