

·运动人体科学·

## 影响跑步经济性的动力学因素

任占兵

(广州体育学院 体育教育学系, 广东 广州 510500)

**摘要:** 为了探索影响中跑运动员个体间跑步经济性(running economy, RE)差异的动力学因素, 根据  $VO_{2max}$  相对值及 800 m 运动成绩, 最终确定 7 人为研究对象(年龄 $(21.43\pm 0.53)$ 岁; 身高 $(172.8\pm 3.79)$  cm; 体重 $(63.66\pm 3.82)$  kg; 训练年限 $(4.57\pm 0.98)$ 年; RE $(35.65\pm 2.58)$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)。研究发现, RE 分别与力的峰值、力的波动范围及冲量相关性都不显著。研究结果表明, 垂直方向、前后方向和内外方向的地面反作用力以及跑步支撑阶段冲量, 并不是造成中跑运动员 RE 差异的原因, 但是, RE 较差的中跑运动员表现出在垂直方向冲量较大的趋势, RE 的差异可能是人体下肢肌肉做功的差异造成的。

**关键词:** 运动生理学; 跑步经济性; 动力学; 摄氧量

**中图分类号:** G804.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7116(2010)10-0095-04

### Kinetic factors that affect running economy

REN Zhan-bing

(Department of Physical Education, Guangzhou Sport University, Guangzhou 510500, China)

**Abstract:** In order to explore kinetic factors that affect differences in running economy (RE) between individual runners, the authors ultimately selected 7 runners (at the age of  $(21.43\pm 0.53)$ , the height of  $(172.8\pm 3.79)$  cm, the weight of  $(63.66\pm 3.82)$  kg, the trained years of  $(4.57\pm 0.98)$ , and the RE of  $(35.65\pm 2.58)$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>) as research subjects according to their relative values of  $VO_{2max}$  and performances in the 800m run, and revealed that the correlations between RE and force peak value, force fluctuation range and impulse were all not significant, which indicated that ground reaction forces in the vertical, longitudinal and transversal directions and impulse at the running support stage were not causes for differences in RE between medium distance runners, however, medium distance runners with a poor RE shown a greater impulse in the vertical direction, and differences in RE may caused by work done by lower limb muscles of the human body.

**Key words:** physiology; running economy; kinetics; oxygen intake

跑步经济性(running economy, RE)是决定耐力跑步运动成绩的关键生理学指标之一<sup>[1]</sup>, RE 可以评价耐力项目运动员的能量节省水平<sup>[2]</sup>。有研究甚至认为, 用 RE 来评价运动员的耐力要比最大摄氧量( $VO_{2max}$ )好<sup>[3-5]</sup>。RE 是指在次极限强度的固定速度下跑步, 摄氧量达到稳定状态时每分钟每单位体重的摄氧量<sup>[5-8]</sup>。

影响 RE 的运动生物力学因素是一个庞大的系统, 人们围绕 RE 进行了大量的研究, 其中涉及到运动学和动力学。影响 RE 的动力学因素研究由来已久,

Williams 和 Cavanagh<sup>[9]</sup>研究认为, 优秀长跑运动员较好的 RE 与小腿到触地点较大的范围、较小的垂直力和较长的支撑时间有关。Williams<sup>[10]</sup>研究指出, 较低的能量消耗与发生在触地即刻的缓冲有一定联系。靠近脚跟的击打着地模式可以使鞋与骨骼结构承受更多的负荷, 减少必要的肌肉力量, 而靠近脚尖击打着地模式可能需要动用更多的肌肉活动参与缓冲。Kram 和 Taylor<sup>[11]</sup>研究了各种不同物种在跑步、跳跃和奔跑过程中需氧量的差异, 研究发现, 需氧量与支撑时间与动

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11002036); 国家科技支撑计划课题(2006BAK37B03)。

作者简介: 任占兵(1979-), 男, 讲师, 博士, 研究方向: 体育教育训练学。

物体型的大小没有关系, 作者认为跑步氧耗主要归因于动物支撑体重的能量消耗和产生力的时间过程。Kyrolainen<sup>[12]</sup>与 Heise GD 等<sup>[13]</sup>也探索了长跑运动员动力学因素与 RE 之间的关系, 但是, 地面反作用力及冲量等动力学因素与 RE 之间的关系并没有定论, 前人的研究对象也主要集中在长跑运动员, 而本研究选择中跑运动员为研究对象, 进一步验证中跑运动员在跑步过程中的地面反作用力及冲量与 RE 之间的关系。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

北京体育大学竞技体育学院受过良好训练, 且水平在 1 级左右的男子中跑运动员 15 人。为了排除运动成绩差异过大对 RE 的影响, 本研究根据 800 m 测试的运动成绩, 筛选了 12 名运动成绩在同一水平的受试者(成绩为 $(115.43 \pm 2.64)$  s), 排除了由于伤病等原因没有跑进 2 min 的 3 名运动员; 为了进一步排除  $VO_{2\max}$  差异过大对 RE 的影响, 本研究测试 12 人的  $VO_{2\max}$ , 根据  $VO_{2\max}$  相对值, 筛选出  $VO_{2\max}$  基本在同一水平的 7 人(剔除了  $VO_{2\max}$  在  $65 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  以上的 5 名运动员, 选择  $VO_{2\max}$  在 $(57.49 \pm 3.07) \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  左右的 7 名运动员的 RE(RE 是运动员在 12 km/h 速度下的耗氧量)作为因变量。

受试者的基本情况: 年龄 $(21.43 \pm 0.53)$ 岁、身高 $(172.8 \pm 3.79)$  cm、体重 $(63.66 \pm 3.82)$  kg、800 m 跑成绩 $(115.43 \pm 2.64)$  s、训练年限 $(4.57 \pm 0.98)$ 年; RE $(35.65 \pm 2.58) \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 受试者代谢指标平均峰值:  $VO_2=(3.66 \pm 0.27) \text{ L/min}$ 、 $VO_{2\max}=(57.49 \pm 3.07) \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $VCO_2=(4958.86 \pm 255.40) \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $VE=(152.98 \pm 11.78) \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $HR=(198.43 \pm 12.18) \text{ b} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 1.2 实验测试

1)最大摄氧量( $VO_{2\max}$ )测试。测试仪器包括: MAXII-运动肺功能测试系统、POLAR 心率遥测系统、秒表等。测试步骤同任占兵的方法<sup>[14]</sup>。

2)RE 测试。在  $VO_{2\max}$  测试后隔日, 受试者在跑台上以较低的负荷热身 3 min; 然后开始测试 RE 值。测试过程同 Daniels<sup>[13]</sup>和任占兵<sup>[14]</sup>方法。实验发现, 65% $VO_{2\max}$  强度下的耗氧量与运动成绩呈正相关性且相关性较大( $r=0.89$ ,  $P=0.007$ ), 因此, 选择 65% $VO_{2\max}$  强度下的耗氧量(RE)作为本研究的因变量。跑台跑步持续时间为 5 min, RE 用最后 1 min 的耗氧量平均值表示(单位:  $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

3)动力学测试。RE 测试隔日, 用一台 Kistler 三维测力台测试跑步过程中足底三维地面支撑反作用力, 测力台距离起跑点为 10 m。为了及时反馈跑步速度,

减少速度误差, 因此使用芬兰产的 Photocells 测速仪, 保证每名运动员在预先设定的速度上(65% $VO_{2\max}$  强度对应的速度为  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )准确试跑 3 次, 取最接近目标速度的试跑数据作为动力学研究内容, 本研究设定两台红外发光装置距离为 4 m。

4)数据处理。地面三维反作用力的数据采集频率 1 000 Hz, 通过 Bioware 软件解析获得垂直方向、前后方向和内外方向 3 个支撑反作用力, 本研究对原始地面支撑反作用力用体重倍率(Body Weight, BW)做标准化处理, 以消除体重差异造成的影响(体重倍率=原始地面反作用力(N)÷9.8 (N/kg)÷体重(kg)); 采用 SPSS 16.0 软件包对所得数据进行基本描述统计和相关分析等, 统计结果以平均数±标准差表示, 显著性水平  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

本研究的动力学指标选择的是 65% $VO_{2\max}$  强度对应的速度  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  下的数据, 图 1 是在  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度下跑步过程中地面三维反作用力的变化曲线, 横坐标是经规一化处理后的数值, 垂直线是运动员由制动阶段向加速阶段转换的瞬间, 即“加速瞬间”。垂直方向支撑反作用力反映了力在垂直方向的受力情况。

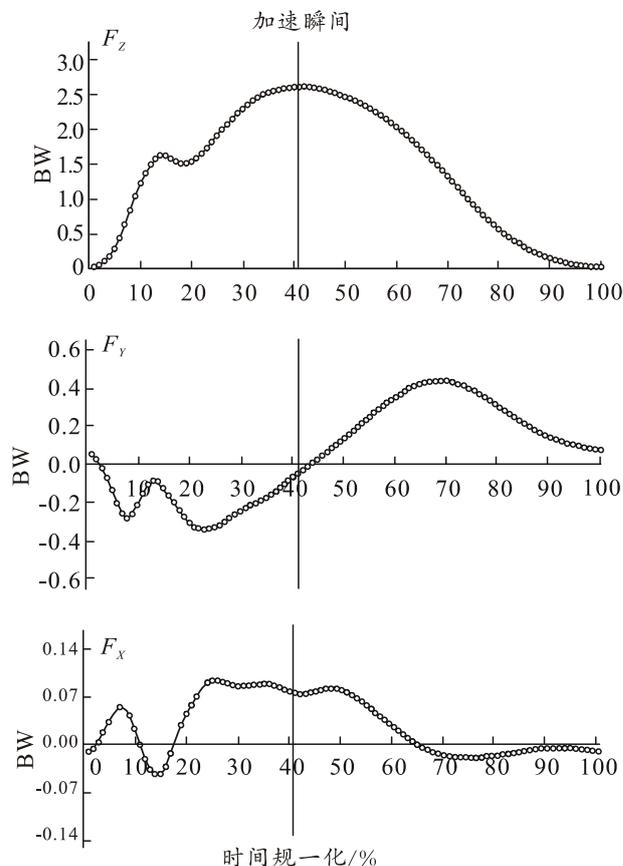


图 1 在  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度下跑步过程中地面三维反作用力的变化曲线

表 1 是 RE 与三维反作用力的动力学指标相关性。

表 1 RE 与动力学测试指标 ( $\bar{x} \pm s$ ) 相关性

测试	$F_{x1 \max}/N$	$F_{x2 \max}/N$	$F_{z \max}/N$	$F_{y \max}/N$	$I_x/(N \cdot s)$
动力学	$1.75 \pm 0.12$	$2.64 \pm 0.18$	$0.44 \pm 0.05$	$0.14 \pm 0.05$	$363.82 \pm 21.90$
相关性	-0.04	-0.21	-0.43	-0.07	0.90
P 值	0.94	0.65	0.40	0.88	0.06

结合图 1 和表 1 可以发现, 垂直方向地面反作用力峰值, 远远大于前后方向和内外方向力的峰值, 因此, 可以认为, 该方向的力与冲量可能会对 RE 的影响最大。进一步对不同方向力的峰值和垂直方向的冲量与 RE 进行相关性分析发现, 在显著性  $\alpha=0.05$  水平时, RE 分别与地面垂直反作用力第 1 峰值、地面垂直反作用力第 2 峰值、前后方向支撑反作用力峰值、内外方向支撑反作用力峰值和垂直方向冲量的相关性均不显著, 但是从 RE 与动力学指标的相关趋势上可以发现, RE 与垂直方向冲量的相关系数最大( $r=0.90$ ,  $P=0.06$ ), 该研究结果说明, 不同方向力的峰值与 RE 的关系不大, 而垂直方向的冲量可能是造成中跑运动员个体 RE 差异的原因之一。

### 3 讨论

7 名受试者的  $VO_{2 \max}$  平均值为  $(57.49 \pm 3.07)$   $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , RE 平均值为  $(35.65 \pm 2.58)$   $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , 本研究 RE 测试结果与前人的研究<sup>[5, 13]</sup>基本一致。人体在跑步过程中的地面反作用力是跑步者的足蹬地时由地面反作用到跑步者的力。像重力和绝大多数接触力一样, 地面反作用实际上是一种分布力, 它是作用在整个接触表面上的, 地面反作用力是一个矢量, 具有大小、方向和作用点。根据研究的目的, 常常把地面反作用力合力分解成三个直角分量, 即垂直分量、前后分量和内外分量<sup>[6]</sup>。这与本研究对地面反作用力的划分方法相同, 本研究将地面作用力划分为垂直方向地面反作用力、内外方向地面反作用力和前后方向地面反作用力, 并且数据测试范围和前人的研究结果<sup>[13]</sup>基本一致。

Kram<sup>[17]</sup>的研究发现, 跑步阶段的能量消耗与人在跑步过程中支撑体重的力, 以及与地面的阻力等都有一定的联系。总之, 地面反作用力变量可能与 RE 相关。但是, 本研究选择的动力学指标并不能解释个体间 RE 的差异, 即垂直方向、前后方向和内外方向的地面反作用力峰值并不是造成个体间 RE 差异的原因。这一方面由于本研究样本量的缺陷, 另一方面是因为

能量消耗是一个时间过程, 而力的峰值只是这个时间过程的一个点而已, 所以, 力的峰值与 RE 之间相关性不显著。

Heise GD 等<sup>[13]</sup>研究发现, RE 较差的运动员表现出总垂直冲量和垂直冲量净值较高。虽然, 本研究通过对垂直冲量和 RE 进行相关分析发现二者的相关性在显著性  $\alpha=0.05$  水平时不显著, 但是, 从 RE 与垂直方向冲量指标的相关性趋势可以发现(表 1), RE 与垂直方向冲量相关性比较大, 且表现出正相关, 说明存在这种可能性: 即 RE 较好(RE 值较小)中跑运动员在垂直方向的冲量较小, RE 较差(RE 值较大)的中跑运动员在垂直方向的冲量较大, 本研究对中跑运动员的这个研究结果与 Heise GD<sup>[13]</sup>对长跑运动员的研究结果趋于一致。未来需要进一步确定前支撑阶段冲量与后支撑阶段冲量, 以及内外方向冲量大小与 RE 之间的关系。

通过三维测力台测试的地面三维反作用力的大小、作用时间, 以及力的冲量等指标, 能够间接地反映出跑步运动员在跑步支撑阶段肌肉力量对跑步动作的控制。由于人体在跑步的过程中, 身体在垂直上下、前后和左右方向出现额外的作用力均是对能量代谢的浪费, 所以, 运动员在跑步过程中与地面接触时, 尽量通过激活肌肉来稳定身体姿态和保持向前。Kyröläinen<sup>[12]</sup>的研究中, 地面反作用力随着跑速的增加而增加, 为了承受较大的冲击负荷, 着地前和制动阶段腿部伸肌的活动会在一定程度上防止跑步者在制动阶段不必要的动作变形。通过相关研究发现, RE 的个体差异与地面反作用力的关系并不是很大, 个体间 RE 的差异有可能是个体间下肢肌肉做功的差异造成的。因此, 深入研究人体下肢肌肉在支撑阶段的做功情况, 对了解影响 RE 的动力学因素具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Costill D L, Branam G, Eddy D, et al. Determinants of Marathon running success[J]. *Int Z Angew Physiol*, 1971, 29(3): 249-254.
- [2] Thomas D Q, Fernhall B, Granat H. Changes in

running economy during a 5-km run in trained men and women runners[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 1999, 13(2): 162-167.

[3] Costill D L, Thomason H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running[J]. *Med Sci Sports*, 1973, 5(4): 248-252.

[4] Morgan D W, Baldini F D, Martin P E, et al. Ten kilometer performance and predicted velocity at  $VO_{2\max}$  among well-trained male runners[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1989, 21(1): 78-83.

[5] Conley D L, Krahenbuhl G S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1980, 12(5): 357-360.

[6] Conley D L. Following Steve Scott: physiological changes accompanying training[J]. *Phys Sports med*, 1984, 12: 103-106.

[7] Anderson T. Biomechanics and running economy[J]. *Sports Med*, 1996, 22(2): 76-89.

[8] Morgan D W, Craib M. Physiological aspects of running economy[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1992, 24(4): 456-461.

[9] Williams K R, Pr C. Biomechanical correlates with running economy in elite distance runners[C]//*Proceedings of the North American Congress on Biomechanics*, Montreal: 1986: 287-288.

[10] Williams K R, Cavanagh P R. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance[J]. *J Appl Physiol*, 1987, 63(3): 1236-1245.

[11] Kram R, Taylor C R. Energetics of running: a new perspective[J]. *Nature*, 1990, 346(6281): 265-267.

[12] Kyrolainen H, Belli A, Komi P V. Biomechanical factors affecting running economy[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2001, 33(8): 1330-1337.

[13] Heise G D, Martin P E. Are variations in running economy in humans associated with ground reaction force characteristics?[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2001, 84(5): 438-442.

[14] 任占兵. 影响跑步经济性的人体下肢肌肉做功研究[J]. *体育科学*, 2010, 30(1): 86-96.

[15] Daniels J, Krahenbuhl G, Foster C, et al. Aerobic responses of female distance runners to submaximal and maximal exercise[J]. *Ann NY Acad Sci*, 1977, 301: 726-733.

[16] Cavanagh P R. *Biomechanics of distance running*[M]. Champaign: Human Kinetics Publishers, 1990.

[17] Kram R. Muscular force or work: what determines the metabolic energy cost of running?[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2000, 28(3): 138-143.