



开放获取

编辑:
Athanasios Bissas,
格鲁斯特大学, 英国审核:
Chris Napier,
西蒙弗雷泽大学, 加拿大
Qichang Mei,
宁波大学, 中国*联系人
Eric C. Honert
eric.honert@boatechnology.com专业部分
本文被提交至Frontiers in Sports and Active Living
期刊的“生物力学和人类运动控制”部分
接收日期: 2022年10月21日
接受日期: 2022年12月14日
出版日期: 2023年1月6日引用
Honert EC、Harrison K和Feeney D (2023)
“野外”鞋类评估: 通过越野跑比较包裹式和系
带式鞋子。
Front. Sports Act. Living 4:1076609.
doi: 10.3389/fspor.2022.1076609版权
© 2023 Honert, Harrison and Feeney. 根据知识共享
署名许可协议(CC BY), 这是一篇开放获取文
章。根据公认的学术惯例, 允许在其他论坛上使
用、分发或复制本文, 但须注明原作者和版权所
有者, 并引用本刊的原始出版版本。不得使用、
分发或复制不符合这些条款的内容。

“在野外”评估跑鞋: 通过越野跑比较包裹式和系带式鞋子。

Eric C. Honert*、Kathryn Harrison和Daniel Feeney

性能匹配实验室, BOA Technology Inc., 美国科罗拉多州丹佛市

在过去的二十年中, 越野跑广泛流行, 对这项运动的研究也越来越多。尽管如此, 我们对鞋类在生态有效条件下对越野跑生物力学的影响仍缺乏了解。本研究旨在评估包裹式与系带式鞋类(同款鞋)对越野跑生物力学的影响。30例受试者在穿戴全球定位系统(GPS)手表、心率监测器、惯性测量单元(IMUs)和足底压力鞋垫的情况下, 穿着这两类鞋完成一圈越野跑。研究发现, 包裹式鞋子可以降低足外翻的峰值速度(通过IMU测量), 这与贴合度相关。包裹式鞋子还可以增加足跟接触面积, 这也与贴合度相关。这种增加可能与对包裹式鞋子的主观偏好有关。此外, 穿着包裹式鞋子的跑步者, 在心率和主观努力没有差异的情况下, 跑步速度有小幅但显著的提高。总之, 在各种地形上, 包裹式鞋子比系带式鞋子更加贴脚。这项研究证明, 在越野跑中, 统计工具和研究设计在检测鞋类特征方面可以提供有意义的生物力学差异。在生态有效环境中评估鞋类通常会在数据中产生额外的差异。这种差异不应被视为噪声; 相反, 如果我们希望利用生物力学来影响新产品的开发, 那么抓住生态有效地形的额外差异和挑战将至关重要。

关键词

可穿戴传感器; IMU; 足底压力; 鞋面; 鞋类特征

引言

在过去二十年中, 越野跑的热度与日俱增, 尤其是超远距离越野跑十分流行。(1, 2)。因此, 最近有很多研究探索了越野跑表现的生理预测因素(3, 4)、长时间下坡跑(5)和越野跑(6)导致的实验室生物力学变化以及户外越野跑期间的生物力学和生理学(7, 8)等方面。尽管这是一个新兴的研究领域, 但人们对鞋类对越野跑的影响尚缺乏了解。此外, 大多数研究在实验室进行, 参与者并没有实际体验越野跑的独特挑战。

鞋子是影响路跑表现的关键装备(9, 10)。路跑以矢状面运动为主(11)，而越野跑会增加正面和横向平面的运动(7, 11)。因此，越野跑对鞋子的要求与路跑不同。最近的研究表明，鞋面材料(12)和鞋类裹脚系统(13, 14)会影响生物力学性能，特别是在非矢状面运动中。跑鞋专家认为，鞋面是一个关键的设计特征(15)，但关于鞋面对越野跑表现影响的研究少之又少。尽管在敏捷性运动中，替代鞋面设计的优势已经过实验室验证，但尚未针对“野外”跑进行评估。

尽管越来越多的证据表明了可穿戴技术的有效性(16)，但是，关于鞋类的贴合度对在生态相关的地形中跑步的影响，人们知之甚少。在实验室内，更合脚的鞋子与降低垂直负荷率（通过力板）和降低内旋（外翻）速度相关(17)。这种生物力学指标的替代指标可以通过穿戴技术来获取，例如包含加速度计和陀螺仪的惯性测量单元（IMUs）。比如，连接到脚上的IMU可以测量足接触附近的足外翻速度和峰值加速度——垂直负荷率的替代指标(18)。此外，IMU已被用于表征上坡越野跑地形，从而通过内外侧加速度与实验室跑步进行对比(7)——跑步者在户外表现出更大的内外侧加速度。由于鞋面已被证明会影响敏捷性运动过渡时间(12, 14)和额平面运动学(13)，内外侧加速度可能对鞋面的变化十分敏感。

足底压力鞋垫是另一种可穿戴技术，用于在实验室外评估鞋类。足底压力已被用于研究步道上的足部撞击模式[穿着公路鞋(19)]、马拉松比赛中的峰值和平均压力(20)，以及在纵向训练研究中量化压力分布的差异(21)。此外，足底压力揭示了系带靴和无系带靴之间的差异：系带靴可以减少足跟和足趾下的峰值压力，同时增加足跟接触面积(22)。根据实验室研究，接触面积增加和足跟和足趾压力峰值降低可以用来区分矫正器是否舒适(23)以及不同的鞋类特征(17, 24)。总之，足跟和足趾区域的足底压力可以灵敏地反应出鞋的贴合度或人的主观舒适度。

虽然在实验室外评估鞋子的影响通常会导致数据的额外变化，但这种变化是真实使用体验的指示。

在认知(25)和神经科学(26)等领域，由于缺乏背景或生态有效性，如果只在实验室进行测试，就会漏掉干预措施效果。虽然在严格控制的环境下，在跑步机上测越野跑生物力学提供了许多观察结果，但对鞋类的评估可能无法推广到地面跑步(27, 28)，并且肯定无法代表受试者穿着越野跑鞋所面临的地形挑战。因此，使用跑步机测越野跑鞋不仅会限制研究结果的普遍性，也可能完全不适合评估这种越野跑鞋。这种限制也会延伸到其他通常测试的生物力学干预措施，如假体、外骨骼和跑步鞋。如果我们希望弥合生物力学和产品设计之间的差距，研究人员必须扩展测试工具箱，纳入可穿戴传感器，进而探索数据中存在的的变化；同时设计实验，以在生态相关领域严格测试产品。

我们研究的目包含两个方面：(1)评估越野跑鞋裹脚系统越野跑生物力学和表现的影响；(2)强调在越野跑中测试生物力学干预的实验范式。具体而言，我们采用La Sportiva Cyklon越野跑鞋评估了包裹式和系带式跑鞋的偏好和性能。我们假设包裹式闭合比系带式闭合更合脚。我们预计闭合性较好的鞋子将：

(1)降低足外翻速度，(2)降低由峰值加速度或峰值加速度测量的负荷率，(3)降低内侧/外侧加速度，(4)降低足趾或足跟的峰值压力，以及(5)增加足趾或足跟的接触面积。除峰值加速度外，我们还评估了峰值加加速度，因为加加速度提供了与加载速率相似的时间导数。我们还评估了主观和客观（心率）的努力程度，以确保两只鞋的努力程度没有差异。

材料和方法

参与者

三十例受试者（15例男性，15例女性平均值±标准差：身高：172 ± 6厘米，体重：65 ± 8公斤，年龄：34 ± 8岁）在参加越野跑前提供了书面知情同意书。此方案由机构审查委员会批准（方案：22-BOAT-101）。这项研究招募了美国男鞋尺码为10和11以及美国女鞋尺码为7.5和9的参与者。受试者的入组标准为：每周至少跑步24公里，每周参加一次越野跑（天气允许），并且在过去六个月中没有因受伤导致缺席超过一周的跑步。

所有参与者均穿着La Sportiva Cyklon包裹式鞋和改装的La Sportiva Cyklon系带式鞋进行越野跑（图1）。

方案

越野跑的场地在美国科罗拉多州莫里森附近，路线是一段1.6公里长的环路（图2），共有三段。路线上坡部分约为580米，平均坡度为4度（上坡最高13度，下坡最高1度）。路线顶段比其他两段更具技术性。此路段约520米，平均坡度为2度（上坡最高9度，下坡最高2度）。

路段的下坡部分约为470米，平均坡度为6度（在3度和11度的下坡角度之间变化）。根据国际山地自行车协会的说法，这条路线不同部分的技术含量为中级上坡和下坡（蓝色）以及高级顶段（黑色）。参与者首先与一名训练有素的实验人员进行热身跑，以熟悉地形和路线。然后，受试者再跑四次循环，以随机平衡顺序（A-B-B-A）测试鞋子，以展示熟悉程度和疲劳程度。要求受试者每圈以相似的速度跑步。通过连接到足跟计数器的IMU（1125Hz时16位灵敏度为 $\pm 16g$ 和 $\pm 2,000^\circ/\text{sec}$ ，1600Hz时13位灵敏度为 $\pm 200g$ ，IMeasureU，美国丹佛）、足底压力传感器（100Hz，XSENSOR，加拿大卡尔加里）、全球定位系统（GPS）手表（1Hz，Suunto，芬兰万塔）和连接上臂的光学心率传感器（1Hz，Polar Verity Sense，Polar Electro Inc.，芬兰肯佩莱）收集数据。



图1
包裹式La sportiva cyklon鞋款（左）和改装的系带式La sportiva cyklon鞋款（右）。



图2
含受试者跑步路线（显示为红色）的地形图。受试者以逆时针方向跑步。图片显示了不同路段的地形示例：上坡（右）、顶部（上）和下坡（左）。平均上坡坡度为 $+4^\circ$ ，平均顶部坡度为 $+2^\circ$ ，平均下坡坡度为 -6° 。地形图经Strava许可使用(<http://www.strava.com>)。

这种心率传感器的早期版本已经过平地 and 上坡跑步期间的心电图验证(29)。GPS坐标和心率数据同步记录在GPS手表上。如果受试者两圈之间的差异超过一分钟，他们的数据将被排除在进一步分析之外。在每一圈之前，受试者进行三次同步跳跃，以指示受试者何时开始跑步。跳跃之后，受试者启动GPS手表并开始跑步。

主观结果

跑完热身圈后，受试者回答调查问卷。在研究条件下每跑一圈后，受试者按照0（不累）到10（筋疲力尽）的顺序对自己的体力消耗进行评分。在每只鞋第二次跑步后，他们回答了关于鞋子在上坡、平地和下坡跑步中的表现。受试者还对穿着这种鞋跑步时的自信程度进行了评估。最后，受试者对整体贴合度、前足贴合度、足中贴合度和足跟贴合度进行评分。除了特定足部区域的问题外，所有问题都按照从0到10的顺序评分，其中0表示“差”，10表示“好”。对于特定的足部区域（例如前足），0表示太松，5表示完美，10表示太紧。经证明，类似的顺序量表是跑步过程中鞋类舒适度的可靠评估(30)。完整的问卷请参见[补充材料](#)。

生物力学结果

利用IMU（三轴加速度计、三轴陀螺仪）确定跑步速度、峰值加速度（有时称为冲击）、加加速度、内外侧加速度范围和外翻角速度峰值。我们首先结合了低g和高g加速度计数据，以避免跑步过程中可能出现的饱和现象(31)。将高g加速度计（1,600 Hz）插值到低g加速度计频率（1,125 Hz）就能做到这一点，这样每个样本都带有UNIX时间戳。每当低g加速度计饱和时（在 ± 16 g），高g加速度计数据点被低g数据点取代。然后根据加加速度平方的大小对跑步步幅进行分段(32)。之后，加速度计和陀螺仪信号通过二阶低通50Hz巴特沃兹滤波器进行旁路滤波。利用这些滤波信号，基于IMU的跑步速度根据之前发布的算法确定(32)，而这些算法针对不同的跑步速度和坡度进行了评估(33)。

简而言之，我们计算了步幅长度，并将其除以步幅时间，正如后续足接触检测所定义的那样。一旦对重力进行了校正，就可以对加速度进行二次积分来确定步幅。我们利用线性去漂移来校正基于站立中期(32, 34)零速度更新的积分误差。基于滤波后的加速度计信号，确定了步幅上的加速度峰值、加加速度峰值和内外侧加速度计范围[类似于(7)]。对于外翻角速度峰值，我们使用二阶、双通、低通30Hz巴特沃兹滤波器对原始陀螺仪信号进行滤波，以更好地捕捉跑步运动频率，并限制足接触附近陀螺仪信号中瞬态峰值的影响。然后计算前20%步幅的外翻角速度峰值，以捕捉步幅的足接触部分。在检测到整个跑步循环的三跳后，提取所有IMU指标。

从足底压力中提取跑步站立阶段的平均足跟和足趾接触面积以及足趾和足跟压力峰值。足底压力的跑步站立阶段通过对总鞋垫力实施梯度下降算法来检测，以提供足接触和足趾离开事件。足跟区域是指足底压力传感器的后20%。足趾区域是指传感器的前20%。这两个区域通过XSENSOR软件定义，大致对应于相应的足部解剖区域。在检测到整个跑步循环的三跳后提取所有压力指标。

手表的GPS坐标可以根据纬度和经度将路线分为三段：上坡、顶部和下坡（见[图2](#)）。由于GPS手表在三次同步跳跃后立即启动，因此对每段分别进行了生物力学测量。计算每段的平均心率以评估生理活动。所有生物力学数据处理均在Python 3.9.7版本中进行。

统计数据

线性混合效应模型用于评估包裹式和系带式鞋子在主观结果和生物力学结果方面的统计学差异。所有统计分析均在R统计软件（4.1.2版）中进行，采用了LMER(35)和emmeans(36)软件包。我们首先创建了一个线性混合效应模型来评估配置之间主观反应的差异（配置：系带式或包裹式），同时利用独立（随机）截距，评估每例受试者各个路段的平均心率（公式1）。

平均心率的差异基于估计的边际平均值。

结果~配置+ (1|受试者)

(1)

然后使用混合效应模型评估所有其他生物力学结果（“结果”）；此模型具有每例受试者的独立（随机）截距，并且对受试者从一种鞋状态切换到另一种鞋状态的特定效应进行了独立斜率编码。此模型利用了每例受试者每个检测到的步幅（IMU）或步数（足底压力）的生物力学结果（例如外翻速度峰值）。由于生物力学结果与速度相关，因此分别评估了每个不同路段（即上坡、顶部、下坡）的生物力学结果的统计差异。对于所有统计测试， α 被设置为0.05。呈现的百分比差异是相对于估计的边际均值。这些模型使用了与我们实验室近期工作类似的结构(13, 14)，并代表了一种对受试者对鞋类特定反应进行建模的自然方式(37)。

结果~配置+ (配置|受试者)

(2)

结果

一例受试者被排除在分析之外，因为其两圈之间的差异超过一分钟（2分23秒）。

主观结果

包裹式鞋子的上坡、平地和下坡跑的主观评分较高($p \leq 0.002$, 表1)。与系带式鞋子相比，包裹式鞋子在主观上更具置信度 ($p < 0.001$)。虽然包裹式鞋子的整体贴合度更好 ($p < 0.001$)，但包裹式鞋子的前足贴合度比系带式鞋子更紧 ($p = 0.04$)；足中贴合度和足跟贴合度没有差异 ($p > 0.1$)。

体力消耗结果

在主观体力消耗结果 ($p = 0.46$) 和客观体力消耗结果 ($p > 0.17$,) 方面均无统计学差异。在越野跑的所有路段上，包裹式鞋子和系带式鞋子之间的平均心率差异小于每分钟一次 (表2)。

IMU结果

在越野跑路线的三段，受试者穿着包裹式鞋子会比穿着系带式鞋子跑得稍快（平均差异：0.03 to 0.05 m/s, $p < 0.022$, 图3, 表2）。两类鞋在任何路段的加加速度峰值、加速度峰值和内外侧加速度范围方面无显著差异（分别为 $p > 0.35$ 、 $p > 0.08$ 和 $p > 0.20$ ）。包裹式鞋子在上坡 ($p = 0.025$)、技术顶部 ($p = 0.008$) 和下坡 ($p = 0.043$) 段，外翻速度峰值平均比系带式鞋子低5%。

压力结果

在跑步的站立阶段，在路线的所有路段上，包裹式鞋子的足跟接触面积的平均百分比比系带式鞋子增加了2% ($p < 0.001$, 图4, 表2)。在跑步的站立阶段，两只鞋在任何路段的平均足趾接触面积没有差异 ($p > 0.21$)。在任何路段，两只鞋的足跟和足尖压力峰值没有差异 ($p > 0.087$)。

讨论

这是第一项在生态有效地形上评估越野跑专用鞋的研究。我们发现：包裹式鞋子的最大外翻速度显著降低，跑步速度稍快，足跟接触面积增加，但在体力消耗的定性或定量测量方面没有差异。在路线的各个部分，生物力学发生变化，整体贴合度和自信程度的定性分数也随之增加。类似地，各种BOA包裹配置减少了正面运动和敏捷性运动期间改变方向的时间，定性贴合度也相应增加(13)。

表1 鞋子在不同地形上的表现和贴合度的主观反馈。显示的是研究平均值±标准差(N = 29)。

配置	上坡	平地	下坡	自信程度	整体贴合度	前足贴合度	足中贴合度	足跟贴合度
包裹式	8.3 ± 1.1	8.4 ± 1.2	8.4 ± 1.5	8.8 ± 1	8 ± 1.5	6.2 ± 1.5	5.3 ± 0.6	5.1 ± 0.7
系带式	7.3 ± 1.1	7.5 ± 1.3	6.3 ± 1.5	6.8 ± 1.5	6.5 ± 1.4	5.5 ± 2.1	5.1 ± 1.5	4.5 ± 1.4
p值	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.04	0.7	0.1

表2 越野跑循环中检测的生物力学指标。加粗的指标表明，对于不同路线段，包裹式鞋子和系带式鞋子之间存在显著差异。显示的是研究平均值±标准差(N = 29)。

指标	上坡		顶部		下坡	
	包裹式	系带式	包裹式	系带式	包裹式	系带式
心率[BPM]	160 ± 11	159 ± 11	171 ± 11	171 ± 11	162 ± 11	161 ± 11
跑步速度[m/s]	2.71 ± 0.38	2.68 ± 0.38	2.54 ± 0.38	2.51 ± 0.38	3.32 ± 0.54	3.32 ± 0.54
加加速度峰值[m/s ³]	24,660 ± 5202	24657 ± 5891	27,836 ± 5310	27,912 ± 614	40,343 ± 10,490	39,819 ± 11,207
加速度峰值[m/s ²]	124.7 ± 21.0	124.1 ± 21.5	135.9 ± 20.5	135.4 ± 22.1	185.9 ± 36.6	182 ± 35
外翻角速度峰值[° /s]	328.1 ± 77.0	343.8 ± 81.9	324.6 ± 71.6	341.2 ± 75.9	466.7 ± 121.2	490.2 ± 118.5
内外侧加速度计范围[m/s ²]	93.0 ± 22.6	95.2 ± 25.8	105.0 ± 19.4	107.2 ± 22.6	165 ± 40.4	167.4 ± 43.6
足跟接触[%]	61.7 ± 10.8	59.3 ± 11.3	62.8 ± 8.6	60.5 ± 9.7	67.4 ± 5.9	65.4 ± 6.5
足跟压力峰值[kPa]	180.1 ± 69.5	175.5 ± 65.7	207.1 ± 65.7	205.4 ± 68.4	382.3 ± 87.2	372.9 ± 91.5
足趾接触[%]	70 ± 5.4	69.8 ± 4.8	70.9 ± 5.9	70.7 ± 5.4	69.2 ± 5.4	69 ± 5.4
足趾压力峰值[kPa]	513.1 ± 102.9	509.7 ± 105	527.3 ± 100.2	523.9 ± 96.4	511 ± 86.7	516.8 ± 88.9

缩写：Acc.，加速度；Ev.Vel.，外翻速度；M/L，内外侧；Press.，压力。

与我们的两个假设相反，包裹式鞋子的加速度峰值或内外侧加速度与系带式没有差异。我们也没有发现足趾接触面积、足趾压力峰值和足跟压力峰值有任何差异。鉴于观察到的鞋类差异，我们认为在越野跑中使用可穿戴传感器对产品进行平衡测试是一种有效设计，应用于跑步产品，并可以扩展到评估其他生物力学干预。

贴合度的生物力学特征

包裹式鞋子表现出更合脚的生物力学特征，同时受试者更喜欢整体贴合的鞋子而非系带式鞋子。我们发现，在每一段越野跑中，与系带式鞋子相比，包裹式鞋子的外翻速度峰值显著降低。在更合脚的鞋子中也观察到了类似的效果(17)。这种减少可能暗示着，包裹式鞋子与更合脚的鞋之间存在更高的耦合度。一些受试者还提到，系带式鞋子会有更多的相对运动（或溢出）。未来的研究可能需要探索这种额平面速度和踝关节扭伤风险之间的联系。内侧和外侧脚踝扭伤是由于过度的外翻/内翻角速度和角度造成的(39, 40)，脚踝扭伤是越野跑者中最常见的损伤(38)。

我们在垂直负荷率的替代测量中没有发现包裹式鞋子和系带式鞋子之间的存在差异，而这与鞋子贴合度相关(17)。加速度峰值被提议作为基于穿戴的垂直负荷率的替代指标(18)，我们还研究了加加速度峰值，因为它提供了与垂直负荷率相同的时间导数。

加速度和加加速度的大小受垂直和前后方向支配，这表明这些测量对矢状面贴合度更敏感。我们没有发现加加速度峰值和加速度峰值存在差异，但我们发现外翻速度峰值存在差异：与矢状平面相比，包裹式鞋子在正面平面旋转中对鞋子贴合度产生更大的影响。

除了探索与贴合度相关的生物力学指标外，我们还探索了主观反馈与可穿戴设备指标之间的关系。之前已经使用足底压力建立了摩擦感和生物力学之间的联系(23)。我们发现包裹式鞋子的足跟接触面积显著增加，这有助于“下坡表现”的分数提高(表1)。超过三分之一的受试者报告（在自由形式的回答中，见补充材料）他们在下坡跑步时穿着系带式鞋子会向前滑动，这将导致足跟接触面积减少。足跟接触面积蕴含多种含义，因为包裹式鞋子在越野跑的每段均改善了足跟接触面积。我们推测，虽然在下坡跑步过程中脚可能会向前滑动，但在上坡跑步过程中脚可能会垂直向上滑动，因为跑步者倾向于向足中冲击模式过渡(19)，这对鞋面保持足跟与足中接触的能力提出了挑战。七例受试者表示，系带式鞋子存在更多鞋跟打滑现象，而这一指标是对鞋跟支撑力的定量估计。未来，可能需要新的技术来将鞋类滑动的主观反馈与生物力学结果（例如可以测量剪切力的足底压力）联系起来[迄今为止还只是原型(41)]。

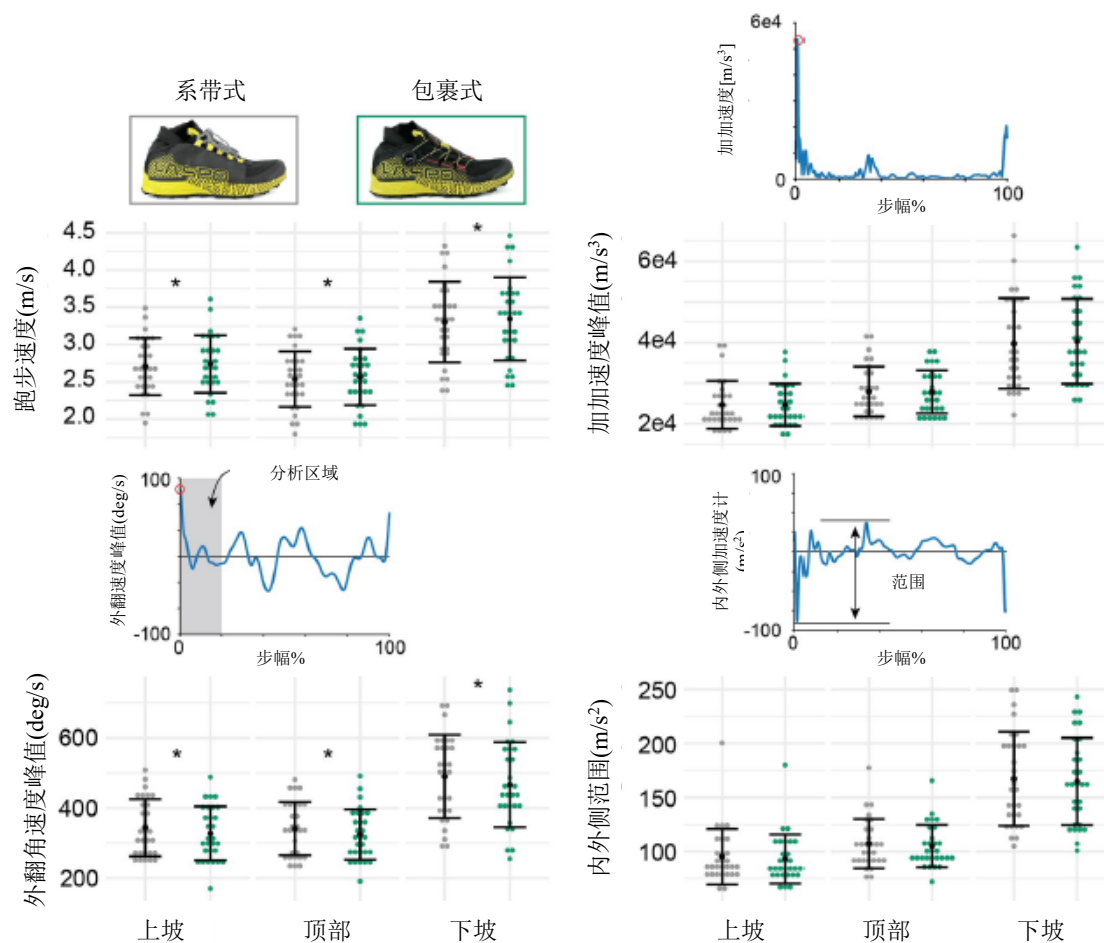


图3

基于IMU的结果。单个点代表受试者的平均表现。黑点和相邻的误差线代表研究平均值和标准差 ($N = 29$)。星号 (*) 表示在越野跑的不同各段, 系带式鞋子和包裹式鞋子之间的显著差异。加加速度峰值、外翻速度峰值(Ev.Vel.)和内外侧加速度范围(M/L范围)之上的部分是一个受试者和一个步幅的示例曲线, 以展示如何计算指标。

讨论：高度受控与生态有效

实验室严格控制因素与在生态有效环境中获得更多可变数据之间需要更多的权衡。总之, 与实验室相比, 越野跑中的可变性更大。这种可变性体现在温度、路线条件、受试者脚部位置、风等变化因素。虽然实验室可以严格控制这些变量, 但跑鞋需要在真实的条件下进行测试。数据收集条件的变化增加了生物力学结果的可变性, 导致需要招募足够的受试者并收集每个受试者的足够观察值 (例如步数) 以维持统计功效。

混合效应模型包括了每个受试者的单独的每一步, 允许在分析中考虑生物力学测量的个体间差异。至关重要的是, 鞋类特征 (如贴合度和外底特征) 通常旨在缓解造成这种可变性的确切因素, 如泥泞的岩石和陡峭的坡度。因此, 为了测试这些设计特征, 有必要在越野跑中对这些产品进行测试。对于我们研究的第二个目标, 我们进行了可重复的实验设计, 以在生态有效的环境中测试产品, 同时限制混淆变量。我们**通过GPS**将路线分为三个独特的部分 (上坡、平地和下坡) 将其作为协变量, 并指示所有参与者在路线的每个部分以相似的速度跑步; 同时使用一个可以在单次训练中完成四次而RPE没有实质性变化的越野跑循环, 以便受试者可以按照平衡的顺序进行测试。

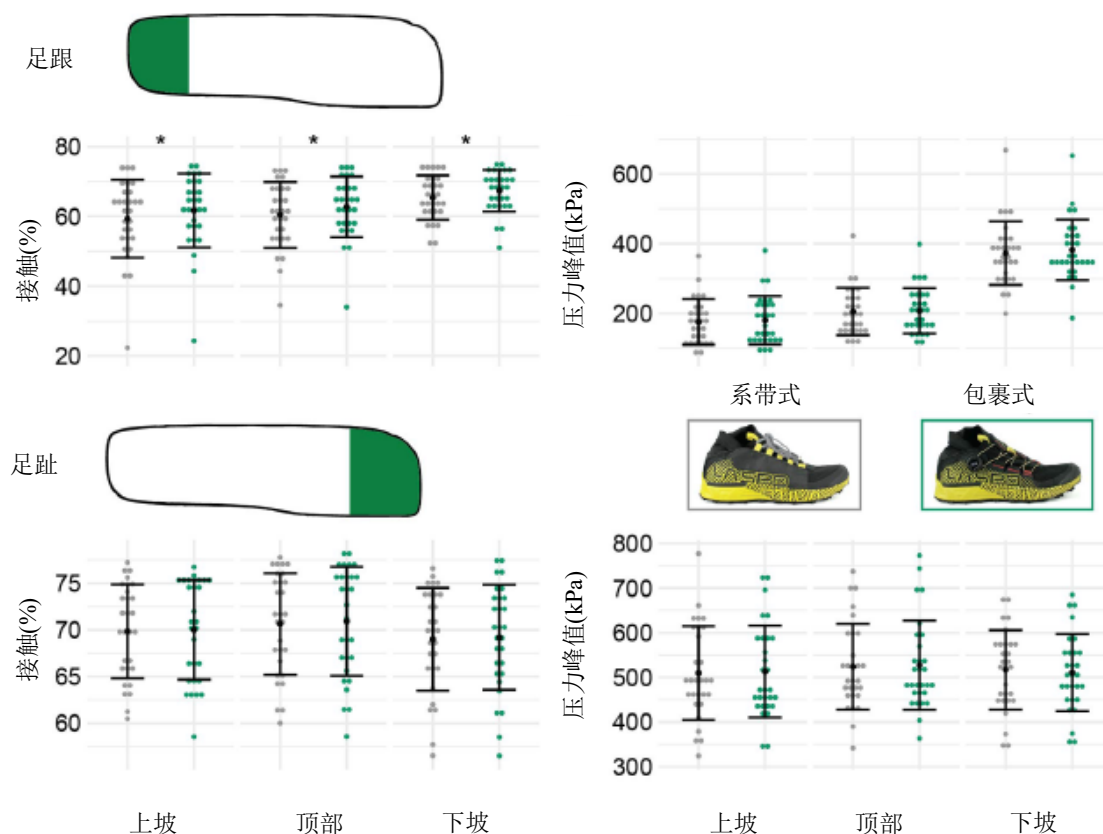


图4

足底压力结果。顶部为足跟结果，描绘了XSENSOR鞋垫中的足跟区域。底部为足趾结果，描绘了XSENSOR鞋垫中的足趾区域。单个点代表受试者的平均表现。黑点和相邻的误差线代表研究平均值和标准差 ($N = 29$)。星号 (*) 表示在越野跑的不同各段，系带式鞋子和包裹式鞋子之间的显著差异。

我们还测量了跑步速度、心率和感知的体力消耗等级，这些可以作为协变量纳入到统计模型中。例如，将跑步速度 (通过IMU测量，图3) 纳入统计模型 (公式3) 并没有改变研究结果；但它确实降低了每个IMU结果显著性发现的 p 值。

$$\text{结果} = \text{配置} + \text{速度} + (\text{配置} \times \text{受试者}) \quad (3)$$

越野跑地形对于评估鞋类特征的影响至关重要。在实验室中，通常在装有仪器的跑步机上评估鞋的特征 [例如 (42, 43)] 和生物力学适应性 (44)。跑步机跑步会激发独特的生物力学 [与地上跑步相比 (27)]，这可以通过改变跑步机皮带表面 (45) 或技术 (11) 来改变。这种独特的适应性可以影响鞋类的生物力学效应 (28)。

此外，从跑步机过渡到越野跑会产生独特的生物力学适应 (7)。鉴于我们在此研究的鞋子旨在用于越野跑，我们建议这类鞋子必须通过越野跑进行测试，从而发现特殊的生物力学适应性。尽管我们在试验中发现系带式鞋子和包裹式鞋子鞋面之前存在差异，但鞋类干预是否在室内和室外引发类似的生物力学效应仍是一个未决问题。

局限性

本研究多处存在局限性。实验者和受试者均无法对鞋子实施盲法。此外，鞋垫和IMU数据不能事后对齐。因此，考虑跑步速度的统计分析 (公式3) 不能与足底压力结果一起执行。

结论

与同一款鞋的系带版本相比，在定性和定量方面，包裹式鞋子具有更好的贴合度。未来，鞋子生产商和越野跑爱好者可能会更加偏好包裹式鞋子，以增强贴合度。

数据可用性声明

支持本文结论的原始数据将由作者提供，不存在任何不当保留。

道德声明

Pearl IRB审查并批准了涉及人类参与者的研究。患者/参与者提供了参与本研究的书面知情同意书。

作者贡献

概念化，E.C.H.、K.H.和D.F.；方法论E.C.H.、K.H.和D.F.。软件，E.C.H.和D.F.；验证，E.C.H.、K.H.和D.F.；形式分析，E.C.H.；调查，E.C.H.、K.H.和D.F.；资源，D.F.；数据监管，E.C.H.；撰写一初稿准备，E.C.H.；撰写一审核和编辑，E.C.H.、K.H.和D.F.；可视化，E.C.H.；监督，D.F.；项目管理，D.F.；融资收购，D.F.所有作者都对文章做出了贡献，并批准通过了提交的版本。

资助声明

本研究得到了BOA Technology Inc.的资助。资助者未参与研究设计、数据收集、数据分析和数据解释，未参与本文的撰写，未参与决定提交发表。所有作者声明没有其他竞争利益。

参考文献

1. Hoffman MD, Ong JC, Wang G. Historical analysis of participation in 161 km ultramarathons in North America. *Int J Hist Sport*. (2010) 27 (11):1877–91. doi: 10.1080/09523367.2010.494385
2. Scheer V. Participation trends of ultra endurance events. *Sports Med Arthrosc*. (2019) 27(1):3–7. doi: 10.1097/JSA.0000000000000198
3. de Waal SJ, Gomez-Ezeiza J, Venter RE, Lamberts RP. Physiological indicators of trail running performance: a systematic review. *Int J Sports Physiol Perform*. (2021) 16(3):325–32. doi: 10.1123/ijsp.2020-0812
4. Lemire M, Hureau TJ, Favret F, Geny B, Kouassi BYL, Boukhari M, et al. Physiological factors determining downhill vs uphill running endurance performance. *J Sci Med Sport*. (2021) 24(1):85–91. doi: 10.1016/j.jsams.2020.06.004

致谢

特此感谢 Hannah McDermott对La Sportiva鞋款的改装。感谢Kelsey Amoroso在受试者招募和数据收集方面提供的帮助。感谢Milena Singletary、Ife Olawore、Bethany Kilpatrick和Adam Luftglass在数据收集方面提供的帮助。感谢Brett Vladika在研究过程早期阶段给予的支持。

利益冲突

BOA Technology Inc.是这项研究的资助者，而本文作者是BOA Technology Inc.的员工。

出版商说明

本文所述的所有观点仅是作者的观点，不代表其所属组织或出版商、编辑和审稿人的观点。出版商对本文中评估的任何产品，或生产商做出的任何声明不做任何担保或背书。

补充材料

本文的补充材料参见 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2022.1076609/full#supplementary-material>.

5. Khassestarash A, Vernillo G, Martinez A, Baggaley M, Giandolini M, Horvais N, et al. Biomechanics of graded running: part II—joint kinematics and kinetics. *Scand J Med Sci Sports*. (2020) 30(9):1642–54. doi: 10.1111/sms.13735
6. Vercruyssen F, Tartaruga M, Horvais N, Brisswalter J. Effects of footwear and fatigue on running economy and biomechanics in trail runners. *Med Sci Sports Exerc*. (2016) 48(10):1976–84. doi: 10.1249/MSS.0000000000000981
7. Nicot F, Sabater-Pastor F, Samozino P, Millet GY, Rupp T. Effect of ground technicity on cardio-respiratory and biomechanical parameters in uphill trail running. *Eur J Sport Sci*. (2021) 22:1–11. doi: 10.1080/17461391.2021.1995507

8. Giandolini M, Horvais N, Rossi J, Millet GY, Morin JB, Samozino P. Effects of the foot strike pattern on muscle activity and neuromuscular fatigue in downhill trail running. *Scand J Med Sci Sports*. (2017) 27(8):809–19. doi: 10.1111/sms.12692
9. Worobets J, Wannop JW, Tomaras E, Stefanyshyn D. Softer and more resilient running shoe cushioning properties enhance running economy. *Footwear Sci*. (2014) 6(3):147–53. doi: 10.1080/19424280.2014.918184
10. Hoogkamer W, Kipp S, Kram R. The biomechanics of competitive male runners in three marathon racing shoes: a randomized crossover study. *Sports Med*. (2019) 49(1):133–43. doi: 10.1007/s40279-018-1024-z
11. Gantz AM, Derrick TR. Kinematics and metabolic cost of running on an irregular treadmill surface. *J Sports Sci*. (2018) 36(10):1103–10. doi: 10.1080/02640414.2017.1357829
12. Subramaniam A, Honert EC, Cigoja S, Nigg BM. The effects of shoe upper construction on mechanical ankle joint work during lateral shuffle movements. *J Sports Sci*. (2021) 39:1791–9. doi: 10.1080/02640414.2021.1898174
13. Harrison K, Feeney D, Pryhoda MK, Dicharry J, Nelson NM, Shelburne KB, et al. Alternative upper configurations during agility-based movements: part 2, joint-level biomechanics. *Footwear Sci*. (2021) 13(2):167–80. doi: 10.1080/19424280.2021.1859296
14. Pryhoda MK, Wathen RJ, Dicharry J, Shelburne KB, Feeney D, Harrison K, et al. Alternative upper configurations during agility-based movements: part 1, biomechanical performance. *Footwear Sci*. (2021) 13(1):91–103. doi: 10.1080/19424280.2020.1853824
15. Honert EC, Mohr M, Lam WK, Nigg S. Shoe feature recommendations for different running levels: a delphi study. *PLoS One*. (2020) 15(7):e0236047. doi: 10.1371/journal.pone.0236047
16. Benson LC, Clermont CA, Bošnjak E, Ferber R. The use of wearable devices for walking and running gait analysis outside of the lab: a systematic review. *Gait Posture*. (2018) 63:124–38. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.04.047
17. Hagen M, Hennig EM. Effects of different shoe-lacing patterns on the biomechanics of running shoes. *J Sports Sci*. (2009) 27(3):267–75. doi: 10.1080/02640410802482425
18. Napier C, Willy RW, Hannigan BC, McCann R, Menon C. The effect of footwear, running speed, and location on the validity of two commercially available inertial measurement units during running. *Front Sports Act Living*. (2021) 3:643385. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2021.643385>. doi: 10.3389/fspor.2021.643385
19. Mo S, Chan ZYS, Lai KKY, Chan PPK, Wei RXY, Yung PSH, et al. Effect of minimalist and maximalist shoes on impact loading and footstrike pattern in habitual rearfoot strike trail runners: an in-field study. *Eur J Sport Sci*. (2021) 21(2):183–91. doi: 10.1080/17461391.2020.1738559
20. Hohmann E, Reaburn P, Tettsworth K, Imhoff A. Plantar pressures during long distance running: an investigation of 10 marathon runners. *J Sports Sci Med*. (2016) 15(2):254–62. Available at: <https://www.jssm.org/researchjssm-15-254.xml#>
21. Escamilla-Martínez E, Gómez-Martín B, Fernández-Seguín LM, Martínez-Nova A, Pedrera-Zamorano JD, Sánchez-Rodríguez R. Longitudinal analysis of plantar pressures with wear of a running shoe. *Int J Environ Res Public Health*. (2020) 17(5):1707. doi: 10.3390/ijerph17051707
22. Dobson JA, Riddiford-Harland DL, Steele JR. Effects of wearing gumboots and leather lace-up work boots on plantar loading when walking on a simulated underground coal mine surface. *Footwear Sci*. (2018) 10(3):139–48. doi: 10.1080/19424280.2018.1486461
23. Chen H, Nigg BM, de Koning J. Relationship between plantar pressure distribution under the foot and insole comfort. *Clin Biomech*. (1994) 9(6):335–41. doi: 10.1016/0268-0033(94)90062-0
24. Hennig EM, Valiant GA, Liu Q. Biomechanical variables and the perception of cushioning for running in Various types of footwear. *J Appl Biomech*. (1996) 12(2):143–50. doi: 10.1123/jab.12.2.143
25. Osborne-Crowley K. Social cognition in the real world: reconnecting the study of social cognition with social reality. *Rev Gen Psychol*. (2020) 24(2):144–58. doi: 10.1177/1089268020906483
26. Parsons TD. Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Front Hum Neurosci*. (2015) 9:660. doi: 10.3389/fnhum.2015.00660
27. Nigg BM, De Boer RW, Fisher V. A kinematic comparison of overground and treadmill running. *Med Sci Sports Exerc*. (1995) 27(1):98–105. doi: 10.1249/00005768-199501000-00018
28. Chambon N, Delattre N, Guéguen N, Berton E, Rao G. Shoe drop has opposite influence on running pattern when running overground or on a treadmill. *Eur J Appl Physiol*. (2015) 115(5):911–8. doi: 10.1007/s00421-014-3072-x
29. Hettiarachchi IT, Hanoun S, Nahavandi D, Nahavandi S. Validation of polar OH1 optical heart rate sensor for moderate and high intensity physical activities. *PLoS One*. (2019) 14(5):e0217288. doi: 10.1371/journal.pone.0217288
30. Miller JE, Nigg BM, Liu W, Stefanyshyn DJ, Nurse MA. Influence of foot, leg and shoe characteristics on subjective comfort. *Foot Ankle Int*. (2000) 21(9):759–67. doi: 10.1177/107110070002100908
31. Bailey GP, Harle R. Assessment of foot kinematics during steady state running using a foot-mounted IMU. *Procedia Eng*. (2014) 72:32–7. doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.009
32. Zrenner M, Gradl S, Jensen U, Ullrich M, Eskofier BM. Comparison of different algorithms for calculating velocity and stride length in running using inertial measurement units. *Sensors (Basel)*. (2018) 18(12). Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6308955/>. doi: 10.3390/s18124194
33. Honert EC, Nigg SR, Nigg BM, Blades S. Validation of running speed across different speeds and slopes using Kinetix sensory insoles. Kinetix. 2022. Available at: <https://www.kinetix.tech/white-paper-002-running-speed>
34. Skog I, Handel P, Nilsson J, Rantakokko J. Zero-Velocity detection—an algorithm evaluation. *IEEE Trans Biomed Eng*. (2010) 57(11):2657–66. doi: 10.1109/TBME.2010.2060723
35. Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J Stat Soft*. (2015) 67(1):1–48. Available at: <http://www.jstatsoft.org/v67/i01/>. doi: 10.18637/jss.v067.i01
36. Lenth RV, Buerkner P, Herve M, Jung M, Love J, Miguez F, et al. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. 2022. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
37. Wilkinson RD, Mazza MR, Feeney DF. Rethinking the statistical analysis of neuromechanical data. *Exerc Sport Sci Rev*. (2023) 51(1):43–50. doi: 10.1249/JES.0000000000000308
38. Hamill J, Hercksen J, Salzano M, Udofa A, Trudeau MB. The prevalence of injuries in trail running: influence of trails, terrains and footwear. *Footwear Sci*. (2022) 14(2):113–21. doi: 10.1080/19424280.2022.2048901
39. Wade FE, Mok KM, Fong DTP. Kinematic analysis of a televised medial ankle sprain. *Asia-pacific journal of sports medicine, arthroscopy. Rehabil Technol*. (2018) 12:12–6. doi: 10.1016/j.asmart.2018.02.001
40. Kristianslund E, Bahr R, Krosshaug T. Kinematics and kinetics of an accidental lateral ankle sprain. *J Biomech*. (2011) 44(14):2576–8. doi: 10.1016/j.jbiomech.2011.07.014
41. Miller JD, Miller AJ, Frazer LL, Templin TN, Eliason TD, Berklund CJ. A soft 3-dimensional force sensor for in-shoe ground reaction force measurement. In Ottawa. CAN. North American Congress of Biomechanics (NACOB) (2022). <https://nacob.org/wp-content/uploads/2022/08/WednesdayThursday.pdf>
42. Clarke TE, Frederick EC, Cooper LB. Effects of shoe cushioning upon ground reaction forces in running. *Int J Sports Med*. (1983) 04(4):247–51. doi: 10.1055/s-2008-1026043
43. Hoitz F, Mohr M, Asmussen M, Lam WK, Nigg S, Nigg B. The effects of systematically altered footwear features on biomechanics, injury, performance, and preference in runners of different skill level: a systematic review. *Footwear Sci*. (2020) 0(0):1–23. doi: 10.1080/19424280.2020.1773936
44. Honert EC, Ostermair F, von Tschamer V, Nigg BM. Changes in ankle work, foot work, and tibialis anterior activation throughout a long run. *J Sport Health Sci*. (2022) 11(3):330–8. doi: 10.1016/j.jshs.2021.02.003
45. Frederick E. Measuring the effects of shoes and surfaces on the economy of locomotion. In: Nigg BM, Kerr BA, editors. *Biomech Aspects Sport Shoes Playing Surf*. University Printing, Calgary (1983). p. 93–106.