



MIT Open Access Articles

限制马拉松运动员成绩的代谢因素

麻省理工学院的教职员工已将这篇文章公开发表。请分享

引文	何使你受益。你的故事很重要。 Rapoport BI (2010) Metabolic Factors Limiting Performance in Marathon Runners.PLoS Comput Biol 6(10): e1000960. doi:10.1371/ journal.pcbi.1000960
已出版	http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000960
著作人	公共科学图书馆
版本	最终出版版本
可引用的链接	http://hdl.handle.net/1721.1/64437
使用条款	知识共享 署名
详细条款	http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/

限制马拉松运动员成绩的代谢因素

本杰明-I-拉波^{1,2}波特*

¹ 美国马萨诸塞州波士顿市哈佛医学院硕士-博士项目, 美国马萨诸塞州剑桥市麻省理工学院电气工程和计算机科学系及²健康科学和技术部, 美国马萨诸塞州剑桥市麻省理工学院

摘要

在过去三十年中, 每年都有数十万名跑步者报名参加大型马拉松比赛。在那些试图参加26英里和码385 (42.195公里) 的马拉松比赛的人中, 超过五分之二的人经历了严重的和限制性能的碳水化合物储备的消耗 (一种被称为 "撞墙" 的现象), 成千上万的人在到达终点前就退出了 (大约占那些开始的人的1%)。对耐力生理学的分析经常使用粗略的近似值来暗示人类的糖原储备不足以为马拉松提供燃料 (使 "撞墙" 看起来不可避免), 或者暗示为了完成马拉松而不 "撞墙", 需要最大的糖原负荷。本计算研究表明, 对耐力赛跑者的能量限制更加微妙, 并且取决于几个生理变量, 包括肌肉质量分布、肝脏和肌肉糖原密度以及跑步速度 (运动强度占有氧能力的一部分), 以个性化但却可量化和可预测的方式。这里提出的分析方法被用来估计跑步者将耗尽其糖原储存的距离, 作为跑步强度的一个函数。这样一来, 它也为确保耐力赛跑者的安全和优化他们的表现提供了一个基础, 即通过设置个人合适的步幅和规定比赛中期的燃料需求来避免 "撞墙"。本分析还从生理学的角度阐明了马拉松比赛中的重要标准, 而这些标准直到现在还只是根据经验来定义。波士顿马拉松赛的合格时间。

引用。Rapoport BI (2010) 限制马拉松运动员成绩的代谢因素。PLOS Comput Biol 6(10): e1000960. doi:10.1371/journal.pcbi.1000960

编辑。Philip E. Bourne, 美国加州大学圣地亚哥分校, 美国

2010年5月收到4; 201017, 年9月接受; 1021, 月发表 2010

Copyright: © 2010 Benjamin I. Rapoport. 这是一篇开放性文章, 根据知识共享署名许可条款发布, 允许在任何媒体上不受限制地使用、分发和复制, 但必须注明原作者和来源。

资助。这项研究没有得到资助。

竞争性利益。作者已声明不存在竞争性利益。

* 电子邮件: brapoport@post.harvard.edu

简介

耐力赛跑者的能量管理是一个公共健康问题

近年来, 参加大型耐力赛的业余选手人数急剧增加, 尤其是世界级的马拉松赛事, 如波士顿、纽约、芝加哥、伦敦和柏林的马拉松赛, 在四十年间, 报名人数增加了一个数量级, 从20世纪70年代的数百名选手到2010年的数万名选手参加每个大型马拉松赛事[1]。关于人类生理学的神话和误解, 以及如何通过训练、营养、药理学和表现策略来优化它, 在休闲和竞技体育中比比皆是, 耐力跑也不例外。耐力跑严重消耗了碳水化合物的储存, 与脂肪储备不同的是, 碳水化合物的储存量相对较小, 可能会限制运动能力的发挥。在耐力运动员中, 包括长跑运动员、自行车运动员和其他运动员, 耗尽生理碳水化合物储备被称为 "撞墙" 或 "爆胎", 运动员们采取了各种做法, 统称为 "碳水化合物负荷", 旨在避免这种灾难性的失败。最近的一组研究表明, 超过40%的跑步者在一次典型的马拉松比赛中 "撞墙" ("撞墙" 的主要风险因素是男性, 最大跑步距离为英里20或更少)。

训练期间, 期待着 "撞墙" [2,3]。相应地, 能量管理在传统上可能是马拉松比赛中最大的生理不确定性领域。一个特定的跑者需要多少碳水化合物来完成比赛, 以及一个特定的跑者如何避免耗尽他或她的碳水化合物储备, 因为他知道这种耗尽将导致性能的急剧、突然和痛苦的下降?

一些研究者分析了耐力跑的生理[4,5]和能量[6,7]要求, 并特别关注了马拉松。一些作者还建立了耐力跑成绩及其理论限制的数学模型[8-13], 一些人还将定量建模技术应用于个别精英长跑运动员的训练[14]和成绩[15]。相关的实验研究集中在确定精英马拉松运动员的成绩限制因素[16,17]。导致耐力跑表现的主要生理因素是

有氧能力 (VO_{2max}) 和有氧运动的能量成本。

额外的因素, 如心脏形态和用力时的乳酸动力学 (在男性), 以及脂肪和血铁水平 (在女性), 似乎限制了精英马拉松运动员目前达到的最高水平的表现[17]。

然而, 个体跑步者以其生理能力进行比赛的能力, 是以维持高水平比赛所需的代谢燃料基质的可用性为前提的。而以前的工作主要是针对

作者简介

马拉松比赛历来被认为是人类耐力的生理极限的考验，甚至在休闲跑者中也变得越来越流行。然而，在那些通过马拉松比赛来测试他们的耐力的跑者中，超过五分之一的人报告说“撞墙”，即迅速出现严重的疲劳和无法保持高强度的步伐，这是由于腿部肌肉和肝脏中的碳水化合物储存几乎完全耗尽造成的。长跑的一个明显的悖论是，即使是最瘦的运动员也会储存足够的脂肪来支撑连续的马拉松比赛，然而，小的碳水化合物储备还是会灾难性地限制耐力运动的表现。在这项研究中，我开发并验证了一个数学模型，该模型有助于计算个性化估计，即跑步者在以选定的速度跑步时将耗尽其碳水化合物储备的距离。此外，我还提供了一种系统化的方法，根据可获得的生理参数，如心率和跑步速度，估算出跑步者能够安全完成马拉松比赛的个性化最大速度。这种分析为提高耐力赛跑者的安全性和优化其表现提供了量化基础，评估了比赛中期的燃料需求，并估算了人类耐力赛跑的表现极限，对精英和休闲跑者都是如此。

耐力跑中能量消耗的静止限制。生理上的燃料储备和碳水化合物负荷

收缩的肌肉所消耗的功率与收缩速度和收缩力的乘积成正比。代谢功率随着收缩速度的增加而增加，因为收缩的肌肉纤维所产生的功率是由于纤维内肌球蛋白横桥的循环，每个循环都需要ATP的水解。更快的收缩或单位时间内更多的收缩需要在单位时间内进行更多的横桥循环，相应地，ATP的使用率更高，因此，代谢功率也更大。Margaria和他的同事[18]以及其他小组[19]已经证实，在整个有氧范围内，跑步者所消耗的功率随着跑步速度线性增加，因此，跑步的总能量成本只取决于跑步距离而不是跑步速度。（这个结论的理由是，消耗的能量是功率的时间积分，跑快一定的距离需要更多的功率，但按比例减少时间，使能量积分保持不变）。特别是，跑步的能量成本， c ，大约是1千卡 $^{l-1}$ 公里 $^{-1}$ ，所以完成一项耐力赛所需的总能量是 cdm ，其中 d 和 m 分别表示跑步距离和跑步者的质量。对于一个体重70公斤的马拉松运动员来说，跑完一个马拉松所需的总能量， $cdm \approx (1 \text{ 千卡公斤}^{-1} \text{公里}^{-1}) \times (42.195 \text{ 公里}) \times (70 \text{ 公斤})$ ，大约是2950千卡。（这里的 c 是指跑步过程中的总代谢能量消耗，而不是指超过静止代谢率的净超额能量消耗；因为在方法一节中讨论过，差别很小，目前的选择简化了建模方程。同样地， VO_{2max}

在这里分别指的是总有氧功率和总有氧能力)。

肌肉收缩可以由各种代谢底物提供燃料，其中最重要的是碳水化合物，来自肝脏和肌肉糖原以及血浆葡萄糖，以及脂肪，包括肌肉内的三酰甘油和从脂肪组织释放的血浆游离脂肪酸。耐力运动的一个明显的悖论是，即使是最瘦的运动员也储存了足够的代谢势能，只要工作的肌肉能完全从脂肪中获得动力，就能进行多次背靠背的马拉松比赛。就势能而言，一个拥有非必需的身体脂肪的跑步者，百分比 p 储存足够的脂肪，以助长比赛的距离 $d \sim \frac{p m f_c}{v}$

（与跑者的质量无关），其中 f_c 表示脂肪的能量密度，约为千卡 $9g^{-1}$ 。即使在 $p \sim 2\%$ 的非必需体脂肪的极端下限， $d \sim 180$ 公里，或超过四个马拉松。相比之下，生理上的碳水化合物储存是非常有限的。

人体以血浆葡萄糖的形式储存少量的碳水化合物。但由于典型的血浆葡萄糖浓度在 $mg 100 \text{ dL}^{-1}$ 范围内，典型的水容量约为5L，而碳水化合物的能量密度约为 $r_c \sim 4 \text{ kcal g}^{-1}$ ，血浆中储存的葡萄糖通常少于20kcal，因此在耐力运动中作为碳水化合物的储存库基本上可以忽略不计。

肝脏通常以每公斤大约毫270摩尔糖基残基（ 195 kcal kg^{-1} ）的密度（ rl ）储存糖原，并且能够以每公斤大约毫500摩尔糖基残基（ 360 kcal kg^{-1} ）的最大密度储存。因此，一个10.8公斤的肝脏通常会储存大约88克碳水化合物，最多可以储存大约克160，分别相当于大约和350千卡650[20,21]。

肌肉也储存糖原，但只供局部使用。肝糖原可以通过糖原分解和将产生的糖原葡萄糖释放到血液中，使全身代谢活跃的细胞（包括工作的肌细胞）都能使用，而肌糖原只能由其合成和储存的细胞使用。肝脏和肌肉糖原储备之间的这种差异的原因是，与肝细胞相反，肌细胞缺乏催化糖原分解的最后反应的葡萄糖-6-磷酸酶，并允许膜葡萄糖转运器释放细胞内葡萄糖。因此，在耐力赛中使用的特定肌肉的糖原储存必须在运动前加载。优化“碳水化合物负荷”的策略比比皆是，但并非所有运动员使用的策略都是基于合理的生理学推论。有几个方案被证明是有效的，McArdle和他的同事[22]已经对此进行了回顾。所有这些技术都是一个三阶段主题的变体。长时间或高强度的肌肉运动，通常首先是一段限制碳水化合物的饮食，然后是一段高碳水化合物的摄入。这样的安排是为了诱发“糖原超级补偿”效应，即糖原耗尽和碳水化合物限制刺激耗尽的肌肉纤维增加糖原合成酶的表达，增强它们在最后的高碳水化合物饮食阶段合成糖原的能力，使肌肉纤维能够以超常的浓度储存糖原。运动诱导的胰岛素过度分泌和肌肉收缩诱导的肌肉葡萄糖转运体的活动也促进了目标肌肉中的糖原负荷，优先于其他生理性能量储存，如脂肪组织和非工作肌肉中的燃料储存。对以这种方式加载的腿部肌肉的活检研究表明，虽然训练有素的运动员的肌肉通常是

储存糖原的密度 (m) ¹ 约为每公斤110毫80摩尔糖基残基, 糖原负荷方案可以将该密度提高到每公斤 ¹ 近毫200144摩尔糖基残基的最大值[23]。虽然耐力跑者可用的糖原库的最大规模取决于相关肌肉的大小, 但有可能估计出可获得的糖原量。例如, 一个精瘦的男性跑步者可能有45%的骨骼肌, 其中一半的质量在腿部肌肉中; 在公斤70级时, 这样的运动员通常会储存310克的碳水化合物作为肌糖原, 最多可以储存约570克, 分别对应于约1250和2270千卡的腿部肌肉糖原。

考虑到来自肌肉糖原、肝糖原和血浆葡萄糖的总碳水化合物能量储备, 很明显, 仅靠正常的碳水化合物储备是不足以作为马拉松提供能量的。此外, 只有在糖原负荷状态下, 即糖原储备接近其生理容量时, 储存的碳水化合物水平才能接近仅靠碳水化合物就能为马拉松提供能量的水平。然而, 上述对生理逻辑潜在能量储备的常规计算方法只揭示了马拉松赛事中能量管理的静态部分。除了这些静态因素外, 还有一些重要的动态因素, 在本工作中也有所体现; 然而, 耐力运动员和那些为他们提供建议的人有时会忽视燃料代谢的动态因素, 从而错误地计算出他们的燃料需求。

个性化的生理学模型在马拉松跑步中的安全和最佳表现

耐力赛跑者的能量问题主要围绕着两个问题。一个特定的跑者需要多少碳水化合物来完成特定的比赛距离, 以及每个跑者如何确保在完成比赛前避免耗尽他或她的碳水化合物储备? 通过综合和定量分析过去几十年研究中收集的人类生理学数据, 本工作得出了一个建模框架, 为这些问题提供个性化的答案。该模型考虑到了有氧能力, 有氧能力可以通过传统的方案来测量, 也可以根据已知速度下跑步的心率反应来估计; 相对用力, 或者说是比赛时总有氧能力的一部分。

运转速度($\%VO_{2max}$), 这可以从运行速度中确定。

一个具有已知有氧能力的个体跑步者; 以及在典型和最大负荷条件下的糖原储备的大小, 这取决于个体跑步者的腿部肌肉组织的分布, 可以作为身体质量的一个函数来估计。该模型包含了跑步的代谢成本和已知的脂肪与碳水化合物代谢对相对运动量的依赖性。这项工作揭示了将糖原储存耗尽所需的距离的功能依赖性, 以及在不耗尽糖原储存的情况下可以跑完特定距离(如马拉松)的最快速度。它还提供了一种定量的方法来建立有效的赛中加油策略, 旨在延长一个给定的跑步者可以完成的距离, 或提高一个跑步者在耗尽他或她的糖原储存之前可以完成的最大速度。此外, 目前的工作显示了个体生理变化以及有氧能力的群体分布是如何限制马拉松完成时间的, 为马拉松资格标准提供了原则性的基础, 例如波士顿马拉松所使用的标准, 到目前为止, 这些标准只是根据经验确定。

结果

有氧运动强度决定了跑步过程中脂肪和碳水化合物作为燃料底物的相对使用情况 工作中的肌肉会消耗一种混合的代谢底物。

脂肪和碳水化合物对这种混合物的相对贡献动态地取决于运动强度和可用糖原库的大小。在较高的运动强度下, 碳水化合物所占的比例较大, 而随着可用糖原的耗尽, 脂肪所占的比例也较大[24]。这些趋势反映了碳水化合物相对于脂肪作为有氧运动燃料的效率明显更高, 这一点在《方法》一节中有更详细的讨论。碳水化合物的氧化通常会产生每摩尔氧气约120千卡的热量, 而脂肪酸的氧化通常只产生每摩尔氧气约100千卡的热量。因此, 在马拉松比赛过程中, 碳水化合物的总消耗量, 以及身体是否能储存足够的碳水化合物燃料来完成比赛的关键问题, 不仅取决于要跑的距离, 而且还取决于比赛的强度。此外, 通过生理过程产生ATP的速度取决于燃料底物和反应的最终产品(有氧过程中的二氧化碳, 与底物无关; 无氧糖酵解或磷酸肌酸水解中的乳酸或肌酸, 分别)。更确切地说, 有一个代谢过程的层次, 由产生ATP的速度来定义, 以便为肌肉收缩提供动力。无氧过程, 即磷酸肌酸的水解和糖原转化为乳酸的过程, 分别最多产生73:3和39:1毫摩尔ATPs ¹; 相比之下, 有氧过程, 即涉及肌肉糖原、肝糖原或脂肪组织衍生的脂肪酸的完全氧化, 分别最多产生:167、6:2或6:毫摩尔7ATPs ¹[25]。随着燃料库规模的增加, ATP的最大提取率趋于下降。

这种对底物和效率的考虑, 强调了充足的碳水化合物储备对耐力赛跑者的重要性。在运动过程中, 低糖原和血浆葡萄糖水平导致胰高血糖素与胰岛素的比例升高, 促进脂肪分解和脂肪酸从脂肪组织释放。在活跃的肌肉中, 脂肪酸经过 β -氧化作用变成乙酰CoA, 最终变成二氧化碳。由此产生的乙酰CoA水平升高, 部分抑制了碳水化合物的代谢, 通过抑制丙酮酸向乙酰CoA的转化, 减少了丙酮酸进入柠檬酸循环的流量[25]。这种生化反馈网络阻止了糖原的完全耗尽, 但同时也降低了氧气利用的能量效率。

Romijn及其同事[24]的工作使我们有可能估算出运动过程中消耗的代谢混合物的组成与运动强度的关系, 这一点在方法一节中有所讨论。图中显示1了碳水化合物(血浆葡萄糖加肌糖原, $f_c(i)$)和脂肪(血浆游离脂肪酸加肌肉甘油三酯, $f_f(i) \sim 1\{f_c(i)\}$)作为相对运动强度的函数, $i \sim \%VO_{2max}$ 。这些函数和肌肉氧代谢的化学计量, 反映在参数 r_c 和 r_f 中, 允许用功率输出来表达 VO_2 , 如方法部分中的1,公式。

个人生理参数和有氧运动强度决定了耐力赛的最大安全跑步速度

这里介绍的计算方法可用于估计马拉松运动员的碳水化合物总消耗量

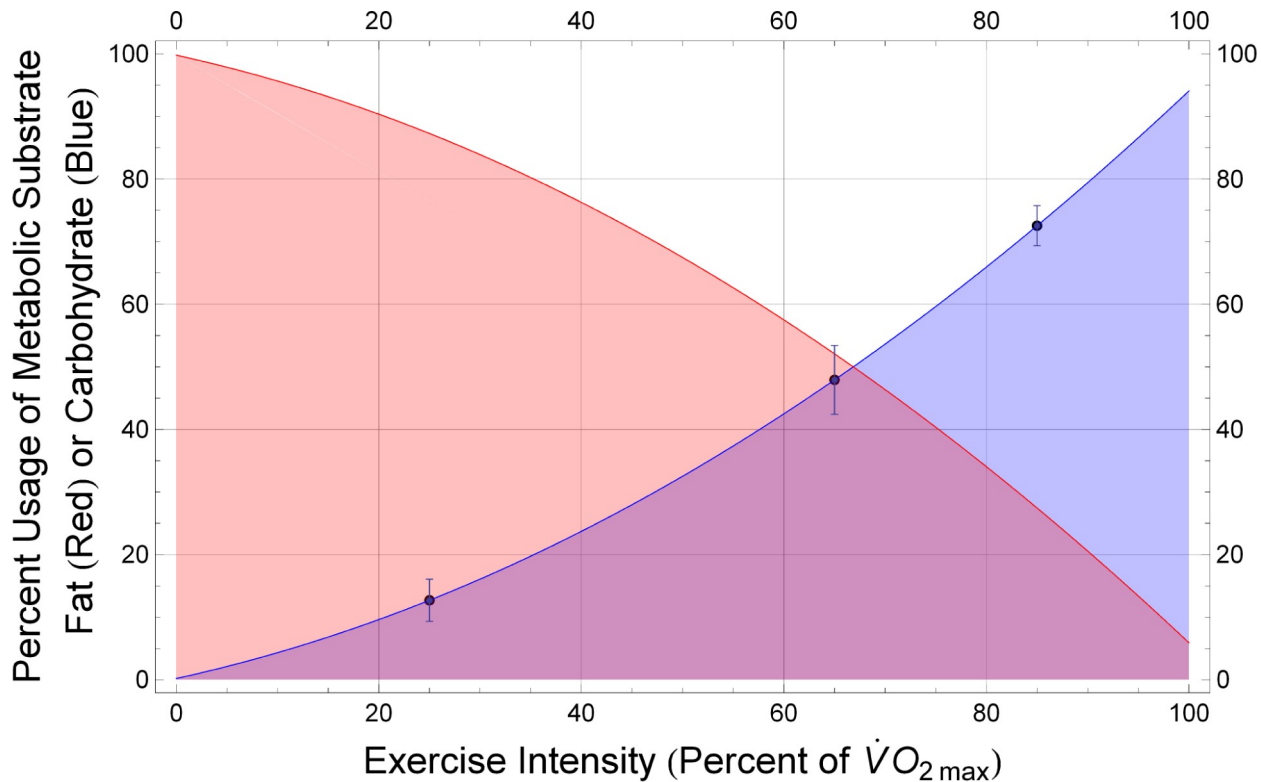


图1.脂肪和碳水化合物作为代谢燃料的相对使用情况取决于运动强度。碳水化合物（血浆葡萄糖加肌糖原，蓝色填充曲线， $f_c(i)$ ）和脂肪（血浆游离脂肪酸加肌肉甘油三酯，红色填充曲线， $f_f(i) \sim 1 - f_c(i)$ ）的使用量是相对运动强度的函数， $i \sim \%VO_{2max}$ 。（基于Romijn及其同事的工作。绘制的点与研究[199324]中的数据点相对应，相应的误差条如方法一节中所述计算）。
doi:10.1371/journal.pcbi.1000960.g001

在比赛过程中，正如在方法一节中详细讨论的那样，方程3被推导出来，以表达一个任意的跑步者的最大有氧跑步速度。然而，该跑步者可获得的碳水化合物总量是否足以他选定的速度跑步提供燃料，取决于他的肝脏和工作肌肉相对于他的身体总质量的大小（其糖原储存必须为其运动提供动力的总质量），以及他们在跑步前装载糖原的密度，如方法一节中详细描述的。

图2说明了不同体重和有氧能力的马拉松运动员（ $d_m \sim 42$ ：195公里（26英里和385码））的碳水化合物总用量对跑步速度的依赖性，以及方法一节中得出的身体总糖原储存能力的限制。对于给定有氧能力的跑者，可能的最快马拉松速度对应于图2中适当的彩色曲线与表示其相对腿部肌肉质量的水平线相交的水平位置（从右侧纵轴画出几条示范性的红色虚线）。有氧能力强、腿部肌肉相对较大的跑者可以储存足够的肝脏和肌肉糖原，以精英运动员的速度（接近挑战当前世界纪录的速度，即男子2:03:59，女子2:15:25）为马拉松跑步提供燃料，而不会耗尽生理上的碳水化合物储存；有氧能力较弱或腿部肌肉相对较小的跑者必须以较慢的速度跑，或在比赛中补充燃料，以避免“撞墙”。

例如，图中显示2，一个 VO_{2max} 的跑者是 $55\text{mLO}_2 \text{ min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ （对应浅绿色曲线）

每公斤体重大约需要千卡20热量才能在3:42:00完成马拉松比赛（对应千卡20的水平网格线与浅绿色曲线上3:42:00的马拉松完赛时间的垂直网格线¹相交）。kcal20 kg的水平网格线上的数字¹表示不同体重的跑者在比赛过程中从碳水化合物中获得的总能量；例如，如果有跑者体重为75公斤，他的糖原储存总量必须至少为1500千卡，以确保他能够完成比赛而不“撞墙”（假设他在比赛中没有消耗碳水化合物）。由于这一能量消耗率低于表示“糖原加载到超级压缩”的阴影区，所以跑者可以确信，考虑到他的有氧能力，3:42:00的目标速度（相当于大约11:4公里/小时¹或每英里8:29）在生理上是可持续的，只要他的腿部肌肉至少占其身体质量的7.5%（如由右侧纵轴上的红色虚线表示）。另一方面，如果有跑者的 VO_{2max} 只有 $45\text{mLO}_2 \text{ min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ （对应于黄色曲线），他可能无法维持114 { km h⁻¹ 马拉松的速度¹。黄色曲线与垂直的3:42:00网格线的交点出现在“糖原加载到超级补偿”区域内，表明该选手在准备比赛时必须实施碳水化合物加载策略；此外，交点相对于右轴网格线的位置表明，即使是最大的碳水化合物加载也不足以该选手的3:42:00马拉松提供动力，除非其腿部肌肉至少占其身体质量的12.5%左右。

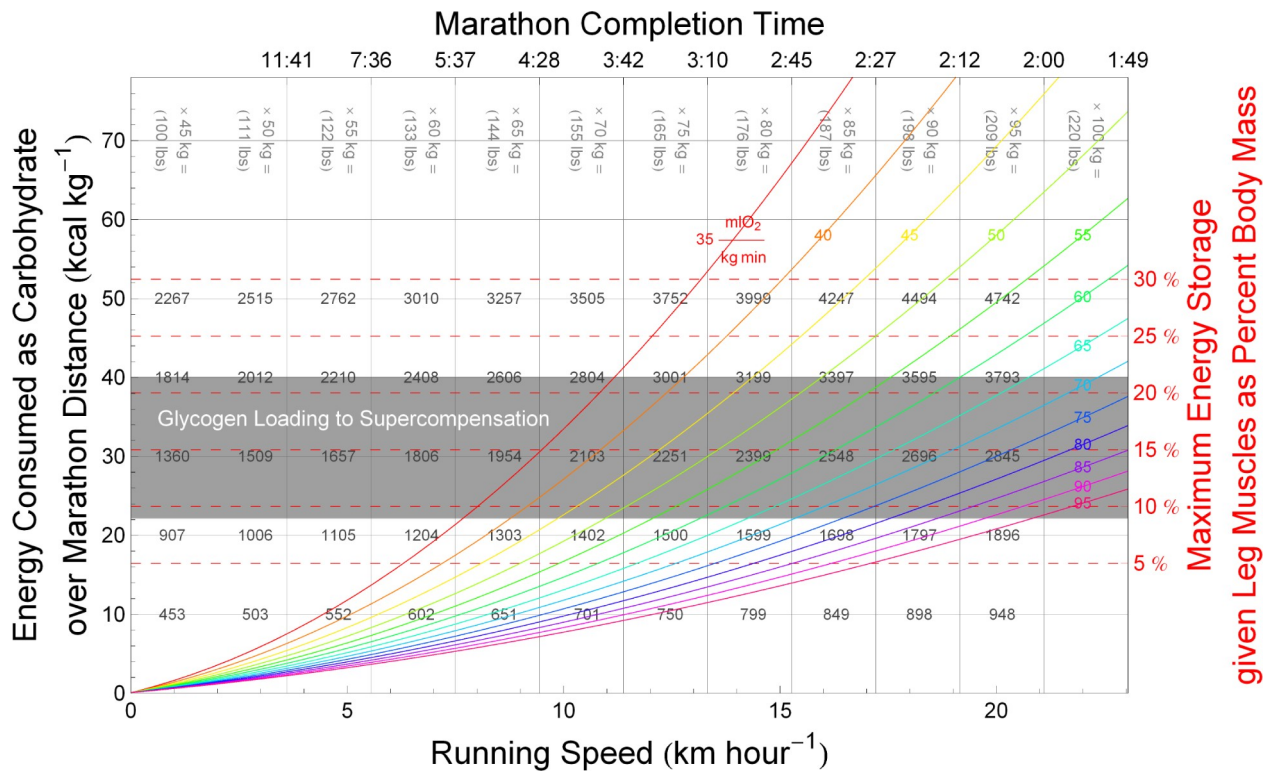


图2.什么时候糖原储存能力会制约最大的马拉松速度?不同有氧能力的跑者在马拉松过程中以碳水化合物形式消耗的总能量的计算近似值,作为跑速的函数。每条色线对应于一个特定的有氧能力值, $\text{VO}_{2\text{max}}$, 以每分钟每公斤体重的氧气毫升数计算, 如图所示(深橙色, 35; 橙色, 40; 黄色, 45; 浅黄色, 50; 浅绿色, 55; 绿色, 60; 水蓝色, 65; 浅蓝色, 70; 蓝色, 75; 紫色, 80; 品红色, 85; 品红色, 90; 红色, 95 $\text{mlO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$)。纵向刻度是以每公斤体重在公里42.195 (26英里和385码) (马拉松的长度)内消耗的能量千卡来表示的;不同质量的跑者相应的总能量消耗沿以下方向显示

水平趋势线, 在沿图的上边缘标注的体重值下面。跑步速度在横轴下方以每小时公里数表示, 在横轴上方以相应速度完成马拉松的总时间表示。虚线、水平红线显示的是在肝脏和糖原负载的肌肉处于最大糖原超级补偿状态(每公斤腿部肌肉有144千卡糖原)的跑步者的估计最大能量储存能力, 对他们来说, 为跑步提供动力的腿部肌肉占身体总质量的百分比(右侧纵轴)。阴影区表示一个典型的男性跑步者可用的超常能量储存能力范围, 其腿部肌肉约占其总体重的21.4%; 阴影区的边界对应于训练有素的耐力运动员的肌肉糖原密度的典型值和最大值(每公斤腿部肌肉分别为80和千卡144糖原)。详细解释见正文。

doi:10.1371/journal.pcbi.1000960.g002

这里提出的模型的预测可以通过与竞争性跑步者的直接实验观察相比较而得到验证。Karlsson及其同事[26]研究了一组10名跑步者, 他们在碳水化合物负荷和非负荷条件下, 两次跑完相同的30公里比赛, 间隔三周。如方法一节所述, 方程可6用于预测每个跑步者的肌肉糖原密度的变化(由Karlsson及其同事在活检研究中测量), 作为其生理参数(身体质量和有氧能力)和平均比赛速度的函数。该模型的预测与卡尔森及其同事的观察结果一致。特别是, 假设跑步者在比赛中不消耗外源性碳水化合物, 模型预测与实验观察到的腿部肌肉糖原密度下降的平均比率为: 108 ± 0.50 (标准误差); 在相反的假设下, 跑步者在比赛中消耗最大允许量的外源性碳水化合物, 平均糖原密度的模拟变化与预测变化的比率为

0.78 ± 0.36 。(在这两种情况下, 完全一致将对应于一个统一的比率)。

耐力跑中的最大燃油经济性是在恒定的用力水平下实现的

1根据前面的分析, 重新考虑图中的数据, 就会发现为什么以恒定的速度跑步, 就像本讨论中假设的那样, 是在特定时间内完成耐力赛的最有效的步调策略。(事实上, 关键的参数是用力程度, $\% \text{VO}_{2\text{max}}$, 在统一的路线上, 它与一个人的速度大约成正比。

个人跑者; 在有山丘等复杂特征的赛道上

然而, 这种简单的关系可能会被打破, 在这种情况下, 保持恒定的用力水平, 而不是恒定的速度, 是最有效的代谢。Margaria及其同事[18]等人已经描述了c对地面坡度的功能依赖性)。虽然总的能量消耗与速度无关, 只取决于跑步的距离, 但碳水化合物对特定跑步者所使用的代谢混合物的贡献比例随着该跑步者的速度而呈正比增加。

跑者。如果一个跑者希望完成一个总距离为d的比赛时间T, 她必须保持总体平均速度为 $\frac{d}{T}$ 。

如果在任何时间间隔内低于这一目标速度, 她必须

后来,她通过跑得比 v 快来补偿,以保持她在整个路程中的平均速度。在慢速间歇期间,她的碳水化合物消耗量低于她保持目标速度时的消耗量;然而,在补偿的快速间歇期间,她的碳水化合物消耗量不仅超过了她保持目标速度时的消耗量,而且还比她在慢速间歇期间节省的碳水化合物数量要多。因此,她的碳水化合物净消耗量比她从未偏离过目标速度的情况下要大。

马拉松完赛时间的人口统计学和"撞墙"的风险

本分析与马拉松运动员的群体研究结果一致,同时也揭示了马拉松运动的重要标准,这些标准直到现在仍是凭经验定义的:波士顿马拉松赛的主要资格时间。

在向所有跑者开放的大型马拉松比赛中,完成时间的模式是在四到五小时之间。图2显示了Sabhapan- dit及其同事[27]提出的马拉松完赛时间的典型分布与 VO_{2max} 的人口分布相一致,对于年龄低于50岁的男性 1 来说, VO 大约介于 $3545\text{mLO}_2 \text{ min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ 之间(50女性的 VO_{2max} 系统地较低,并且随着男性和女性的年龄增长而下降)[28]。典型的糖原负荷水平允许 VO_{2max} 在大约和 $35\text{mLO}_2 \text{ min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ 之间的 1 跑者在四到五小时内安全地完成马拉松比赛,正如图中2相应的曲线与"糖原负荷到超级补偿"区域的下边界的交点所示。

布曼和他的同事已经表明,"击中"的可能性

在马拉松比赛中,"撞墙"现象在一英里(2133-34公里)左右达到高峰,随后急剧下降[2,3]。关于耐力跑的流行说法往往是通过近似的方式论证人类生理上的糖原储备不足以为马拉松提供燃料(宣传"撞墙"是不可避免的神话),或者暗示最大的糖原负荷是对试图完成马拉松的跑者的普遍要求。

相反,目前的工作表明,耐力赛跑者的能量限制更加微妙,取决于几个生理变量,包括个体跑者的相对腿部肌肉质量、肝脏和肌肉糖原密度以及跑步速度(运动强度占有氧能力的一部分),以个性化但却可量化和可预测的方式。与Buman及其同事的研究结果一致,这里提出的分析方法可用于估计跑步者耗尽其糖原储存("撞墙")的距离,作为这些生理参数的函数。正如在方法一节中所详细讨论的,其中的公式为5

用来表示运动员在"撞墙"之前可以跑的距离 d_{wv} 随着用力程度($\%VO_{2max}$)的增加,以及相对腿部肌肉质量或腿部肌肉糖原密度的减少而下降。然而,由于后两个参数是一个乘积,其中一个参数的相对减少可以被以下因素抵消。因此,许多不同的物理参数都会导致糖原在某一特定距离上的耗尽。特别是,如图3中曲线中阴影最密集的区域所示,运动员的腿部肌肉构建和肌肉糖原密度的范围非常广泛。

当在80%至95% VO 的 $_{2max}$ 强度下运行时,会受到故障(由条件 DVD 定义 $_{wm}$)在大约一英里处21.

一般男性人口中的 VO 分布 $_{2max}$ 大约34在:5和51: $4\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 之间 1 (分别为第10和第90个百分位数),年龄在29岁以下20的男性。

[28],并被证明能够通过耐力训练增加到最大约 $60\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ [29]。对于具有典型身材的跑步者来说,根据普通的训练计划,糖原储存量是有限的,这种有氧能力不足以以马拉松的速度(13:3公里/小时 1 ,或每英里7:15)跑完,3这是目前波士顿马拉松的主要男性资格赛时间,进入该比赛被认为是业余跑步者中的一个标志。这种情况可以从图中推断出来,2,其中绿色曲线对应于大约 $60\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 的 $^{1}VO_{2max}$ 相交。

在略微慢于3:10的速度下,"糖原加载到超级补偿"区域的下限(相当于,曲线与"超级补偿"系统内3:10速度对应的垂直网格线相交),表明典型的生理性糖原储备略微不足以为波士顿资格赛时间的马拉松提供动力。因此,希望在波士顿马拉松赛上跑出合格成绩的典型男性跑者必须达到某种程度的超常糖原负荷(通过赛前的糖原超级补偿方案),或者在比赛中战略性地补充能量,如方法部分所述。

对于女性跑步者来说,情况也同样具有挑战性。一般女性人口中的 VO 分布 $_{2max}$ 大约28在:4和44: $2\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 之间 1 (分别为第10和第90个百分位数),年龄在岁以下20的女性29。考虑到训练引起的 VO 的 $_{2max}$ 相对增加,与在男性跑步者中观察到的相同,得出典型女性跑步者的 VO_{2max} 上限约为 $52\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 。参照图,这个 VO_{2max} 介于浅黄色和浅绿色曲线之间,与"糖原加载到超级补偿"制度的下边界相交,其速度相当于马拉松完成时间约为3:40,这是18至34岁年龄组妇女的波士顿马拉松资格赛时间。

赛中加油策略

在方法一节中得出的公式5和7可以作为个性化加油策略的基础,以便在不"撞墙"的情况下跑完特定距离。就马拉松运动员而言,首先应用公式5来计算 d_{wv} 即在他或她的生理参数和预期速度下,到"墙"(糖原耗尽)的距离。如果 d_{wv} ,该选手不可能在不撞墙的情况下完成比赛,除非他或她在途中采取了加油策略。7然后可以应用公式,设定 $d \sim d_{wv} \{d$,以确定在比赛过程中必须消耗的最低碳水化合物量,以确保选手能够在不耗尽其糖原储存的情况下保持其目标速度。

讨论

本研究表明,糖原储存能力只是限制低、中度有氧能力或腿部肌肉相对较小的跑步者的表现的因素。相比之下,精英长跑运动员通常具有较大的有氧能力(高于 $70\text{mLO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$),瘦削的上身和相对较大的大腿肌肉。对于这样的跑者,根据这里描述的分析 and 图2和图3的总结,糖原储存能力不应该把马拉松的记录限制在世界各地的主要赛道上,目前的记录在2:04左右徘徊。许多研究者认为,代谢动态的其他来源,如用力时的乳酸动力学,限制了马拉松比赛的成绩,或者说限制了马拉松比赛的成绩。

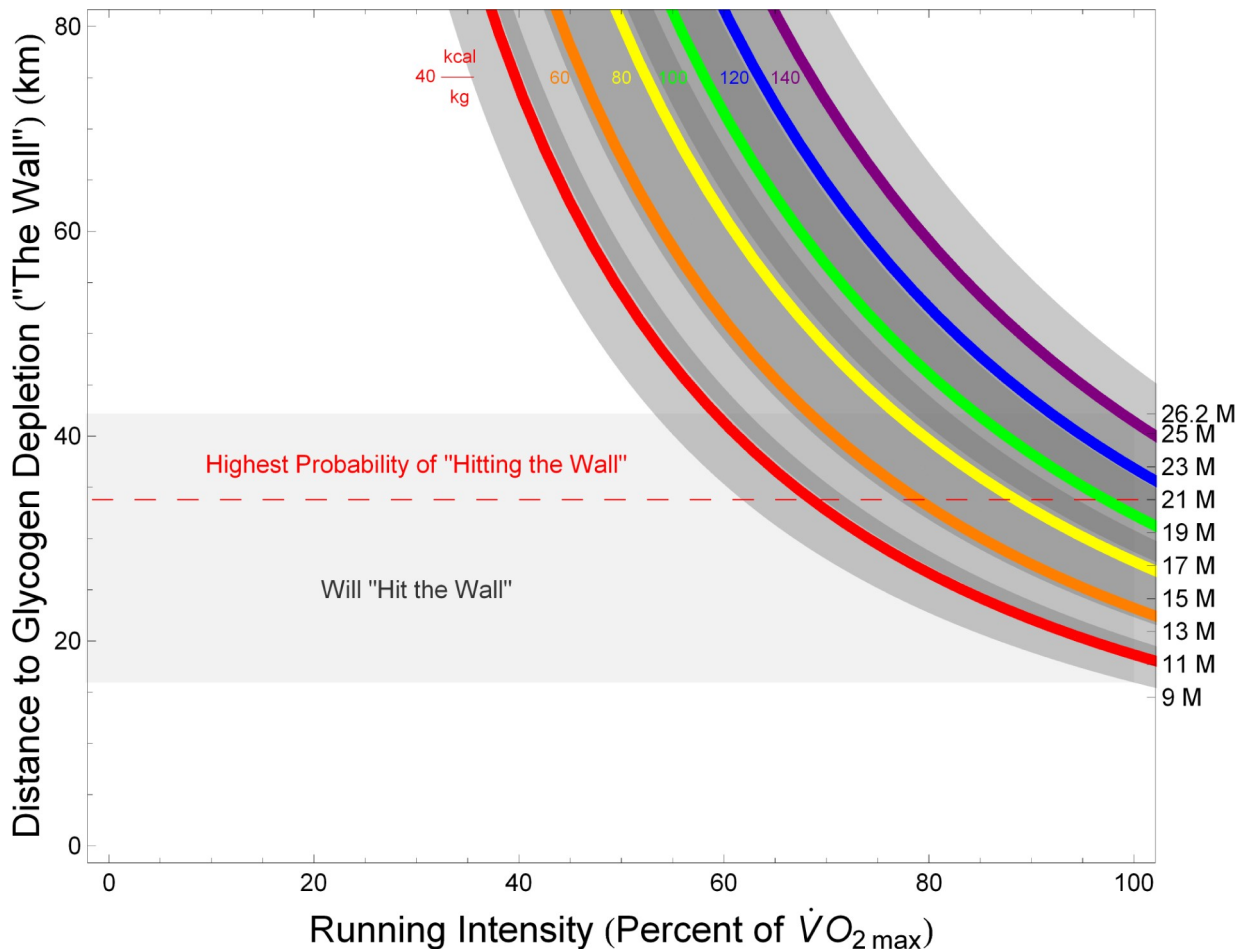


图3为耐力跑者的“撞墙”距离。计算出运动员在完全耗尽糖原储备（“撞墙”）之前可以跑的距离，作为跑步强度（以 $\dot{V}O_{2max}$ 百分比表示）、相对腿部肌肉质量（腿部肌肉质量占身体总质量的百分比）和肌肉糖原密度的函数。运动员在“撞墙”前能跑的距离随着运动量的增加而减少，正如阴影中的

标有“会撞墙”的矩形区域表示，如果这个距离小于千米42.195（26英里和385码），那么跑者将无法在不经历完全的糖原消耗的情况下完成马拉松比赛（至少在比赛中途不加油）。每条彩色曲线对应于一个特定的肌肉糖原密度，如标示（红色，40；橙色，60；黄色，80；绿色，100；蓝色，120；紫色，千卡140公斤⁻¹腿部肌肉）。彩色曲线分别对应于腿部肌肉占身体总质量的21.4%，并以特定密度加载糖原的运动员（相对肝脏质量被假定为恒定在身体总质量的2.5%，而肝脏糖原密度被假定为最大的千卡360公斤⁻¹肝脏质量）；每个彩色曲线周围的阴影区域填补了相对腿部肌肉质量占身体总质量的15%至25%的区域。较深的阴影表示重叠的区域和不同的物理参数集的相同的失败距离。阴影最密集的区域横跨了21英里的线

运动员在80%到95%的 $\dot{V}O_{2max}$ 下跑步，表明许多不同的运动结构和糖原负荷水平都会出现故障

根据经验，马拉松运动员最常“撞墙”的距离是在一英里左右的这些强度下。21,相比之下，很少有跑者会在一英里11之前“撞墙”，或者在以低于55%的 $\dot{V}O_{2max}$ 马拉松时撞墙。

doi:10.1371/journal.pcbi.1000960.g003

超过目前精英马拉松运动员所保持的最快速度[10,11,16,17]。

在马拉松比赛之前，碳水化合物的摄入会影响比赛成绩，因为它可以让具有一定有氧能力（ $\dot{V}O_{2max}$ ）和腿部肌肉分布的跑者以更高的速度奔跑，而不会“撞墙”，屈服于与糖原储备耗尽有关的失败模式。在比赛中通过消耗碳水化合物有效地补充燃料，同时跑步也同样有助于提高成绩。增加外力将碳水化合物作为比赛期间的燃料来源，可以使跑步者在不耗尽糖原储备的情况下保持接近其最大有氧速度的步伐。本论述明确地得出了一个个性化的处方，即在比赛中为避免“撞墙”而必须消耗的最小补充碳水化合物量。同样，这里提出的模型也可以作为一个框架，用来估计

在马拉松等长距离赛事中，维持所需的速度增长所需的外源性碳水化合物的数量。

通过将外源性碳水化合物引入血浆库，可以在多大程度上保存糖原储存，目前还不完全清楚。连续运动从血浆（从肝脏储存和外源补充）和肌肉内储存库中吸取碳水化合物。肌肉内糖原对总能量消耗的相对贡献似乎部分地取决于相对储存库的大小[30]。实验证据还表明，比赛中期加油可以通过增加来自血浆葡萄糖而非肌肉内糖原的氧化碳水化合物的比例来延长耐力能力[31]，并相应地减少肌肉内糖原消耗的速度[32]。然而，肌肉内糖原的氧化似乎并没有完全被比赛中期的碳水化合物消耗所抑制；至少在高强度下，比赛前的肌肉

糖原储存能力似乎仍然是限制长距离运动的一个因素。

补充碳水化合物的形式会影响比赛中加油的效果。摄入的碳水化合物只有在糖原消耗开始前被工作中的肌肉利用时才有用。摄入后，碳水化合物的来源必须由胃释放到小肠，以便被血液吸收。长期以来，人们都知道液体排出胃部的速度对渗透压有很强的依赖性，对于等渗液体来说是最迅速的[33]。与这种生理现象相一致的是，一些研究证实，在耐力运动中饮用含碳水化合物的饮料可以推迟疲劳的发生[22,34]，而为运动市场设计的商业碳水化合物电解质饮料往往是近乎等渗的。只要在预期的疲劳发生之前提供足够的时间（通常是大约几分钟30）摄入所需的碳水化合物总量，那么比赛中加油的时间和分布显然对其效果没有什么影响[22]。

这里提出的分析提供了一种实用的定量方法来估计下列因素对性能的限制作用。

它为耐力赛跑者提供了一种方法来评估他们的成绩在多大程度上会受到他们储存糖原的限制。它为耐力赛跑者提供了一种方法来评估他们的成绩在多大程度上会受到他们储存糖原能力的限制，以及使他们能够计算出个性化的、安全的、最大的耐力距离的比赛步伐，如马拉松。

方法

确定脂肪和碳水化合物作为燃料底物的相对使用量与相对有氧运动强度的关系（% VO_{2max} ）。

有氧运动强度是一个相对量，经常用参数% VO 来衡量 $2max$ ： VO_{2max} 表示运动员的有氧能力，用他或她的身体在运动中能吸收氧气的最大速率来衡量（通常用标准温度和压力下每公斤体重每分钟的氧气毫升数来表示），和% VO_{2max} 表示运动员的工作强度。因为有氧运动依赖于工作肌肉中的燃料基质在明确的化学反应中的氧化，这些肌肉从血液中摄取氧气的速度反映了它们的燃料消耗率和

因此，他们的最大功率输出。

例如，考虑一个60公斤的精英跑步者，其 VO_{2max} 值为76mL O_2 公斤 $^{-1}$ 体重分钟 $^{-1}$ ，以75%的强度跑步。她的 VO_2 ：她的吸氧率，或 VO_2 ，是57mL O_2 min $^{-1}$ 每公斤体重，因此她的身体作为一个整体，消耗氧气的速度为3：4L min $^{-1}$ （0：15摩尔min $^{-1}$ ）。

正如结果部分所指出的，Romijn及其同事[24]的实验工作提供了数据，在此基础上，代谢混合物的组成被消耗了。

运动量可以作为运动强度的一个函数来估计的。函数 $f(i) \sim \%VO_2$ 和 $f(i) \sim \%VO_2$ ，绘制在

图2和结果部分所描述的，是通过以下方式获得的：对该工作中提出的数据进行二次曲线拟合。

在这个例子中，运动员所消耗的代谢燃料混合物是 $f(i) \sim 0.75VO_{2max} \sim 60\%$ 碳水化合物和 $f(i) \sim 0.75VO_{2max} \sim 40\%$ 脂肪。知道了每种底物对燃料混合物的贡献比例，就有可能对她的肌肉使用氧气的总体化学计量进行估计。举例来说。

一个典型的碳水化合物氧化的反应途径包括葡萄糖的完全氧化， $6126CHO_2O_2 \rightarrow 2626CO_2HO$ ，每摩尔碳水化合物消耗6摩尔氧气，并以大约 $r_c \sim 4 \text{ kcal g}^{-1}$ 碳水化合物的密度释放能量；由于葡萄糖的摩尔质量为 $g180 \text{ mol}^{-1}$ ，碳水化合物的氧化通常产生大约 $r_c \sim 120 \text{ kcal}$ 每摩尔呼吸的氧气。另一方面，脂肪酸氧化的一个典型反应途径是棕榈酸， $16322CHO_2O_2 \rightarrow 2221626CO_2HO$ ，每摩尔脂肪酸消耗23摩尔氧，并以大约 $r_f \sim 9 \text{ kcal g}^{-1}$ 脂肪酸的密度释放能量；由于棕榈酸的摩尔质量为 $g256 \text{ mol}^{-1}$ ，典型的脂肪酸氧化只产生大约 $r_f \sim 100 \text{ kcal}$ 每摩尔呼吸氧。这些有代表性的计算说明，相对于脂肪而言，碳水化合物作为有氧运动的燃料，其效率明显更高。

重要的是，它们还允许以下列方式表达 VO_2 。当代谢混合物的组成是已知的时候，功率输出。一般来说，有氧运动中的功率输出 P （例如以每小时消耗的千卡热量表示）可以从公式中推断出

$$P \sim \frac{VO_2}{\frac{f(i)}{r_f} - \frac{f(i)}{r_c}}; \quad \delta 1p$$

在本例中应用这个公式可以看出，转轮问题中的人每分钟消耗千卡17（每小时1020千卡）。

跑步速度作为有氧运动强度的指数（% VO_{2max} ）。

对于一个 VO_{2max} 已知的跑步者来说，跑步速度提供了一个

估计 VO_2 的自然方法，以及% VO_2 的自然方法：另一种看待前面引用的Margaria及其同事的发现的方法是在跑步中消耗的功率方面，因为以每单位身体质量的能量表示的 $c \sim 1 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 的代谢成本，相当于以每单位身体质量的功率表示的 $c \sim 1$ （千卡/小时） kg^{-1} （公里/小时） $^{-1}$ 的跑步速度（因为功率是能量变化的时间率，而速度是距离变化的时间率）。因此，跑步者消耗的功率大约为 $P \sim cmv$ ，其中 v 表示跑步者的速度。

等价地，速度可以用功率表示为 $v \sim \frac{P}{m}$ 。

因此，上述例子中的精英跑者在跑步时的速度是速度约为公里17/小时 $^{-1}$ （每英里5:53的速度）。有氧能力的估计(VO_{2max})

通常使用各种协议来评估 VO_2

以及跑步者和其他运动员的 VO_{2max} 。虽然休闲性跑者，包括每年在美国和国外城市参加马拉松比赛的数万名跑者，通常没有机会使用用于精确量化 VO_{2max} 的生理测量设施，但许多人有机会使用跑步机，允许在恒定的速度下进行控制性跑步。

心率，特别是心率占最大限度的百分比

心率。人力资源医学上通常被用作运动的指数。并且不需要特殊的仪器来

强度（ i 或% VO_{2max} ）措施。虽然一个人的最大心率，即 HR_{max} ，是一个人的最大心率。

特定的运动员取决于各种因素，它可以用许多与年龄有关的公式之一来估计，如通常引用的Fox和Haskell的公式[35]（每分钟220次减去年龄）或Tanaka和同事的公式（对于活跃的成年人，每分钟207次减去0.7倍的年龄），这些公式得到了实验和元分析的支持[36]。由于

跑步时消耗的功率是跑步速度的函数，因此可以将 $\dot{V}O_{2max}$ 表示为跑步速度 v 的函数，并且

$\%V_{Omax2}$ 以最大心率分数为指标， i

&。

使用上述分析中描述的方法。

$$\dot{V}O_{2max}(v,i) \sim \frac{c \cdot f(i)}{f_c(i)} \cdot \frac{f_c(i)}{c}$$

公式中的 $2\dot{V}O_{2max}$ 是以每分钟每公斤体重的氧气毫升数来表示的；乘以体重， m ，得到总的 $\dot{V}O_{2max}$ ，以每分钟的氧气毫升数来表示。图中说明4了如何应用这个公式来估计跑步者的 $\dot{V}O_{2max}$ ，并显示了一组计算出的 $\dot{V}O_{2max}$ 近似值与估计的最大心脏分数的函数。

以一定速度运行时的速率。

利用图，可以通过以下方式估计出跑者的 $4\dot{V}O_{2max}$ 找到垂直坐标，沿着彩色曲线，对应于摄于他或她的最大心率的一部分所需的维持与该曲线相关的运行速度（每条彩色曲线是为特定的运行速度绘制的，如图所示）。图例）。例如，考虑一个三十岁的运动员运行速度为14：5公里/小时¹（对应于图中的蓝色曲线）。

图4）。应用田中和同事的公式，我们预计这个跑步者的最大心率约为0.5%。

准确地说是每分钟跳动186一次。因此，如果他出现了心脏速率为每分钟149次，相当于他体重的80%。

当他以这个速度跑步时，他估计的 $\dot{V}O_{2max}$ 是60mLO₂ kg⁻¹ min⁻¹，相当于与最大心率的80%相关的蓝色曲线上的垂直坐标，这就是预期的最大值（因此是“运动强度”约为%80 $\dot{V}O_{2max}$ ）。

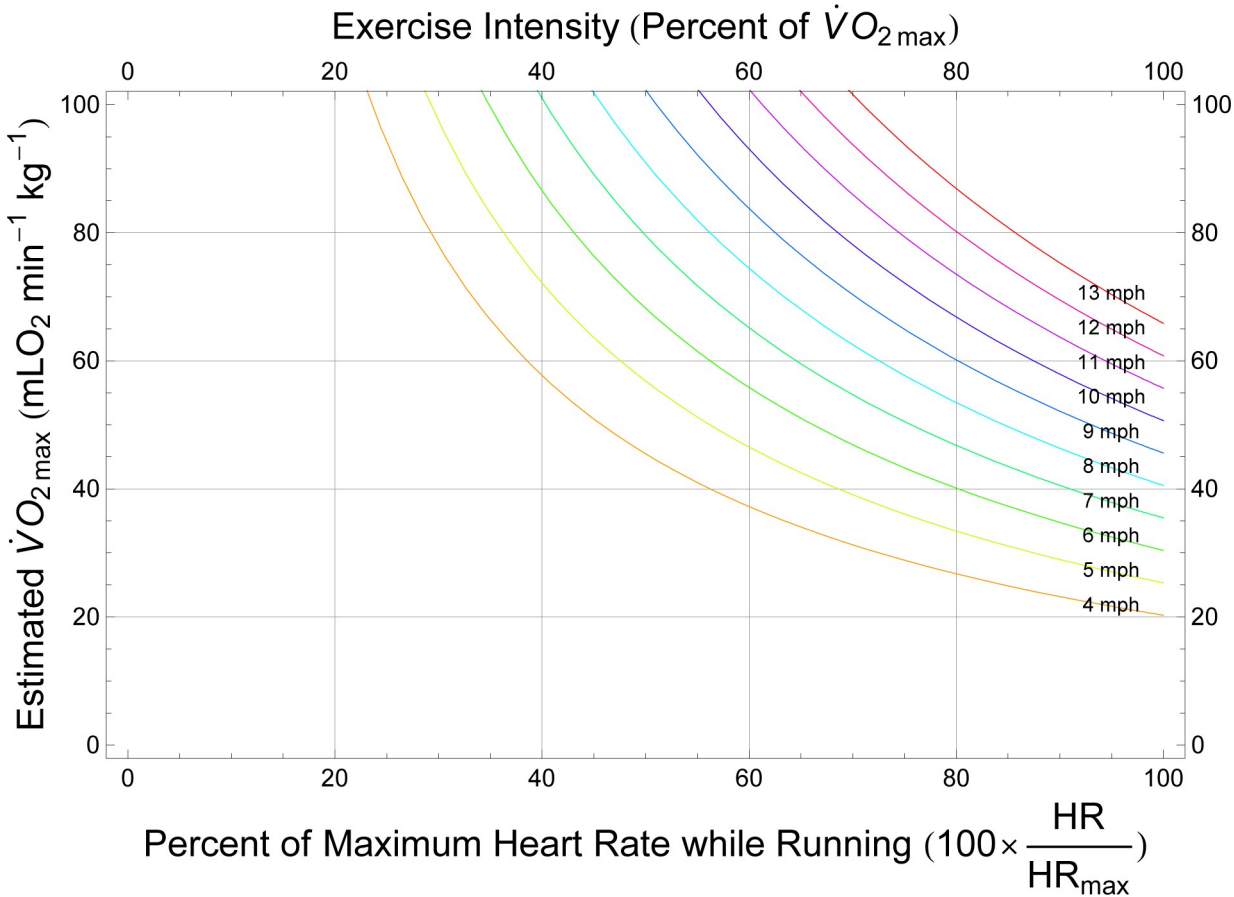
最大有氧跑步速度的估计

跑者的 $\dot{V}O_{2max}$ 可以用来估计他或她的最大有氧持续跑速。

$$v_{max} \sim \frac{\dot{V}O_{2max}}{f_c(i) - f_c(1)}$$

这反过来又允许估计碳水化合物和脂肪对他或她的有氧功率输出的相对贡献。

当以速度运行时
 v 大约等于
 $\frac{v}{v_{max}}$ 此外，由于能量



图：估计4.一个典型跑步者的有氧能力。计算出的 $\dot{V}O_{2max}$ 近似值（以每分钟每公斤体重的氧气毫升数计），作为以特定速度跑步时最大心率的估计分数的函数，显示为一组彩色曲线。每条线对应一个特定的跑步速度（橙色，英里/4小时（6：4公里/小时¹）；浅绿色，英里5/小时（89：17公里/小时¹）；绿色，英里6/小时（11：公里/小时¹）；深绿色，英里7/8小时（12：93公里/小时¹）；浅蓝色，英里/小时（14：5公里/小时¹）；蓝色，英里/小时9（：公里/小时¹）；深蓝色，英里10/小时（16：1公里/小时）；紫色，英里11小时（1917：7公里/小时¹）；品红色，英里13/12小时（20：93公里/小时¹）。详细解释见正文。doi:10.1371/journal.pcbi.1000960.g004

跑完一段距离 d 所需的能量为 cdm ，当以速度 v 跑步时，该能量中来自碳水化合物代谢的部分约为 $f \frac{v}{v_{\max}}$ 。

$$E_{\sim cdmf_c} \frac{v}{v_{\max}}$$

其中，对于给定质量和VO的跑步者来说，运行固定距离，只取决于跑步者的速度。

估算生理上的糖原储存能力和跑到筋疲力尽的距离

肝脏质量受到严格控制，通常约占身体总质量的2.5%[37]。另一方面，一些研究对成年人群的腿部肌肉质量进行了研究[38-40]，发现它与总体重相比表现出变化性，在成年女性和男性中分别约占总体重的18.0-22.5%和14.0-27.5%。因此，腿部肌肉质量占身体总质量的一部分，几乎占了耐力跑者最大碳水化合物储存能力相对大小的所有变化，对他或她在不补充燃料的情况下能维持的最大速度造成了潜在的限制。

值得注意的是，Karlsson和Saltin有证据表明，即使是积极的耐力跑者，在腿部肌肉糖原浓度接近 $\{35 \text{ g kg}^{-1}\}$ 时，表现也会在糖原储存完全耗尽前开始下降[26]；因此，跑者可用的有效糖原储备可能比总糖原库要小一些。然而，只有微弱的实验证据表明，在有氧运动强度不变的情况下，碳水化合物的代谢率相对于脂肪的代谢率有时间上的下降。在实验中，这种影响的程度在10%左右，出现在中度至剧烈运动的2-3小时后，而且很难与实验误差区分开来[24,31]。此外，仔细考虑这些研究中提出的生理学数据表明，这种下降在很大程度上可归因于实验对象的有氧输出下降，而实验对象被分配的任务是在连续几个小时内保持恒定、连续的功率输出。例如，在Bosch及其同事的研究中[31]，有氧输出的时间深浅变化与碳水化合物和脂肪氧化的变化之间的相关系数分别0.79,为和0.59。

运动员在“撞墙”前能跑的距离， d_w ，可以是表示为以一定强度跑步时，每单位体重以糖原形式储存的能量与每单位体重以碳水化合物形式消耗的能量之比。该

前者是由肝脏的糖原密度之和，后者是由肝脏的糖原密度之和。腿部肌肉（分别为 n 和 r_m ，以每公斤组织的糖原千卡为单位），按其占总质量的相对比例（分别为 m_l 和 m_m ）加权，而后者等于 $cf_c(i)$ 。因此。

$$d_w \sim \frac{m_l n + m_m r_m}{cf_c(i)} \quad (5)$$

由于在给定的跑者群体中， d_w 大部分变化将是由于肌肉的特性而不是肝脏的特性造成的，假设 m_l 和 n 分别为总体重的2.5%和每公斤肝脏的360千卡糖原（肝糖原的最大生理密度），是近似恒定的。

这里的3.推理可以扩展到估计一个跑步者的最大肌糖原利用率，以及他的肌糖原密度在长距离运动后的变化。长跑比赛。

$$D_{rm} \sim \frac{f_c \frac{v}{v_{\max}} (cdm \{E_i\})}{mrcm_m}, \quad (6)$$

其中 E_i 指的是比赛期间的碳水化合物总能量摄入， $f \frac{v}{v_{\max}}$ 取决于选手的速度以及

他的有氧能力（通过 v_{\max} 对VO的 v_{\max} 依赖）。公式6代表了密度的最大变化，因为它假设运动中代谢的所有碳水化合物都来自于肌糖原。如结果部分所述，在对卡尔森及其同事[26]的数据应用这一方程式时， v 被设定为每个跑者的平均比赛速度，这是从他的完成时间和比赛距离推断出来的。Karlsson及其同事允许每位选手在30公里内每4公里摄入最多1克20葡萄糖，但没有监测每位选手的加油模式，因此该研究中每位选手的 fE 为0.560千卡。参数 m_m 被设定为0.214，这是男性相对腿部肌肉质量的一个典型值。

赛中加油策略

运动引起的低血糖是指与耐力跑等活动相关的血浆葡萄糖水平的降低，因为它们耗尽了身体的总糖原储存。血浆葡萄糖水平的下降导致疲劳，客观上被定义为肌肉产生力量的能力下降[41]。肌肉疲劳的发生部分是由中枢神经系统介导的，但主要是由代谢因素引起的，包括肌肉内燃料储备的消耗[42]。许多研究和评论文章已经证实了耐力运动中消耗碳水化合物的性能提升能力[34]。在耐力赛跑者寻求避免“撞墙”的情况下，这里提出的建模方法可用于计算特定跑者在途中必须消耗的碳水化合物数量，以便将墙“推后”一定距离（例如超过马拉松终点）并避免在比赛中完全耗尽糖原。

如公式所示，质量为 m 的跑者在相对强度为 $i \sim \%VO$ 的 v_{\max} 情况下跑完距离 d 所需的4.碳水化合物能量为 $E_{\sim cdmf_c(i)}$ 。相应的碳水化合物的质量为

$$m \sim \frac{E_c}{rc} \sim \frac{cdmf_c(i)}{rc} \quad (7)$$

识别和量化误差来源

用于构建和数值评估本文介绍的模型的一些技术和假设，对得出的结果有潜在的误差来源。本小节研究并量化了模型各组成部分的不确定性对其预测的预期误差的影响程度。

首先，考虑整个模型中用来描述碳水化合物代谢占总能量一部分的函数 $f(i)$

支出，作为相对运动强度的一个函数， $i \sim$ 由于 $f(i)_{2max}$ 在整个模型方程的推导过程中被符号化处理，这些方程的有效性与其被准确描述的程度无关。这种处理方法也有利于直接的敏感性分析，在这种分析中，从模型中得出的主要数量相对于 $f(i)$ 进行对数区分，以得出这些数量中每个数量的预期相对（分数）变化，这些变化可归因于 $f(i)$ 的相对误差。

考虑到 P 、 $\frac{VO_{2max}(v,i)}{m}$ 、 v_{max} 、 E_c 和 d 的 w 表达式，在分别为方程 1、2、3、4 和 5。在这些方程中用 $\{1f(i)$ 代替 $f(i)$ ，可以清楚地看到这些模型量中的每一个都表现出对 $f(i)$ 或其逆的一阶依赖。然后，对数微分显示， $f_c(i)$ 的相对误差

导致这些量的相对误差减少（分别为正或负）。以 1 这种方式处理公式中的运动中的功率输出表达，可以得到

$$\frac{L \ln P}{L f(i)} \sim \frac{L \ln B}{L f(i)} \frac{V}{V} \frac{2}{2} \quad (8b)$$

$$\frac{1}{P} \frac{LP}{L f(i)} \sim \frac{L}{L f(i)} \ln VO_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{f(i)}{f} \frac{f_c(i)}{r} \right\} \quad (9b)$$

$$\frac{P}{P} \sim \left\{ \frac{B}{f_c(i)} \frac{dP}{r} \frac{r}{r} \frac{1}{r} \frac{1}{r} \right\} \quad (10b)$$

$$\frac{dP}{P} \sim \left\{ \frac{df_c(i)}{f_c(i)} \right\} \quad (11b)$$

由于 $\frac{1}{r_f} \sim \left\{ \frac{1}{r_c} \right\}$ 和 $f_c(i) \sim \frac{1}{f(i)}$ 。

$$\frac{dP}{P} \sim \left\{ \frac{df_c(i)}{f_c(i)} \right\} \quad (12b)$$

意味着 $f_c(i)$ 的相对误差会通过模型传播。将这种方法应用于 P 的相对误差较小。

表达式 $\frac{VO_{2max}(v,i)}{m}$ 和方程 v_{max} 中的 v ，并得到 23 得到这些数量的相对误差有类似的界限。

$$\frac{dVO_{2max}(v,i)}{VO_{2max}(v,i)} \sim \left\{ \frac{1}{5} \frac{df(i)}{f(i)} \right\} \quad (13b)$$

和

$$\frac{dv_{max}}{v_{max}} \sim \left\{ \frac{1}{5} \frac{df_c(i)}{f_c(i)} \right\} \quad (14b)$$

分别。在说明不等式 12、13 和 14 时，假设 d 标记的数量的变化幅度为正值；负值的变化需要颠覆每个不等式。

数量 E_c 和 d 分别表现出对 $f_c(i)$ 和 $f_c(i)^{-1}$ 的纯粹依赖。由于它们对 $f_c(i)$ 的明确依赖， E_c 和 d 的 w 预期相对误差同样可以通过对数微分得出，这就产生了

$$\frac{dE_c}{E_c} \sim \left\{ \frac{df_c(i)}{f_c(i)} \right\} \quad (15b)$$

和

$$\frac{dd}{d} \sim \left\{ \frac{df_c(i)}{f_c(i)} \right\} \quad (16b)$$

分别是。

函数 $f_c(i)$ 定义为 $f(i)z_c(i)$ ，其中 $f(i)$ 和 $c(i)$ 分别表示在特定强度下，脂肪和碳水化合物的全身氧化率。 $f_c(i)$ 的实验测定是基于对 $f(i)$ 和 $c(i)$ 的独立测量，在不同的强度，所以这两个量的实验误差对 $f_c(i)$ 的总误差有独立贡献。局部对 $f(i)$ 和 $c(i)$ 进行微分，得到的是

在加权项之和中分配给每个组成部分的权重对应于 $f_c(i)$ 的总误差。

$$\frac{df_c(i)}{f_c(i)} \sim \left\{ \frac{Lc(i)}{Lc(i)} \frac{dc(i)}{c(i)} + \frac{Lf(i)}{Lf(i)} \frac{df(i)}{f(i)} \right\} \quad (17b)$$

$$\frac{1}{\delta f(i) z_c(i)} \sim \left\{ \frac{1}{\delta^2} \frac{1}{\beta} \right\} \quad (18b)$$

本文在数值计算中使用的 $f_c(i)$ 的特定拟合函数形式是基于 Romijn 及其同事 [24] 的工作中提供的数据。该工作中给出的与 $f(i)$ 和 $c(i)$ 的测量相关的标准误差值，可以用来推导出 $f_c(i)$ 在不同情况下的总预期误差。

有氧运动强度。相应的误差条显示在图中 1，绘制了 $f_c(i)$ 的拟合数据。误差在

根据公式计算的 $f_c(i)$ 在 Romijn 及其同事的研究中观察到的任何强度下都不超过 5.5%。

由于敏感性分析表明，与 $f_c(i)$ 的变化相关的模型误差最多是等量的

到，并且对于某些数量小于或等于 $\frac{1}{5}$ 的那些变化，任何建模量的误差都可归因于对 $f_c(i)$ 的误差不应超过 5.5%，在许多情况下应接近 1%。

作为不确定性的第二个来源，考虑跑步的代谢成本 c 。一般来说，跑步的能量成本因人而异，也可能取决于跑步的距离 [43]。

训练有素的跑者通常有更大的跑步经济性（跑步的能量成本较低），比未受过训练的跑者要高。Margaria 和他的同事报告说，这种差异的大小大约为 5-7% [18]。值得注意的是，随后的研究，如 Billat 及其同事的研究 [16]，发现即使在精英人群中，跑步经济性也存在差异

运动员们的数量相似。这种变化并不是与马拉松比赛成绩的变化始终相关。然而，Billat 及其同事已经证明了

氧气消耗率， VO_2 或 $\%VO_{2max}$ ，在决定马拉松赛事的时间方面，比赛场地是一个明显更重要的因素。

跑步经济中的个人变异性比区分总能量和净能量支出而引入模型的任何误差都要大得多。

正如引言中所建议的那样。一个准确的个人模型运行的总能量成本将有 $m(bzcv)Dt$ 的形式。

其中 b 表示基础(静止)代谢率,约为 $1\text{千卡h}^{-1}\text{公斤}^{-1}$,如Margaria[18]所示; c 表示跑步的净能量成本,约为 $1\text{千卡kg}^{-1}\text{公里}^{-1}$; v 表示跑步速度; m 表示跑步者的质量; Dt 表示跑步的时间。在这个模型中,基础代谢对跑步净能量成本的贡献率为

$$\frac{1}{v} \frac{dv}{dt} \approx 0$$

从数字上看,

以每小时公里数表示。大的模式完成时间因此,如果基础代谢将其所有的能量都消耗在碳水化合物上,那么对这里提出的模型的相关修正将是10%左右^[1]。然而,诸如Romijn及其同事[24]的研究表明,静止代谢没有从肌肉糖原储备中获得明显的能量,从血浆葡萄糖中获得的能量不到10%。因此,忽略 b 而引入模型的误差通常小于1%;在较快的完成时间内,这一误差会进一步下降。

第三,考虑与用于评估有氧能力的方法有关的不确定性。使用这里提出的建模框架所做的预测的准确性,如应用于一个特定的跑步者,取决于对有关跑步者的 VO_{2max} 的准确性。目前,测量 VO_2 和 VO 的最准确和最精确的方法 $_{2max}$ 涉及在渐进式运动方案中的定量肺活量测定[22]。在有当代定量生理学最精确的测量技术的情况下,通过这些方法获得的参数可以被纳入到模型方程以产生尽可能准确的结果。在

在没有这种技术的情况下,典型的休闲跑步者可能无法获得这种技术,有原则的近似技术是非常有用的。为此,一种普遍适用的方法

的近似值 VO_{2max} 在本文中提供;错误与该方法有关的问题在此讨论。

本工作中提出的估计 VO_{2max} 的方法属于相关的“外推法”系列,多年来被运动员、教练员和训练员广泛使用。一般的方法在生理学文献中已经有了广泛的描述(McArdle和他的同事[22],以及其他许多人的评论)。具体的实施方案已经通过共识进行了标准化[28,44]。推断方法

测量 VO_{2max} 方法有已知的缺点[22],这些缺点可能是

导致它们与肺活量评估的偏差高达10-20%。然而,典型的误差可能要小得多:例如,di Prampero及其同事[7]采用了与本文类似的外推法,发现将外推法获得的 VO 估计值 $_{2max}$ 与相应的测量值相比,平均比率为1:025+0:042(标准误差)。通过肺活量测定获得的数据。

鸣谢

威廉-M-凯蒂尔提供了宝贵的、明确的建议。在某种程度上,他邀请我加入他在哈佛医学院的内分泌学核心课程的讲课人员,我在耐力运动生理学方面的工作始于2005年以来每年4月的第三个星期一,在完成波士顿马拉松比赛后进行的一系列讲座,从而激发了本项工作。我还感谢克雷格-H-梅尔(Craig H. Mermel),他是我的同学和跑步伙伴,在开发这里的模型期间进行了富有洞察力的对话,并对这份手稿进行了严格的审查。

作者投稿

实验的构思和设计。BIR.进行了实验。BIR.分析数据。BIR.撰写论文。BIR.

参考文献

1. 美国路跑信息中心 (2010) 2010年马拉松和运动状况报告。
2. Buman MP, Brewer BW, Cornelius AE, Van Raalte JL, Petitpas AJ (2008) 在马拉松比赛中撞墙。现象学特征以及期望值、性别和跑步历史的关系。Psychol Sport Exerc 9: 177-190.
3. Buman MP, Brewer BW, Cornelius AE (2009) 休闲马拉松跑者撞墙的离队时间危险模型。Psychol Sport Exerc 10: 662-666.
4. Sjodin B, Svedenhag J (1985) 马拉松跑步的应用生理学。运动医学2: 83-99.
5. Emmett J (2007) 马拉松跑步的生理学。跑马拉松对你的身体有什么影响? Marathon and Beyond 11: 20-36.
6. Locksley R (1980) 马拉松比赛中燃料的利用。对成绩的影响(医务人员会议,加利福尼亚大学,旧金山)。West J Med 133: 493-502.
7. di Prampero PE, Atchou G, Lickner JC, Moia C (1986) 耐力跑的能量学。Eur J Appl Physiol Occup Physiol 55: 259-266.
8. Ward-Smith AJ (1985) 基于热力学第一定律的跑步数学理论,以及它在世界级运动员表现中的应用。J Biomech 18: 337-349.
9. Peronnet F, Thibault G (1989) 对跑步性能和世界跑步记录的数学分析。J Appl Physiol 67: 453-465.
10. Joyner MJ (1991) 建模: 基于生理因素的最佳马拉松表现。J Appl Physiol 70: 683-687.
11. Billat V, Bocquet V (1999) 女性马拉松最佳成绩的生物能量学方法。科学体育14: 180-182.
12. Bocquet V, Billat V (1999) 人类表现的数学和生理学模型。科学体育》14: 278-291.
13. di Prampero PE (2003) 限制人类最大表现的因素。Eur J Appl Physiol 90: 420-429.
14. McGregor SJ, Weese RK, Ratz IK (2009) 奥运会1500米决赛选手的表现模型。一种实用的方法。J Strength Cond Res 23: 2515-2523.
15. Jones AM (2006) 女子马拉松世界纪录保持者的生理学。Int J Sports Sci Coach 1: 101-116.
16. Billat VL, Demarle A, Slawinski A, Paiva M, Koralsztejn JP (2001) 顶级马拉松选手的身体和训练特点。Med Sci Sports Exerc 33: 2089-2097.
17. Anrese LA, Izquierdo DM, Serveto Galindo JR (2005) 与高水平男性和女性同质群体的马拉松跑步成绩有关的生理措施。Int J Sports Med 27: 289-295.
18. Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P, Sassi G (1963) 跑步的能量成本。J Appl Physiol 18: 367-370.
19. Mayhew JL (1977) 训练有素的跑步者的氧气成本和能量消耗。Br J Sports Med 11: 116-121.
20. Acheson KJ, Schutz Y, Bessard T, Anantharaman K, Flail JP, et al. (1988) 在人类大量碳水化合物过量喂养期间的糖原储存能力和新脂肪生成。Am J Clin Nutr 48: 240-247.
21. Hultman E, Nilsson LH (1973) 人在吸收后状态下的肝糖原含量。Scand J Clin Lab Invest 32: 17-23.
22. McArdle WD, Katch FI, Katch VL (2010) Exercise Physiology: 营养、能量和人类表现。纽约。Lippincott Williams and Wilkins, 第七版。
23. Fairchild TJ, Fletcher S, Steele P, Goodman C, Dawson B, et al. (2002) 短暂的接近最大强度的运动后,快速的碳水化合物负荷。Med Sci Sports Exerc 34: 980-986.
24. Romijn AJ, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, et al. (1993) 内源性脂肪和碳水化合物代谢的调节与运动强度和时间的关系。Am J Physiol 265:E380-E391.
25. Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L (2002) Biochemistry. New York: W. H. Freeman and Company, 第五版。
26. Karlsson J, Saltin B (1971) 饮食、肌糖原和耐力表现。J Appl Physiol 31: 203-206.
27. Sabhapandit S, Majumdar SN, Redner S (2008) Crowding at the front of marathon packs. J Stat Mech arXiv: 0802.1702v2.
28. 美国运动医学学院 (2000) 运动测试和处方指南。费城。Lippincott Williams and Wilkins, 第六版。
29. Pollock ML (1973) 耐力训练计划的量化。Exerc Sport Sci Rev 1: 155-188.

30. Arkinstall MJ, Bruce CR, Clark SA, Rickards CA, Burke LM, et al. (2004) 运动前肌肉糖原含量和运动强度对燃料代谢的调节。J Appl Physiol 97: 2275-2283.
31. Bosch AN, Dennis SC, Noakes TD (1993) 碳水化合物负荷对长时间运动中燃料底物周转和氧化的影响。J Appl Physiol 74: 1921-1927。
32. Tsintzas OK, Williams C, Boobis L, Greenhaff P (1996) 男性在长时间跑步过程中碳水化合物的摄入和单一肌肉纤维的糖原代谢。J Appl Physiol 81: 801-809。
33. Thomas JE (1957) 胃排空的力学和调节。Physiol Rev 37: 453-474.
34. Tsintzas K, Williams C (1998) 运动中人类肌肉糖原代谢。补充碳水化合物的效果。运动医学25: 7-23。
35. Fox III SM, Haskell WL, Naughton JP (1971) 体育活动和冠心病的预防。Ann Clin Res 3: 404-432。
36. Tanaka H, Monahan KD, Seals DR (2001) 重新审视年龄预测的最大心率。J Am Coll Cardiol 37: 153-156.
37. Valentin J, ed. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: 参考值, 《国际辐射防护委员会32年鉴》卷。纽约。Pergamon出版社。
38. Heymsfield SB, Smith R, Aulet M, Bensen B, Lichtman S, et al. (1990) Appendicular skeletal muscle mass: measurement by dual-photon absorptiometry. Am J Clin Nutr 52: 214-218.
39. Wang W, Wang Z, Faith MS, Kotler D, Shih R, et al. (1999) 区域骨骼肌测量: 新的双能量X射线吸收仪模型的评估。J Appl Physiol 87: 1163-1171.
40. Levine JA, Abboud L, Barry M, Reed JE, Sheedy PF, et al. (2000) 测量人类的腿部肌肉和脂肪质量: CT和双能量X射线吸收仪的比较。J Appl Physiol 88: 452-456.
41. Nybo L (2003) 中枢神经系统的疲劳和长时间的运动。补充葡萄糖的效果。Med Sci Sports Exerc 35: 589-594。
42. Kent-Braun JA (1999) 人类在持续的最大努力中对肌肉疲劳的中枢和周边贡献。Eur J Appl Physiol Occup Physiol 80: 57-63.
43. Brueckner JC, Atchou G, Capelli C, Duvallet A, Barrault D, et al. (1991) 跑步的能量成本随着距离的增加而增加。European J Appl Physiol 62: 385-389.
44. Golding LA (2000) YMCA 健身测试和评估手册。Champaign Illinois: Human Kinetics, 第四版。