

文章编号: 1004-7220(2021)05-0684-08

# 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异

梅齐昌<sup>1,2,3</sup>, 相亮亮<sup>1,2,3</sup>, 李建设<sup>1,2</sup>, Justin FERNANDEZ<sup>1,2,3</sup>, 顾耀东<sup>1,2,3</sup>

(1. 宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 大健康研究院, 浙江 宁波 315211;

3. 新西兰奥克兰大学 生物医学工程研究所, 奥克兰 1010)

**摘要:**目的 通过一维统计参数映射(statistical parametric mapping, SPM)对比分析男、女性跑者及左右侧地面反作用力(ground reaction force, GRF)差异。方法 30名男、女性跑者在测力跑台上以12 km/h速度进行跑步测试,记录连续5个支撑期GRF,采用一维统计参数映射独立样本 $t$ 检验与配对样本 $t$ 检验分别对比男、女性跑者及左右侧GRF差异。结果 男、女性跑者的垂直平均负荷加载率(vertical average loading rate, VALR)左右侧均存在不对称,且男性跑者左侧VALR显著高于女性,而右侧无显著差异;男女性跑者右侧垂直GRF在蹬离期及横向GRF在落地期存在差异,男、女性跑者左侧横向GRF在落地期及支撑中期存在差异;男性跑者左右侧前后GRF在蹬离期、垂直GRF在落地和蹬离期及横向GRF在落地期均在存在差异;女性跑者左右侧GRF仅在垂直方向的落地期和蹬离期存在差异。结论 介绍SPM在GRF数据分析中的应用,阐释相关步骤及原理,对比SPM连续值检验与特征值检验的差异,并讨论参数性SPM与非参数性SPM的差异与特征,为该方法在运动生物力学研究中的应用提供参考。通过对男、女性跑者间及左右侧GRF对比分析发现在落地期、支撑中期及蹬离期等阶段的性别差异及左右侧对称性差异,相关结果为后续进一步探究跑步相关损伤原理及防治措施铺垫基础。

**关键词:**统计参数映射;一维数据;地面反作用力;对称性;性别差异

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.004

## Analysis of Ground Reaction Forces during Running Based on One-Dimensional Statistical Parametric Mapping

MEI Qichang<sup>1,2,3</sup>, XIANG Liangliang<sup>1,2,3</sup>, LI Jianshe<sup>1,2</sup>, Justin FERNANDEZ<sup>1,2,3</sup>, GU Yaodong<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Research Academy of Grand Health, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Auckland Bioengineering Institute, University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand)

**Abstract: Objective** To analyze the difference in ground reaction force (GRF) between male and female runners and between left and right limbs using the one-dimensional statistical parametric mapping (SPM). **Methods** Thirty male and female runners participated the running test on force treadmill at the speed of 12 km/h. GRF of consecutive five steps were recorded. The independent-sample  $t$  test and paired-sample  $t$  test in the SPM package were used to check the male vs female and right limb vs left limb differences. **Results** Male and female runners showed inter-limb asymmetry in vertical average loading rate (VALR), and the VALR of male runners was significantly higher than that of female runners in the left limb, while no significant differences were found in the right limb. Male and female runners showed significant differences in the right vertical GRF during push-off and

收稿日期:2020-06-22; 修回日期:2020-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(81772423),中新政府博士研究生奖学金项目

通信作者:顾耀东,教授,博士生导师,E-mail: guyaodong@hotmail.com

medial-lateral GRF during landing, while left medial-lateral GRF presented significant differences during landing and mid stance. Male runners showed right limb vs left limb significance in the anterior-posterior GRF during push-off, vertical GRF during landing and push-off and medial-lateral GRF during landing, while female runners exhibited right limb vs left limb significance in vertical GRF during landing and push-off. **Conclusions** This study introduced the application of SPM in statistical analysis of GRF, elaborated the procedures and theory, compared the test of time-series data in SPM and discrete value with traditional statistics, and discussed the difference and features in SPM and SnPM, thus providing references for the application in data analysis of sports biomechanics. Comparison in the male vs female and right limb vs left limb revealed the genders and inter-limb symmetrical differences in the landing, mid-stance and push-off phases during stance. The research findings laid the foundation for future investigation of mechanism in running related injuries and strategy of prevention and treatment.

**Key words:** statistical parametric mapping (SPM); one-dimensional data; ground reaction force (GRF); symmetry; gender difference

运动生物力学中的数据多呈一维特征,如角度、力矩和地面反作用力(ground reaction force, GRF)等;传统数据统计多选取一维数据上某特征值,如峰值(或活动度)、最大力矩或最大冲击力等进行对比分析<sup>[1-2]</sup>。生物力学研究对各阶段的动作分析能够评估损伤的风险及临床干预疗效。从研究假设的角度,若是对连续数据的随机假设,则统计分析也需采用连续性数据模型检验;相反,若是基于某特征点的假设,在连续值的统计分析中则会产生随机数据偏差<sup>[3-4]</sup>。统计参数映射(statistical parametric mapping, SPM)是基于时空平滑及标准化后数据的检验,已运用到角度、力矩及肌电等一维数据的统计学分析<sup>[5-7]</sup>。SPM基于随机场理论(random field theory, RFT)进行拓扑分析,计算数据群集超过阈值( $t$ )的统计学显著性( $P$ )<sup>[8]</sup>。根据对特征值或一维数据的检验,SPM可用传统的统计学方法分析特征值(SPM0d)及基于RFT分析一维数据(SPM1d)的差异<sup>[3]</sup>。另外,针对检验数据的正态(高斯)分布性,可分为参数性及非参数性,即SPM1d和一维统计非参数映射(SnPM1d)<sup>[3]</sup>。与传统统计学类似,根据一维参数的特点及研究假设,可进行 $t$ 检验、方差分析、多变量分析、事后多重比较(post-hoc test)分析等<sup>[3,4,6-7,9-10]</sup>。

跑步是一项重要的身体活动,在生物力学研究中已有广泛关注<sup>[9-14]</sup>。GRF常分析的特征参数包括被动冲击力峰值(A)、主动蹬力峰值(B)、垂直负荷加载率(vertical loading rate, VLR)及冲量(impulse)等[见图1(a)];然而,明确连续性GRF的非特征值外其他数据的差异也具有重要意义。基于SPM在

特征值(0 d)及一维变量(1 d)的应用,本文以SPM分析男、女性跑者及左右侧GRF为例,首先检查正态性;其次采用SPM0d检验特征值;再开展SPM1d或SnPM1d检验,分别用独立样本(男、女性跑者)及配对样本(左右侧)的SPM或SnPM数据检验,旨在介绍独立样本与配对样本SPM在生物力学一维数据统计分析中的应用,以及通过分析男、女性跑者及左右侧GRF以揭示性别和左右侧差异及潜在冲击相关的指标不同。基于本文示例,为后续SPM在生物力学数据的分析应用及跑步损伤相关的机制研究提供启示和参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

招募30名跑者,男、女性各15名。其中,男性年龄(30.2±4.7)岁,身高(175.8±2.8)cm,体质量(71.4±3.5)kg;女性年龄(29.7±4.2)岁,身高(166.7±3.5)cm,体质量(60.6±2.5)kg。志愿者均有跑步的运动习惯,每周平均跑量约20 km,且右腿为优势腿;无任何心血管、呼吸及运动系统功能异常或疾病。测试前向跑者介绍本研究的测试流程与目的,并签署相关知情同意说明书。

### 1.2 测试仪器及流程

测试在双传送带 Bertec 测力跑台上进行[见图1(b)],与12摄像头Vicon三维捕捉系统(Vicon公司,英国)同步,通过Vicon Nexus 2.8.2控制;测试前跑者均在跑台上以自选舒适速度进行10 min热身并适应跑台;测试开始后跑者先开始慢跑,速

度逐步调至 3.33 m/s,待跑者适应跑速且跑姿稳定后,连续记录 2 min 的 GRF 数据,选取左右侧各 5 个

连续步态支撑期的数据,各跑者均进行 3 次测试,测力台频率设定在 1 kHz。

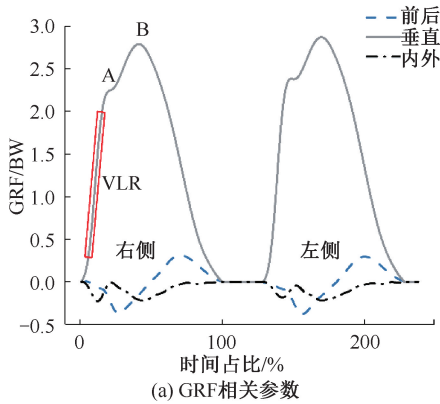


图1 GRF 相关测量参数与测力跑台示意图

Fig.1 Illustration of parameters in GRF and force treadmill (a) GRF-related parameters, (b) Force treadmill

### 1.3 数据处理

通过 Vicon Nexus 2.8.2 导出 GRF 数据 (CSV 格式),后运用 MATLAB 程序进行 100 Hz 的 Butterworth 零滞后 4 阶低通滤波;截取左右侧各连续 5 步支撑期数据,以垂直 GRF 阈值 20 N 为落地和离地节点<sup>[10]</sup>,采用 B-样条基曲线 (cubic B-Spline) 将 GRF 数据标准化至 101 个数据点<sup>[10,15]</sup>;均按体重 (body weight, BW) 作标准化,男、女性受试者左右侧 GRF 分别取 3 组平均,获得男、女性及左右侧 GRF 平均后的数据 (即男女各 15 组,共计 30 组和左右各 15 组,共计 30 组) 用于 SPM 或 SnPM 统计分析。计算男、女性跑者及左右侧垂直平均负荷加载率 (vertical average loading rate, VALR)<sup>[16]</sup> 用于 SPM0d 特定值的统计检验。

### 1.4 统计学分析

首先检验残差值是否满足正态分布,若符合正态分布则采用 SPM 进行检验,若不符合正态分布则采用 SnPM 检验。SPM 与 SnPM 的差异在于 SPM 参数性模型是假设所有变量均满足正态分布,后通过计算均值及标准差等少量参数间的分布及随机性;而 SnPM 非参数性模型则不基于任何分布特征,仅直接通过各组数据进行检验<sup>[3]</sup>。

分别采用独立样本  $t$  检验对男、女性跑者及配对样本  $t$  检验对左、右侧 GRF 数据进行检验,依据公式进行 SPM 或 SnPM 检验:

$$\text{SPM\&SnPM}(t) =$$

$$\frac{\bar{y}_1(t) - \bar{y}_2(t)}{\sqrt{\frac{1}{n_1} \text{var}[y_1(t)] + \frac{1}{n_2} \text{var}[y_2(t)]}} \quad (1)$$

式中:  $t$  具有方向性,即  $y_1$  与  $y_2$  之间的大小关系<sup>[16]</sup>。 $y_1(t)$  与  $y_2(t)$  表示两组变量,独立样本  $t$  检验指男、女性跑者 GRF,配对样本  $t$  检验指左、右侧 GRF; $\bar{y}_1(t)$  与  $\bar{y}_2(t)$  分别指两组变量对应各点均值, $n_1$  与  $n_2$  分别指两组变量的样本量,  $\text{var}[y_1(t)]$  与  $\text{var}[y_2(t)]$  指两组变量的方差。

基于随机场理论 (random field theory, RFT)<sup>[8]</sup>,通过下式计算两组数据间各连续点的最大差异  $t(q)_{\max}$ ,若超过阈值 ( $t_{1D}^*$ ) 水平,则有统计学显著性 ( $\alpha=0.05$ )。

$$P(t(q)_{\max} > t_{1D}^*) =$$

$$1 - \exp\left(-\int_{t_{1D}^*}^{\infty} f_{1D}(x) dx - ED\right) = \alpha \quad (2)$$

式中:  $t(q)_{\max}$  为两组数据间的最大差异;  $t_{1D}^*$  为 SPM 或 SnPM 统计差异 ( $\alpha=0.05$ ) 阈值;  $f_{1D}(x)$  为  $t$  检验的概率密度函数;  $ED$  为平滑相关的欧拉 (Euler) 密度函数。

本文先进行正态性检验;基于正态性,选用 SPM 或 SnPM 进行独立样本 (男、女性跑者) 或配对样本 (左、右侧) 数据检验,分别运用 SPM 独立样本  $t$  检验对比分析男、女性跑者三维 GRF 数据,及 SPM

配对样本  $t$  检验对比分析左右侧 GRF 数据,显著性水平设定在 0.05。

## 2 研究结果

### 2.1 SPM0d 对特征值的检验

男、女性跑者及左右侧下肢 VALR 均符合正态

分布,使用 SPM0d 独立样本  $t$  检验男、女性跑者左及右侧 VALR,发现男性跑者左侧显著高于女性左侧,右侧则无显著差异;使用 SPM0d 配对样本  $t$  检验发现,男性跑者右侧显著小于左侧,而女性右侧显著大于左侧。

表 1 SPM0d 对比男女跑者及左右侧下肢间的垂直平均负荷加载率

Tab.1 Comparison of VALR in male vs female and right limb vs left limb using SPM0d

跑者	VALR/ (BW · s <sup>-1</sup> )		配对样本 $t$ 检验 (左 vs 右)	
	右	左	$t$	$p$
男 ( $n=15$ )	83.04±11.12	87.27±10.67	-2.6	0.01
女 ( $n=15$ )	83.54±8.4	74.9±10.1	4.71	0.001
独立样本 $t$ 检验 (男 vs 女)	$t$	-0.14	-	-
	$p$	0.445	-	-

### 2.2 SPM1d 独立样本 $t$ 检验

检验男性(黑色)及女性(红色)跑者右侧和左侧 GRF 的正态性,发现男、女性跑者右侧前后(X)

和内外(Z)方向的 GRF 符合正态性,而垂直(Y)方向的 GRF 不符合正态分布(见图 2)。

对前后和内外方向 GRF 进行 SPM1d 独立样本

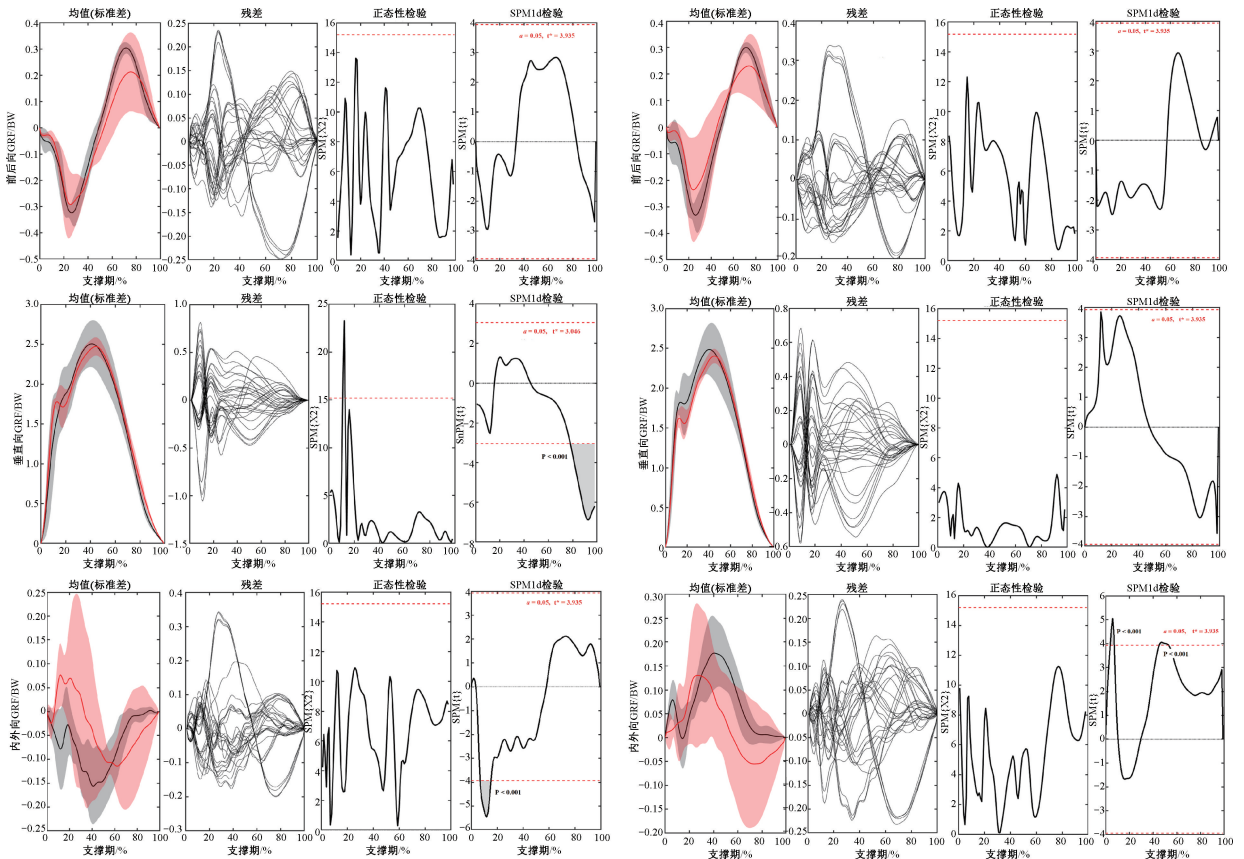


图 2 男(黑)、女(红)性跑者不同侧前后(X)、垂直(Y)及内外(Z)方向地面反作用力正态性及 SPM/SnPM 检验

Fig.2 Normality and SPM/SnPM test of ground reaction forces in anterior-posterior (X), axial (Y) and medial-lateral (Z) directions between male (black) and female (red) runners (a) The right limb, (b) The left limb



*t* 检验,男、女性跑者内外 GRF 在支撑期 8% ~ 16% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t^* = 3.935$ ),呈显著性差异 ( $P < 0.001$ );对垂直 GRF 的 SnPM1d 进行独立样本 *t* 检验,发现在 80% ~ 100% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t^* = 3.046$ )呈显著性差异 ( $P < 0.001$ )。

同理,对男、女性跑者左侧 GRF 正态分析均负荷正态分布,采用 SPM 独立样本 *t* 检验,发现在内

外方向支撑期 5% ~ 8% 和 47% ~ 54% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t^* = 3.935$ )表现出显著性 ( $P < 0.001$ )。

### 2.3 SPM1d 配对样本 *t* 检验

分别检验男、女性跑者的右侧(黑色)和左侧(红色)GRF 的正态性,发现男性跑者的右侧前后 (*X*)GRF 符合正态性,而垂直 (*Y*)和内外 (*Z*)GRF 不符合正态分布(见图 3)。

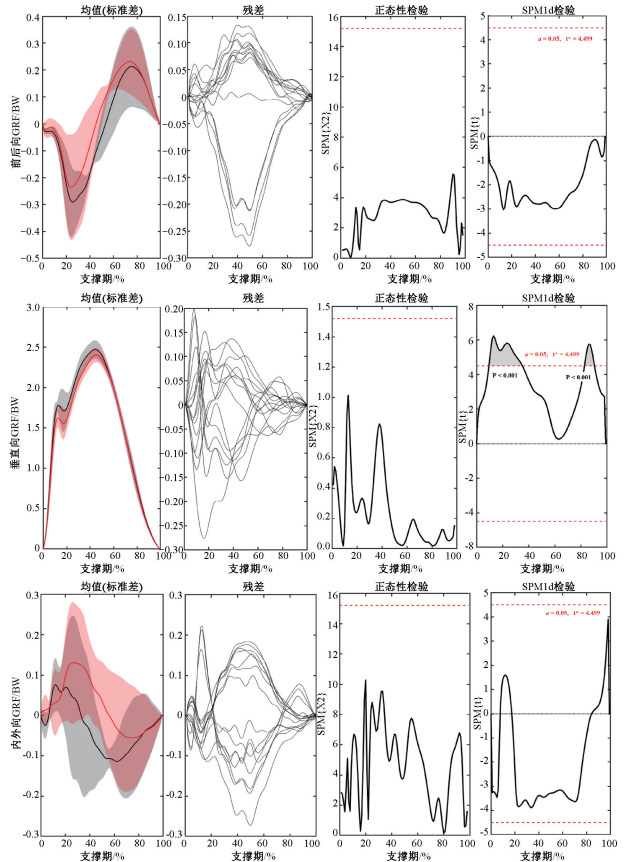
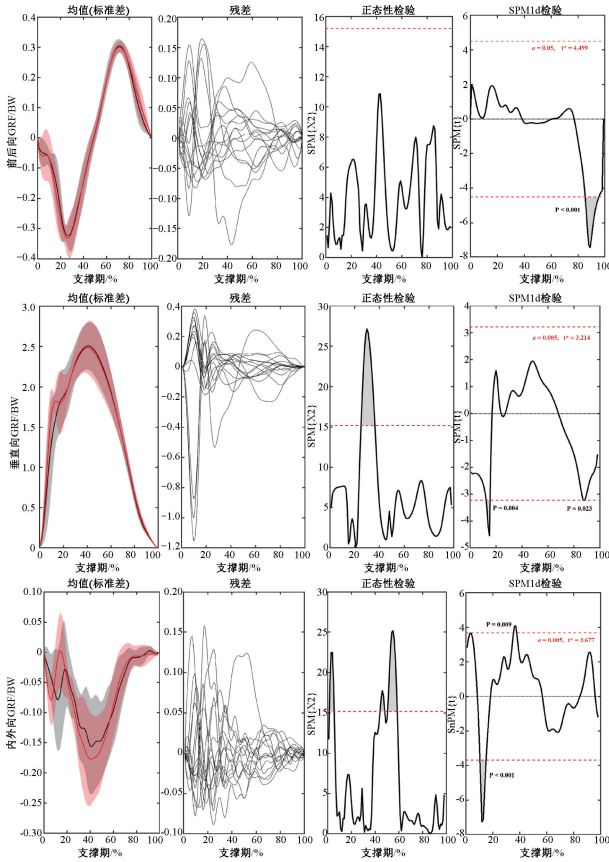


图 3 不同性别跑者左(红)右(黑)侧前后(*X*)、垂直(*Y*)及内外(*Z*)方向地面反作用力的正态性及 SPM/SnPM 检验

Fig.3 Normality and SPM/SnPM test of right (black) and left (red) ground reaction forces in anterior-posterior (*X*), axial (*Y*) and medial-lateral (*Z*) directions in runners with different genders (a) Male runners, (b) Female runners

基于正态性特征,对男性跑者前后 GRF 采用 SPM1d 配对样本 *t* 检验,发现在支撑期 87% ~ 94% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t^* = 4.499$ ),呈显著性 ( $P < 0.001$ );对垂直及内外方向 GRF 采用 SnPM1d 配对样本 *t* 检验,发现垂直 GRF 在支撑期 14% ~ 16% 和 88% ~ 89% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t = 3.214$ ),呈显著性 ( $P = 0.004, P = 0.023$ );内外 GRF 在支撑期 12% ~ 16% 和 36% ~ 39% 阶段超过阈值 ( $\alpha = 0.05, t^* = 3.677$ ),呈显著性 ( $P < 0.001, P = 0.009$ )。

同理,对女性跑者的右侧(黑色)和左侧(红色)三维 GRF 进行正态性检验,均符合正态分布,采用 SPM 配对样本 *t* 检验,发现二者在前后 (*X*)及内外 (*Z*)方向 GRF 无显著性差异,而在垂直 (*Y*)方向支撑期的 11% ~ 36% 和 84% ~ 91% 阶段超过差异阈值 ( $\alpha = 0.05, t = 4.499$ )表现出显著性 ( $P < 0.001$ )。

### 3 讨论

本文基于 SPM0d 及 S(n)PM1d 检验方法对男、

女性跑者及左右侧 GRF 特征值 VALR 及支撑期连续值作统计分析,介绍了具体的相关原理和步骤。对 VALR 的 SPM0d 分析发现,男、女性跑者左右侧 VALR 均存在不对称的情况,且男性跑者左侧 VALR 显著高于女性,而右侧无显著差异;对支撑期 GRF 的 SPM/SnPM 分析发现,男、女性跑者右侧垂直 GRF 支撑蹬离期及横向 GRF 落地期存在差异,男、女性跑者左侧横向 GRF 落地期及支撑中期存在差异;男性跑者左右侧前后 GRF 在蹬离期、垂直 GRF 在落地和蹬离期及横向 GRF 在落地期均在存在差异;女性跑者左右侧仅垂直 GRF 在落地期和蹬离期存在差异。

SPM 在生物力学一维数据统计分析中有广泛应用<sup>[17]</sup>。鉴于其开源 (www.spm1d.org),可兼容 MATLAB 及 Python 等平台,大量用在连续性关节运动学、动力学、关节接触力、肌电激活与肌力及足底压力等数据分析<sup>[3,6-7,9,18-19]</sup>。假设变量与采用的数据检验方法紧密相关,分析特征值可采用 0 d 数据检验方法;然而,对 1 d 变量的假设则需采用连续性数据检验<sup>[3,7]</sup>。本文为验证特征值 VALR 的假设,采用 SPM0d 的配对样本  $t$  及独立样本  $t$  检验,揭示男、女性跑者间的差异及自身左右侧的对称性问题,VALR 结果与近期相关研究结果相近<sup>[20]</sup>。本文发现,男、女性跑者间差异主要在非优势肢体侧;左右对称性比较又揭示了优势侧与非优势侧的冲击应力特点,揭示了可能与跑步损伤相关的潜在 GRF 因素<sup>[21-25]</sup>。

除特征值数据检验外,揭示连续数集的差异对全面理解该变量具有重要意义。男性跑者的右侧垂直 GRF 在蹬离期显著低于女性跑者,该阶段的负荷常与跑步相关的过劳损伤相关<sup>[26]</sup>;而落地期女性跑者较大的内外 GRF 表明,下肢髌关节外展肌群、股后肌群及小腿后侧肌群的作用较大<sup>[27]</sup>。上述 GRF 差异均与女性跑者有较高的跑步相关损伤有关<sup>[28]</sup>。SnPM 的配对样本  $t$  检验可检验肢体左右对称性,且两侧对称性会影响运动表现及损伤风险<sup>[29-30]</sup>。男性跑者的左右侧三维 GRF 均表现出差异;在落地期,左侧垂直 GRF 显著大于右侧,表现出不对称差异,与 SPM0d 中左侧 VALR 显著大于右侧相一致;在蹬离期,左侧前后 GRF 显著大于右侧,与上文类似,非优势侧有较大的过度负荷累积。在落

地期,内外 GRF 的差异亦表明非优势侧下肢相关肌群作用显著,表现出较大 GRF,与近期相关跑台测试的双侧不对称性相关结论一致<sup>[21-22]</sup>。不同于男性的对称性差异,女性跑者仅在落地期与蹬离期的垂直 GRF 有差异,且优势侧显著大于非优势侧,该差异性可能与性别间的运动机能表现及动员相关<sup>[24,31]</sup>。

基于正态性的 SPM/SnPM 检验,两者共同点是  $t$  检验均具有方向性,即  $y_1$  与  $y_2$  间的大小差异;且可设定单尾或双尾,即两者间的差异( $t$  值)是否超过正或负方向的  $t^*$  阈值。两者不同点在 SPM 的参数性分析通常是在广义线性模型 (general linear model, GLM) 范畴内,并运用该模型框架分析连续的多维数据,随后进行参数性推测及随机场理论的多次对比较正<sup>[5,8]</sup>;后者 SnPM 则是不基于任何随机模型的置换检验,需要对数据进行重复迭代,故计算速度较前者更慢、耗时更长<sup>[3]</sup>。本文中数据分析的电脑型号及配置是 DELL Latitude E5570, Windows 10 64 位系统, i7-6820HQ 的八核处理器 (2.70 GHz),采用 MATLAB R2018(学术版)软件对  $30 \times 101$  矩阵数集的 SPM 及 SnPM 计算时间分别为 2.06、3.37 s。Pataky 等<sup>[3]</sup>认为,SPM 与 SnPM 的最大差异在于检验数据的正态性,前者需首先进行正态分布检验,再选用 SPM 或 SnPM;而后者则对无分布特征或未知分布特征的数据均适用。当数据符合正态性时,SnPM 检验结果则与 SPM 检验结果出现耦合。尽管后者处理分析耗时比前者略长,对于相对小样本量的数据检验,SnPM 对于未知正态性的数据则更适合;相反,对于较大数据量矩阵的统计学计算,前者的检验速率则更快。

关于本文结果,以下几点需考虑:① 使用 SPM 或 SnPM 时需考虑对原始数据的平滑及数点标准化,目前常用 B-样条基曲线 (B-Spline) 平滑,该方法可表示且设计自由型曲线、曲面,最大化减少关键点的丢失,以弱化对潜在数据群集差异的中和<sup>[15]</sup>;② 横向及纵向 GRF 数据中的异常值可能是测力跑台传送带与测力台界面的噪声造成;③ SPM 还可进行方差分析、多变量分析及事后多重比较 (post-hoc test) 分析等数据检验,可在将来其他数据中应用。

## 4 结论

本文使用 SPM 及 SnPM 分析男、女性跑者及左右侧的三维 GRF 数据统计学差异,介绍原始数据的平滑、数据点长度标准化、正态性检验及 SPM/SnPM 分析的具体步骤,讨论 SPM 与 SnPM 之间的差异与特征,为该方法在运动生物力学研究中的应用提供启示和参考。同时,本文采用 SPM/SnPM 对男、女性跑者及左右侧 GRF 进行检验分析,详细揭示支撑期内落地期、支撑中期及蹬离期等具体阶段的性别差异及左右侧对称性差异,相关结果为后续进一步探究及预防跑步相关损伤铺垫基础。

## 参考文献:

- [ 1 ] RICHTER C, O'CONNOR NE, MARSHALL B, *et al.* Comparison of discrete-point vs. dimensionality-reduction techniques for describing performance-related aspects of maximal vertical jumping [J]. *J Biomech*, 2014, 47(12): 3012-3017.
- [ 2 ] 梅齐昌, 顾耀东, 李建设. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析 [J]. *体育科学*, 2015, 35(6): 34-40.
- [ 3 ] PATAKY TC, VANRENTERGHEM J, ROBINSON MA. Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis [J]. *J Biomech*, 2015, 48(7): 1277-1285.
- [ 4 ] PATAKY TC, VANRENTERGHEM J, ROBINSON MA. The probability of false positives in zero-dimensional analyses of one-dimensional kinematic, force and EMG trajectories [J]. *J Biomech*, 2016, 49(9): 1468-1476.
- [ 5 ] PENNY WD, FRISTON K, ASHBURNER J, *et al.* Statistical parametric mapping: The analysis of functional brain images [M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [ 6 ] PATAKY TC. One-dimensional statistical parametric mapping in Python [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2012, 15(3): 295-301.
- [ 7 ] PATAKY TC, ROBINSON MA, VANRENTERGHEM J. Vector field statistical analysis of kinematic and force trajectories [J]. *J Biomech*, 2013, 46(14): 2394-2401.
- [ 8 ] ADLER RJ, JONATHAN ET. *Ramdon fields and geometry* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [ 9 ] MEI Q, GU Y, XIANG L, *et al.* Foot pronation contributes to altered lower extremity loading after long distance running [J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 1-12.
- [ 10 ] 梅齐昌, 相亮亮, 孙冬, 等. 长距离跑后“足外翻”姿态增加

膝关节内侧接触力:基于 OpenSim 肌骨建模及机器学习预测的研究 [J]. *体育科学*, 2019, 39(9): 51-59.

- [ 11 ] 顾耀东, 孙冬, FEKETE GUSZTÁV, 等. “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*, 2019, 55(1): 61-74.
- [ 12 ] 郝琦, 李建设, 顾耀东. 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*, 2012, 32(7): 91-97.
- [ 13 ] 张力文, 马云茹, 朱晓兰, 等. 跑鞋与着地方式对跑步损伤的影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 76-81.  
ZHANG LW, MA YR, LI XL, *et al.* The influence of running shoes and foot-strike patterns on running injuries [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 76-81.
- [ 14 ] 杨洋, 王熙, 傅维杰. 着鞋和触地方式对慢跑时足部受力特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(2): 154-160.  
YANG Y, WANG X, FU WJ. The influence of shod conditions and foot-strike patterns on foot force characteristics during jogging [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(2): 154-160.
- [ 15 ] WARMENHOVEN J, HARRISON A, ROBINSON MA, *et al.* A force profile analysis comparison between functional data analysis, statistical parametric mapping and statistical non-parametric mapping in on-water single sculling [J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21(10): 1100-1105.
- [ 16 ] UEDA T, HOBARA H, KOBAYASHI Y, *et al.* Comparison of 3 methods for computing loading rate during running [J]. *Int J Sports Med*, 2016, 37(13): 1087-1090.
- [ 17 ] PATAKY TC. Generalized n-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping [J]. *J Biomech*, 2010, 43(10): 1976-1982.
- [ 18 ] ROBINSON MA, VANRENTERGHEM J, PATAKY TC. Statistical parametric mapping (SPM) for alpha-based statistical analyses of multi-muscle EMG time-series [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2015, 25(1): 14-19.
- [ 19 ] TENFORDE AS, RUDER MC, JAMISON ST, *et al.* Is symmetry of loading improved for injured runners during novice barefoot running [J]. *Gait Posture*, 2018, 62: 317-320.
- [ 20 ] GIRARD O, BROCHERIE F, MORIN JB, *et al.* Lower limb mechanical asymmetry during repeated treadmill sprints [J]. *Hum Mov Sci*, 2017, 52: 203-214.
- [ 21 ] PAPPAS P, PARADISIS G, VAGENAS G. Leg and vertical stiffness asymmetry between dominant and non-dominant legs in young male runners [J]. *Hum Mov Sci*, 2015, 40: 273-283.
- [ 22 ] QUAN W, MEI Q, GU Y, *et al.* Biomechanical variations in female runner's pre and post treadmill running [J]. *J Biomimetics Biomater Biomed Eng*, 2018, 37: 1-11.
- [ 23 ] TAKABAYASHI T, EDAMA M, INAI T, *et al.* Gender differences in coordination variability between shank and

- rearfoot during running [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 66: 91-97.
- [24] WOUDA FJ, GIUBERTI M, BELLUSCI G, *et al.* Estimation of vertical ground reaction forces and sagittal knee kinematics during running using three inertial sensors [J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 218.
- [25] EDWARDS WB. Modeling overuse injuries in sport as a mechanical fatigue phenomenon [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2018, 46(4): 224-231.
- [26] JOHN CT, SETH A, SCHWARTZ MH, *et al.* Contributions of muscles to mediolateral ground reaction force over a range of walking speeds [J]. *J Biomech*, 2012, 45(14): 2438-2443.
- [27] MESSIER SP, MARTIN DF, MIHALKO SL, *et al.* A 2-year prospective cohort study of overuse running injuries: The runners and injury longitudinal study (TRAILS) [J]. *Am J Sports Med*, 2018, 46(9): 2211-2221.
- [28] SERRIEN B, GOOSSENS M, BAEYENS JP. Statistical parametric mapping of biomechanical one-dimensional data with bayesian inference [J]. *Int Biomech*, 2019, 6(1): 9-18.
- [29] BISHOP C, ANTHONY T, READ P. Effects of inter-limb asymmetries on physical and sports performance: A systematic review [J]. *J Sports Sci*, 2018, 36(10): 1135-1144.
- [30] DING Z, TSANG CK, NOLTE D, *et al.* Improving musculoskeletal model scaling using an anatomical atlas: The importance of gender and anthropometric similarity to quantify joint reaction forces [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2019, 66(12): 3444-3456.
- [31] SADEGHI H, MATHIEU PA, SADEGHI S, *et al.* Continuous curve registration as an intertrial gait variability reduction technique [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2003, 11(1): 24-30.