

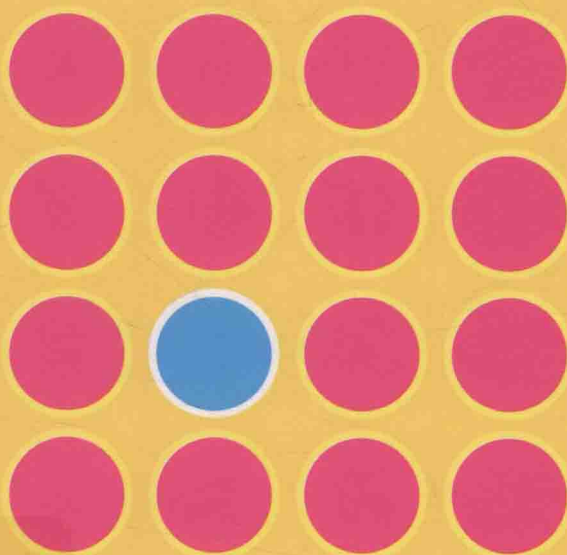
中国体育博士文丛

广东省高等学校优秀青年教师培养计划

国家自然科学基金青年科学基金项目（11002036）资助

# 跑步经济性的 运动生物力学机制研究

任占兵 著



北京体育大学出版社

广东省高等学校优秀青年教师培养计划

国家自然科学基金青年科学基金项目 (11002036) 资助

# 跑步经济性的 运动生物力学机制研究

任占兵 著

北京体育大学出版社

策划编辑 秦德斌  
责任编辑 秦德斌  
审稿编辑 苏丽敏  
责任校对 成昱臻  
版式设计 罗 斯  
责任印制 陈 莎

#### 图书在版编目(CIP)数据

跑步经济性的运动生物力学机制研究/任占兵著.  
- 北京: 北京体育大学出版社, 2014. 1  
ISBN 978 - 7 - 5644 - 1554 - 9

I. ①跑… II. ①任… III. ①跑 - 运动生物力学 - 研究 IV. ①G822 ②G804. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 007402 号

#### 跑步经济性的运动生物力学机制研究

任占兵 著

---

出 版 北京体育大学出版社  
地 址 北京海淀区信息路 48 号  
邮 编 100084  
邮 购 部 北京体育大学出版社读者服务部 010 - 62989432  
发 行 部 010 - 62989320  
网 址 <http://cbs.bsue.edu.cn>  
印 刷 北京昌联印刷有限公司  
开 本 710 × 1000 毫米 1/16  
印 张 8.75  
字 数 150 千字

---

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(本书因装订质量不合格本社发行部负责调换)



## 作者简介

任占兵，1979 年出生，博士，副教授。2009 年博士毕业于北京体育大学，现就职于广州体育学院运动训练系。广东省千百十人才工程校级培养对象，入选 2013 年广东省高等学校优秀青年教师培养计划，在《体育科学》、《中国体育科技》、《体育学刊》、《北京体育大学学报》等期刊发表文章 20 余篇。主持国家自然科学基金“跑步经济性的运动生物力学机制研究”，主持国家科技支撑计划项目“潜优势项目体能训练体系的研究与建立”子课题，参与国家社会科学基金、教育部“十一五”规划、国家体育总局、广东省体育局、广东省教育厅等多项课题研究工作。

爱好跑步运动，多次参加跑步赛事。曾参加 2010 年广州花都 10 公里挑战赛（成绩 38 分钟）、2010 年深圳马拉松接力赛、2010 年珠海国际半程马拉松（成绩 1 小时 28 分）、2011 年深圳马拉松接力赛（团体第三名）、2011 年厦门国际马拉松（成绩 3 小时 13 分）、2011 年广州耐克 10 公里挑战赛（成绩 38 分钟）、2012 年厦门国际马拉松赛（3 小时 37 分）、2012 年广州马拉松赛（3 小时 15 分）、2012 年珠海国际半程马拉松赛（成绩 1 小时 28 分）和 2013 年广州马拉松赛等。

# 自序

如果你想健康，跑步吧！如果你想健美，跑步吧！如果你想聪明，跑步吧！

——古希腊格言

目前，跑步是世界上运动人口最多的群体，人天生两条腿，主要功能之一便是跑步。英文中有这种说法“Humans are born to run（人天生会跑）。”其实，这种说法主要是指在原始社会，人类主要通过奔跑的方式去捕猎，只有跑得快，才能够捕到猎物，才能够生存，可以说跑步对人类的生存繁衍具有非常重要的意义。但是，后来，当人类可以通过更多的手段获取足够的食物以满足最基本的生存需要的时候，开始逐渐将跑步作为一种休闲方式，通过竞赛的方式来满足身体和精神上的需求，这样，形形色色的跑步赛事便开始逐渐产生。

其中，流传着这样一个跑步赛事，感觉很有意思，国外历史上叫作“Hour Run”，目前这种运动已经不多见了。Hour Run 主要流行于 17 世纪 90 年代的时候。首个被历史记载下来的一名运动员的名字叫 Edmund Preston，他的职业其实是一名屠夫，当时在一个小时或者更少时间内他可以跑 10 ~ 12 英里，非常不错了。但是，当赌博融入到该项运动的时候，Hour Run 似乎变得更加血腥了，许多人甚至家破人亡，有的人赶着马车去赌跑步结果，最后连马带车都输掉了，结果只能跑步回家。

我自己喜欢跑步运动，启蒙于小学时候的一段经历，那时候我们村还流行一种“管饭制度”。当我在清晨到学校带数学老师回家吃饭时，发现他并不在所住之处，不远处的操场上模糊发现一个跑步身影，我径直走过去，原来，数学老师在跑步，他发现我之后，也让我一起陪他跑

两圈，数学老师的耐心和热情逐渐感染了我，从那以后，我喜欢上了数学，更喜欢上了跑步。后来到了初中阶段，我几乎都是跑步上学，然后跑步回家。一直到现在，还经常约朋友一起去参加一些马拉松等长跑比赛，以此激励自己坚持跑步。

当现代科技充斥着人们日常生活的方方面面，并开始逐渐取代人类的双腿，让人足不出户享受美味的时候，当对着电脑为工作、科研而忙碌、焦头烂额、身心疲惫、不知所措的时候，您是否想过迈出您的双腿走到大自然的怀抱当中享受瞬间的宁静，让双腿像弹簧一样腾空，让心跳开始逐渐加速，让思绪重新点燃激情的火花。

由于我喜欢跑步运动，所以也喜欢进行跑步运动相关的研究。我们知道，耐力跑步运动成绩的提高主要取决于两个方面，一方面是体能的提高；一方面是能量的节省化。如同两辆汽车，要想跑得又快又远，能量供应很重要，但能量的节省化更关键。如果能够研究影响跑步经济性的因素，那么就可以对跑步经济性进行有效控制。本研究系统阐述了影响跑步经济性的运动生物力学因素，从运动学、动力学和肌电等角度来探索若干指标与跑步经济性之间的关系，研究内容其实只是影响跑步经济性因素中的冰山一角，跑步经济性的运动生物力学机制仍然存在很多未知的因素等待我们去深入探索。

任占兵

2014年1月1日

# 摘 要

## 研究目的:

基于前人围绕跑步经济性 (Running Economy, 简称 RE) 研究的成果及理论, 本研究选择中跑运动员的 RE 作为因变量, 人体下肢的运动学、动力学和表面肌电等若干变量为自变量, 探索跑步过程中若干自变量的表现特征, 以及自变量与因变量 RE 之间的关系。

## 实验设计:

首先根据中跑运动员的  $VO_{2max}$  和 800 米成绩, 确定三个不同的测试速度; 其次, 在 12km/h, 14km/h 和 16km/h 三个不同的跑台速度下分别测试因变量 RE, 同时, 测试下肢肌肉的表面肌电; 最后, 在相同速度的平地跑中获得下肢运动学及动力学指标。

## 研究方法:

挑选出 7 名水平在一级左右, 且  $VO_{2max}$  和 800 米成绩都相似的运动员作为研究对象, 研究方法采用实验研究、数据处理涉及数字滤波、归一化及三次样条插值函数、Pearson 和 Spearman 秩相关分析、主成分分析等。

## 研究结论:

(1) 本研究采用自主研发的 LED 速度控制系统, 能有效地控制运动员跑步的节奏, 配合 Photocells 测速计, 取得了很好的测试效果。

(2) 该研究发现, 运动员在 12.0km/h 速度下的耗氧量 (用 RE12 表示) 与 800 米最好运动成绩的相关性呈现高度显著性, 选择该负荷的测试速度评价运动员的 RE 水平比较适合。

(3) 该实验发现, 随着跑步速度的增加, 耗氧量也不断增加, 但

运动学综合因素并不能解释个体间 RE 的差异。

(4) 该实验发现,跑步过程中地面反作用力前后方向的最大值越小、内外方向力的峰值波动范围越小、前后方向冲量和内外方向冲量越小,受试者的经济性会表现出较好的趋势,但这些指标并不能解释个体间 RE 的差异。

(5) 该实验发现,肌肉在支撑阶段的“拉长-缩短”周期做功越少,受试者的经济性越好,结合前人研究,建议耐力训练同时对人体下肢肌肉进行爆发力训练,通过改善人体下肢的神经肌肉结构,可以有效地提高运动员的 RE 水平。

**关键词:** 耗氧量 跑步经济性 生物力学 肌电图

# Abstract

## Objective:

Based on previous research and theories related to running economy (RE), we chose RE as the dependent variable and the human lower extremity running biomechanics as the independent variables, such as the thigh angle, knee angle, and the ankle angle etc which can reflect the lower extremity performance. Based on the dependent variable RE, we have explored the performance characteristics of the independent variables and the relationship between independent variables and dependent variable.

## Design:

In this study, based on the VO<sub>2</sub>max, we decided three different test speed. After that, we got the dependent variable RE at the three different speeds of 12km/h, 14km/h and 16km/h respectively. Meanwhile, we got the surface electromyogram (sEMG) of the lower extremity muscles. And then, and we got the lower extremity kinematics and the kinetics variables on the overground running at the same controlled speed.

## Methods:

Based on the 800m results and the VO<sub>2</sub>max, We have chose 7 highly homogeneous runners (age:  $21.43 \pm 0.53$  years old; height:  $172.8 \pm 379$ cm; weight:  $63.66 \pm 3.82$ kg, and training period:  $4.57 \pm 0.98$  years) as the Subjects. We processed the data by using the digital filters, normalization and cubic spline interpolation function; The statistics in this study included the Pearson rank correlation analysis, Spearman correlation analysis and the principal component analysis.

### Conclusion:

(1) By using the self-developed speed control system, we have effectively control the athlete running rhythm with the Photocells. So we have achieved the receivable test effects.

(2) It is proper to test the RE of the 800m players under the running speed of 14 km/h. But, we also found if the runner was considered as economical under one running speed, it was possible that he maybe uneconomical under another speed.

(3) With the increase of the running speed, the  $VO_2$  rose accordingly and the lower extremity kinematics also showed its own trend. The PAC (Principle analysis component) indicated that the synthetic factors of the kinematics can not explain the RE.

(4) Though we have not found the Principle component and the kinetics variables influenced the RE, we indeed found that the rank correlation coefficient was the highest ( $r=0.64$ ). Further research should be done to verify the possibility of the independent variables, such as maximum anterior-posterior ground reaction force, the maximum medial-lateral ground reaction force, the anterior-posterior impulse, and the medial-lateral impulse etc, which may influence the RE.

(5) The rank correlation coefficient between the RE12 and the Principle components F2 which was influenced by the gastrocnemius, rectus femoris, vastus lateralis, and tibialis anterior was highly significant ( $r=-0.80$ ,  $p=0.03$ ). This further indicated that it was possible for us to understand the RE through SSC.

**Key words:** Oxygen uptake, running economy, biomechanics, electromyography

# 目 录

|     |                              |      |
|-----|------------------------------|------|
| 1   | 前 言 .....                    | (1)  |
| 2   | 文献综述 .....                   | (4)  |
| 2.1 | RE 的概念阐释 .....               | (4)  |
| 2.2 | RE 的测量 .....                 | (8)  |
| 2.3 | 基于 RE 的动作表现相关研究 .....        | (13) |
| 2.4 | RE 的国内相关研究 .....             | (24) |
| 2.5 | 小 结 .....                    | (25) |
| 3   | 研究方法 .....                   | (28) |
| 3.1 | 研究设计 .....                   | (28) |
| 3.2 | 研究对象 .....                   | (30) |
| 3.3 | 指标测试方法及步骤 .....              | (30) |
| 3.4 | 数据处理 .....                   | (40) |
| 4   | 分析讨论 .....                   | (43) |
| 4.1 | $VO_{2max}$ 和 RE 的测试结果 ..... | (43) |
| 4.2 | 下肢运动学参数与 RE 关系表现特征 .....     | (50) |
| 4.3 | 跑步支撑阶段下肢动力学与 RE 关系表现特征 ..... | (71) |
| 4.4 | 跑步过程中下肢表面肌电与 RE 关系表现特征 ..... | (80) |
| 4.5 | RE 测试结果分析 .....              | (86) |

|     |                               |       |
|-----|-------------------------------|-------|
| 4.6 | 人体下肢跑步动作的运动学表现与 RE 关系分析 ..... | (88)  |
| 4.7 | RE 动作表现的动力学分析 .....           | (94)  |
| 4.8 | 肌肉表现与 RE 关系分析 .....           | (96)  |
| 4.9 | 提高 RE 的运动训练学启示 .....          | (102) |
| 5   | 结论与建议 .....                   | (107) |
| 5.1 | 研究结论 .....                    | (107) |
| 5.2 | 研究的创新点 .....                  | (107) |
| 5.3 | 研究建议 .....                    | (108) |
| 6   | 致 谢 .....                     | (110) |
| 7   | 参考文献 .....                    | (112) |
|     | 附 录 .....                     | (125) |

# 1 前 言

跑步是人类运动中最基本和最普遍存在的活动方式,当跑步成为竞技体育运动项目时,要求运动员在规定的距离内以最少的时间跑完全程。体能是运动员跑完全程过程的重要前提和保障,对于跑步来说,每一个动作任务的完成都需要相应的体能支持,这也意味着为了取得优异的运动成绩,运动员必须最有效经济地利用可获得的能量参与竞技。长期以来,运动生理学家把最大摄氧量(用  $VO_{2max}$  表示)作为衡量耐力运动员有氧代谢能力高低的首要指标,并成为评价中长跑运动员体能水平高低的重要指标之一。而近年来的研究发现,跑步经济性(Running Economy,用 RE 表示)也是决定跑步运动成绩的关键生理学指标之一<sup>[1]</sup>。对于体能水平相当的运动员来说,用 RE 指标来评价运动员的耐力水平要比  $VO_{2max}$  好<sup>[2-4]</sup>。Sjodin 和 Svedenhag J (1985)<sup>[5]</sup> 的实验进一步发现,马拉松成绩相接近运动员的  $VO_{2max}$  与运动成绩相关性不高,而  $VO_{2max}$ 、RE 和  $\% VO_{2max}$  三个指标可以解释马拉松运动成绩的变化原因。Larsen. H B (2003)<sup>[6]</sup> 在对肯尼亚长跑运动员的研究中也认为,长跑的关键生理学指标为  $VO_{2max}$ 、 $\% VO_{2max}$  和 RE。我国学者席翼(2008)<sup>[7]</sup> 的研究也指出,RE 在评价普通人群(即训练初期)的耐力及其耐力训练效果方面优于  $VO_{2max}$  和 VT 指标。一定速度下的摄氧量体现了一定速度下的能量产出与能量消耗之间的关系,能准确的形容一定跑步速度下的能量消耗,为我们比较群体或者个体的体能提供了非常实用的办法<sup>[2,8]</sup>。另外,关于人类运动的效率的测量,前人已经做了大量的工作,设计了各种不同的方法去计算,但是计算机机械功的所有方法都存在缺陷,并且都基于假设,其精确性不可确定<sup>[9]</sup>。RE 概念明确,具有实用价值,作为评价耐力运动员体能的有效指标已经被普遍接受。

中长跑项目属于体能主导类耐力性项目,长期以来,有氧代谢能力被认为是中长跑运动员取得优异运动成绩所必须具备的能力<sup>[10]</sup>。传统

的观念认为,要想提高中长跑运动员的竞技成绩,必须提高中长跑运动员的能量代谢水平,尤其是有氧代谢能力,例如提高运动员的  $VO_{2max}$  等。然而,随着科学的发展,人们很快发现,增强运动员的能量代谢水平固然重要,但是,能量的有效利用也不容忽视。于是,在国际上关于提高运动员 RE 方面的研究成为体能训练中的突出问题。而要想提高中长跑运动员的 RE,其关键点和前提工作在于掌握 RE 与相关因素之间的关系。

经验告诉我们,在训练的过程中如果适当地改进运动员跑步的动作技术,就有可能在一定程度上提高 RE。但是,如果不了解动作与 RE 之间的关系,就无法对跑步动作进行科学的指导,更无法从技术的角度去进一步提高运动员体能的节省化,那么,究竟通过什么样的途径去提高运动员 RE 问题,跑步的技术是否与 RE 有一定的关系?都是亟需解决的问题。

摄氧量与跑步速度之间的关系一直是运动科学领域研究的热点问题。近 20 多年来,在国际上对动作与摄氧量之间的关系研究也逐渐成为焦点问题,随着 RE 概念的不断明确,人们也从不同的角度去探索了 RE 的跑步动作表现规律,虽然人们已经各个角度分析了影响 RE 的因素,比如心理学、生理学、生物化学等等,然而当前的问题是,提高运动员的 RE 是一个复杂的系统,并没有明确的答案告诉我们 RE 的决定因素是什么。这就更需要我们通过各种实验去进一步的探索和验证。另外,跑步的动作技能主要是通过骨骼、肌肉和相应的神经过程来实现,跑步的动作表现在一定程度上影响着运动员的能量消耗,如果单纯的从运动学分析也很难诊断 RE 的多因素问题,因此,从跑步动作的多角度去深入探索 RE 与运动学、动力学及肌肉做功的关系,并探究进一步改善跑步动作的方法,具有一定的现实意义。

总而言之,基于 RE 对跑步动作在各种情况下进行系统分析并掌握其动作表现规律,了解清楚经济性跑步动作的表现概况及相互之间的关系,才能更有效地对运动员的动作进行科学指导,从而进一步为提高运动成绩和跑步体能训练的科学化水平提供帮助。

本研究工作的目的是基于 RE 的相关研究理论,从运动学、动力学和肌电等三个层面上分析中长跑运动员 RE 测试过程中的动作表现,以及 RE 与中长跑运动员动作表现之间的关系,并分析其原因,以帮助我们更清楚地了解 RE 的动作表现特征。该研究设想确定因变量为 RE,

自变量为人体下肢运动学（主要是反应运动幅度的角度指标）、动力学（地面三维作用力及冲量）和肌电（积分后面积值，反应做功大小），论文的工作主要包括以下内容：

1. 对 RE 的概念及 RE 的动作相关研究进行系统的综述，力求掌握关于 RE 动作研究的相关国际研究的前沿动态，深入评述研究现状。

2. 通过实验测试，得出运动员的  $VO_{2\max}$  和跑步经济性（RE）指标表现特征。该部分关键环节在于对 RE 测试实验环境的控制，其中包括温度、服装、测试时间、测试仪器、测试人员、测试对象的饮食要求等。

3. 通过实验测试，描绘出不同 RE 测试速度下人体下肢的运动学及动力学表现特征及与 RE 之间的关系。该部分关键在于对跑步测试要求的控制，例如，跑步速度、跑步的节奏、步点的相对稳定等，重点是分析 RE 与人体下肢运动学和动力学表现之间的关系。难点在于对运动学数据进行快速傅里叶滤波处理，对动力学数据进行巴特沃斯低通滤波处理，通过三次样条函数的插值计算等。

4. 通过肌电测试，得出人体下肢不同肌肉的表现规律及与 RE 之间的关系。该部分关键问题是对测试条件的控制，包括电极的贴放、肌肉的选择等，重点是分析 RE 与人体下肢肌肉做功表现之间的关系，难点是对肌电数据进行的巴特沃斯低通滤波处理，以及数据的标准化和归一化处理等。

5. 深入分析讨论了 RE 与动作表现之间的关系。讨论有助于理解与分析不同测试速度下动作表现差异的现象，以及了解 RE 与动作表现之间呈现的规律。该部分的难点是分析 RE 与动作表现之间的关系。关键在于通过统计处理得出基于 RE 的人体下肢跑步动作表现特征。

## 2 文献综述

### 2.1 RE 的概念阐释

#### 2.1.1 RE 的前期研究

RE 通过跑步速度与能量消耗之间的关系来表征运动员的有氧代谢能力。在 RE 被正式提出之前,人们围绕跑速与耗氧量之间的关系进行了大量的研究。Hill 和 Lupton (1922)<sup>[11]</sup>对稳定状态和非稳定状态的摄氧量变化进行了研究。他们认为运动结束后所摄取的氧气(特别是指出安静时水平的部分)主要是用作重新储备运动时消耗掉的能量物质及清除肌肉和血液内积累的乳酸,因此,跑步速度与需氧量之间的关系曲线表现出指数关系。Sargent (1926)<sup>[12]</sup>通过测试运动员在不同速度下的摄氧量,计算了每分摄氧量随速度的变化情况,研究结果支持跑步速度与摄氧量之间的非线性关系的假设。Furusawa 等 (1924)<sup>[13]</sup>认为,当速度高于 2 m/sec 时,走路比跑步消耗更多的能量。Dill 等 (1930)<sup>[14]</sup>报道了在标准跑步速度下运动员绝对摄氧量的差异在 50%。他们的数据揭示了,假如摄氧量用 ml/min/kg 来表示,那么在标准跑步速度下运动员绝对摄氧量仍然有超过 30% 的差异。Fenn (1930)<sup>[15]</sup>表述了他的观点,肢体跑步的动能构成了总能量需求的一部分,这表明,跑步者自身的变化或者不同跑步者之间在跑步技术和风格上的变化都可以影响能量消耗。

Daniels (1985)<sup>[8]</sup>认为,早期关于摄氧量和跑步速度之间的关系的 研究主要呈现出以下特点:(1)关于次最大强度跑的摄氧量研究具有意义;(2)个体间在一定速度下的摄氧量有本质区别;(3)生物力学因素影响摄氧量与跑步速度之间的关系;(4)疲劳影响跑步的需氧量;

(5) 摄氧量与跑速之间呈现出非线性关系。根据 Daniels 等 (1985)<sup>[8]</sup> 的研究, 自从 1950 年起, 人们普遍支持跑速与摄氧量 ( $\text{ml}/\text{min}/\text{kg}$ ) 之间呈现出线性或者非常接近线性的关系。Henry (1951)<sup>[16]</sup> 是支持线性关系的先驱, 而且他相信不存在个体间差异。这种观念后来得到 Balke (1963)<sup>[17]</sup> 的证实。

在 20 世纪 60 年代, Margaria 等<sup>[18-20]</sup> 计算出每米或者每千米跑的能量消耗是固定的, 而且不依赖于速度; 跑步的净消耗是  $1 \text{ kcal}/\text{kg}/\text{km}$ , 他们进一步指出受过训练和未受过训练跑步者之间的效率差异非常小 ( $5 \sim 7\%$ )。跑速与摄氧量之间的线性关系在次最大强度下似乎成立, 因为这种情况下能量供应以有氧为主, 跑速范围也受到限制。

Daniels 等 (1977)<sup>[21]</sup> 指出, 跑速与摄氧量之间的回归线在一组受试者间变化很大, 取决于比较的速度 (低速时曲线坡度较小, 高速时曲线坡度较大), 当跑步强度非常大, 相当大比例的能量通过无氧代谢提供, 这并不能像稳定状态下有氧运动那样去定量计算, 因此, 上述关系在这种情况下变得不明朗了<sup>[8]</sup>。在不同的跑步强度下, 血乳酸聚集变化<sup>[22]</sup> 说明, 即使摄氧量与跑速之间的关系呈现出线性, 但是总的能量消耗 (强度至少要大于  $80\% \text{VO}_{2\text{max}}$ ) 表现呈指数的增加。

### 2.1.2 RE 的概念

跑步经济性 (RE) 与规定的速度或规定距离下的耗氧量有关, 主要是指在次极限负荷的特定速度下跑步, 摄氧量达到稳定状态时每单位体重的摄氧量<sup>[2,23-25]</sup>。如果考虑到体重的因素, 那么在规定的跑步速度下, 耗氧量较少则说明 RE 较好, 反之耗氧量较多则 RE 较差, 即 RE 好的运动员比 RE 差的运动员在稳定的速度下耗氧量少<sup>[26]</sup>。

举例说明: 如图 1 所示, 当跑步速度为  $3:30 \text{min}/\text{km}$  时, 受试者 A 的  $\text{VO}_2$  为  $50 \text{ ml}/\text{kg}/\text{min}$ , 受试者 B 的  $\text{VO}_2$  为  $60 \text{ ml}/\text{kg}/\text{min}$ , 在相同的跑步速度下, 受试者 A 的  $\text{VO}_2$  要小于 B 的  $\text{VO}_2$ , 因此, A 的 RE 表现较好, 受试者 B 的 RE 表现较差。RE 之间的差别也意味着当二者在相同的  $\text{VO}_2$  水平上, 受试者 A 要比受试者 B 每千米快大约 15 秒。