

文章编号:1004-7220(2018)02-0168-06

# 高冲击运动时不同着陆姿势对骨密度和骨矿含量的影响

罗依雪<sup>1</sup>, 罗陈宇<sup>1</sup>, 蔡宇辉<sup>1</sup>, 江天云<sup>1</sup>, 崔亚琳<sup>1</sup>, 王丽珍<sup>1</sup>, 樊瑜波<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 国家康复辅具研究中心, 北京 100176)

**摘要:**目的 研究不同类型高冲击运动对于骨密度(bone mineral density, BMD)和骨矿含量(bone mineral content, BMC)的影响。方法 招募39名志愿者,其中伞兵、篮球运动员和作为对照组的普通大学生各13名,将其分成两组(第1组:20~22岁;第2组:23~25岁),分别测量跟骨、第1~5跖骨、髋关节和腰椎(L1~4)BMD和BMC。结果 篮球运动员跟骨、第1、2跖骨、总腰椎和髋部BMC显著大于伞兵和对照组;篮球运动员在腰椎、髋关节和股骨颈处BMD也显著大于其他组;伞兵和对照组在测量部位的BMD和BMC无显著性差异。结论 BMC与BMD并非总是正比于平时运动时的垂直地面反作用力。相比跳伞训练,篮球运动能更好提高BMC和BMD,这种变载荷运动作为训练方法,更有利于降低骨质疏松性骨折的风险。

**关键词:**高冲击运动;跳伞;篮球;骨密度;骨矿含量;变载荷

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI:10.16156/j.1004-7220.2018.02.013

## Effects of Different Landing Postures on Bone Mineral Density and Content during High-Impact Exercises

LUO Yixue<sup>1</sup>, LUO Chenyu<sup>1</sup>, CAI Yuhui<sup>1</sup>, JIANG Tianyun<sup>1</sup>, CUI Yalin<sup>1</sup>, WANG Linzhen<sup>1</sup>, FAN Yubo<sup>1,2</sup>

(1. Key laboratory for biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China)

**Abstract: Objective** To study effects of different types of high-impact exercises on the increment of bone mineral density (BMD) and bone mineral content (BMC). **Methods** Thirty-nine male volunteers, including 13 hoopsters, 13 paratroopers, and 13 common college students as the control, were recruited and divided into two subgroups (subgroup 1:20-22 years old; subgroup 2:23-25 years old). Their BMDs and BMCs on calcaneus, first through fifth metatarsus, hip, and lumbar spine (L1-4) were evaluated. **Results** The BMC of calcaneus, the first and second metatarsals, total lumbar spine, and total hip in the hoopster group was significantly higher than that in the control group and paratrooper group. The hoopster group obtained statistically higher BMD at the lumbar spine, hip, and femoral neck than the other two groups. However, the BMCs and BMDs of the paratrooper

收稿日期:2017-04-15; 修回日期:2017-06-23

基金项目:国家自然科学基金创新群体项目(11421202)

通信作者:樊瑜波,教授,博士研究生导师, E-mail:yubofan@buaa.edu.cn;

王丽珍,副教授,硕士研究生导师, E-mail:lizhenwang@buaa.edu.cn

group and control group had no significant differences at almost all measured anatomical locations.

**Conclusions** BMC and BMD are not always in positive correlation with vertical ground reaction forces during normal exercises. Compared with parachuting training, playing basketball as a kind of variable load exercise can effectively increase BMC and BMD, and is more beneficial for reducing the risk of osteoporotic fracture.

**Key words:** high-impact exercises; parachute; basketball; bone mineral density (BMD); bone mineral content (BMC); variable loads

低骨量是导致骨质疏松性骨折的重要因素。引起骨质流失的原因有很多,缺钙、维生素 D 摄入不足、过度饮酒、生殖激素水平低、体重偏轻、年纪增长和缺少体育锻炼等都会造成骨丢失<sup>[1-2]</sup>。骨量的高低可以通过测量骨密度(bone mineral density, BMD)和骨矿含量(bone mineral content, BMC)来进行评估<sup>[3]</sup>。研究表明, BMD 越小,越容易受到冲击载荷造成的伤害<sup>[4]</sup>。通过体育运动能够有效提高 BMD 和 BMC,促进骨骼生长<sup>[5]</sup>。

不同类型的运动,在特定骨骼区域产生不同的载荷。早期的大鼠实验表明,间歇性的动态运动会产生不同于常规运动的力学载荷,有利于刺激骨骼产生成骨响应<sup>[6-9]</sup>。篮球、排球和体操等属于高冲击载荷运动,它们能提高全身、腰椎、股骨颈、腿部和双臂 BMD<sup>[10]</sup>。研究发现,通过 6 个月的高冲击运动,股骨颈 BMD 增加了 2%<sup>[11-12]</sup>。相反,在进行游泳与自行车等低冲击运动后,下肢 BMD 和 BMC 几乎没有变化<sup>[6-7]</sup>。高冲击运动更加有利于刺激承重骨骼进行骨重建,提高 BMD 和 BMC,维持骨量<sup>[13-15]</sup>。

有关多种高冲击运动对 BMD 和 BMC 影响的研究多有报道,然而对比跳伞与篮球运动对 BMD 和 BMC 影响的研究鲜有报道。虽然两者均为高冲击

运动,但是以不同的姿势着陆。篮球运动包含跑、走、停和慢慢移动,跳跃着陆时身体稍稍前倾,前脚掌首先着地,然后整个脚掌与地面接触<sup>[16]</sup>。伞兵要求以半蹲的姿势着陆,并且遵循“三紧一平”的规则,即弯曲双腿,夹紧前脚掌内侧、内踝、双膝,保证着陆时脚掌与地面平行<sup>[17]</sup>。本文对比了伞兵和篮球运动员 BMD 和 BMC,分析不同姿势着陆的高冲击运动对骨量的影响,为预防骨流失和骨质疏松性骨折提供训练依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 受试者与分组

招募 39 名男性受试者,伞兵、篮球运动员和作为对照组的普通大学生各 13 名,年龄均为 20 ~ 25 岁。将其分成两组,第 1 组为 20 ~ 22 岁(含伞兵、篮球运动员和对照组各 7 名),第 2 组为 23 ~ 25 岁(含伞兵、篮球运动员和对照组各 6 名)。受试者分别来自跳伞训练队、篮球运动队和普通大学,无肌骨疾病和骨代谢疾病,并且近 1 年未服用影响骨代谢的药物。问卷调查结果显示,篮球运动员和伞兵每周训练时间约 50 h,而对照组每周运动不超过 1 h。所有受试者的身高、体重以及体质量指数(body mass index, BMI)如表 1 所示。

表 1 受试者特征

Tab. 1 Characteristics of the subjects

分组	第 1 组			第 2 组		
	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )
伞兵	179.83 ± 4.02	70.03 ± 6.32	21.83 ± 1.99	174.1 ± 3.70	68.72 ± 4.80	22.62 ± 2.32
篮球运动员	184.29 ± 4.11 <sup>a,c</sup>	75.71 ± 8.01	22.29 ± 1.62	181.17 ± 8.13 <sup>a,c</sup>	76.33 ± 8.45	23.18 ± 1.280
对照组	173.00 ± 6.73	70.66 ± 11.10	23.34 ± 2.68	173.83 ± 2.14	64.33 ± 3.08	21.32 ± 1.23

注: <sup>a</sup>表示与伞兵具有显著性差异; <sup>b</sup>表示与篮球运动员具有显著性差异; <sup>c</sup>表示与对照组具有显著性差异

### 1.2 扫描部位与方法

扫描跟骨、第 1 ~ 5 跖骨、髌关节和腰椎(L1 ~ 4),处理后分别得到扫描部位的 BMD 和 BMC。

扫描时分别将足水平放置、内翻 90°和外翻 45°扫描 3 次,以便清楚区分辨认跟骨和跖骨。在扫描前将测量方法和潜在风险告知受试者,并签署知情同意书。

所有扫描都处于相同环境下,于2016年3月完成。

### 1.3 跳台测试

跳台测试要求篮球运动员和伞兵分别从1.2 m高平台着陆,通过摄像机分别记录他们的着陆过程(见图1)。并且使用三维力台(1 kHz, SMA-6, AMTI公司,美国)采集垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF),采用鞋垫式足底压力鞋垫(100 Hz, Pedar-X, Novel公司,德国)采集着陆时足部各区峰值压力。

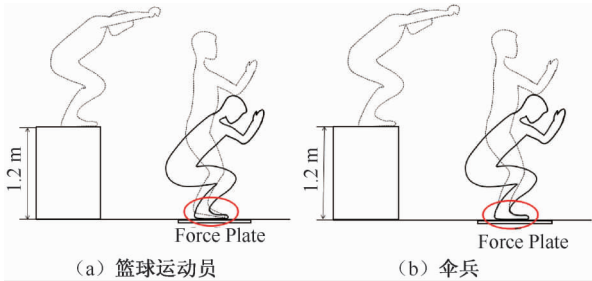


图1 不同受试者着陆示意图

Fig. 1 Landing postures of different subjects (a) Hoopsters, (b) Paratroopers

### 1.4 数据处理

BMD和BMC数据统计学分析通过SPSS 13.0完成,采用独立t检验, $P < 0.05$ 表示差异具有统计

学意义, $P < 0.01$ 表示差异具有高度统计学意义。足部分区<sup>[18]</sup>如图2所示,其中M01~07为前足区域,M08为中足区域,M09~10为后足区域。将vGRF和各区峰值压力与受试者自身体重(body weight, BW)相比进行标准化。

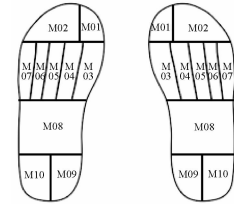


图2 足底分区

Fig. 2 Partitions of the feet

## 2 实验结果

### 2.1 BMC结果

篮球运动员跟骨、第1、2跖骨BMC显著大于伞兵( $P < 0.05$ )和对照组( $P < 0.01$ )。篮球运动员在腰椎和髋关节处BMC也显著大于伞兵和对照组( $P < 0.05$ ),除了第2组的L3腰椎。所有受试者股骨颈BMC无显著性差异。伞兵和对照组扫描部位BMC无显著性差异(见表2)。

表2 受试者不同部位BMC比较

Tab. 2 BMC comparison for different anatomical locations in subjects

部位	第1组(n=7)			第2组(n=6)		
	伞兵	篮球运动员	对照组	伞兵	篮球运动员	对照组
跟骨	27.84 ± 3.89	32.52 ± 5.12 <sup>a,c</sup>	24.58 ± 2.64	23.85 ± 2.98	32.95 ± 9.03 <sup>a,c</sup>	22.82 ± 3.15
第1跖骨	6.19 ± 0.85	8.01 ± 1.84 <sup>a,c</sup>	5.68 ± 0.78	6.46 ± 0.81	7.59 ± 1.88 <sup>a,c</sup>	5.64 ± 0.93
第2跖骨	3.54 ± 0.36	4.60 ± 0.84 <sup>a,c</sup>	3.15 ± 0.58	3.55 ± 0.43	4.22 ± 0.73 <sup>a,c</sup>	3.34 ± 0.36
第3跖骨	3.09 ± 0.38	3.61 ± 1.15 <sup>c</sup>	2.41 ± 0.38	2.67 ± 0.50	2.61 ± 0.88	2.17 ± 0.96
第4跖骨	2.90 ± 0.60	2.96 ± 0.79	2.26 ± 0.48	2.65 ± 0.39 <sup>c</sup>	2.50 ± 0.64	2.01 ± 0.29
第5跖骨	3.82 ± 0.86	3.59 ± 0.81	3.06 ± 0.73	3.43 ± 0.55	3.51 ± 0.89	2.57 ± 0.47
L1	13.34 ± 1.68	17.29 ± 1.31 <sup>a,c</sup>	13.13 ± 1.87	14.19 ± 1.06	17.20 ± 2.97 <sup>a,c</sup>	12.49 ± 1.47
L2	15.43 ± 1.43	19.70 ± 2.06 <sup>a,c</sup>	15.08 ± 2.52	15.74 ± 1.02	19.84 ± 3.83 <sup>a,c</sup>	14.02 ± 1.01
L3	17.79 ± 1.48	23.03 ± 3.34 <sup>a,c</sup>	17.56 ± 2.26	18.93 ± 2.27	22.50 ± 4.24 <sup>c</sup>	14.88 ± 1.95 <sup>a,b</sup>
L4	19.19 ± 0.93	25.31 ± 2.31 <sup>a,c</sup>	19.42 ± 2.49	19.16 ± 2.57	23.70 ± 4.22 <sup>a,c</sup>	16.09 ± 1.45
总腰椎	65.75 ± 5.16	85.33 ± 8.38 <sup>a,c</sup>	65.19 ± 8.55	68.02 ± 6.46	83.24 ± 14.95 <sup>a,c</sup>	57.47 ± 4.81
左侧股骨颈	5.84 ± 1.33	6.86 ± 0.92	5.41 ± 0.78	4.89 ± 1.73	6.29 ± 1.94	4.51 ± 0.67
左髌	40.51 ± 5.09	58.94 ± 5.05 <sup>a,c</sup>	41.62 ± 3.00	40.86 ± 7.54	53.28 ± 7.56 <sup>a,c</sup>	38.67 ± 5.12
右侧股骨颈	6.46 ± 1.34	6.72 ± 0.72	5.18 ± 0.67 <sup>b</sup>	5.36 ± 1.63	6.73 ± 1.51 <sup>c</sup>	4.14 ± 0.39
右髌	41.96 ± 4.35	57.45 ± 4.61 <sup>a,c</sup>	40.36 ± 5.76	42.96 ± 7.42	53.68 ± 7.50 <sup>a,c</sup>	38.44 ± 4.88

注:<sup>a</sup>表示与同组伞兵具有显著性差异;<sup>b</sup>表示与同组篮球运动员具有显著性差异;<sup>c</sup>表示与同组对照组具有显著性差异

### 2.2 BMD结果

跟骨处篮球运动员的BMD显著高于对照组

( $P < 0.05$ )。第1组中,第1~3跖骨处篮球运动员BMD显著高于对照组( $P < 0.05$ );然而第2组中,第

3~5 跖骨处伞兵 BMD 显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。篮球运动员髌关节、股骨颈和总腰椎 BMD 显著高于其他受试者 ( $P < 0.01$ )。伞兵和对照组跟骨、腰

椎和髌关节的 BMC 无显著性差异 (见表 3)。对于 BMC 和 BMD, 第 1、2 组的测量结果均无显著性差异。

表 3 受试者不同部位 BMD 比较

Tab. 3 BMD comparisons for different anatomical locations in subjects

部位	第 1 组 ( $n=7$ )			第 2 组 ( $n=6$ )		
	伞兵	篮球运动员	对照组	伞兵	篮球运动员	对照组
跟骨	0.81 ± 0.94	0.75 ± 0.13	0.88 ± 0.92 <sup>c</sup>	0.87 ± 0.14 <sup>c</sup>	0.79 ± 0.48	0.71 ± 0.07
第 1 跖骨	0.49 ± 0.66	0.52 ± 0.09	0.59 ± 0.85 <sup>a,c</sup>	0.56 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.50 ± 0.57	0.49 ± 0.05
第 2 跖骨	0.43 ± 0.44	0.43 ± 0.08	0.51 ± 0.64 <sup>c</sup>	0.47 ± 0.04	0.40 ± 0.47	0.41 ± 0.02
第 3 跖骨	0.40 ± 0.75	0.39 ± 0.07	0.43 ± 0.95 <sup>c</sup>	0.33 ± 0.08	0.33 ± 0.33	0.30 ± 0.01 <sup>a</sup>
第 4 跖骨	0.37 ± 0.08	0.38 ± 0.06	0.35 ± 0.05	0.31 ± 0.07	0.30 ± 0.05	0.27 ± 0.03 <sup>a</sup>
第 5 跖骨	0.36 ± 0.09	0.36 ± 0.07	0.35 ± 0.04	0.33 ± 0.07	0.31 ± 0.05	0.28 ± 0.03 <sup>a</sup>
L1	0.96 ± 0.04	1.00 ± 0.08	1.05 ± 0.05	1.11 ± 0.12	0.94 ± 0.10	0.88 ± 0.07
L2	1.00 ± 0.05	1.04 ± 0.11	1.13 ± 0.03	1.20 ± 0.15 <sup>a,c</sup>	1.01 ± 0.10	0.91 ± 0.04
L3	1.04 ± 0.06	1.11 ± 0.13	1.21 ± 0.04 <sup>a,c</sup>	1.23 ± 0.15	1.06 ± 0.10	0.91 ± 0.06
L4	1.03 ± 0.04	1.06 ± 0.15	1.13 ± 0.09	1.19 ± 0.11	1.07 ± 0.06	0.88 ± 0.08
总腰椎	1.01 ± 0.04	1.06 ± 0.12	1.13 ± 0.04 <sup>a,c</sup>	1.19 ± 0.13 <sup>a,c</sup>	1.02 ± 0.08	0.90 ± 0.05
左侧股骨颈	0.96 ± 0.08	0.94 ± 0.15	1.21 ± 0.13 <sup>a,c</sup>	1.18 ± 0.15 <sup>a,c</sup>	0.96 ± 0.10	0.85 ± 0.14
左髌	0.99 ± 0.08	0.99 ± 0.14	1.25 ± 0.09 <sup>a,c</sup>	1.21 ± 0.10 <sup>a,c</sup>	1.05 ± 0.09	0.95 ± 0.10
右侧股骨颈	0.95 ± 0.11	1.02 ± 0.18	1.23 ± 0.08 <sup>a,c</sup>	1.16 ± 0.15 <sup>a,c</sup>	0.95 ± 0.09	0.84 ± 0.10
右髌	0.98 ± 0.08	1.03 ± 0.17	1.24 ± 0.07 <sup>a,c</sup>	1.19 ± 0.09 <sup>a,c</sup>	1.05 ± 0.07	0.94 ± 0.08

注: <sup>a</sup>表示与伞兵具有显著性差异; <sup>b</sup>表示与篮球运动员具有显著性差异; <sup>c</sup>表示与对照组具有显著性差异

### 2.3 着陆时伞兵和篮球运动员足底压力分布情况

从 1.2 m 高平台着陆时,伞兵双脚的跟骨 (M09、M10) 压力峰值都显著大于篮球运动员 ( $P < 0.05$ )。篮球运动员第 1~5 跖骨 (M03~07) 的峰值压力显著大于伞兵 ( $P < 0.05$ )。篮球运动员和伞兵中足部分 (M08) 的峰值压力无显著性差异 ( $P > 0.05$ , 见表 4)。

表 4 从 1.2 m 跳台着陆时双足各区压力峰值对比

Tab. 4 Comparison of plantar pressure peak when landing from 1.2 m-platform kPa/kg

分区	左足		右足	
	伞兵	篮球运动员	伞兵	篮球运动员
M01	3.41 ± 1.9	3.8 ± 1.16	3.2 ± 0.72	4.14 ± 1.11 <sup>a</sup>
M02	2.38 ± 1.01	2.63 ± 0.957	2.63 ± 0.86	2.94 ± 1.31
M03	3.14 ± 1.58	5.16 ± 1.5 <sup>a</sup>	3.18 ± 1.29	5.23 ± 1.23 <sup>a</sup>
M04	2.89 ± 1.12	4.94 ± 1.86 <sup>a</sup>	3.6 ± 1.89	5.05 ± 2.09 <sup>a</sup>
M05	2.33 ± 0.64	4.25 ± 1.81 <sup>a</sup>	2.86 ± 1.48	4.13 ± 2.21 <sup>a</sup>
M06	1.82 ± 0.49	3.65 ± 1.41 <sup>a</sup>	2.07 ± 1.17	3.44 ± 1.39 <sup>a</sup>
M07	2.23 ± 0.96	3.76 ± 1.32 <sup>a</sup>	2.34 ± 1.25	3.63 ± 1.96 <sup>a</sup>
M08	4.16 ± 2.63	3.52 ± 0.77	5.4 ± 2.43	3.64 ± 0.88 <sup>a</sup>
M09	13.57 ± 2.91	9.49 ± 3.56 <sup>a</sup>	14.82 ± 1.97	9.93 ± 3.24 <sup>a</sup>
M10	12.7 ± 3.42	8.02 ± 3.2 <sup>a</sup>	14.41 ± 2.03	8.52 ± 3.16 <sup>a</sup>

注: <sup>a</sup>表示篮球运动员和伞兵在该区域的压力峰值存在显著性差异,  $P < 0.05$

### 2.4 着陆时伞兵和篮球运动员 vGRF 情况

着陆瞬间伞兵和篮球运动员 vGRF 对比曲线如图 3 所示。伞兵 vGRF 约为 11 BW, 远大于篮球运动员的最大峰值压力 (6 BW)。图 3 中伞兵只有 1 个 vGRF 峰值, 篮球运动员则出现 2 个 vGRF 峰值, 第 1 个 vGRF 峰值与第 2 个相差 20~30 ms。配合摄像机分析发现, 第 1 个 vGRF 峰值出现在篮球运动员前脚掌着陆时, 第 2 个 vGRF 峰值则出现在全脚掌着陆时。伞兵从着陆到稳定的时间明显短于篮球运动员。

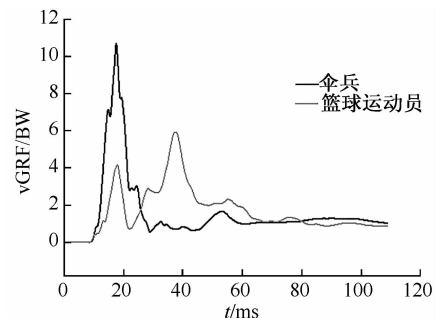


图 3 着陆瞬间伞兵和篮球运动员 vGRF 对比

Fig. 3 vGRF comparison of hoopsters and paratroopers at the moment of landing

### 3 讨论

不同冲击类型的运动,如篮球、排球、游泳、体操和跑步等对 BMC 和 BMD 有不同的影响。篮球和跳伞作为两种典型的高冲击运动,却较少被对比分析来研究对 BMD 和 BMC 的不同影响。本文选择伞兵和篮球运动员作为研究对象,结合跳台实验采集的 vGRF 和足底分区峰值压力,分析不同着陆姿势和训练方式对不同部位 BMD 和 BMC 的影响。

篮球运动员第 1、2 跖骨处 BMC 显著大于对照组,推测篮球运动能够刺激加载部位的成骨响应、提高承重骨 BMC<sup>[19]</sup>。但是伞兵与对照组在足部的 BMC 无显著性差异,伞兵在进行着陆时,跖骨峰值压力明显小于篮球运动员,且篮球运动员第 1 个 vGRF 峰值与第 2 个相差 20 ~ 30 ms,前脚掌提前接触地面起到一定的缓冲作用。对于瞬时高冲击运动,篮球运动员的跖骨相比伞兵承担了更多冲击载荷,且第 1、2 跖骨相比其他跖骨所承受的载荷更大,更有效刺激跖骨的骨形成,提高 BMC。

研究表明,篮球运动能够提高下肢 BMD 和 BMC,促进青少年甚至成年人的骨矿积累<sup>[15]</sup>。本文发现,篮球运动也能显著提高跟骨和髌关节 BMC 和 BMD,而跳伞运动不能明显提高伞兵 BMC 和 BMD。足底分区压力峰值显示,伞兵跟骨相比篮球运动员在着陆瞬间有更大的压力峰值,故骨量的增减与作用与承重骨的载荷大小并不总是正相关,与运动时受到的 vGRF 大小也并非正相关。因此认为,并不是所有的高冲击运动都能显著提高 BMC 和 BMD。

Waener 等<sup>[21]</sup>研究表明,山地自行车选手所有测量部位的 BMD 显著高于公路自行车选手。山地自行车所面对的地形较为复杂,受到变化频率和强度的载荷作用力,会产生更多的成骨刺激。类似地,在本研究中,篮球运动员腰椎和髌关节处 BMD 显著高于伞兵,因为在篮球运动中包含跑、走、停、慢慢移动和跳跃等各种动作,篮球运动员快速、方向多变的移动,在腰椎和髌关节产生变化的拉力、压缩力、剪切力和弯矩等,会诱导骨形成,提高 BMD<sup>[19,21-22]</sup>。然而,跳台训练是伞兵的常规训练,在跳台过程中,GRF 是伞兵受到的主要力学刺激。由于变化的载荷较恒定载荷更有利于产生积极的

成骨反应<sup>[23-24]</sup>,故方向多变、速度多变的篮球运动相比受力单一的跳伞运动更容易提高下肢骨量。

本研究的局限性如下:① 受试样本量需要扩大;② 对研究对象的运动史应该进行详细问卷调研,因为青少年时期的运动对于骨量积累和 BMD 高低有重要影响;③ 忽视了对受试者本身运动能力、激素水平等的测量,因为骨量的得失是自身和外界各种因素共同作用的结果。

总体来说,虽然高冲击运动产生的载荷能够刺激成骨形成,但 BMC 和 BMD 的增减与载荷大小并不一定成正比。篮球运动能显著提高下肢骨量,在伞兵的日常训练中可考虑采用篮球运动的训练方式提高 BMD 和 BMC,降低骨质疏松性骨折的风险;同时,篮球运动对于普通人的骨量提升也具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] BAKHIREVA LN, BARRETT-CONNOR E, KRITZ-SILVERSTEIN D, *et al.* Modifiable predictors of bone loss in older men: A prospective study [J]. *Am J Prev Med*, 2004, 26(5): 436-442.
- [2] OLSZYNSKI WP, DAVISON KS, ADACHI JD, *et al.* Osteoporosis in men: Epidemiology, diagnosis, prevention, and treatment [J]. *Clin Ther*, 2004, 26(1): 15-28.
- [3] WOLFF I, VAN CROONENBORG JJ, KEMPER HCG, *et al.* The effect of exercise training programs on bone mass: A meta-analysis of published controlled trials in pre- and postmenopausal women [J]. *Osteoporosis Int*, 1999, 9(1): 1-12.
- [4] 周双珍, 张雄, 马红磊. 不同骨密度下人体脊柱着陆冲击响应的数值模拟 [J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 591-595. ZHOU SZ, ZHANG X, MA HL. Numerical simulation on response of human spine with different bone mineral density to landing impact [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 591-595.
- [5] NIKANDER R, SIEVÄNEN H, HEINONEN A, *et al.* Targeted exercise against osteoporosis: A systematic review and meta-analysis for optimising bone strength throughout life [J]. *BMC Med*, 2010, 8(1): 47.
- [6] SHIRAZI-FARD Y, METZGER CE, KWACZALA AT, *et al.* Moderate intensity resistive exercise improves metaphyseal cancellous bone recovery following an initial disuse period, but does not mitigate decrements during a subsequent disuse period in adult rats [J]. *Bone*, 2014, 66: 296-305.

- [ 7 ] MARQUES EA, WANDERLEY F, MACHADO L, *et al.* Effects of resistance and aerobic exercise on physical function, bone mineral density, OPG and RANKL in older women [J]. *Exp Gerontol*, 2011, 46(7): 524-532.
- [ 8 ] MILANESE C, PISCITELLI F, CAVEDON V, *et al.* Effect of distinct impact loading sports on body composition in pre-menarcheal girls [J]. *Sci Sport*, 2014, 29(1): 10-19.
- [ 9 ] UBAGO-GUISADO E, GÓMEZ-CABELLO A, SÁNCHEZ J, *et al.* Influence of different sports on bone mass in growing girls [J]. *J Sport Sci*, 2015, 33(16): 1710-1718.
- [10] MAÏMOUN L, COSTE O, PHILIBERT P, *et al.* Peripubertal female athletes in high-impact sports show improved bone mass acquisition and bone geometry [J]. *Metabolism*, 2013, 62(8): 1088-1098.
- [11] ALLISON SJ, FOLLAND JP, RENNIE WJ, *et al.* High impact exercise increased femoral neck bone mineral density in older men: A randomised unilateral intervention [J]. *Bone*, 2013, 53(2): 321-328.
- [12] COURTEIX D, LESPESSAILLES E, PERES SL, *et al.* Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: A comparative study between impact-loading and non-impact loading sports [J]. *Osteoporosis Int*, 1998, 8(2): 152-158.
- [13] KELLEY GA, KELLEY KS, KOHRT WM. Exercise and bone mineral density in men: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Bone*, 2013, 53(1): 103-111.
- [14] DUNCAN CS, BLIMKIE CJ, COWELL CT, *et al.* Bone mineral density in adolescent female athletes: Relationship to exercise type and muscle strength [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2002, 34(2): 286-294.
- [15] NURMI-LAWTON JA, BAXTER-JONES AD, MIRWALD RL, *et al.* Evidence of sustained skeletal benefits from impact: Loading exercise in young females. A 3-year longitudinal study [J]. *J Bone Miner Res*, 2004, 19(2): 314-322.
- [16] CRISAFULLI A, MELIS F, TOCCO F, *et al.* External mechanical work versus oxidative energy consumption ratio during a basketball field test [J]. *J Sport Med Phys Fitness*, 2002, 42(4): 409-417.
- [17] 牛文鑫. 跳伞着陆踝关节损伤机制及其防护的生物力学研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学博士学位论文, 2012.
- [18] 李毅, 伍骥, 郑超, 等. 中国伞兵着陆时足底动力学指标的变化特征 [J]. *解放军医学院学报*, 2013, 34(9): 953-956.
- [19] ZRIBI A, ZOUCHE M, CHAARI H, *et al.* Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent basketball players [J]. *J Clin Densitom*, 2014, 17(1): 156-162.
- [20] WARNER SE, SHAW JM, DALSKY GP. Bone mineral density of competitive male mountain and road cyclists [J]. *Bone*, 2002, 30(1): 281-286.
- [21] YANG P, BRÜGGEMANN GP, RITTWEGGER J. What do we currently know from *in vivo* bone strain measurements in humans? [J]. *J Musculoskel Neuron*, 2011, 11(1): 8-20.
- [22] CREIGHTON DL, MORGAN AL, BOARDLEY D, *et al.* Weight-bearing exercise and markers of bone turnover in female athletes [J]. *J Appl Physiol*, 2001, 90(2): 565-570.
- [23] WONG MG, HULL ML. Analysis of road induced loads in bicycle frames [J]. *J Mech Trans Automation*, 1983, 105(1): 138-145.
- [24] WANG EL, HULL ML. A dynamic system model of an off-road cyclist [J]. *J Biomech Eng*, 1997, 119(3): 248-253.