

## 裸足跑生物力学特征研究述评

罗炯, 姬玉, 郭启贵

(西南大学 体育学院, 国家体育总局体质评价与运动机能监控重点实验室, 重庆 400715)

**摘 要:** 对国内外关于裸足跑生物力学特征研究进行了综述, 概括了裸足跑与穿鞋跑在运动学、动力学、生理学等方面的生物力学特征差异。与穿鞋跑相比, 裸足跑更多地采用前足着地、更短的步长、更快步频的行进方式, 这种模式能大大降低地面的碰撞冲击峰、加载率; 裸足跑能更多地利用好足部的本体感觉, 从而可能增强足的力量及行进中的稳定性; 裸足跑并不比穿鞋跑拥有更低的损伤率, 当前没有权威性的证据显示行进中较高运动损伤率是由于巨大、反复的撞碰力所致, 故影响裸足或穿鞋跑损伤率的方式和模式有待于进一步探讨; 裸足比穿鞋跑更经济这已被实验所证明, 而几乎每个长跑项目的世界纪录保持者都是前足着地的跑步者, 故建议将裸足跑作为一种交叉训练方式纳入我国长距离项目运动员和教练员的训练计划中, 这对改进运动员的着地方式是有益的。

**关 键 词:** 运动生物力学; 裸足跑; 损伤; 本体感觉; 述评

**中图分类号:** G804.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2017)01-0138-07

### A review of researches on the biomechanical characteristics of barefoot running

LUO Jiong, JI Yu, GUO Qi-gui

(School of Physical Education, Key Lab of Physical Fitness Evaluation and Motor Function Monitoring, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The authors gave an overview of researches on barefoot running at home and abroad, and summarized the differences in biomechanical characteristics between barefoot running and shod running in terms of kinematics, dynamics and physiology etc. As compared with shod running, more likely barefoot running is carried out in a way of moving forward with forefoot landing, a shorter step length and a faster pace frequency, such a mode can greatly reduce ground impact shock peak and loading rate; barefoot running can better utilize foot proprioception, thus increase foot power and stability during moving forward; barefoot running does not have an injury rate lower than the one shod running has, currently there is no authoritative evidence showing that a higher sports injury rate during moving forward is caused by a tremendous repeating impact force, therefore the way and mode that affect barefoot or shod running injury rate need be further probed into; it has been proven by experiment that barefoot running is more economic than shod running, while almost every long distance run event world record holder is a forefoot landing runner, hence the authors recommended to include barefoot running as a way of cross training into long distance run event athlete and coach training plans, which is conducive to improving athlete's way of landing.

**Key words:** sports biomechanics; barefoot running; injury; proprioception; review

1960 年罗马奥运会上, 埃塞俄比亚运动员 Abebe Bikila 裸足跑出了 2 h 15 min 16 s 的马拉松世界纪录。英国选手 Bruce Tulloh 多次裸足参与国际田径大赛并

在 1962 欧锦赛 5 000 m 跑项目中获得了金牌。南非运动员 Zala Badd 从小进行裸足跑训练并于 1983 年世锦赛上以 15 min 1.83 s 创下女子 5 000 m 跑世界纪录,

收稿日期: 2016-03-20

基金项目: 重庆市体育局 2015 奥运争光重点项目(A201502)。

作者简介: 罗炯(1966-), 男, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向: 运动技术诊断与全民健身。E-mail: luojiong@swu.edu.cn

两年后, 19 岁的她再度以 14 min 48.07 s 成绩裸足跑完 5 000 m, 第 2 次打破自己创下的世界纪录。随后, 一系列专业裸足跑选手陆续涌现, 如 Chris McDougall、Micah True、Jason Robillard、Michael Sandler、Ken Bob Saxton 及 Rick Roeber 等选手都是这领域的杰出代表。2005 年, 五脚趾鞋问世(附: 该鞋最初为海员(水手)设计, 穿上后能让水手们更好地用脚抓住滑溜溜的甲板), 但这种鞋很快在体育界盛行, 并被许多跑步者及户外活动爱好者所接受。2009 年, 耐克公司又开发出一种“最低限度的鞋”(又叫裸足鞋)——平底、很薄、很轻, 随即这种鞋受到运动训练界的重视, 并对后来的“裸足跑”起到了推波助澜作用。

裸足跑现已逐渐渗透到普通居民的健身锻炼中, 面对这新兴的健身与训练模式, 国际新闻界、运动医学界, 特别在体育界已引起了人们对裸足跑的浓厚兴趣。主张裸足跑者认为它是最自然且有益于人类足健康的跑方式, 并同时提出鞋会引起损伤<sup>[1-3]</sup>。反对裸足跑者认为它是一种必须避免的危险“时尚”运动, 因为人体“足”需要缓冲垫的保护、支撑及运动控制<sup>[4-5]</sup>。辩证的学者认为: 海滩上或草地上裸足跑应该是安全的, 但在像沥青路和水泥地上的硬表面上裸足跑是有危险的, 并提出只有那些在生物力学上是幸运的人才可以不穿鞋跑<sup>[6]</sup>。自 Lieberman<sup>[1]</sup>在英国《Nature》上刊发出第一篇有关裸足跑科学论文后, 更加引起了学界的高度重视, 人们提出了一些基本问题: 裸足跑比穿鞋跑好吗? 裸足跑是最好的行走方式吗? 最低限度鞋的优点和缺点又是什么? 裸足跑与穿鞋跑的生物力学差别是什么? 裸足跑的表现、经济性(能量节省化)如何? 裸足跑与穿鞋跑与损伤有联系吗? 裸足跑的训练效果怎样? 等等。

目前国内关于裸足跑的相关研究文献几乎是空白, 仅查阅相关学术论文 2 篇及北京体育大学金季春教授<sup>[7]</sup>在最新专著(2013, 教授学术文库)《体育与运动科学探索》第 2 章中对裸足跑与裸足鞋进行了介绍。针对上述疑问, 笔者查阅了目前国外学者关于裸足跑的最新研究成果, 对裸足跑的各项运动实效及相关机制进行了较全面的综述, 以全面评价裸足跑所能带来的益处与风险, 希冀能为我国将来在长距离项目中推广这种跑方式、改善训练方法、提高运动表现、减少运动损伤发生等提供重要参考。

## 1 对裸足跑的运动学研究

裸足跑运动学方面的研究主要集中在着地方式、步长、步频及触地时间特征等方面。Lieberman<sup>[1]</sup>对受试者采用 3 种跑速(健身跑、中快跑和快速跑)探讨着

地方式时发现, 沥青路面上, 绝大多数着地是用前足, 而草地上的着地则更多地表现为足跟着地。有学者综合了先前的研究<sup>[8-9]</sup>, 认为裸足跑的着地方式大致归为 4 类: 一是足跟早于跖骨头着地, 又称之为跟触地, 简称 RFS(跟-趾跑); 二为跖骨头早于足跟着地是前足着地 FFS(趾-跟-趾跑); 三为足跟和跖骨头同时着地 MFS(称中足触地跑); 四为跖骨头先触地而足跟始终不触地是趾触地。刘卫国等<sup>[10]</sup>对 91 名大学生自然速度裸足跑的足底压力测试中发现: 自然速度裸足跑单步支撑时间先短后长、负荷空间分布不均, 集中作用于后足与前足, 但时间与负荷分布均无性别差异。有学者提出用替代分类方法, 该方法以足触地指数为依据, 用着地时压力中心相对于最大鞋长百分比<sup>[9]</sup>。若比例小于 33% 的是 RFS, 在 34% 到 66% 之间的是 MFS, 大于 67% 的是 FFS<sup>[4]</sup>。对裸足跑触地方式还有学者报道: 平坦的硬地上以中等速度穿鞋跑者采用 RFS 着地方式的约占 75%, 而裸足跑的人基本上是用 FFS 方式着地, 并通常在 MFS 或 FFS 时采用第 4 或第 5 跖骨头下面的籽骨着地<sup>[11]</sup>。

对裸足跑和穿鞋跑间步频及步长特征的研究中发现: 优秀的穿鞋跑步者典型地采用 170~180 步/min 之间的步频, 即使跑速低于 2.75 m/s, 这种步频基本不变<sup>[12]</sup>。裸足跑步者同样倾向于使用较低的步频, 而在要求他们穿鞋并用同样速度跑时则采用较大的步长<sup>[9, 13]</sup>。那为什么在普通跑步者中, 裸足跑者倾向于缩短步长呢? 研究表明其原因有二: 其一是裸足跑者通过更多屈膝关节的方法来缩短步长是避免以 RFS 着地及降低踝关节的有效质量, 因为膝关节弯曲较大决定了足的跖表面方向更多地向着跖屈。故较短的步长将增加在裸足时的 FFS 倾向以及在穿一双有抬高后跟的鞋时的 MFS 倾向; 其二是采用 FFS 着地时, 若膝关节伸得太直, 加之步长较长, 则需要更多的跖屈, 而较大跖屈的 FFS 着地方式则增加了作用在踝关节矢状面上外部的背屈力矩, 它需要跖屈肌力矩去抵消。故采用较短步长的 FFS 跑步者, 其踝关节刚度较小, 加载速率较小以及加在小腿三头肌和跟腱上的应变也较小<sup>[9, 3, 13, 10]</sup>。

## 2 裸足跑的动力学研究

### 2.1 裸足跑地面垂直反作用力 (GRF) 的特征

Gluliani<sup>[12]</sup>对 RFS 和 FFS 着地时地面垂直反作用力 (GRF) 的研究中发现: 采用脚跟着地方式(RFS)的裸足者, 以 4 m/s 速度落在一个刚性测力台上, GRF 碰撞峰值的加载速率约 400~600 倍体质量/s, 其峰值大小约达 1.5~2.5 倍体质量; 这种碰撞然后向上发送一个震动波到身体上, 它在几毫秒内可传到胫骨上, 约 10 ms

到达头上<sup>[10]</sup>。有学者采用穿有抬高后跟的现代跑鞋且采用同样(RFS)着地方式进行探索<sup>[14, 1]</sup>, 结果发现 RFS 引起的碰撞力峰值将衰减掉 10%, 加载速率降至约原来 1/7 (70~100 倍体质量/s), 故穿现代鞋的后跟在硬表面上的触地是舒服的, 但这种鞋并未消除地面反作用的碰撞峰值。也有研究证明: FFS 和 MFS 落地模式所产生的碰撞峰值几乎难以识别, 即用 FFS 着地的跑步者表现出较轻巧的或者说绅士风度, 这与跑步期间同样不产生碰撞峰值的哺乳动物的落地方式是一样的<sup>[10, 15]</sup>。Nigg<sup>[16]</sup>研究指出: 按 FFS 方式跑确实不需要来自鞋的任何缓冲来衰减碰撞的震荡, 即使是在测力台这样的硬表面上也不产生碰撞峰值, 但鞋确实使 FFS 方式在粗糙表面上的跑步变得舒服, 在这些表面上来自鹅卵石的擦伤和应力集中可能引起痛苦。Hasegawa<sup>[15]</sup>进一步研究表明: FFS 着地方式的碰撞期间, 足一开始是跖屈然后通过柔性的踝关节进行控制进入到背屈, 但 RFS 着地方式中, 足是保持背屈, 以及在同一时间中踝关节是刚硬的, 这就是 FFS 和 MFS 不产生显著碰撞力的主要原因。

## 2.2 裸足跑地面垂直反作用力 (GRF) 对下肢柔顺性 (lower limb compliance) 的影响

人体在行进期间所产生腿力非常类似于一个线性伸缩弹簧。这种行为来源于肌肉-肌腱单元在 SSC 收缩(离心-向心收缩)所做的正能量释放, 它可用单步支撑过程中, 地面对支撑腿的反作用力(支反力)近似表达出来; 另一方面, 支撑过程中, 地面反作用力对脚的作用点与腿质量中心(COM)的距离称为腿长, 地面支反力与腿长之比称为下肢柔顺性。下肢柔顺性对 GRF 中的加载速率的影响非常关键, 绝大多数研究集中在人体整个站立阶段的柔顺性。相关研究表明, 当跑速接近 4 m/s 时, 习惯性裸足跑者和习惯性穿鞋跑者, 在穿鞋和不穿鞋条件下既用 FFS 着地又用 RFS 着地的情况下, RFS 着地中的下肢柔顺性要比 FFS 的高得多, 其加载速率范围在 60~100BM/s (BM 为身体质量)<sup>[1]</sup>。不过, 在这个例子中没有 RFS 着地是在 30~40 BM/s 以下的, 而这是许多裸足跑者用 FFS 着地的典型值。此外, 还有学者认为, 有些 FFS 跑步者具有相对刚硬的下肢和大于大多数穿鞋跑的柔顺落地的加载速率<sup>[17-18]</sup>。即一个跑步者可以用许多方法来改变下肢的柔顺性, 例如用较短的步长, 更多的膝关节屈和较少的大步子。这一点可能解释为什么某些裸足跑者有时用 RFS 着地的没有显著不舒服及为什么某些穿鞋跑者用 RFS 形式经受低碰撞力。

## 2.3 裸足跑地面垂直反作用力 (GRF) 对足部肌肉力量增长的影响

相关研究认为, 与穿鞋跑绝大多数采用 RFS 着地方式不同, 裸足跑常采用 FFS 和 MFS 着地, 在站立阶段的初期把一个离心载荷加在跖屈肌上, 而离心载荷比向心载荷产生更多的肌肉肥大, 故有理由推断用 FFS 或 MFS 着地的跑步者或者转换到 FFS 或 MFS 步态的跑步者具有较强的跖屈肌, 因为习惯上裸足跑或者穿最低限度平底鞋跑步者在 FFS 的站立开始阶段经受更多的跖屈, 它们比穿有抬高后跟的鞋的 RFS 跑步者把更多的应力加在跖屈肌上并产生更多的肌肉生长<sup>[8, 11, 19]</sup>。有学者认为: 足弓着地支撑期的缓冲阶段拉长(塌陷)然后在支撑期的蹬伸阶段恢复, 起着一种弹簧的作用<sup>[20]</sup>; 足弓在 RFS 中并不拉长直到跖骨头着地时为止, 足的纵弓是在三点上承载, 在足触地后立即弯曲, 故一个 FFS 涉及的足弓的外部肌和内在肌与 RFS 不同。然而, 一双有足弓支撑的鞋限制了多大的足弓塌陷, 减少了多少的足弓拉长以及这些肌肉做了多少负功(离心收缩), 这些问题还没有学者进行过测算。还有如果足的肌肉对加载的响应像身体上其它的肌肉一样的话, 那么, 裸足跑或穿最低限度鞋跑是否会比穿有足弓支撑的鞋跑更能增强足弓的肌肉? 目前查阅到的唯一文献是[14]: 穿最低限度鞋(耐克自由鞋)训练 5 个月的跑步者的外部足肌肉显著变大和变强了<sup>[14]</sup>。但该研究没有经历重复实验, 也没探讨鞋底的硬度变化是如何影响足肌做功的。

## 3 裸足跑与运动损伤的研究

### 3.1 撞碰力与运动损伤

自 20 世纪 80 年代以来, 人们普遍认为行进中的巨大而重复的撞碰力是造成与跑有关的运动器系损伤的原因<sup>[21-24]</sup>。然而, 经历了几十年的减震努力, 缓冲性能良好的运动鞋却并未改善跑步者的损伤情况。研究发现, 跑步者和非跑步者的骨关节炎和长期软骨退化的发病率几近相等<sup>[25-27]</sup>; 与在软表面上跑步者相比, 在硬表面上跑步者所导致的与跑有关的损伤并没有增加, 穿着吸收震动的鞋没有导致应力骨折的减少<sup>[28-29]</sup>。一项前瞻性研究显示, 跑损伤发生率与跑步者承受撞碰力峰值(高、中、低)之间也没有显著性差异, 说明碰撞力不是损伤的主要原因<sup>[30]</sup>; 而相较于较低加载速率的受试者, 较高加载速率者所患与跑有关的损伤发生率呈下降趋势, 但是, 当前没有结论性的证据显示行进运动期间的碰撞力是跑损伤的原因。

### 3.2 关节力矩与运动损伤

当外力作用到骨骼上时, 对关节会产生外力矩, 这些力矩必须要由肌肉、肌腱和韧带产生的反方向的内力矩来对抗。如同骨一样, 快速的加载速率在结缔

组织中会引起较大的滞后作用, 这会潜在地导致更多的组织损伤<sup>[31]</sup>。跑步时着地方式不同可能产生的关节力矩有差异, 即 FFS 和 RFS 步态产生不同的力矩。在矢状面力矩方面, FFS 跑步者足着地时有较大的跖屈, 因而在站立第 1 阶段中踝关节做较大的背屈, 引起必须由跖屈肌来控制这种较大的外力矩<sup>[32-33]</sup>, 作为对照, 较低的地面反作用力与较少伸展下肢相结合在 FFS 形式跑中产生较小的膝关节矢状面力矩<sup>[32]</sup>。裸足跑者已经显示出比穿鞋跑者在膝关节和髌关节产生出较小的矢状面力矩<sup>[33]</sup>, 这种差别可以部分地通过鞋的设计来影响力矩作为解释, 例如, 较宽的和抬高后跟的鞋能增加作用在踝关节、膝关节和髌关节上的力矩<sup>[33]</sup>。

### 3.3 足“过度旋前”与运动损伤

有学者对足触地“过度旋前”与跑损伤的关系进行了探索, 发现“足旋前”与任何一种损伤诊断(包括胫骨后肌综合症、跖筋膜炎、跟腱炎、膝痛、髌骨软骨软化)无关<sup>[21]</sup>。通过大样本量跟踪调查(180 名运动员)发现, 损伤并不是足过度旋前造成的, 其中 60%与跑期间错误的训练有关, 如跑距过长、强度过大、改变日常训练惯例太急及上坡跑等<sup>[21, 34]</sup>; 另一个大样本(143 名跑步者)评估研究发现, 随着鞋外翻的增加, 损伤率下降<sup>[34]</sup>。Wen<sup>[35]</sup>对 304 名参加马拉松跑运动员的调查认为, 足弓指数及足跟着地外翻与跑损伤无关; Hetsroni<sup>[36]</sup>对 400 名有长期足外翻的新战士进行长期观察发现, 过度旋前和短期损伤无关。因此, 同碰撞力一样, 当前没有实验证据证明“过度旋前”是导致与行进有关损伤的主要原因。

### 3.4 碰撞频率与肌肉调谐

根据有关理论, 足着地的碰撞频率若与身体运动器系的自然频率接近, 会形成共振, 增大损伤风险。RFS 着地方式, 碰撞震动的典型频率在 10~20 Hz 之间, 这个碰撞力作用于跑步者的足上, 并产生震动波通过身体向上传递, 这种震动波被运动器系的许多感受器感觉到, 并把这种信息传送到中枢神经系统。碰撞力的震动频率与骨的自然频率(80~100 Hz)相去甚远, 一般不会产生共振导致大的震动波。但是, 软组织隔室的自然振动频率在 10~50 Hz 之间, 取决于所涉及肌肉的激活、长度和收缩速度<sup>[37]</sup>, 故输入的碰撞力频率可以接近软组织部分的自然频率, 从而可能引起软组织部分出现共振, 增加行进运动的损伤风险。而人体会通过肌肉活动来改变软组织的自然频率和阻尼特征以避免产生共振效果, 这种改变就是肌肉的调谐作用。

Boyer<sup>[38]</sup>让 10 个对象穿 5 种不同的鞋(鞋的中底从软到硬分为 5 类), 用 4 种不同速度进行 RFS 着地跑, 利用测力台、三轴加速度计及表面肌电仪分别测出地

面反作用力, 软组织震动加速度及股直肌、股二头肌、胫骨前肌和腓肠肌内测头 4 块肌肉电活动。结果表明, 不同跑速、不同中底材质的跑鞋, 改变了碰撞力的输入频率, 从而引起股四头肌软组织隔室及股四头肌前激活显著不同, 跑速越快, 加载速率增加, 前激活的肌电图活动也随之增加。这意味着在快速跑时, 输入的碰撞频率接近股四头肌软组织隔室的自然频率, 因此, 肌肉的调谐作用增加。

### 3.5 重复应力与运动损伤

跑产生一组重复性的、复杂的及动态的力。若重复应力是损伤的最接近的力学因素, 那么, 引起重复力的加载速率和数量可能是损伤的关键因素, 然而, 众多学者的研究结果却并未证明这一认识。然而, 重复应力损伤在耐力运动员中非常普遍<sup>[24, 39-40]</sup>。在一个非常接近的水平上, 绝大多数重复应力损伤是由组织中的微损伤累积所引起的, 这些微损伤是由于产生应力的力反复作用引起应变的结果。微损伤的发生是源自于作用力的数量、大小、方向、频率和速度之间的相互作用, 以及遭受这些力的组织的大小、形状和材料的性质。微损伤的一个主要原因是伴随着高速率的高应变, 它使骨变成更加脆弱和增加弹性滞后作用。反复的高水平的弹性滞后作用在骨中及在像韧带与肌腱这样的更粘滞的组织中都是潜在的损伤因素, 因为在卸载期间丢失的某些能量被转换成摩擦力, 产生热, 但是其余的能量可以被转换成结构的损伤。裸足跑者几乎都用 FFS 着地, 这种落地并不产生显著的碰撞峰值<sup>[41]</sup>, FFS 着地把较大的载荷加在跟腱和跖屈肌上, 可能在损伤中引起一种折衷。

## 4 裸足跑与本体感觉

研究认为穿鞋行进运动限制了足的本体感觉, 从而导致了运动损伤的增加<sup>[11, 23, 27, 30, 35]</sup>。因为在人类早期逐渐形成的足底跖表面感觉反馈是一种对地面硬度、粗糙度、不平以及像尖锐的石子这种潜在的危险特征的适应。足底感觉、压觉和本体感受器激活反射并帮助中枢神经系统做出增加稳定性和避免损伤的决策。裸足时代的行进运动形式可能是反映了这种进化的本体感觉对保持身体平衡、避免疼痛撞击以及调节腿的刚度的适应作用。但是, 这些反馈机制在鞋中被削弱了, 这样就增加了与行进运动有关的损伤发生率。

穿鞋可能促使足变得虚弱、不柔软、不灵活, 特别是足正在生长中的儿童时期。肌肉骨骼系统需要对载荷做出响应, 没有载荷刺激, 肌肉骨骼系统就会变虚弱。裸足与穿鞋的载荷是不一样的, 对肌肉骨骼系统的刺激也不一样。有硬底的、足弓支撑物的以及控

制足旋前和其他运动特征的鞋可能减少了裸足时受到的“正常”应力，从而削弱了肌肉骨骼系统。如同加工过的食物导致降低咀嚼力和让颌肌虚弱一样，这会引起下颌不充分的生长和以前罕见的错位咬合及碰撞牙齿的高发生率。穿有高度支撑鞋的人同样会使足和下肢肌肉骨骼虚弱，尤其是维持纵弓的肌肉，进而削弱了保持身体平衡和其他重要功能。有研究报道，不穿鞋的人群在足弓形状上变化不大，扁平足的百分比低以及其他的足畸形也较少<sup>[42-43]</sup>。另有研究获得相反的观点，穿最低限度的鞋会增强足的肌肉肌骨系统，一个强有力的足是较为柔软的，具有较好的控制过度旋前和其他运动能力<sup>[44-46]</sup>。因此，在发挥鞋对人足的保护功能时，如何减少鞋对人足运动的约束和因改变行进运动形式而带来的损伤危险就成了研究课题和运动鞋改革的方向。

## 5 裸足跑与能量节省

绝大多数优秀跑运动员喜爱穿鞋，鞋除了对足有保护作用外，穿鞋跑运动员碰到粗糙表面时不用担心足着地的位置。但 Abebe Bikila 和 Zola Budd 等裸足跑运动员已经在马拉松和长距离项目上创造了世界纪录。而几乎每个长跑项目的世界纪录保持者都是 FFS 方式跑步者，他们都穿平底跑鞋或各种最低限度的鞋进行比赛或日常训练。从经济性视角对裸足或穿最低限度鞋跑进行了研究发现，鞋的重量每增重 100 g 几乎要增加 1% 的跑的代价，而穿最低限度鞋跑要比穿一双标准跑鞋的经济性大 2.4%~3.3%，这种差异对长跑的成绩显然有实质性的影响<sup>[2-3, 10, 47-48]</sup>。到目前为止，还没有证据表明裸足跑对运动成绩有明显的负作用<sup>[1]</sup>。穿鞋要增加能量消耗不仅只表现在鞋的质量上，也表现在其他方面，如为了改变鞋底的形状和为了对地面转动鞋底要做的功，以及在中底吸收的能量和在跖趾关节处弯曲鞋要做的功等方面都得消耗能量。

## 6 问题与展望

(1) 绝大多数的裸足跑研究文献都是在实验室中要求平时穿鞋跑的人脱掉鞋跑来完成的，虽然这样的研究有许多优点，但是，仅仅利用平时穿鞋跑的人来研究裸足跑从而获得运动学、动力学等参数是值得思考的，因为不能期望这样的对象具有像习惯于裸足跑的人已经发展的肌肉骨骼的适应性和运动学特征，故未来研究应更多地探讨自然环境下的习惯性裸足跑选手所表现出的真实参数。

(2) 目前没有证据证明穿鞋和跑损伤之间的明确关系。要揭示导致跑步者发生损伤的真正原因，可能

更多的研究应从跑步者的着地方式去找寻答案，跑损伤是多因素综合，鞋对运动控制的做法对减少损伤率没有作用，仅仅通过修补鞋的设计来减少损伤的努力是无用的。裸足未必适合所有的跑步爱好者，那些小腿和足肌力量较弱者若采用裸足跑(FFS 着地)，或者他们穿鞋用 RFS 着地、长步长、低步频去跑都会面临较高的损伤率。

(3) 几乎每个长跑项目的世界纪录保持者都是 FFS 方式跑步者，他们都穿平底跑鞋或其它各种最低限度的鞋比赛或日常训练。这似乎暗示裸足跑者可能获得较多的本体感觉反馈，故往往采用 FFS 着地及缩短步长和增加步频，避免 RFS 和在硬表面上的碰撞峰值，保持低的关节力矩和有强壮的足，这可能正是人类进化过程中，人类祖先为了避免损伤而采用的一种适应。

(4) 裸足比穿最低限度鞋跑更经济，这种差异对长跑成绩的影响是显著的。未来迫切需要解决的是最低限度鞋对足部本体感觉的约束到底对跑步形式的影响有多大，对一个转换到裸足跑或穿最低限度鞋跑的运动员来说其跑步方法如何调整。裸足跑或穿最低限度鞋跑会影响足的力量及足弓形状，这种影响是否与受试者年龄、跑速、身体素质和其它环境变量有关。穿鞋对足的力量和柔顺性的影响有多大，这些影响是否与运动损伤存在某种关联。

(5) 习惯于穿鞋跑者当过渡到裸足跑或直接采用裸足跑姿态的运动员会导致小腿三头肌扭伤或跟腱炎症，这是因为 FFS 跑需要较强的小腿三头肌力量和足的控制，反映了在 FFS 步态期间增加了作用在踝关节上的跖屈力矩。尽管 FFS 着地并不产生大的碰撞力，但是转换成 FFS 的跑步者可能没有足够强大的伸肌群或跖骨来对抗在前足中的弯曲力矩，它可能导致增加跖骨痛或跖骨应力骨折的危险。未来研究需要确立哪些跑步者是从转换中获利及另一些从转换中受损，从而为避免损伤找到不同的转换策略。

## 参考文献:

- [1] LIEBERMAN D E, VENKADESAN M, WERBEL, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. *Nature*, 2010, 46(3): 531-535.
- [2] DIVERT C, MOMIEUX G, FREYCHAT P, et al. Barefoot-shod running differences: shoe or mass effect?[J]. *Int J Sports Med*, 2008(290): 512-518.
- [3] HANSON N J, BERG K, DEKA P, et al. Oxygen cost of running barefoot vs. running shod [J]. *Int J Sports Med*, 2011(32): 401-406.

- [4] SQUADRONE R, GALLOZZI C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2009(49): 6-13.
- [5] MORLEY J B, DECKER L M, DIERKS T, et al. Effects of varying amounts of pronation on the mediolateral ground reaction forces during barefoot versus shod running[J]. *J Appl Biomech*, 2010(26): 205-214.
- [6] BRAMBLE D M, LIEBERMAN D E. Endurance running and the evolution of Homo [J]. *Nature*, 2004(432): 345-352.
- [7] 金季春. 体育与运动科学探索[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2013.
- [8] DEWIT B, DCCLERCQ D, AERTS P. Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running[J]. *J Biomech*, 2000(33): 269-278.
- [9] LIEBERMAN D E. Strike type variation among Tarahumara Indians in minimal sandals versus conventional running shoes[J]. *J Sport Health Sci*, 2014(3): 86-94.
- [10] 刘卫国, 高晗, 欧瑜枫, 等. 自然速度裸足跑足底压力特征与慢跑鞋设计研究[J]. *北京体育大学学报*, 2015, 38(1): 74-78.
- [11] PONTZER H, SUCHMAN K, RAICHLEN D A, et al. Foot strike patterns and hind limb joint angles during running in Hadza hunter-gatherers[J]. *J Sport Health Sci*, 2014(3): 95-101.
- [12] GLULIANI J, MASINI B, ALITZ C, et al. Barefoot simulating footwear associated with metatarsal stress injury in 2 runners[J]. *Orthopedics*, 2011(34): 320-323.
- [13] KERRIGAN D C, FRANZ J R, KEENAN G S, et al. The effect of running shoes on lower extremity joint torques[J]. *Physical, Med and Rehabil*, 2009(1): 1058-1063.
- [14] BRUGGERMANN G P, POTTHAST W, BRAUSTEIN B, et al. Effect of increased mechanical stimuli on foot muscles functional capacity[C]. Cleveland: Proceedings ISB XXch Congress, American Society of Biomechanics, 2005: 553.
- [15] HASEGAWA H, YAMAUCHI T, KRAEMER W J. Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon[J]. *J Strength Cond Res*, 2007(21): 888-893.
- [16] AHN A N, BRAYTON C, BHATIA T, et al. Muscle activity and kinematics of forefoot and rearfoot strike runners[J]. *J Sport Health Sci*, 2014(3): 102-112.
- [17] GRUBER A H, BOYER K A, DERRICK T R, et al. Impact shock frequency components and attenuation in rearfoot and forefoot running[J]. *J Sport Health Sci*, 2014(3): 113-121.
- [18] MILNER C E, FERBER R, POLLARD C D, et al. Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006(38): 323-328.
- [19] ZADPOOR A A, NIKOOYAN A A. The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: a systematic review[J]. *Clin Biomech*, 2011(26): 23-28.
- [20] KER R F, BENNETT M B, BIBBY S R, et al. The spring of the arch of the human foot[J]. *Nature*, 1987(325): 147-149.
- [21] KASMER M E, KETCHUM N C, LIU X C. The effect of shoe type on gait in forefoot strike runners during a 50-km run[J]. *J Sport Health Sci*, 2014(3): 122-130.
- [22] CAVANAGH P R. Effect of shoe Cushioning upon Ground reaction forces in running[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1983(4): 247-251.
- [23] FREDERICK E S. Measuring the effects of shoes and surfaces on the economy of locomotion[C]. Calgary AB: The University of Calgary, 1983: 93-106.
- [24] VAN MECHELEN W. Running injuries: a review of the epidemiological literature[J]. *Sports Medicine*, 1992, 14(9): 320-335.
- [25] LANE N E, BLOCH D A, JONES H H. Long-distance running, bone density, and osteoarthritis. *JAMA*[J]. *The Journal of the American Medical Association*, 1986, 255(9): 1147-1151.
- [26] PANUSH R S, SCHMIDT C, CALDWELL J R. Is running associated with degenerative joint disease?[J]. *Journal of the American Medical Association*, 1986, 255(9): 1152-1154.
- [27] EICHNER E R. Does running cause osteoarthritis?[J]. *The Physician and Sports Medicine*, 1989, 17(3): 147-154.
- [28] KONRADSEN L, BERG HANSEN E M. Long distance running and osteoarthritis[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 1990, 18(4): 379-381.
- [29] GRUBER K, RUDER H, DENOTH J, et al. A Comparative study of impact dynamics: wobbling mass model versus rigid body models[J]. *Journal of Biomechanics*, 1998(319): 439-444.

- [30] NIGG B M. Impact forces in running. *Current Opinion in Orthopedics*[J]. *Clin J Sports Med*, 1997, 8(6): 43-47.
- [31] MARRIN R B, BURR D B, SHARKEY N A. *Skeletal tissue mechanics*[M]. New York: Springer, 1998: 392.
- [32] WILLIAMS D S, MCCLAY I S, MANAL K T. Lower extremity mechanics in runners with a converted forefoot strike patterns[J]. *J Appl Biomech*, 2000(16): 210-218.
- [33] NIGG B M. *Biomechanics of Sports Shoes*[J]. *J Appl Biomech*, 2004(11): 201-210.
- [34] STEFANYSHYN D, STERGIOU P, LUN V M Y. Knee joint moments and patellofemoral pain syndrome in runners. Part I : a case control study[G]//*Proceedings of the 4th symposium of footwear biomechanics*. Calgary A B: The University of Calgary, 1999: 211-215.
- [35] WEN D Y, PUFFER J C, SCHMALZRIED T P. Lower extremity alignment and risk of overuse injuries in runners[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1997, 29(10): 1291-1298.
- [36] HETSRONI I, FINESTONE A, MILGROM C. The role of foot pronation in the development of femoral and tibial stress fractures : a prospective biomechanical study[J]. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 2008, 18(1): 18-23.
- [37] WAKELING J M, NIGG B M, ROZITIS A. Muscle activity damps the soft tissue resonance that occurs in response to pulsed and continuous vibrations[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2002, 93(3): 1093-1103.
- [38] BOYER K A, NIGG B M. Muscle tuning during running: implication of an untuned landing[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2006, 128(6): 815-822.
- [39] 郝琦, 李建设, 顾耀东. 裸足与着鞋跑步生物力学及损伤特征的研究现状[J]. *体育科学*, 2012, 32(7): 91-97.
- [40] VAN GENT R M, SIEM D, VAN MIDDLEKOOP M, et al. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review[J]. *Br J Sports Med*, 2007(41): 769-807.
- [41] DAOUD A I, GEISSLER G J, WANG F, et al. Foot strike and injury rates in endurance runners: a respective study[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006(48): 401-410.
- [42] D'AOUUK, PARKEY T C, DE CLERCQ D, et al. The effects of habitual use; foot shape and function in native barefoot walker[J]. *Footwear Science*, 2009(1): 81-94.
- [43] RAO U B, JOSEPH B. The influence of footwear on the prevalence of flat . a survey of 2300 children[J]. *J Bone Joint Surg*, 1992(74): 525-527.
- [44] WILLEMS T M, WITVROUS E, DE COCK A, et al. Gait-related risk factors for exercise-related lower-leg pain during shod running[J]. *Med Sports Exerc*, 2007(39): 330-339.
- [45] ROBBINS S E, HANNA A M. Running-related injury prevention through barefoot adaptation[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1987(19): 148-156.
- [46] MARRI B, VADER J P, MINDER C E, et al. On the epidemiology of running injuries. The 1984 Bern Grand-Prxi study[J]. *Am J Sports Med*, 1988(16): 285-294.
- [47] BURKERT L N, KOTT W M, BUCHBINDER R. Effects of shoes and foot orthotics on VO<sub>2</sub> and selected frontal plane knee kinematics[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1985(17): 158-163.
- [48] FLAHERLING R F. Running economy and kinematic difference among running with the foot shod, with the foot bare and with the bare foot equated for weight[J]. *Foot and Ankle International*, 1994, 14(6): 247-352.