



儿童青少年足形发育特征及生物力学功能 对鞋具研发的启示

Implications of Foot Shape Characteristics and Biomechanics Function of Children and Adolescents to the Research and Development of Footwear

孙冬¹, 郑志艺², 杨礼², 宋杨¹, 梅齐昌¹, 李建设¹, 顾耀东^{1*}
SUN Dong¹, ZHENG Zhiyi², YANG Li², SONG Yang¹, MEI Qichang¹,
LI Jianshe¹, GU Yaodong^{1*}

摘要:目的:系统分析儿童青少年足形发育特征,厘清裸足/着鞋运动规律及下肢生物力学功能。方法:运用布尔逻辑运算在Web of Science、PubMed和CNKI等8个国内外数据库中检索2000年1月1日—2020年4月1日发表的相关研究文献,使用改良版《Downs和Black量表》对研究文献质量进行评估。结果:最终纳入40篇研究文献,涉及儿童青少年的足形发育及功能特征、裸足运动生物力学特征、裸足/着鞋运动生物力学特征对比和着鞋运动生物力学特征4种类型。样本量共计30450人,年龄为1~19周岁,其中具有裸足习惯的1490人。结论:1)儿童青少年不同足形特征如足长、足围、足弓等对应不同的发育敏感期和年龄阶段,需依据足形发育特点及时调整鞋楦设计;2)鞋具束缚降低足部小关节活动度,抑制部分足功能,儿童青少年裸足运动习惯可能有助于正常足弓形态及功能形成,增加足部肌力,降低踣外翻风险;3)降低儿童鞋具扭转刚度等,遵循“保护大于功能”设计原则,可能有利于降低对低龄儿童的足部外力刺激,增加力学正向反馈及本体感觉输入,提升步态稳定性,促进足部形态及功能的正常发育。建议:未来研究结合大样本长期追踪研究及流行病学方法,进一步探讨儿童青少年裸足/着鞋习惯及鞋具特征对足形特征、运动生物力学功能及损伤风险的影响,提升儿童青少年足部健康水平。

关键词:儿童青少年;足形发育;生物力学功能;鞋具

Abstract: Objective: To systematically analyze the characteristics of foot shape Characteristics of children and adolescents, clarify the movement of barefoot/shod and biomechanical functions of lower limbs. Methods: The published research literatures from January 1, 2000 to April 1, 2020 in 8 domestic and foreign databases including Web of Science, PubMed and CNKI were searched by Boolean logic operation. The quality of the research literatures was assessed by using the modified version of the Downs and Black Scales. Results: 40 articles were included, which involved 4 types of research on foot shape development and functional characteristics of children and adolescents, biomechanical characteristics of the barefoot movement, comparison of biomechanical characteristics of barefoot/shod, and biomechanical characteristics of shod. The sample size totaled 30 450, from 1 to 19 years old, of which 1 490 were habitually barefoot (HB). Conclusions: 1) Different foot shape characteristics of children and adolescents such as foot length, foot circumference, foot arch, etc. correspond to different developmental periods, thus the shoe last design needs to be adjusted according to the foot morphology development characteristics; 2) shoes may limit foot inter-segment motion, HB may contribute to the formation of normal arch shape and function, increase foot muscle strength, reduce the risk of valgus; 3) reducing the torsional stiffness of the shoes, following the principle of “protection is greater than function” may be beneficial to reduce external force stimulation to young children’s feet, increase mechanical positive feedback and proprioceptive input, improve gait stability, and promote foot shape and function development. It is recommended that future research should fur-

基金项目:

国家自然科学基金项目(81772423);
宁波市自然科学基金项目(2022J120);
安踏(中国)有限公司资助项目

第一作者简介:

孙冬(1992-),男,副教授,博士,
主要研究方向为运动生物力学,
E-mail: sundong@nbu.edu.cn。

*通信作者简介:

顾耀东(1981-),男,教授,博士研
究生导师,主要研究方向为运动
人体科学,E-mail: guyaodong@nbu.
edu.cn。

作者单位:

1. 宁波大学,浙江 宁波 315211;
2. 安踏运动科学实验室,福建 晋江
362212
1. Ningbo University, Ningbo 315211,
China;
2. ANTA Sports Science Laborato-
ry, Jinjiang 362212, China.

ther explore the effects of habitually barefoot/habitually shod habits and footwear characteristics on foot morphology characteristics, biomechanical function, and injury risk in children and adolescents by combining with long-term follow-up studies of large samples and epidemiological methods, so as to improve the foot health of children and adolescents.

Keywords: children and adolescents; foot morphology development; biomechanical function; footwear

中图分类号:G804.6 **文献标识码:**A

儿童青少年足部形态发育和功能完善贯穿整个未成年时期,其足部形态、结构与运动功能并非是成年人足部的等比例缩小(Walther et al., 2008)。儿童足部三维形态和结构参数对指导鞋具设计具有重要价值,例如,鞋具合脚性和舒适性的前提是鞋腔与足部形态的契合(Mauch et al., 2009)。部分研究结合儿童足部静态三维形态测量参数指导鞋植设计,提升鞋具舒适度。Cheng等(1997)对 2 829 名中国儿童青少年正常负载和空载下的静态足形进行测量,发现正常负载和空载下的足长和足宽差异分别为 2.5~3.4 mm 和 2.1~4.4 mm。Mauch 等(2008)依据德国和澳大利亚儿童足部静态三维形态测量指导儿童鞋具设计。然而,足部在运动过程中的动态结构及功能特征无法通过静态足形参数预测。鞋具设计同样需要考虑儿童足部运动过程中的形态结构变化以及运动功能需求,兼顾合脚性及功能性,并考虑儿童足部生长发育规律(Mauch et al., 2008)。

从运动特征及功能角度,研究发现,儿童在 3 岁左右已基本形成以足跟触地、双臂交替摆动等为特征的成熟步态模式。随着年龄的进一步增长,儿童步态呈现步速及步长增加、单支撑期延长、步频下降等特征(Guffey et al., 2016)。有研究认为,儿童发育及步行早期应以裸足为主,或着柔软的鞋具,以降低对足部的束缚以及足功能发育的影响,并且能够增强儿童足部小肌肉群力量,提升足底正向感觉输入反馈(顾耀东等, 2019; Lythgo et al., 2009)。随着儿童年龄的增长,鞋具能够为较大强度的身体活动提供必要的保护。儿童足部的持续发育及可塑性使儿童鞋具的保护性、合脚性和功能性更为重要。鞋具设计的调整直接影响儿童足部形态结构发展和功能成熟,并可能导致一系列形态及功能代偿(顾耀东等, 2019)。如有研究发现,儿童鞋头空间不足及束缚过紧会导致跖外翻畸形风险增大,对足部健康长期发展产生不良影响(李蜀东等, 2018)。

儿童青少年足部在不同生长发育阶段的形态、功能、裸足/着鞋运动习惯及下肢运动生物力学特征对设计满足其特殊功能需求的鞋具有重要指导价值。本研究聚焦儿童青少年足部形态和下肢运动功能 2 条主线,沿着儿童青少年足形发育及功能特征—裸足运动生物力学特征—裸足/着鞋运动生物力学特征对比—着鞋运动生物力学特征的研究脉络,梳理并总结儿童青少年足形发育特征及下肢运动生物力学功能。

1 研究对象与方法

1.1 文献检索策略

本研究遵循《系统综述和荟萃分析优先报告的条目: PRISMA 声明》(Shamseer et al., 2015),检索外文数据库包括 PubMed、EBSCO、SPORTDiscus、Web of Science 和 Scopus,中文数据库包括中国知网、维普及万方数据库。文献检索时间为 2000 年 1 月 1 日—2020 年 4 月 1 日。选取的英文关键词包括:1)‘Child (Children)’ AND ‘Adolescent’ AND ‘Teenager’ AND ‘Juvenile’ AND ‘Morphology’ OR ‘Shape’ OR ‘Function’;2)‘Child (Children)’ AND ‘Adolescent’ AND ‘Teenager’ AND ‘Juvenile’ AND ‘Gait’ OR ‘Walking (walk)’ OR ‘Jogging (jog)’ OR ‘Running (run)’ OR ‘Shoe’ OR ‘Footwear’;3)‘Child (Children)’ AND ‘Adolescent’ AND ‘Teenager’ AND ‘Juvenile’ AND ‘Biomechanic’ OR ‘Kinematic’ OR ‘Kinetic’ OR ‘Plantar pressure’ OR ‘Electromyography’ OR ‘Lower Extremity (limb)’ OR ‘Hip’ OR ‘Knee’ OR ‘Ankle’ OR ‘Foot’。选取的中文关键词包括:1)“儿童”并含“青少年(少年)”或含“足形(型)”或含“功能”;2)“儿童”并含“青少年(少年)”或含“步态”或含“步行(走)”或含“慢跑”或含“跑步”或含“鞋”;3)“儿童”并含“青少年(少年)”或含“生物力学”或含“运动学”或含“动力学”或含“足底压力”或含“肌电”或含“下肢(腿)”或含“髌”或含“膝”或含“踝”或含“足”。

1.2 纳入/排除标准

检索文献资料的纳入标准:1)世界卫生组织将儿童期确定为年龄 1~9 周岁,将青少年期确定为年龄 10~19 周岁,因此纳入文献受试者的年龄范围均应在 1~19 周岁;2)探索、实验类研究;3)包含统计学分析。检索文献资料的剔除标准:1)会议论文、综述论文、通讯评论、预印未发表论文、研究方法类论文等;2)受试者年龄大于 19 周岁或不满 1 周岁;3)研究结果仅有定性结果,不包含定量研究结果;4)个案/个例研究。

1.3 关键信息提取及文献质量评估

检索所得研究文献均下载并导入文献管理软件 Endnote X9 进行重复文献剔除及最终文献筛选。其中,提取关键信息包括:第一作者、发表年份、研究对象(受试者)所在国家、样本特征、研究设计、选取指标、主要研究结果等。

本研究采用《Downs 和 Black 量表》进行文献质量评估(Downs et al., 1998),共计 14 个问题,总得分为 15 分,除

第10题得分为0分、1分或2分以外,剩余13个问题的得分为0分或1分,其中0分表示未报告/不符合,1分或2分表示报告/符合,第10题中的1分介于两者之间(Rabusin et al., 2019)。定义各项研究总得分在13~15分为非常好,9~12分为好,6~8分为一般,小于6分为差。关键信息提取及文献质量评估均由2位研究人员独立进行,不一致意见由第3位研究人员进行处理并达成一致。此外,采用非加权科恩卡帕系数(Cohen's Kappa coefficient)报告

评分者信度(Steinijans et al., 1997)。

2 结果

2.1 纳入文献基本情况

本研究共检索到研究文献1 620篇,经去重得到研究文献576篇,经2名研究人员阅读题目、摘要及部分全文并与第3位研究人员讨论达成共识筛选得到研究文献82篇,经纳入/排除标准筛选后最终获得全文文献40篇,且均为英文研究文献(图1)。

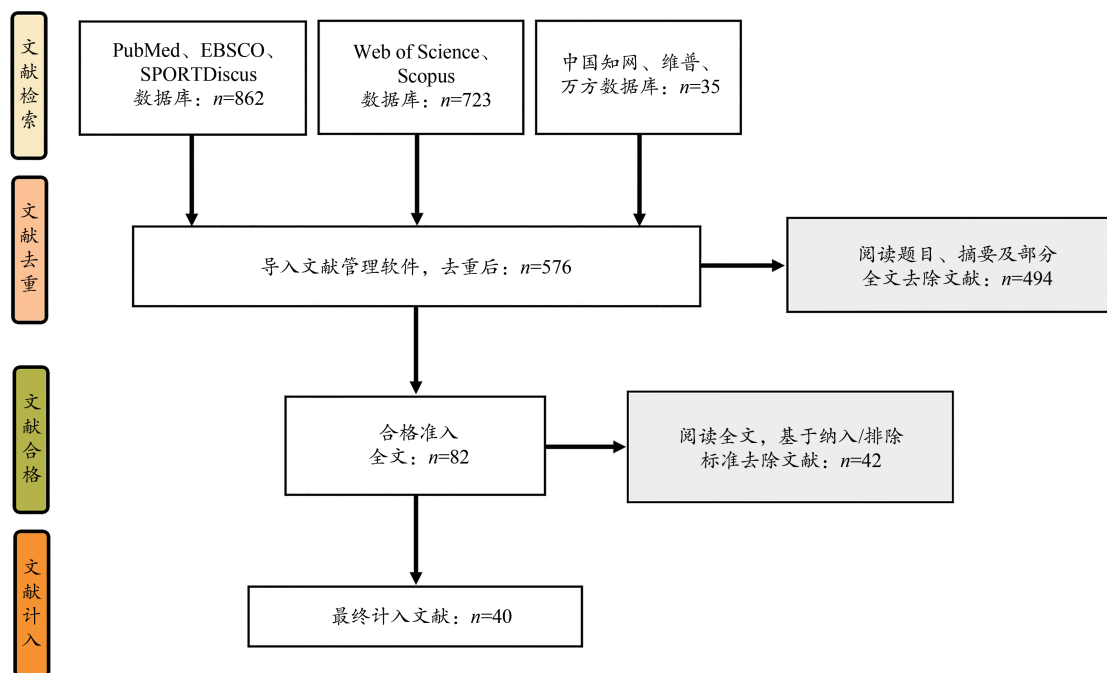


图1 文献检索和筛选流程图

Figure 1. Flow Diagram of Relevant Literatures Search Strategy and Screening

2.2 相关文献质量评估

文献质量评估结果(表1)显示,2位研究人员的一致性水平 $\geq 92.9\%$,非加权科恩卡帕系数 ≥ 0.65 ,组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)为0.97。纳入研究文献的得分从7分到14分不等,总体质量较高,90%以上研究文献的评价等级为好和非常好。相关研究文献的主要失分项为“受试者选取是否有代表性”和“研究样本量是否足够”。

3 相关研究文献关键信息综述

3.1 儿童青少年足形发育及功能特征研究

儿童青少年足形发育及功能特征相关研究文献共计11项(表2)。相关研究选取的受试者年龄为1~18岁,共计25 314名,其中习惯着鞋(habitually shod, HS)的受试者占95.3%,习惯裸足(habitually barefoot, HB)的受试者占4.7%。8项研究以HS儿童青少年为研究对象,其中纵向追踪研究6项(Barisch-Fritz et al., 2014; Bosch et al., 2010;

Müller et al., 2012; Tong et al., 2016; Unger et al., 2004; Waseda et al., 2014),横断面研究2项(Klein et al., 2009; Mauch et al., 2008)。3项对比HS和HB儿童青少年足形及功能特征的研究文献均采用横断面研究设计(Aibast et al., 2017; Echarri et al., 2003; Hollander et al., 2017)。

相关研究(涉及的足部形态学指标主要有以下6类:1)足长;2)足宽,包括前掌宽度和中足宽度;3)足围,包括跖骨围和兜跟围;4)足弓,包括足弓高度、舟骨高度、足弓高度指数(arch height index, AHI)(足背高度/足长)、足弓指数(arch index, AI)(中足接触面积/全足接触面积)、足印角度和Chippaux-Smirak指数;5)足趾角度,包括跖趾角度和足趾角度比值;6)足形指数,足宽/足长。在3项HS及HB儿童青少年的对比研究中,1项研究涉及部分功能指标,包括足部肌力、跟骨刚度、跟腱力臂长度、下肢损伤率、身体活动水平。8项关注HS儿童青少年的研究中有4项纳入功能相关指标,主要为自选速度步行时的足底压力参数,包括足底各分区的峰值压力(peak force, PF)、峰

值压强 (peak pressure, PP)、压力时间积分 (force-time integral, FTI) 等 (Aibast et al., 2017; Bosch et al., 2010; Müller et al., 2012; Unger et al., 2004)。

表 1 相关研究文献质量评估结果
Table 1 Quality Assessment Results of Relevant Research Literatures

| 研究类型 | 研究文献 | 报告 | | | | | | | | | | 外部真实性 | | | 内部真实性 | | 选择性偏倚 | 把握度 | 总得分 (实际得分 占比%) |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|------|-----------------|----------|-------|-----|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 ^m | 4 | 6 | 7 | 10 ^m | 11 ^m | 13 ^m | 14 | 18 | 20 | 23 | 27 ^m | | | | |
| 儿童青少年足形发育及功能特征 (11 项) | Aibast 等(2017) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Barisch-Fritz 等(2014) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Bosch 等(2010) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 (80) | | | |
| | Echarri 等(2003) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 (87) | | | |
| | Hollander 等(2017) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 12 (80) | | | |
| | Klein 等(2009) | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Mauch 等(2008) | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Müller 等(2012) | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 10 (67) | | | |
| | Tong 等(2016) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Unger 等(2004) | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 (53) | | | |
| | Waseda 等(2014) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 12 (80) | | | |
| 儿童青少年裸足运动生物力学 (16 项) | Dixon 等(2013) | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 10 (67) | | | |
| | Dusing 等(2007) | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 9 (60) | | | |
| | Guffey 等(2016) | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Van Hamme 等(2015) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 12 (80) | | | |
| | Hillman 等(2009) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Hollander 等(2018a) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 (93) | | | |
| | Holm 等(2009) | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 8 (53) | | | |
| | Lai 等(2014) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 (87) | | | |
| | Lye 等(2016) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Phethean 等(2012) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Rosenbaum 等(2013) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 (87) | | | |
| | Rozumalski 等(2015) | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 12 (80) | | | |
| | Schwartz 等(2008) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 (87) | | | |
| | Stansfield 等(2006) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 10 (67) | | | |
| | Thevenon 等(2015) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 (87) | | | |
| | Zeininger 等(2018) | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 12 (80) | | | |
| 裸足/着鞋运动生物力学特征对比 (9 项) | Hernandez 等(2010) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Hollander 等(2014) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 10 (67) | | | |
| | Hollander 等(2018b) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 (80) | | | |
| | Kung 等(2015) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 10 (67) | | | |
| | Latorre-Román 等(2018) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 14 (93) | | | |
| | Lieberman 等(2010) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 14 (93) | | | |
| | Lythgo 等(2009) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 13 (87) | | | |
| | Wegener 等(2015) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Wolf 等(2008) | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 7 (47) | | | |
| 着鞋运动生物力学特征 (4 项) | Buckland 等(2014) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 (87) | | | |
| | Forrest 等(2012) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 (80) | | | |
| | Herbaut 等(2017) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 11 (73) | | | |
| | Hillstrom 等(2013) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 10 (67) | | | |
| 非加权科恩卡帕系数 | | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 1.00 | 1.00 | 0.67 | 0.67 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.67 | 0.65 | ICC=0.97 | | | |
| 评估一致性/% | | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 92.9 | 92.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 92.9 | 100.0 | — | | | |

注:m表示该指标为在《Downs 和 Black 量表》基础上修改后的指标(Rabusin et al., 2019)。

表2 儿童青少年足形发育及功能特征关键信息

Table 2 Key Information Related to Foot Development and Functional Characteristics in Children and Adolescents

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 裸足/ 着鞋习惯 | 研究设计 | 足部形态/ 功能参数 | 研究结果 |
|--------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------|---|---|--|
| Aibast等 (2017) | 肯尼亚 | 99(47) | 15.1±1.4 | 组①: HB、HS 组②: HB、HS | 组①: 对比HB、HS足弓特征,足部肌力及下肢损伤率 组②: 对比HB/HS跟骨刚度,跟腱力臂长度及身体活动水平 | 形态:舟骨高度 功能:足部肌力、跟骨刚度、跟腱力臂长度、下肢损伤率、身体活动水平 | 与HS相比,HB足部肌力↑,舟骨高度↑,跟骨刚度↑,跟腱力臂长度↓;HB下肢损伤率为8%,HS下肢损伤率为61%;HB身体活动水平为(60±26)min/天,HS设备图活动水平为(31±13)min/天 |
| Barisch-Fritz等 (2014) | 德国 | 2 554 (1 269) | 10.6±2.5 | 均为HS | 纵向追踪儿童足发育过程中静态及动态步行的足部形变特征 | 形态:足背高度、足长、足宽、足围度、足趾角度比值(踇趾角度/第5趾角度) | 随年龄↑,足部形态学特征改变:足宽↑,足围度↑,足趾角度比值↑ |
| Bosch等 (2010) | 德国 | 36(16) | 1.2±0.1~ 10.2±0.2 | 均为HS | 纵向追踪研究儿童足形发育及足底载荷分布特征 | 形态:足长、AI 功能:步行足底压力分布特征 | 9年成长发育期,全足PP上涨了190%,全足PF上涨了20%,中足PP下降了63%;足长上涨了90%,AI下降了49% |
| Echarri等 (2003) | 刚果 | 1 851 (945) | 3~12 | HB、HS | 测量HB与HS儿童足印的形态学特征,探索足印形态与穿鞋习惯的相关性 | 形态:足印角度、Chippaux-Smirak指数、AI | 3~4岁,足弓较低,呈平足形态,随年龄↑,AI↑,足弓抬高;HS组平足率↑,男孩平足率↑ |
| Hollander等 (2017) | 南非、 德国 | 810 (HB:193 HS:212) | 11.99± 3.33 | HB、HS | 测量不同年龄段来自南非的HB组和来自德国的HS组儿童青少年足形参数特征 | 形态:足长、足宽、AHI、踇趾角度、动态AI | 与HS相比,HB AHI↑,踇趾角度↓;HB在6~10和14~18年龄段足长↑,在6~10年龄段,足宽↑,在10~14年龄段,动态AI↓ |
| Klein等 (2009) | 奥地利 | 858(439) | 3~7 | 均为HS | 测量儿童踇趾角度,足长度和儿童室内/室外鞋腔纵向长度 | 形态:足长、踇趾角度 | 足踇趾角度<4°(23.9%),14.2%踇趾角度>10°;室内用鞋纵向长度不足(88.8%),室外用鞋纵向长度不足(69.4%);鞋腔纵向长度与踇趾角度显著相关,鞋腔纵向长度↓,踇趾角度↑ |
| Mauch等 (2008) | 德国 澳大 利亚 | 1 010 (德国:224 澳大利亚: 224) | 3~12 | 均为HS | 分别测量德国与澳大利亚学龄前及小学年龄儿童足形特征,探讨对儿童鞋设计的影响 | 形态:足长、前掌宽度、前掌围度、足背高度、足印角度、Chippaux-Smirak指数 | 同年龄德国儿童,足长↑,足背高度↓;同年龄澳大利亚儿童前掌宽度↑ |
| Müller等 (2012) | 德国 | 7 788 (3 738) | 1~13 | 均为HS | 纵向追踪测量1~13岁儿童每一年的足形特征及步行足底压力载荷分布特征 | 形态:足长、足宽、AI、足底接触面积 功能:全足/前足/中足FTI及PP | 随着年龄↑,1岁足长(13.1±0.8)cm与足宽(5.7±0.4)cm上涨至13岁足长(24.4±1.5)cm、足宽(8.9±0.6)cm,AI由1岁(0.32±0.04)下降至5岁(0.21±0.13),此后趋于稳定 |
| Tong等 (2016) | 新加坡 | 111(52) | 7~9 | 均为HS | 纵向追踪测试7~9岁儿童内侧纵弓发育的年龄特征,以及鞋具对足内侧纵弓发育的影响 | 形态:AI 功能:中足PP及PF | 儿童AI在7~9岁年龄段保持稳定,男孩随着年龄↑,AI↓(足弓抬高);在平均6.9岁年龄时,男孩相比女孩AI↑(足弓低);习惯穿着封闭鞋面鞋具儿童AI↑;习惯穿着拖鞋的儿童中足PP↑ |
| Unger等 (2004) | 德国 | 42(20) | 1~2 | 均为HS | 纵向追踪测量1~2岁婴儿足形性别差异特征并以3个月为测量周期 | 形态:中足宽度、足形指数(足宽/足长)、AI、全足接触面积 功能:全足PF、FTI、触地时间 | 与女孩相比,男孩中足宽度↑,足形指数↑,AI↑,表示足弓高度↓ |

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 裸足/ 着鞋习惯 | 研究设计 | 足部形态/ 功能参数 | 研究结果 |
|-------------------|----|-------------------|------|-------------|--|----------------------|---|
| Waseda 等(2014) | 日本 | 10 155 (5 311) | 6~18 | 均为 HS | 纵向追踪测量 6~18 岁儿童青少年每一年足形特征, 探究足长、足弓生长发育规律 | 形态: 足长、足弓高度、舟骨高度、AHI | 男孩足长发育持续到 14 岁, 女孩持续到 13 岁; 6~18 岁, AHI 呈正态分布, 且无性别差异; 男孩足弓从 11 岁抬高到 13 岁, 女孩足弓从 10 岁抬高到 12 岁; 男孩足部发育持续到 16 岁, 女孩持续到 14 岁 |

注: 足印角度是以足弓内侧最凹点做切线, 连接足内侧第一跖骨与足跟处做直线, 切线与直线的夹角定义为足印角度; Chippaux-Smirak 指数是指足内侧纵弓最窄处长度与前掌最宽处长度的比值; 总样本量中括号里的数据为男性样本量, 下同。

以 HS 儿童青少年为受试者的 8 项文献中, 6 项纵向追踪按照所测量的不同足形发育指标及儿童青少年年龄分布, 发现儿童青少年足形发育具有以下特征: 1) 1~2 岁阶段, 男孩相比女孩, 中足更宽, 足弓更低, 足形指数偏大; 2) 1~13 岁阶段, 足长平均增长约 90%, 足宽平均增长约 56%, AI 在 1~10 岁期间下降较快, 降幅约为 50%, 提示, 1~10 岁儿童足弓逐步发育抬高; 其中, 7~9 岁年龄阶段, 男孩相比于女孩 AI 更高, 表明其足弓相更低; 3) 6~18 岁阶段, 足长、足宽及足围等指标增大, 男孩足长发育平均持续到 14 岁左右, 女孩平均持续到 13 岁左右; 男孩足弓从 11~13 岁明显抬高, 女孩足弓从 10~12 岁明显抬高; 男孩足部整体发育持续到 16 岁, 女孩足部整体发育持续到 14 岁。同时研究发现, 随着鞋具使用和年龄增长, 足趾角度比值增大 (Barisch-Fritz et al., 2014)。1 项横断面研究表明, 3~7 岁儿童的室内用鞋和室外用鞋的纵向长度均不足, 使儿童踮趾角度增大, 增加踮外翻风险, 影响足部形态及功能发育 (Klein et al., 2009)。另一项横断面研究显示, 不同地域 (德国、澳大利亚) 的儿童足形特征存在差异, 主要体现在足长、前掌宽度及足背高度等方面 (Mauch et al., 2008)。从足部功能角度, 1~10 岁儿童经过 9 年生长发育, 全足 PP 平均增加 190%, 中足 PP 平均下降 63%, 全足 PF 平均增加 20% (Bosch et al., 2010)。

3 项 HS 和 HB 儿童青少年足形发育及功能特征的对比研究中, HB 研究对象均来自非洲, 分别为肯尼亚 (Aibast et al., 2017)、刚果 (Echarri et al., 2003) 和南非 (Hollander et al., 2017)。与 HS 儿童青少年相比, HB 儿童青少年在不同年龄阶段具有以下特点: 1) 3~12 岁, HB 组足弓较高, 扁平足发生率较低; 2) 6~18 岁, AHI 较大, 踮趾角度较小; 其中 6~10 岁, HB 组足长、足宽均显著大于 HS 组; 10~14 岁, HB 组步态支撑期的动态 AI 较 HS 组小; 14~18 岁, HB 组的足长大于 HS 组; 3) 12~18 岁, 足部形态学特征 HB 组足舟骨显著高于 HS 组; 从足功能角度, HB 组

呈现出足部肌力上升, 跟骨刚度增加, 下肢损伤率较低以及身体活动水平高的特点。

3.2 儿童青少年裸足运动生物力学功能

儿童青少年裸足运动生物力学功能相关研究文献共计 16 项 (表 3), 主要探讨儿童裸足状态下的运动生物力学特征, 选取动作涉及步行、跑步及转弯步态。裸足步行研究 13 项, 其中自选步速 11 项 (Dusing et al., 2007; Guffey et al., 2016; Hillman et al., 2009; Holm et al., 2009; Lai et al., 2014; Phethean et al., 2012; Schwartz et al., 2008; Stansfield et al., 2006; Thevenon et al., 2015; Van Hamme et al., 2015; Zeininger et al., 2018), 控制步速 2 项 (Lye et al., 2016; Rosenbaum et al., 2013); 裸足跑步 2 项 (Hollander et al., 2018a; Rozumalski et al., 2015), 转弯步态 1 项 (Dixon et al., 2013)。相关研究受试者共计 1 889 名, 且绝大部分来自欧美国家, 1 项来自中国 (Lai et al., 2014), 研究对象均为 HS 儿童青少年, 年龄为 1~18 岁。13 项裸足步行相关研究中, 2 项采用纵向追踪研究设计 (Hillman et al., 2009; Stansfield et al., 2006)。

11 项研究涉及儿童青少年裸足步态的时空参数, 相关指标包括步速 (跑速)、步长、跨步长、步宽、步频、支撑期时间 (stance time, ST)、双支撑期时间 (double stance time, DST)、步数等 (Dixon et al., 2013; Dusing et al., 2007; Guffey et al., 2016; Hillman et al., 2009; Hollander et al., 2018a; Holm et al., 2009; Rozumalski et al., 2015; Schwartz et al., 2008; Stansfield et al., 2006; Thevenon et al., 2015; Van Hamme et al., 2015)。儿童青少年裸足步态时空参数具有以下特征: 1) 1~10 岁, 随年龄上升, 绝对步长与跨步长增大, 步频降低; 2) 6~12 岁, 随年龄增长, 绝对步长增大 (约 15%), 1 项研究发现, 7~11 岁标准化步长 (绝对步长/身高) 随年龄增加呈上升趋势, 然而另一项研究发现, 7~12 岁标准化步长无显著改变; 随年龄增加, 步行比 (步长/步速) 增大, 表明步行比可以作为衡量儿童步态成熟特征的参数。

表3 儿童青少年裸足运动生物力学特征相关研究关键信息

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 研究设计 | 运动生物力学参数 | 研究结果 |
|-------------------|------|----------|-------|---|--|---|
| Dixon等(2013) | 英国 | 17(5) | 10~16 | 测试儿童直角转弯不同步态策略(跨步式/旋转式)的时空参数及下肢运动学参数特征 | 时空参数:步速、步长、步宽、ST 运动学参数:下肢髌/膝/踝/足部小关节三维运动学 | 与直线步态相比,转弯步态步速↓,步长↓,CT↑,步宽↑;转弯步态下肢运动学参数差异主要体现在冠状面及水平面 |
| Dusing等(2007) | 美国 | 438(242) | 1~10 | 构建1~10岁儿童每个年龄段自选步速步态的时空参数样本数据库 | 时空参数:步速、步长、步频、跨步长、DST | 随着年龄↑,步频↓,步长↑,跨步长↑;7岁以下儿童自选步速范围为[(82.05±25.28)~(133.63±15.44)]cm/s |
| Guffey等(2016) | 美国 | 84(一) | 2~5 | 采集幼儿自选步速步行时空参数,结合儿科平衡量表评价步态平衡得分,构建基于主成分分析的多元回归模型,探索步态时空参数对幼儿平衡控制的影响 | 形态参数:腿长 时空参数:步长、跨步长、ST、DST、步频 步态平衡参数:儿科步态平衡量表 | 幼儿年龄、腿长、步频、ST、DST与平衡量表得分呈显著线性相关;其中,年龄是影响步态平衡的首要因素,其次是步长、步频及腿长 |
| Van Hamme等(2015) | 法国 | 106(一) | 1~7 | 采集1~7岁儿童自选步速步态的生物力学参数,构建年龄和步速预测步态生物力学参数的回归方程 | 时空参数:步速 运动学参数:下肢髌/膝/踝关节步态周期内峰谷值及活动度 动力学参数:三维GRF,髌/膝/踝关节功率 | 构建了步态参数与年龄、步速和年龄-步速交互作用的回归预测方程,可使用该回归方程预测1~7岁儿童正常步态生物力学参数 |
| Hillman等(2009) | 英国 | 33(13) | 7~11 | 纵向追踪儿童连续5年生长发育期步态时空参数发育特征,验证步行比参数衡量步态成熟的可靠性 | 时空参数:经身高标准化后的步速、步长、步频及步行比(walk ratio) | 标准化步长及步行比随年龄增长↑;步行比可以作为衡量儿童步态成熟特征的稳定参数 |
| Hollander等(2018a) | 德国 | 101(55) | 10~14 | 构建健康儿童动态AI与跑步下肢运动生物力学参数的相关关系 | 形态参数:动态AI 时空参数:跑速、步长、跨步长、步频、ST 运动学参数:髌/膝/踝关节触地角度、RFS占比、步向角 动力学参数:峰值GRF、VALR、膝关节峰值伸膝及外展力矩、峰值伸髌及跖屈力矩 | 动态AI与RFS占比无显著相关性;步向角与动态AI存在显著相关性,同时伴随低足弓与足外旋 |
| Holm等(2009) | 挪威 | 360(181) | 7~12 | 构建健康儿童自选步速时空参数数据库,评估年龄及性别对步行时空参数的影响 | 时空参数:绝对步长、标准化步长(绝对步长/身高)、步频 | 从7~12岁,绝对步长↑15%,标准化步长无变化 |
| Lai等(2014) | 中国 | 77(45) | 5~16 | 采集步行足底压力分布特征,探索足步向角与足底压力分布以及年龄、性别的相关性 | 运动学参数:步向角 足底压力参数:前足内外侧、中足内外侧以及足跟压力、压强及冲量分布特征 | 步向角平均外展角度为5.3°;外展的步向角与前足区域较高冲量呈正相关,与中足冲量呈负相关;步向角与性别及年龄不相关性 |
| Lye等(2016) | 澳大利亚 | 32(一) | 6~13 | 采用三维步态分析,探索儿童不同发育时期不同速度走/跑蹬离期及摆动早期推进策略,预测步态成熟及下肢能量回归特征 | 动力学参数:蹬离期踝关节功率峰值(peak A2),摆动早期髌关节功率峰值(peak H3) 定义参数:蹬离策略值(propulsion strategy, PS)为peak A2/(peak A2+peak H3),表示踝关节蹬离期做功占比 | 与自选速度步行相比,快走与快跑PS均值↓,慢跑PS值无显著变化;仅在快走时,PS值随年龄改变;年长儿童快走时peak A2↑,peak H3↓ |
| Phethean等(2012) | 英国 | 98(43) | 4~7 | 采用横断面研究设计,探究儿童体质量、BMI及性别对正常步行足底压力特征的影响 | 身体测量学参数:体质量、BMI 足底压力参数:足跟、中足内外侧、第1到5跖骨区域、大脚趾9个区域的PP及PTI | 体质量、BMI与足底压力参数呈中等程度相关性;足底压力参数无性别差异;4~7岁儿童足底压力参数无需对体质量及BMI进行标准化处理 |
| Rosenbaum等(2013) | 德国 | 20(一) | 6~10 | 研究慢速、常速及快速3种不同速度下的足底压力分布特征 | 足底压力参数:全足及10个细分区域的CT、PP、PF、FTI | 随步速↑,CT↓,足跟、前足内侧、中部PP及FTI↑,中足及前足外侧PP↓,PF↓,FTI↓ |

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 研究设计 | 运动生物力学参数 | 研究结果 |
|---------------------|----|-----------|------------|---|--|---|
| Rozumalski 等 (2015) | 美国 | 24 (16) | 11.7 士 3.6 | 对比儿童在跑台和普通地面慢跑的运动学 GRF 及 sEMG 特征进行定性及定量描述 | 时空参数: 步长、步频、跑速 运动学参数: 下肢髌/膝/踝关节矢状面运动特征 动力学特征: 髌/膝/踝矢状面力矩及功率 表面肌电: 股直肌/股二头肌内侧头/股外侧肌/胫骨前肌/腓肠肌信号特征 | 踝关节运动学轨迹变化在整个支撑期相似, 跑台跑步踝关节摆动期背屈程度↓; 动力学参数差异较大, 跑台水平制动 GRF ↑; 跑台伸髌力矩峰值↑, 伸膝力矩峰值↓, 跖屈力矩峰值↑, 髌关节功率↑, 踝关节功率↓; 跑台肌电信号振幅值↑ |
| Schwartz 等 (2008) | 美国 | 83 (48) | 4~17 | 构建儿童最慢到最快 5 种不同步速的时空参数, 下肢三维运动学、动力学及 sEMG 参数数据库 | 时空参数: 步长、步频、步速、ST 运动学参数: 下肢髌/膝/踝三维运动特征 动力学参数: 三维 GRF, 髌/膝/踝关节三维力矩及功率 表面肌电: 股直肌/股二头肌内外侧头/胫骨前肌/腓肠肌内侧头信号特征 | 随步速变化, 下肢运动学、动力学及肌电信号特征均出现调整及适应性改变; 提供儿童步态生物力学参数正常值参考范围 |
| Stansfield 等 (2006) | 英国 | 16 (一) | 7~12 | 对儿童进行连续 5 年的追踪研究, 对步速与步态运动学和动力学参数之间的关系进行线性回归分析, 通过步速预测儿童步态参数特征 | 时空参数: 步长、步频、步速 运动学参数: 骨盆/髌/膝/踝关节矢状面运动特征 动力学参数: 髌/膝/踝关节矢状面力矩及功率 | 构建了正常儿童步速范围与步态生物力学参数之间的线性回归模型, 通过步速预测正常步态参数具有一定的准确度 |
| Thevenon 等 (2015) | 法国 | 382 (228) | 6~12 | 健康儿童的标准步态参数集在不同国家(地区)/人种之间的差异性探究 | 时空参数: 步速、步数、步频、步长/跨步长、步宽、ST、DST | 6~12 岁法国儿童的步态时空参数特征与其他国家(地区)出现差异; 随年龄增大, 步速/步长↑; 时空参数在 110~130 cm 的儿童身高范围内等比例↑, 超过 130 cm 后趋于稳定; 超重儿童的 ST 和 DST ↑ |
| Zeininger 等 (2018) | 美国 | 18 (一) | 2~4 | 研究幼儿学步阶段着地模式及跟骨负荷, 测量幼儿足部触地角度, 确定儿童足触地时 COP 相对于跟骨的位置以及 GRF 的方向和大小 | 运动学参数: 着地期踝关节及足部矢状面运动学特征, COP 轨迹 动力学参数: 三维 GRF | 儿童早期学步时, 着地模式为 FFC, GRF 垂直及合力相对值↑, COP 相对跟骨位置靠前; 随步行经验增加, 转变为 RFS 着地模式, GRF 相对值↓, COP 位于跟骨正下方 |

注: 步行比=步长²/步速; sEMG. 表面肌电信号。

8 项研究涉及儿童青少年裸足运动学分析 (Dixon et al., 2013; Hollander et al., 2018a; Lai et al., 2014; Rozumalski et al., 2015; Schwartz et al., 2008; Stansfield et al., 2006; Van Hamme et al., 2015; Zeininger et al., 2018), 相关指标包括: 下肢髌/膝/踝关节步态周期及支撑期、三维平面运动轨迹、峰值角度、谷值角度、活动度, 髌/膝/踝关节及足矢状面触地角度、足步向角、足底压力中心线 (center of pressure, COP) 轨迹等。儿童青少年裸足运动学参数在不同发育阶段表现出以下特征: 1) 2~4 岁 (学步阶段), 触地模式多为全足触地模式, 随步行经验增加和年龄增长逐渐转变为足跟触地模式, COP 逐渐后移, 向跟骨正下方移动; 2) 5~16 岁, 正常步行时足外展步向角平均值为 5.3°, 步向角外展, 提示, 步行时足外旋, 且与前

足冲量增加呈正相关; 3) 4~17 岁, 下肢髌/膝/踝关节运动学参数随步速改变出现适应性调整, 相关研究建立了不同步速的下肢运动学参数数据库, 提供了正常运动学参数参考范围。

动力学和足底压力参数能够一定程度上反映儿童青少年步态的力学特征, 探索下肢/足底在不同发育时期, 不同步速和支撑期不同阶段的力学表现和机理 (Hollander et al., 2018a; Lye et al., 2016; Rozumalski et al., 2015; Schwartz et al., 2008; Stansfield et al., 2006; Van Hamme et al., 2015; Zeininger et al., 2018)。动力学参数包括: 支撑期三维地面反作用力 (ground reaction force, GRF)、垂直负荷增长率 (vertical loading rate, VLR)、下肢髌/膝/踝三维力矩、功率及能量学做功特征。足底压力参数包括:

足底各分区的接触面积、PF、PP、压力-时间积分等。儿童青少年裸足步态的动力学参数表现出以下特征:1)2~4岁,学步阶段早期的标准化GRF垂直分力及合力较学步后期大,随着步态成熟及触地模式转变为RFS,标准化GRF合力下降;2)6~13岁,逆向动力学计算蹬离期踝关节功率峰值(peak A2),摆动早期髌关节功率峰值(peak H3),定义蹬离策略值(propulsion strategy, PS)=peak A2/(peak A2+peak H3),与自选速度步行和跑步相比,PS值仅在快走时发生改变,并呈现随年龄增长而增大的趋势,提示,相比跑步,快走动作可能需要神经控制系统具有更高的成熟度;3)6~18岁,跑台相比地面跑步,水平制动GRF增大,伸髌力矩增大,伸膝力矩降低,提示,儿童青少年跑台跑步时,髌关节做功增加,膝关节做功降低。足底压力参数在儿童4~7岁阶段与体质量及身体质量指数呈中等程度正相关,足底压力无性别差异,且无需对体质量进行标准化处理(Phethean et al., 2012)。下肢股直肌和股二头肌等表面肌电信号随步速改变也出现适应性调整,且跑台跑步时肌电振幅值大于地面跑步,提示,儿童青少年跑台裸足运动时下肢部分肌群募集兴奋程度较高,能耗增加(Rozumalski et al., 2015)。

3.3 儿童青少年裸足与着鞋对比运动生物力学

9项研究对比了儿童青少年在裸足与着鞋状态下的运动生物力学特征(表4)。相关研究受试者共计3 172名,年龄跨度为3~18岁,其中2项研究纳入HB受试者,分别来自南非与肯尼亚(Hollander et al., 2018b; Lieberman et al., 2010)。5项研究关注跑步状态下裸足/着鞋运动生物力学特征(Hollander et al., 2014, 2018b; Latorre-Román et al., 2018; Lieberman et al., 2010; Wegener et al., 2015);4项研究聚焦正常步行(Lythgo et al., 2009; Kung et al., 2015; Moreno-Hernández et al., 2010; Wolf et al., 2008)。4项研究报告鞋具特征,包含极简跑鞋/常规缓震跑鞋、不同品牌的运动鞋和日常穿着鞋具/特制易弯折轻便鞋具(Hollander et al., 2014; Kung et al., 2015; Wegener et al., 2011; Wolf et al., 2008)。9项研究均采用横断面设计,选取的运动生物力学指标参数包括:1)形态学参数,包括支撑期足内侧纵弓长度相对值变化;2)时空参数,包括步长、步宽、步频、步速(跑速)、步数;3)运动学参数,包括髌/膝/踝/距下关节三维角度及活动度,足触地角度/模式,第一跖趾关节矢状面活动度;4)动力学参数,包括GRF第1、2峰值,髌/膝/踝关节支撑期内三维角冲量,力矩,功率及能量学特征。

表4 儿童青少年裸足/着鞋对比运动生物力学研究关键信息

Table 4 Key Information Related to Biomechanical Research under Barefoot/Shod Condition in Children and Adolescents

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 鞋具特征 | HB/HS | 研究设计 | 运动生物力学参数 | 研究结果 |
|-------------------|-------|---------------------------|----------|------------------------------|----------------|---|--|--|
| Hernandez等(2010) | 墨西哥 | 120 (61) | 6~13 | — | HS | 研究儿童年龄、性时空参数:步数、步速、步着鞋走:步行步速↑,跨步长/步别、着鞋习惯对步行频、步长、跨步长、ST及摆长↑,ST↑,步频↓,摆动期占时空参数的影响 | 步速、步着鞋走:步行步速↑,跨步长/步别、着鞋习惯对步行频、步长、跨步长、ST及摆长↑,ST↑,步频↓,摆动期占时空参数的影响 | 比↓ |
| Hollander等(2014) | 德国 | 36 (14) | 6~9 | 极简跑鞋/普通缓震跑鞋 | HS | 探究青春期前儿童时空参数:步长、步宽、步频、着鞋习惯对步行频、步长、跨步长、ST及摆长↑,ST↑,步频↓,摆动期占时空参数的影响 | 裸足跑:相比普通跑鞋,踝关节着地角度下降了5.97°(8 km/h),下降了6.18°(10 km/h);相比极简跑鞋,裸足跑踝关节着地角度下降了1.94°(8 km/h),下降了1.38°(10 km/h);着鞋跑:GRF第1、2峰值↑,步长↑,步频↑,RFS占比↑ | 裸足跑:相比普通跑鞋,踝关节着地角度下降了5.97°(8 km/h),下降了6.18°(10 km/h);相比极简跑鞋,裸足跑踝关节着地角度下降了1.94°(8 km/h),下降了1.38°(10 km/h);着鞋跑:GRF第1、2峰值↑,步长↑,步频↑,RFS占比↑ |
| Hollander等(2018b) | 南非、德国 | 南非:288 德国:390 (339) | 6~18 | — | 南非:HB 德国:HS | 探究着鞋习惯对儿运动学参数:高速摄像捕捉裸足/着鞋习惯显著影响儿童跑着地角度判断足触地模式,相比青春期的生物力学影地模式(RFS/NRFS) | 高速摄像捕捉裸足/着鞋习惯显著影响儿童跑着地角度判断足触地模式,相比青春期的生物力学影地模式(RFS/NRFS) | HS儿童,HB儿童裸足和着鞋跑步时使用RFS比例↑ |
| Kung等(2015) | 新西兰 | 13 (9) | 10.2±1.4 | New Balance (KJ553 TLY)儿童运动鞋 | HS | 探究裸足与着鞋对运动学参数:髌/膝/踝/距下关节支撑期内矢状面/冠状面/水平面角度峰值;力矩↑,角冲量↑,伸髌角冲量 | 着鞋走:屈髌↑,屈膝↑,踝背屈↑,距下关节内翻↑;踝背屈关节运动学及动力学冠状面/水平面角度峰值;力矩↑,角冲量↑,伸髌角冲量 | ↑,伸髌、伸膝释放能量↑;裸足走:伸髌↑,踝跖屈↑,距下面/水平面角冲量,力矩、关节外翻↑;伸髌角冲量↑,距下关节内翻力矩↑,踝跖屈释放能量↑ |

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 鞋具特征 | HB/HS | 研究设计 | 运动生物力学参数 | 研究结果 |
|------------------------|------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------|--|--|--|
| Latorre-Román 等 (2018) | 西班牙 | 1 356 (673) | 3~6 | — | HS | 探究学龄前儿童着运动学参数:足触地模式裸足跑:RFS 使用率相比着鞋鞋/裸足及性别对跑 (RFS/MFS/FFS) 使用率, 跑显著↓ (男: 44.2% vs 34.7%; 步时足着地模式以足触地时刻的内外翻及女: 48.5% vs 36.1%); 学龄前儿童及足触地时冠状面内外旋程度及水平面运动学特征的影响 | | 童, 性别对足触地方式及触地时足内外翻活动度无影响 |
| Lieberman 等 (2010) | 肯尼亚 | HB: 16(8) HS: 17(10) | HB: 13.5±1.4 HS: 15.0±0.8 | — | HB/HS | 分别采集 HB、HS 儿童在裸足/着鞋状态下跑步的运动生物力学特征 | 跑速 节及膝关节矢状面着地角度 | HB 组裸足跑速大于 HS 组裸足及着鞋跑速; 相比 HS 组, HB 组裸足跑, 足踝矢状面触地角度显著↓, 膝关节触地屈曲角度显著↑ |
| Lythgo 等 (2009) | 澳大利亚 | 898 (462) | 5~13 | 跑鞋或常规运动鞋 | HS | 探究学龄期儿童着时空参数: 步速、步频、步鞋/裸足步行的时空长、跨步长、步宽、ST、参数及步向角随年 DST 龄变化特征 | 步速、步频、步长 运动学参数: 步向角 | 着鞋走: 步速上涨了 8 cm/s, 跨步长上涨了 5.5 cm, 步长上涨了 11.1 cm, 步宽上涨了 0.5 cm, 步向角下降了 0.1°, 步频下降了 3.9 步/分, ST 上涨了 0.8%, DST 上涨了 1.6% |
| Wegener 等 (2015) | 澳大利亚 | 20 (一) | 8~12 | ASCIS Gel Kanbarra GS 型号儿童运动鞋 | HS | 对比儿童裸足/着鞋时空参数: 步速、ST、步长步行和跑步步态的运动学参数: 第一跖趾关节(仅矢状面), 中足及踝关节的三维关节角度及活动度 | 步速、ST、步长 第一跖趾关节(仅矢状面), 中足及踝关节的三维关节角度及活动度 | 着鞋走/跑, 步长↑, 步行第一跖趾关节活动范围下降了 25.3°, 跑步下降了 18.9°。步行支撑期中足矢状面活动度下降了 16.3°, 跑步时下降了 17.8° |
| Wolf 等 (2008) | 德国 | 18 (10) | 6~10 | 常规儿童鞋, 易弯折轻便儿童鞋 | HS | 探究儿童在裸足/穿鞋形态学参数: 支撑期足内穿着常规儿童鞋具: 步行时踝关节活动度 (26.6°) 相比裸足易弯折、轻便鞋具步运动学参数: 踝关节及第一跖趾关节活动度 | 支撑期足内穿着常规儿童鞋具: 步行时踝关节活动度 (26.6°) 相比裸足易弯折、轻便鞋具步运动学参数: 踝关节及第一跖趾关节活动度 | 步行时踝关节活动度 (26.6°) 相比裸足易弯折、轻便鞋具步运动学参数: 踝关节及第一跖趾关节屈曲↓; 足内侧纵弓长度 (5.9%) 相比裸足 (9.9%) ↓ |

注: RFS. 后跟着地模式; MFS. 全掌触地模式; FFS. 前掌触地模式; NRFS. 非后跟着地模式。

4 项步行动作的儿童青少年裸足/着鞋运动生物力学特征对比研究中, 研究对象均为 HS 儿童青少年。2 项研究对鞋具特征描述详细(Kung et al., 2015; Wolf et al., 2008), 1 项研究限定鞋具范围为跑鞋或常规运动鞋(Lythgo et al., 2009), 1 项研究未提及鞋具类型(Moreno-Hernández et al., 2010)。4 项研究均未控制步行速度, 采集受试者自选舒适速度步行的参数。1 篇纳入文献从足弓形态学角度发现, 着鞋步行蹬离时足内侧纵弓长度小于裸足(Wolf et al., 2008)。裸足/着鞋步行对比的运动生物力学参数角度具有下列特点: 1) 2 项研究涉及时空参数特征: 相较于着鞋, 裸足步行的步长、跨步长、步宽、步速降低, 步频升高, 支撑期及 DST 占比减小(Lythgo et al., 2009; Moreno-Hernández et al., 2010); 2) 3 项研究涉及运动学特征: 相较于着鞋, 裸足步行屈髋、屈膝、踝背屈及距下关节内翻峰值角度显著减小, 踝关节活动度降低, 步向角增大(Lythgo et al., 2009; Kung et al., 2015; Wolf et al., 2008); 3) 1 项研究涉及动力学特征: 着鞋步行踝关节峰值背屈力矩增大, 伸

髓、伸膝角冲量及支撑后期做正功增大; 裸足步行时踝关节峰值屈力矩增大, 踝关节支撑后期屈力矩做正功增大(Kung et al., 2015)(图 2)。以上研究结果表明, HS 儿童青少年在应激裸足步行状态下, 出现了运动生物力学参数的适应性调整, 步长、步宽、步速降低结合踝关节背屈程度及活动度下降可能是由于缺乏鞋具保护的一种代偿适应行为, 以避免冲击力增大和相关损伤风险(梅齐昌等, 2020)。动力学研究结果发现, 裸足步行时踝关节屈力矩做正功贡献提升, 伴随蹬离时第一跖趾关节屈曲增大及足内侧纵弓长度增大, 表明相比于着鞋, 裸足步行可增加足部小关节活动范围, 增大足部小肌肉群的募集程度, 且易弯折鞋具相比常规鞋具, 步行时更接近裸足状态(郝琦等, 2012)。

对比裸足/着鞋跑步运动生物力学特征的 5 项研究, 其中 3 项研究对象均为 HS 儿童青少年(Hollander et al., 2014; Latorre-Román et al., 2018; Wehener et al., 2015), 2 项研究同时包含 HB 和 HS 儿童青少年(Hollander et al.,

2018; Lieberman et al., 2010)。Hollander等(2018)的研究在控制跑速条件下进行。2项研究描述了鞋具特征(Hollander et al., 2014; Wegener et al., 2015)。对比HB/HS儿童青少年跑步运动生物力学特征的研究包含时空参数和运动学参数,HB组裸足跑速大于HS组在裸足和着鞋状态下的跑速,足踝触地角度及触地模式是HB组与HS组跑步时出现主要调整的运动学参数(Lieberman et al., 2010)。Hollander等(2018)对比来自南非的HB组和来自德国的HS组,发现HB组无论裸足还是着鞋跑步,使用后跟着地模式(rearfoot strike, RFS)的比例均高于HS组(Hollander et al., 2018)。另一项HB和HS组来自肯尼亚的研究结果显示,HB组裸足跑时足踝触地角度降低,倾向于非后跟触地模式(Lieberman et al., 2010)。

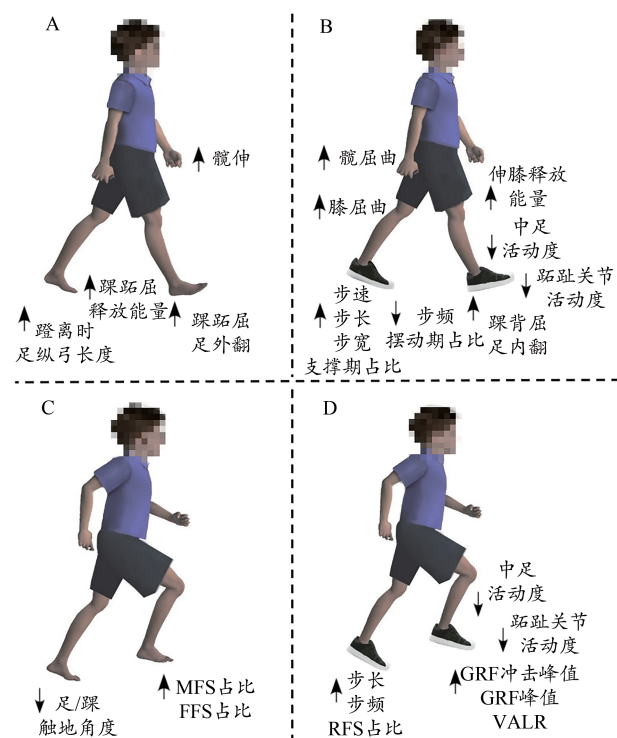


图2 儿童青少年裸足与着鞋步行/跑步运动生物力学参数特征对比示意图

Figure 2. Biomechanical Parameters Comparison of Barefoot/Shod Walking/Running in Children and Adolescents

注:A. 裸足步行;B. 着鞋步行;C. 裸足跑步;D. 着鞋跑步。

对比HS人群分别在裸足/着鞋状态下的运动生物力学特征(图2),受试者分别来自德国、西班牙与澳大利亚,年龄为3~12岁(Hollander et al., 2014; Latorre-Román et al., 2018; Wegener et al., 2015)。1项对1356名3~6岁学龄前HS儿童研究显示,裸足跑步时后跟触地频率相比着鞋跑步显著下降,性别对该年龄段触地方式无显著影响。研究发现,6~9岁青春期前HS儿童裸足跑步相比于穿着普通跑鞋,步长、步频均降低,踝关节触地角度降低,倾向于全足着地模式,穿着极简跑鞋同样可以显著降低

踝关节触地角度,同时发现GRF第1、2峰值降低(Latorre-Román et al., 2018)。HS儿童青少年在裸足跑步时着地模式的转变,步长、步频的减小结合GRF冲击峰值的下降是一种应激状态下的保护机制。相比于HB人群,HS人群在即刻转变为裸足运动时,下肢运动生物力学参数会产生代偿性调整,作为一种避免发生冲击损伤的保护策略(顾耀东等,2019)。对8~12岁HS儿童青少年足部小关节运动学参数研究发现,裸足运动可显著增大中足关节及第一跖趾关节在跑步支撑期的活动度,提示,着鞋运动一定程度限制了足部小关节的活动范围,抑制了部分足功能(Wegener et al., 2015)。

3.4 儿童青少年着鞋运动生物力学功能

4项研究关注于儿童青少年穿着不同鞋具的运动生物力学表现(表5),共涉及75名受试者,年龄范围为1~14周岁,其中3项研究来自美国(Buckland et al., 2014; Forrest et al., 2012; Hillstrom et al., 2013),1项来自法国(Herbaut et al., 2017)。相关研究选取的运动生物力学参数包括:1)时空参数:步长、步宽、步速(跑速)以及ST;2)运动学参数:足触地角度、膝/踝关节矢状面、冠状面触地时刻及峰值角度;3)动力学参数:GRF冲击峰值、GRF峰值、GRF平均值、VLR、膝/踝关节矢状面力矩、功率及关节做功情况;4)足底压力参数:足底各分区PP。2项关注鞋具扭转刚度影响的研究受试者均为1~2周岁学步期儿童,采集穿着不同扭转刚度鞋具步行的时空参数及足底压力参数特征。研究结果表明,穿着扭转刚度较小鞋具时步宽增加,ST降低,跌倒次数降低,提示,学步时期儿童鞋具扭转刚度降低可以提升步行稳定性。同时发现,穿着扭转刚度小鞋具时的足底PP较高,类似裸足状态的足底压力特征(Buckland et al., 2014; Hillstrom et al., 2013)。推测外部力学反馈增加可提升儿童足部本体感受输入,有利于学步期儿童步态习得(梅齐昌等,2015)。

运动鞋随着使用时间的延长会导致鞋具材料老化,缓震及回弹性能衰减等问题(李建设等,2009)。研究发现,9~12周岁儿童青少年穿着使用4个月后的运动鞋相比全新运动鞋跑步时会造成足触地冲击力及VLR增大,膝关节支撑期峰值屈曲及踝关节峰值背屈角度降低,膝/踝关节吸收能量做负功下降,增大冲击损伤风险,提示,穿着使用过较长时间的老化鞋具可降低膝/踝关节载荷,降低膝/踝周围肌群拉伸损伤风险(Herbaut et al., 2017)。Forrest等(2012)研究发现,11~13周岁青少年(女性)穿着相同尺码成人运动鞋跑步时的VLR低于穿着儿童跑鞋,提示,儿童鞋具后跟处的缓震性能可能较成人鞋具偏低。

4 讨论

4.1 儿童青少年足发育及足形特征

儿童青少年足生长发育过程是复杂的内部生物学因素和外部应力刺激共同作用的结果,其中外部因素包括鞋具和运动界面等。穿着鞋具对儿童足部具有保护作

用,但学界对长期使用鞋具是否会影响儿童足发育和足形特征以及这种影响的利弊尚存在争议(Morrison et al., 2018)。现有研究显示,鞋具对儿童青少年足形的影响大多体现在足内侧纵弓和足趾部位。Echarri等(2003)采集分析 1 851 名 3~12 周岁 HB 和 HS 刚果儿童的二维静态足印发现,着鞋习惯对足形参数影响较小。Rao等(1992)分

析 2 300 名 4~13 周岁儿童的静态足印特征分析发现,长期穿着鞋头完全闭合鞋具的儿童扁平足发生率较高,而习惯裸足儿童的扁平足发生率较低。上述研究结果的分歧可能是二维足形和静态采集方法的局限性导致,但也一定程度上反映出鞋具使用习惯对儿童足形长期影响方面存在的争议。

表 5 儿童青少年着鞋运动生物力学特征相关研究关键信息

Table 5 Key Information Related to Biomechanical Research under Shod Condition in Children and Adolescents

| 研究文献 | 国别 | 总样本量 | 年龄/岁 | 鞋具特征 | 研究设计 | 关键生物力学参数 | 研究结果 |
|-------------------|----|---------|-------|---|---|--|--|
| Buckland等 (2014) | 美国 | 25 (17) | 1~2 | 4 种不同扭转刚度的系带运动鞋 | 探究婴儿学步过程穿着不同抗扭转刚度运动鞋对步态时空参数及稳定特征的影响 | 时空参数:步长、步宽、ST、步速; 稳定特征:跌倒次数统计 | 相比扭转刚度较大鞋具,扭转刚度最小鞋具步行 ST↓,步宽↑,跌倒次数降低;步速、步长与稳定特征在不同扭转刚度鞋具之间无显著差异 |
| Forrest等 (2012) | 美国 | 10 (0) | 11~13 | Nike 全掌气垫 Peg-asus+25 型号儿童及成人缓震跑鞋,无动作控制功能 | 探究同样尺码、型号的儿童跑鞋和成人跑鞋对儿童跑步时 GRF 特征的影响 | 时空参数:ST 动力学参数:GRF 冲击峰值、GRF 峰值、GRF 平均值、VALR | 女孩穿着同样尺码的成人跑鞋跑步时,VALR↓;GRF 冲击峰值、GRF 峰值与 ST 在相同尺码的儿童及成人跑鞋跑步时无显著差异 |
| Herbaut等 (2017) | 法国 | 14 (14) | 9~12 | 全新运动鞋,使用 4 个月后的同款老化运动鞋 | 研究运动鞋老化及性能衰减对儿童跑步下肢生物力学参数的影响 | 时空参数:ST、跑速; 运动学参数:足触地角度、膝/踝关节触地时刻及峰值矢状面、冠状面角度 动力学参数:GRF 冲击峰值、VALR、膝/踝关节力矩、关节功率及做功值 | 使用 4 个月的老化运动鞋鞋底硬度上涨了 16%,能量回归效率下降了 18%;穿着老化运动鞋跑步支撑早期 VALR 上涨了 23%,膝关节峰值屈曲↓,踝关节峰值背屈↓,膝关节与踝关节支撑期内吸收能量分别下降 12% 与下降了 11% |
| Hillstrom等 (2013) | 美国 | 26 (—) | 1~2 | 4 种不同扭转刚度的儿童学步鞋具 | 使用鞋垫式足底压力测量系统测试学步期儿童穿着不同扭转刚度的鞋具时的足底压力特征 | 足底压力参数:足底分区(足跟内侧、足跟外侧、中足内侧、中足外侧、第 1~5 跖骨、第 1 脚趾、第 2 脚趾、3~5 脚趾)的 PP | 学步期儿童穿着扭转刚度最小鞋具时足底 PP 最高,随着鞋具扭转刚度↑,儿童步行时足底 PP↓ |

Hollander等(2017)对来自南非的 385 名 HB 和来自德国的 425 名 HS 儿童青少年跑步时的 AHI、AI 及踮趾角度测量发现,HB 组 AHI 上升,动态 AI 下降,提示,静态足弓相比 HS 组高;HB 组运动中的动态足弓较高,提示,裸足运动习惯有助于保持足弓正常形态,有利于提高足弓功能。HB 组踮趾角度下降(踮趾呈自然内收形态)有助于提升踮趾抓地功能。HS 儿童青少年随年龄增长,足长、足宽和足围稳步增长,AI 降低伴随舟骨抬高,AHI 增长,提示,足弓逐步发育形成,10~13 岁是儿童足弓发育的敏感期,男孩足部发育成熟年龄(16 岁)晚于女孩(14 岁)。长期鞋具束缚或穿着不合适的鞋具会影响儿童青少年足弓及前足发育,增大扁平足及踮外翻风险。对儿童青少年足形发育特征的纵向追踪研究提示,在儿童鞋具研发过程中需根据不同足形特征的发育敏感年龄阶段及时调整鞋植设计,以适应其足部生长发育规律(李建设等,

2009)。儿童青少年的裸足运动习惯对正常足弓形成较为有利,并且由于缺少鞋具束缚,表现出足长、足宽增加,踮趾角度减小的一系列足部形态学适应调整,以及习惯裸足群体足部肌力和跟骨刚度增加等一系列功能适应与足部形态学调整,提高足部对外界环境适应性,并降低足相关损伤风险(顾耀东等,2019)。

4.2 儿童青少年下肢及足部运动生物力学功能

儿童青少年足发育过程中,长期鞋具束缚或穿着不合适的鞋具会影响足部的形态、功能以及长期足部健康。深入分析足-鞋-地相互作用的生物力学关系以及着鞋习惯对足部功能的长期影响有助于解释足形态及功能障碍机制,为研发适合儿童青少年的功能性鞋具提供指导。Wegener等(2011)研究认为,2~15 周岁的 HS 儿童青少年在着鞋步行时的步速、步长/跨步长、ST 及 DST 占比均大于裸足步行,但步频降低。这一结论也得到 Lythgo 等(2011)

研究结果的支持,通过对 656 名 5~13 周岁 HS 儿童青少年着鞋和裸足步态进行分析,发现着鞋状态下的步速和步长/跨步长显著大于裸足状态,但步频降低。然而以上研究结果在幼儿学步阶段并不成立,推测可能由于幼儿期多以裸足状态为主,尚未形成对鞋具的适应机制以及成熟的步态模式。

HS 儿童青少年的裸足运动生物力学特征随年龄、步速、运动接触界面等因素的改变出现适应性调整。时空参数方面,随年龄增长,裸足步行的绝对步长、跨步长增大,步频降低;在 7~11 岁阶段,相对步长研究结果存在争议,推测可能是受样本量及研究地域影响(Dusing et al., 2007; Holm et al., 2009)。HS 儿童青少年在裸足运动时,下肢运动学参数表现为足踝在矢状面的触地角度降低,足触地模式倾向于全足着地。裸足步行时步向角的增大与前足冲量增加显著相关,同时与跑步时足支撑期的动态 AI 增大显著相关,并伴随足弓降低与足外旋,提示,儿童青少年裸足步行步向角与足弓形态功能有一定相关性,步向角增大超过正常范围,可能会增加足外翻和外旋趋势,并可能对足弓形态和功能造成损害(Morrison et al., 2018)。动力学研究结果提示,快走动作的完成相比于跑步可能需要更高的神经系统成熟程度,足底压力和表面肌电信号显示出随步速改变的适应性调整,其中足底压力参数在 4~7 岁无性别差异,且无需进行标准化处理,提示,该年龄阶段儿童体质量增长较慢,对鞋具减震功能需求较低(Phethean et al., 2012)。

相比于裸足,着鞋步行会限制中足环节的三维活动度,尤其对中足矢状面的活动度限制可达 72%。Wegener 等(2015)推测,着鞋对中足活动度的限制会影响部分足功能,降低能量回归效率。除影响运动学参数,着鞋对儿童下肢肌肉活动度也具有一定影响。研究发现,儿童着鞋运动时胫骨前肌活动度增加,推测一方面是由于相比裸足状态需克服鞋具质量做功,另一方面是着鞋时足本体感受输入降低,为更好廓清地面障碍,采用增加足触地角度的方式以防止跌倒损伤(Hollander et al., 2014)。有研究发现,穿着普通鞋具跑步时足触地角度大于穿着极简鞋具或裸足,也进一步佐证了上述推论(梅齐昌等, 2015)。以上研究设计均为 HS 儿童青少年在急性转变为裸足运动状态下的应激运动生物力学反馈。HB 儿童青少年由于对裸足运动状态较为适应,无论着鞋和裸足下的跑速均大于 HS 组,提示,长期裸足运动习惯可能增强儿童青少年运动能力。现有研究在 HB 组跑步足触地模式方面研究结果的不一致可能是由于研究对象所在地域、年龄、样本量等不同导致(Hollander et al., 2018b; Latorre-Román et al., 2018)。HS 儿童青少年急性转变为裸足运动状态时,会出现步长和步频降低,足踝触地角度减小,着地模式倾向于非后跟触地,GRF 冲击峰值降低等

一系列运动生物力学参数的适应性调整,这可能是一种代偿保护机制,一定程度上降低足部及下肢冲击损伤风险。

长期以来,学界关于儿童鞋具相关参数中的材料硬度和扭转刚度选取等问题一直是存在争议的。Herbaut 等(2017)选取 14 名儿童青少年的小样本量研究发现,随运动鞋的老化和鞋底硬度增加,跑步时垂直冲击力的增长率显著高于穿着全新运动鞋(23%),但目前鲜见儿童鞋具硬度及刚度设计指导相关实证研究。Buckland 等(2014)对 26 名学步期(1~2 岁)儿童显示,穿着柔软且扭转刚度低的鞋具表现出步宽增大,ST 降低。而对 18 名年龄较大的儿童[(8.2±0.7)岁]研究显示,穿着柔软、扭转刚度较低且质量较轻的鞋具对步态时空参数无影响(Wolf et al., 2008)。研究发现,儿童穿着柔软和扭转刚度低的鞋具,足前掌宽度增加(Barisch-Fritz et al., 2014)。提示,扭转刚度低的柔软鞋具对儿童足部形态发育的抑制程度低,尤其是对足形态及功能发育容易受到外力干扰的幼儿和学步期儿童,穿着扭转刚度小的鞋具有助于提升步行稳定性。儿童鞋具尤其是幼儿鞋具设计应遵循“保护大于功能”的原则,增加足底力学刺激正向反馈,提升学步期足本体感受输入,有利于足部功能发育及健康。

4.3 研究局限性和展望

儿童与青少年分属于不同年龄群体,在发育特征、身体活动水平等方面存在差异,本研究同时将儿童和青少年群体纳入分析,可能对研究结果的系统性和独立性产生一定影响。鞋具对儿童青少年足发育和功能影响的研究范围较广,但多数研究方法具有一定的局限性,如 HB 儿童青少年跑步时的足触地模式方面,需注意的是,当前针对成年 HB 群体跑步触地模式也存在一定争议。建议未来研究考虑地域、人种、运动习惯、环境等因素,增加样本量,进一步挖掘运动模式调整的生物力学机制,提升研究结果信度。此外,现有研究已证实鞋具参数会影响儿童青少年下肢运动生物力学参数,但是否会对足部健康和运动功能产生长期影响还需要进行长期跟踪研究。

5 结论

儿童青少年不同发育敏感时期对应不同的足形特征,需及时调整鞋植设计,以适应其足部生长发育规律。鞋具束缚会限制足部小关节活动度,抑制部分足功能,并对足形发育产生影响。裸足运动或穿着扭转刚度低的鞋具可能有利于儿童正常足弓形态和功能发育,降低踮外翻风险,提升足部肌力及身体活动水平,但针对儿童青少年群体裸足或模拟裸足运动的安全性和有效性仍需结合大样本量的流行病学研究进一步明确。

参考文献:

顾耀东,孙冬,Gusztáv Fekete,等,2019.“裸足”运动方式对下肢生

- 物力学功能调整的研究进展[J]. 中国体育科技, 55(1): 61-74.
- 郝琦, 李建设, 顾耀东, 2012. 裸足与着鞋下跑步生物力学及损伤特征的研究现状[J]. 体育科学, 32(7): 91-97.
- 李建设, 顾耀东, 陆毅琛, 等, 2009. 运动鞋核心技术的生物力学研究[J]. 体育科学, 29(5): 40-49.
- 李蜀东, 顾耀东, 2018. 足前掌在不同着地角度下跖骨应力状态的有限元研究[J]. 体育科学, 38(3): 67-72.
- 梅齐昌, 顾耀东, 李建设, 2015. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析[J]. 体育科学, 35(6): 34-40.
- 梅齐昌, 顾耀东, 孙冬, 等, 2020. 基于影像学构建个体化 OpenSim 下肢肌骨模型的生物力学研究应用进展[J]. 医用生物力学, 35(2): 259-264.
- AIBAST H, OKUTOYI P, SIGEI T, et al., 2017. Foot structure and function in habitually barefoot and shod adolescents in Kenya [J]. *Curr Sports Med Rep*, 16(6): 448-458.
- BARISCH-FRITZ B, SCHMELTZPFENNING T, PLANK C, et al., 2014. Foot deformation during walking: Differences between static and dynamic 3D foot morphology in developing feet[J]. *Ergonomics*, 57(6): 921-933.
- BOSCH K, GERB J, ROSENBAUM D, 2010. Development of healthy children's feet: Nine-year results of a longitudinal investigation of plantar loading patterns[J]. *Gait Posture*, 32(4): 564-571.
- BUCKLAND M A, SLEVIN C M, HAFER J F, et al., 2014. The effect of torsional shoe flexibility on gait and stability in children learning to walk[J]. *Pediatr Phys Ther*, 26(4): 411-417.
- CHENG J C Y, LEUNG S S F, LEUNG A K L, et al., 1997. Change of foot size with weightbearing: A study of 2 829 children 3 to 18 years of age[J]. *Clin Orthop Relat Res*, (342): 123-131.
- DIXON P C, STEBBINS J, THEOLOGIS T, et al., 2013. Spatio-temporal parameters and lower-limb kinematics of turning gait in typically developing children[J]. *Gait Posture*, 38(4): 870-875.
- DOWNS S H, BLACK N, 1998. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions[J]. *J Epidemiol Commun H*, 52(6): 377-384.
- DUSING S C, THORPE D E, 2007. A normative sample of temporal and spatial gait parameters in children using the GAITRite® electronic walkway[J]. *Gait Posture*, 25(1): 135-139.
- ECHARRI J J, FORRIOL F, 2003. The development in footprint morphology in 1 851 Congolese children from urban and rural areas, and the relationship between this and wearing shoes [J]. *J Pediatr Orthop B*, 12(2): 141-146.
- FORREST D, DUFEK J S, MERCER J A, 2012. Impact characteristics of female children running in adult versus youth shoes of the same size[J]. *J Appl Biomech*, 28(5): 593-598.
- GUFFEY K, REGIER M, MANCINELLI C, et al., 2016. Gait parameters associated with balance in healthy 2-to 4-year-old children[J]. *Gait Posture*, 43: 165-169.
- HERBAUT A, CHAVET P, ROUX M, et al., 2017. The influence of shoe aging on children running biomechanics[J]. *Gait Posture*, 56: 123-128.
- HILLMAN S J, STANSFIELD B W, RICHARDSON A M, et al., 2009. Development of temporal and distance parameters of gait in normal children[J]. *Gait Posture*, 29(1): 81-85.
- HILLSTROM H J, BUCKLAND M A, SLEVIN C M, et al., 2013. Effect of shoe flexibility on plantar loading in children learning to walk[J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 103(4): 297-305.
- HOLLANDER K, DE VILLIERS J E, SEHNER S, et al., 2017. Growing-up (habitually) barefoot influences the development of foot and arch morphology in children and adolescents[J]. *Sci Rep*, doi: 10.1038/s41598-017-07868-4.
- HOLLANDER K, STEBBINS J, ALBERTSEN I M, et al., 2018a. Arch index and running biomechanics in children aged 10~14 years[J]. *Gait Posture*, 61: 210-214.
- HOLLANDER K, DE VILLIERS J E, VENTER R, et al., 2018b. Foot strike patterns differ between children and adolescents growing up barefoot vs. shod[J]. *Int J Sports Med*, 39(2): 97-103.
- HOLLANDER K, RIEBE D, CAMPE S, et al., 2014. Effects of footwear on treadmill running biomechanics in preadolescent children[J]. *Gait Posture*, 40(3): 381-385.
- HOLM I, TVETER A T, FREDRIKSEN P M, et al., 2009. A normative sample of gait and hopping on one leg parameters in children 7~12 years of age[J]. *Gait Posture*, 29(2): 317-321.
- KLEIN C, GROLL-KNAPP E, KUNDI M, et al., 2009. Increased hallux angle in children and its association with insufficient length of footwear: A community based cross-sectional study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, doi: 10.1186/1471-2474-10-159.
- KUNG S M, FINK P W, HUME P, et al., 2015. Kinematic and kinetic differences between barefoot and shod walking in children[J]. *Footwear Sci*, 7(2): 95-105.
- LAI Y, LIN H, PAN H, et al., 2014. Impact of foot progression angle on the distribution of plantar pressure in normal children[J]. *Clin Biomech*, 29(2): 196-200.
- LATORRE-ROMÁN P Á, PÁRRAGA-MONTILLA J A, GUARDIA-MONTEAGUDO I, et al., 2018. Foot strike pattern in preschool children during running: Sex and shod-unshod differences[J]. *Eur J Sport Sci*, 18(3): 407-414.
- LIEBERMAN D E, VENKADESAN M, WERBEL W A, et al., 2010. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. *Nature*, 463(7280): 531-535.
- LYE J, PARKINSON S, DIAMOND N, et al., 2016. Propulsion strategy in the gait of primary school children: The effect of age and speed[J]. *Hum Mov Sci*, 50: 54-61.
- LYTHGO N, WILSON C, GALEA M, 2009. Basic gait and symmetry measures for primary school-aged children and young adults whilst walking barefoot and with shoes[J]. *Gait Posture*, 30(4): 502-506.
- MAUCH M, GRAU S, KRAUSS I, et al., 2009. A new approach to children's footwear based on foot type classification[J]. *Ergonomics*, 52(8): 999-1008.
- MAUCH M, MICKLE K J, MUNRO B J, et al., 2008. Do the feet of German and Australian children differ in structure? Implications for children's shoe design[J]. *Ergonomics*, 51(4): 527-539.
- MORENO-HERNÁNDEZ A, RODRÍGUEZ-REYES G, QUIÑONES-URIÓSTEGUI I, et al., 2010. Temporal and spatial gait parameters analysis in non-pathological Mexican children [J]. *Gait Posture*, 32(1): 78-81.
- MORRISON S C, PRICE C, MCCLYMONT J, et al., 2018. Big issues for small feet: Developmental, biomechanical and clinical nar-

- ratives on children's footwear[J]. *J Foot Ankle Res*, doi: 10.1186/s13047-018-0281-2.
- MÜLLER S, CARLSOHN A, MÜLLER J, et al., 2012. Static and dynamic foot characteristics in children aged 1~13 years: A cross-sectional study[J]. *Gait Posture*, 35(3): 389-394.
- PHETHEAN J, NESTER C, 2012. The influence of body weight, body mass index and gender on plantar pressures: Results of a cross-sectional study of healthy children's feet[J]. *Gait Posture*, 36(2): 287-290.
- RABUSIN C L, MENZ H B, MCCLELLAND J A, et al., 2019. Effects of heel lifts on lower limb biomechanics and muscle function: A systematic review[J]. *Gait Posture*, 69: 224-234.
- RAO U B, JOSEPH B, 1992. The influence of footwear on the prevalence of flat foot: A survey of 2 300 children[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 74(4): 525-527.
- ROSENBAUM D, WESTHUES M, BOSCH K, 2013. Effect of gait speed changes on foot loading characteristics in children [J]. *Gait Posture*, 38(4): 1058-1060.
- ROZUMALSKI A, NOVACHEK T F, GRIFFITH C J, et al., 2015. Treadmill vs. overground running gait during childhood: A qualitative and quantitative analysis[J]. *Gait Posture*, 41(2): 613-618.
- SCHWARTZ M H, ROZUMALSKI A, TROST J P, 2008. The effect of walking speed on the gait of typically developing children [J]. *J Biomech*, 41(8): 1639-1650.
- SHAMSEER L, MOHER D, CLARKE M, et al., 2015. Preferred reporting items for systematic review and Meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: Elaboration and explanation [J]. *BMJ*, doi: 10.1136/bmj.g7647.
- STANSFIELD B W, HILLMAN S J, HAZLEWOOD M E, et al., 2006. Regression analysis of gait parameters with speed in normal children walking at self-selected speeds[J]. *Gait Posture*, 23(3): 288-294.
- STEINIJANS V W, DILETTI E, BOMCHES B, et al., 1997. Interobserver agreement: Cohen's kappa coefficient does not necessarily reflect the percentage of patients with congruent classifications [J]. *Int J Clin Pharmacol Ther*, 35(3): 93-95.
- THEVENON A, GABRIELLI F, LEPVRIER J, et al., 2015. Collection of normative data for spatial and temporal gait parameters in a sample of French children aged between 6 and 12[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 58(3): 139-144.
- TONG J W, KONG P W, 2016. Medial longitudinal arch development of children aged 7 to 9 years: Longitudinal investigation[J]. *Phys Ther*, 96(8): 1216-1224.
- UNGER H, ROSENBAUM D, 2004. Gender-specific differences of the foot during the first year of walking[J]. *Foot Ankle Int*, 25(8): 582-587.
- VAN HAMME A, EL HABACHI A, SAMSON W, et al., 2015. Gait parameters database for young children: The influences of age and walking speed[J]. *Clin Biomech*, 30(6): 572-577.
- WALTHER M, HEROLD D, SINDERHAUF A, et al., 2008. Children sport shoes: A systematic review of current literature[J]. *Foot Ankle Surg*, 14(4): 180-189.
- WASEDA A, SUDA Y, INOKUCHI S, et al., 2014. Standard growth of the foot arch in childhood and adolescence: Derived from the measurement results of 10 155 children[J]. *Foot Ankle Surg*, 20(3): 208-214.
- WEGENER C, GREENE A, BURNS J, et al., 2015. In-shoe multi-segment foot kinematics of children during the propulsive phase of walking and running[J]. *Hum Mov Sci*, 39: 200-211.
- WEGENER C, HUNT A E, VANWANSEELE B, et al., 2011. Effect of children's shoes on gait: A systematic review and Meta-analysis[J]. *J Foot Ankle Res*, doi: 10.1186/1757-1146-4-3.
- WOLF S, SIMON J, PATIKAS D, et al., 2008. Foot motion in children shoes: A comparison of barefoot walking with shod walking in conventional and flexible shoes[J]. *Gait Posture*, 27(1): 51-59.
- ZEININGER A, SCHMITT D, JENSEN J L, et al., 2018. Ontogenetic changes in foot strike pattern and calcaneal loading during walking in young children[J]. *Gait Posture*, 59: 18-22.

(收稿日期:2020-06-12; 修订日期:2023-02-21; 编辑:尹航)

