

中国伞兵着陆时足底动力学指标的变化特征

李毅¹, 伍骥¹, 郑超¹, 黄蓉蓉¹, 那雨虹², 薛静¹, 扬帆³, 苏斌¹, 王增顺¹

¹空军总医院, 北京 100142; ²哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江哈尔滨 150000; ³中国标准化研究所, 北京 100045

摘要: **目的** 观察伞兵着陆过程中左、右足底动力学指标变化规律。**方法** 利用德国 Pedar-X 足底压力检测系统检测 12 名现役八一跳伞大队的跳伞运动员模拟伞兵从 1.5 米跳台跳下着陆时足底最大应力、最大压力、接触面积、压力时间积分值等动力学指标。将左、右足底按照常规标准分为 10 区, 分别记录各区的动力学指标值, 观察各区指标的变化规律, 同时比较左、右足底相应各区的动力学指标值。**结果** 左足底最大压力值 (kPa) 分布规律: 9 区足跟内侧 (7.86 ± 1.68) kPa, 10 区足跟外侧 (7.47 ± 1.88) kPa, 8 区中足 (4.68 ± 0.71) kPa, 1 区第一足趾 (3.96 ± 1.56) kPa, 3 区第一跖骨区 (3.72 ± 1.43) kPa, 4 区第二跖骨区 (2.87 ± 1.05) kPa, 5 区第三跖骨区 (2.72 ± 1.08) kPa, 2 区第 2~4 趾 (2.64 ± 1.25) kPa, 6 区第四跖骨区 (2.42 ± 0.68) kPa, 7 区第五跖骨区 (2.13 ± 0.87)。左足底最大应力值、最大压力时间积分值与最大压力值分布规律一致。右足最大应力值、最大压力值、最大压力时间积分值分布规律基本与左足一致。**结论** 半蹲式着陆足底受力左右足一致; 足底足跟部受力最大; 足底内侧受力大于外侧, 易导致足内外踝骨折。

关键词: 中国伞兵; 足底; 动力学指标

中图分类号: R 87 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-5227(2013)09-0953-04 **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-5227.2013.09.018

网络出版时间: 2013-05-27 09:26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3275.R.20130527.0926.001.html>

Change of plantar dynamics in Chinese parachutists at landing

LI Yi¹, WU Ji¹, ZHENG Chao¹, HUANG Rong-rong¹, NA Yu-hong², XUE Jing, YANG Fan³, SU Bin¹, WANG Zeng-shun¹

¹General Hospital of Air Force, Beijing 100142, China; ²Aerospace College, Harbin University of Technology, Harbin 150000, Heilongjiang Province, China; ³National Institute of Standardization, Beijing 100045, China

Corresponding author: WU Ji. Email: bjwuji@hotmail.com

Abstract: Objective To observe the rule of plantar dynamics in Chinese parachutists at landing. **Methods** The maximum stress, maximum pressure, contact area, pressure-time integration value of 12 active duty parachutists from "August 1st" Skydiving Team were measured using the German Pedar-X system when they jumped off from a 1.5-meter high platform. The left and right plantars were divided into 10 regions according to the conventional criteria and their dynamics parameters were recorded. The rule of dynamics change in each region was observed. The dynamics values in different regions of the left and right plantars were compared. **Results** The distribution of the maximum pressure in left plantar was as follows: the maximum pressure in left plantar of medial heel in region 9 > that of lateral heel in region 10 > that of middle foot in region 8 > that of the first toe in region 1 > that of the first metatarsal area in region 3 > that of the second metatarsal area in region 4 > that of the third metatarsal area in region 5 > that of 2-4 toes in region 2 > that of the fourth metatarsal area in region 6 > that of the fifth metatarsal area in region 7 (7.86 ± 1.68 kPa vs 7.47 ± 1.88 kPa vs 4.68 ± 0.71 kPa vs 3.96 ± 1.56 kPa vs 3.72 ± 1.43 kPa vs 2.87 ± 1.05 kPa vs 2.13 ± 0.87 kPa). The distribution of maximum stress and maximum pressure-time integration value was consistent with that of the maximum pressure in left plantar. The distribution of maximum stress, maximum pressure and maximum pressure-time integration value in the right plantar was consistent with that of those in the left plantar. **Conclusion** The pressure of left and right feet is similar at half-squat landing. The pressure of plantar and heel is the highest. The pressure of medial plantar is greater than that of the lateral plantar, thus easy leading to fracture of medial and lateral ankles.

Key words: Chinese paratroops; plantar; dynamics index

我国伞兵伞降及平时训练时发生伤害的几率较高, 其中 86.2% 发生在着陆过程中, 受伤部位

以足踝部为最高^[1]。本课题组前期对现役空降兵军事跳伞伤流行病学调查显示, 调查 397 名伞兵, 因伞降着陆受伤 173 人, 其中踝关节损伤 70 人^[2], 伞降着地过程中的冲击力是足踝部损伤的重要原因。我国伞兵着陆时使用的是半蹲式着地这一方法^[3], 冯文树和刘铁汉^[4]对这一动作过程中下肢各部位的压力进行测量认为, 足、踝部承受的压力最大。有作者通过研究人体站立位足底面静压

收稿日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81071516)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(81071516)

作者简介: 李毅, 男, 博士, 副主任医师。研究方向: 生物力学。

Email: 136512889170@163.com

通信作者: 伍骥, 男, 博士, 主任医师, 主任。Email: bjwuji@hotmail.com

力的分布发现足底面在与踝关节垂直轴线相交面上的压力最大^[5]。同时对正常行走的青年人的足底动力学研究发现，左、右足底动力学指标除压力指标外，其他指标显示均有差异性^[6]。对于半蹲式着地时足底动力学指标的分布规律及着陆时左、右足底动力学指标是否有差异的探讨有助于了解足底承受压力的规律及正常范围，有利于指导伞兵的训练，减少训练及伞降时伤害。本实验利用德国的 Pedar-X 足底压力测定系统对伞兵着陆这一动作过程中足底的压力进行测量，观察足底压力等动力学指标的分布规律以及左、右足底相应的动力学指标是否具有差异性。

对象和方法

1 对象 八一跳伞大队现役跳伞军事人员共 12 人。均为男性，实际跳伞年限在 1 年以上；平均年龄 (22.6 ± 2) 岁；身高 (175.6 ± 4.1) cm；体质量 (74.4 ± 8.6) kg。身体健康，无下肢外伤史。

2 实验仪器与设备 中国标准化研究院生物力学实验室内使用德国 Novel 公司 Pedar-X 鞋垫式足底压力测定系统。数据采集频率为 100 Hz/s。压力传感单元通过电缆与控制盒相连，控制盒进行读取、记录、发送、同步输出等功能。踝关节感受器、足底 Pedar-X 鞋垫使用前进行校正。本实验仅使用足底后部的数据，跳台高度 150 cm。

3 测试方法 在实验前告知被测试者本次实验的目的、方法、步骤及实验中的注意事项。适度慢跑 20 min 后开始实验。按照被测人员足的大小选择合适鞋号的 06 伞兵作训靴，将 Pedar-X 鞋垫式压力感受器置于足与鞋之间。被测试人员在 150 cm 高跳台上按照伞兵着陆的标准式姿势 (半蹲式着地) 跳下，着地于沙坑内，沙坑为 100 cm × 100 cm × 30 cm 大小^[7]。每人跳 3 次，选择 1 次合格记录保存。足底划分为 10 区 (图 1)：前足分为 1~7 区，中足为 8 区，后足分为 9 区、10 区，分别记录各个区的动力学指标值。

4 观察指标 Pedar+Pliance 软件记录每人 3 次半蹲式着地记录，选择 1 次完整合格的数据保存。记录并分析指标：最大应力值 (force, F)、最大压力值 (pressure, P)、接触面积、最大压力时间积分 (pressure time integral, PTI)，最大压力时间积分是平均压力值 × 达到最大压力值所用的时间，是对足、踝部压力大小评估的一个客观指标^[8]。记录左、右足底相应各部位的上述动力学指标值，并进行比较，观察不同高度半蹲式着地踝关节动力学指

标变化特点及规律。

5 统计学分析 应用组间比较 *t* 检验。统计学分析使用 SPSS13.0 软件进行数据处理。

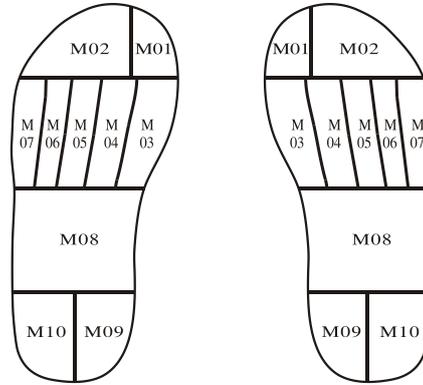


图 1 足底分区示意图
Fig.1 Ten plantar areas of foot

结果

1 最大应力值 (force, F) 本实验中将最大应力值进行标准化，即每一个最大应力值除以相应被测试者体质量，结果是被测试者的每公斤体重的最大应力值。左足各区最大应力值大小顺序是：内侧足跟部 > 外侧足跟部 > 中足 > 第一跖骨区 > 第二跖骨区 > 第二~四趾 > 第三跖骨区 > 第一趾 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 (表 1)。本实验右足底最大应力值以足跟部最大，内侧足跟部值显著大于外侧足跟部值。右足顺序是：内侧足跟部 > 外侧足跟部 > 中足 > 第一趾 > 第一跖骨区 > 第二跖骨区 > 第二~四趾 > 第三跖骨区 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 (表 2)。

2 最大压力值 (pressure, P) 本实验中将最大压力值进行标准化，即每一个最大压力值除以相应被测试者体质量，结果是被测试者的每公斤体重的最大压力值。本实验左足最大压力值以足跟部最大，内、外侧足跟部压力值没有明显差别，接近全足的最大值。足底各分区最大压力值大小顺序是：内侧足跟部、外侧足跟部 > 中足 > 第一趾 > 第一跖骨区 > 第二跖骨区 > 第三跖骨区 > 第二~四趾 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 (表 1)。本实验右足最大压力值以足跟部最大，内、外侧足跟部压力值没有明显差别，接近全足的最大值。足底各分区最大压力值大小顺序是：内侧足跟部、外侧足跟部 > 中足 > 第一跖骨区 > 第一趾 > 第二跖骨区 > 第二~四趾 > 第三跖骨区 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 (表 2)。

3 接触面积 本实验左足底接触面积 (158.84 ±

10.96) cm²。各区接触面积大小顺序是：中足 > 第二~四趾 > 外侧足跟部 > 内侧足跟部 > 第一跖骨区 > 第二跖骨区 > 第三跖骨区 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 > 第一趾 (表 1)。右足底接触面积 (157.26 ± 12.07) cm²。各区接触面积大小的顺序是：中足 > 外侧足跟部 > 第二~四趾 > 内侧足跟部 > 第一跖骨区 > 第二跖骨区 > 第三跖骨区 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 > 第一趾 (表 2)。

4 足底最大压力时间积分 (pressure time integral, PTI) 左足底的最大压力时间积分值以足跟部最大, 内侧明显大于外侧。左足底各区最大压力时间积分大小顺序为：内侧足跟部 > 外侧足跟部 > 第三跖骨区 > 第一趾 > 第二跖骨区 > 中足 > 第四跖骨区 > 第一跖骨区 > 第五跖骨区 > 第二~四趾 (表 1)。右足底的最大压力时间积分值以足跟部最大, 内侧明显大于外侧。右足底各区最大压力时间积分大小顺序为：内侧足跟部 > 第一跖骨区 > 外侧足跟部 > 第二跖骨区 > 第一趾 > 第三跖骨区 > 中足 > 第四跖骨区 > 第五跖骨区 > 第二~四趾 (表 2)。

5 左、右足底相应动力学指标比较 左、右足底

无论是全足底还是足底相应各分区在最大应力值、最大压力值、接触面积、最大压力时间积分值的比较均无统计学差异。

讨 论

中国伞兵伞降着陆时使用的是半蹲式着陆, 半蹲式着陆的要求是双足靠拢站在平台边缘, 露出全足的四分之一, 膝、脚跟、足尖三点靠紧, 当听到跳的口令时, 同时两脚跟稍提起, 利用两脚掌的弹力和身体的内在力量向前上方跳离平台。离台后, 身体保持原有姿势落地, 两脚掌平行地面, 接地时, 两腿的膝、脚跟、脚尖三点并紧, 两腿自然缓冲并站稳^[3]。这一姿势与其他姿势着陆对人体的冲击力, 无论是垂直冲击力还是水平冲击力, 半蹲式着陆均为最大^[9]。而在人体各部位受到的冲击力比较, 踝关节受到的冲击力最大^[4]。本实验中使用的 Pedar-X 系统是目前应用在各种运动中测定足底动力学指标最广泛的压力测定系统。

左足底的最大应力值分布情况示后足值最大, 中足次之, 前足最小; 后足内侧值大于外侧值;

表 1 12 名跳伞人员左足底动力学指标值

Tab. 1 Index of left plantar dynamics in 12 parachutists(150 cm)

Foot region	Force(n)	Pressure(kPa)	Contact area (cm ²)	Pressure time integral (kPa/ms)
Total object	37.78 ± 5.31	8.00 ± 1.35	158.84 ± 10.96	59.50 ± 20.61
Great toe	1.55 ± 0.74	3.96 ± 1.56	7.14 ± 1.03	70.13 ± 42.27
Lesser toes	1.66 ± 0.58	2.64 ± 1.25	17.45 ± 2.68	25.84 ± 17.77
The first metatarsal	2.45 ± 0.69	3.72 ± 1.43	13.97 ± 1.17	50.14 ± 38.63
The second metatarsal	1.74 ± 0.61	2.87 ± 1.05	11.15 ± 1.18	65.83 ± 75.46
The third metatarsal	1.56 ± 0.56	2.72 ± 1.08	9.74 ± 1.14	72.40 ± 72.03
The forth metatarsal	1.19 ± 0.32	2.42 ± 0.68	9.28 ± 0.55	54.48 ± 52.86
The fifth metatarsal	1.04 ± 0.28	2.13 ± 0.87	9.13 ± 1.06	28.20 ± 16.39
Midfoot	9.60 ± 1.44	4.68 ± 0.71	45.39 ± 3.36	55.20 ± 17.95
Medial hind foot	10.32 ± 2.59 ^a	7.86 ± 1.68	15.65 ± 0.01	157.24 ± 56.17 ^a
Lateral hind foot	7.93 ± 2.65	7.47 ± 1.88	16.30 ± 0.51	103.66 ± 49.45

^aP < 0.05, vs lateral hind foot

表 2 12 名跳伞人员右足底动力学指标值

Tab. 2 Index of right plantar dynamics in 12 parachutists(150 cm)

Foot region	Force(n)	Pressure(kPa)	Contact area (cm ²)	Pressure time integral (kPa/ms)
Total object	35.70 ± 8.78	7.80 ± 1.84	157.26 ± 12.07	66.54 ± 42.26
Great toe	3.34 ± 1.57	3.34 ± 1.57	6.71 ± 1.03	66.15 ± 42.36
Lesser toes	1.60 ± 0.93	2.12 ± 0.99	15.79 ± 5.41	31.32 ± 26.89
The first metatarsal	2.57 ± 0.73	3.70 ± 1.23	13.93 ± 1.01	128.94 ± 148.13
The second metatarsal	1.61 ± 0.59	2.52 ± 1.18	10.96 ± 1.87	74.76 ± 67.17
The third metatarsal	1.30 ± 0.44	2.11 ± 0.72	9.47 ± 1.46	60.43 ± 51.02
The forth metatarsal	1.07 ± 0.35	1.89 ± 0.55	9.11 ± 0.92	44.14 ± 40.38
The fifth metatarsal	0.95 ± 0.40	1.98 ± 0.76	8.95 ± 1.65	33.59 ± 23.79
Midfoot	9.23 ± 1.95	4.28 ± 1.14	45.51 ± 3.27	57.96 ± 38.27
Medial hind foot	10.21 ± 3.75 ^a	7.59 ± 2.36	15.40 ± 0.87	160.70 ± 117.73
Lateral hind foot	7.07 ± 2.18	7.66 ± 1.85	16.16 ± 0.67	105.52 ± 81.43

^aP < 0.05, vs lateral hind foot

前足自内向外侧最大应力值逐渐减小。最大压力值、最大压力时间积分值的分布情况与最大应力值的分布情况一致。左足底的动力学指标显示：左足底内侧受力较外侧大；足跟部受力最大，且内侧较外侧在最大应力值、最大压力时间积分值上有统计学差异。这种内外侧受力的差别，可以引起左足的内翻运动，易导致左踝关节的损伤。

右足底的最大应力值分布情况后足值最大，中足次之，前足最小；后足内侧值大于外侧值；前足自内向外侧最大应力值逐渐减小。右足最大压力值的分布情况与最大应力值的分布情况一致。右足底最大压力时间积分值显示第一跖骨区值明显升高，右足底内外侧受力差别加大。右足底的动力学指标显示：右足底内侧受力较外侧大；足跟部受力最大，且内侧较外侧在最大应力值上有统计学差异。这种内外侧受力的差别，可以引起右足的内翻运动，易导致右踝关节的损伤。左、右足底这一动力学特点导致左足的运动学变化原理可以解释流行病学调查中踝关节损伤比例较大的结果。

在左、右足底及相应分区的动力学指标比较中，均未显示出统计学差异。故半蹲式着陆这一动作左、右足底受力是一致的。这与行走时左、

右足底动力学指标的特点是不一致的。

综上所述，半蹲式着陆足底受力分布规律左、右足一致，足底足跟部受力最大，足底内侧受力明显大于外侧，易导致足内外踝骨折。

参考文献

- 1 王忠仁, 刘涛, 江岚, 等. 空降兵事故性伤害及其危险因素流行病学调查 [J]. 解放军预防医学杂志, 2010, 28 (2): 124-125.
- 2 郑超, 伍骥, 王琦. 397例空降兵跳伞训练损伤的流行病学调查 [J]. 空军总医院学报, 2009, 25 (3): 121-122.
- 3 航空医学会. 航空医学 (上) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1974: 355-362.
- 4 冯文树, 刘铁汉. 采用两种跳伞着陆姿势着陆时人体主要节段承受的冲击过载 [J]. 航天医学与医学工程, 1989, 2 (2): 84-88.
- 5 Ghosh AK, Tibarewala DN, Mukherjee P, et al. Preliminary study on static weight distribution under the human foot as a measure of lower extremity disability [J]. Med Biol Eng Comput, 1979, 17 (6): 737-741.
- 6 张庆来, 孟站领. 正常青年人左右足底压力分布特征的对比分析 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11 (5): 889-892.
- 7 冯文树, 刘铁汉, 何杨举, 等. 平台跳伞训练中着陆冲击力在人体上的分布 [J]. 生物医学工程学杂志, 1986, 3 (2): 94-98.
- 8 Sneyers CJ, Lysens R, Feys H, et al. Influence of malalignment of feet on the plantar pressure pattern in running [J]. Foot Ankle, 1995, 16 (10): 624-632.
- 9 冯文树, 刘铁汉, 何杨举, 等. 不同姿势着陆时人体质心部位冲击过载的比较 [J]. 第四军医大学学报, 1989, 10 (2): 87-90.