



# 常见便携式遥测气体代谢仪核心测量指标的信度和效度分析

陈俊飞<sup>1,2</sup>, 汤强<sup>1\*</sup>, 严翊<sup>2</sup>, 谢敏豪<sup>3</sup>

**摘要:** 现代社会生活方式的改变, 给人类健康带来极大的威胁。通过增加日常体力活动量(约占总能量消耗量的 20%), 可以有效减少和控制慢性非传染性疾病的发生和发展, 减轻社会医疗负担。便携式遥测气体代谢仪可测量自由状态下的体力活动量, 因而被广泛应用于智能手机、可穿戴和虚拟现实设备的开发和应用, 以及竞技体育科研等健康促进领域的研究, 目前对便携式遥测气体代谢仪准确的使用范围知之不深。本文对常见的几种便携式遥测气体代谢仪(包括: Cosmed K4b<sup>2</sup>、Metamax 3B/VmaxST、Oxycon Mobile、VO2000)在不同环境、不同条件下测量的信度和效度及其核心指标  $VO_2$ 、 $VCO_2$  和  $V_E$  进行分析, 以期为相关的研究和应用提供参考。

**关键词:** 便携式遥测气体代谢仪; 体力活动量评价; 核心测量指标; 信度; 效度

中图分类号: G804.5 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2017)06-0067-07

DOI: 10.12064/ssr.20170610

## Reliability and Validity of the Core Measurement Indices of Classical Portable Telemetric Gas Metabolic Systems

CHEN Junfei<sup>1,2</sup>, TANG Qiang<sup>1\*</sup>, YAN Yi<sup>2</sup>, XIE Minhao<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Institute of Sports Science, Nanjing 210033, China; 2. College of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 3. National Institute of Sports Medicine, Beijing 100061, China)

**Abstract:** The changes of lifestyle in modern society bring great threat to human health. Enhancing the level of physical activity (PA), which usually accounts for 20% of the total energy expenditure, can effectively decrease and control the occurrence of chronic non-infectious diseases and reduce the burden of social medical service. Portable telemetric gas metabolic systems can assess PA in free state. It has been applied to health promotion researches, the development and application of smart phones, wearable devices and visual reality equipment as well as competitive sports researches. However, people do not understand much about the correct use of the systems. The paper focuses on the reliability and validity of several portable telemetric gas metabolic systems, including Cosmed K4b<sup>2</sup>, Metamax 3B/VmaxST, Oxycon Mobile and VO2000, at different environments and conditions, especially the core indexes of  $VO_2$ ,  $VCO_2$  and  $V_E$ , so as to provide reference for the relative research and application.

**Key Words:** portable telemetric gas metabolic system; assessment of physical activity(PA); core measurement index; reliability; validity

现代社会的不断进步和科技的飞速发展, 不断地改变着人类的生活方式。人们的饮食摄入量不变或增加, 而体力活动量在迅速减少<sup>[1, 2]</sup>。这种生活方式的改变, 与肥胖<sup>[3]</sup>、代谢综合征<sup>[4, 5]</sup>、2型糖尿病<sup>[6, 7]</sup>、心血管疾病<sup>[8]</sup>等慢性非传染性疾病的发生和发展密切相关。

便携式遥测气体代谢仪的出现, 克服了自由状态下的体力活动量评价难的问题, 被广泛应用于体力活动相关领域的研究, 如智能手机、可穿戴和虚拟现实设备的开发和应用, 竞技体育科研等。但这些设备测量是否准确? 特别是其核心指标: 摄氧量( $VO_2$ )、二氧化碳产生量( $VCO_2$ )和通气量( $V_E$ )测量

收稿日期: 2017-10-20

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2006BAK3303); 江苏省科技厅社会发展项目(BE2013726)。

第一作者简介: 陈俊飞, 男, 助理研究员, 在读博士研究生。主要研究方向: 运动与能量代谢。E-mail: chenjunfei188@163.com。

\* 通讯作者: 汤强, 男, 研究员。主要研究方向: 体力活动与健康。E-mail: tang\_qiang@sina.com。

作者单位: 1.江苏省体育科学研究所, 南京 210033; 2.北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084; 3.国家体育总局运动医学研究所, 北京 100061。



的信度和效度如何?对于设备的应用范围及使用限制具有很强的指导作用。本文就这些问题进行分析,以期对相关研究和应用提供参考。

### 1 便携式遥测气体代谢仪的发展

便携式遥测气体代谢仪是基于间接测热法(Indirect Calorimetry)发展起来的设备<sup>[9]</sup>。最初,研究人员用道格拉斯气袋(Douglas bag),收集受试者经过三通单向阀的呼出气体,每隔一段时间(30 s 或 1 min)更换一个气袋,整个测试过程约需要几十个气袋。气体收集完成后,使用化学分析法分析气袋中的 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的浓度,以及气体体积,得出受试者单位时间内 O<sub>2</sub> 的消耗量和 CO<sub>2</sub> 的生成量,并计算呼吸商(Respiratory Quotient, RQ)、能量消耗量(Energy Expenditure, EE)等。这就是道格拉斯气袋法(Dogalas Bag method, DB 法),它也被誉为气体代谢测试的“金标准”(gold standard)<sup>[10-13]</sup>,常被用于评判新的气体代谢设备测量的效度<sup>[14]</sup>。

由于 DB 法测试整个过程缓慢而且非常繁琐,

且设备体积大,难于携带,短时间内气体在多氏袋内无法均匀混合,使其应用受到限制<sup>[15]</sup>。20 世纪末,伴随电子技术、高速传感器技术的发展和计算机的应用,测试技术有了大飞跃,人们提出呼出气的动态混合概念,即混合仓(Mixing Chamber)法,在测试的同时便可得到了气体代谢的数据。混合仓法比较符合道格拉斯气袋法的基本原理,适用于稳态负荷的测试<sup>[16]</sup>,但由于数据动态性能差,反映迟钝,该方法不适用于短时间快速精确的测量。

随后出现了更为及时的 breath-by-breath 方法,即分析每一口呼出气的 V<sub>E</sub>、O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度,使 VO<sub>2</sub> 的测试成为一个快速、精确、动态测试。无线传输技术的应用,使气体代谢测试突破了以前测试只能在跑台或功率车上进行,它可以测试自由活动状态下的气体代谢状况,这就是便携式遥测气体代谢仪。目前,市场上常见的设备有 Cosmed K4b<sup>2</sup>、Metamax 3B/VmaxST、Oxycon Mobile、VO2000 等,其参数如表 1 所示。

表 1 常见便携式遥测气体代谢分析仪基本参数

Table I Basic Parameters of the Common Portable Telemetric Gas Metabolic System

制造商	型号	传感器			功能选项
		流量计	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
Cosmed	K4b <sup>2</sup>	数字涡轮	电化学	ND 红外	BXB, spir, ECG
Cortex	Metamax 3B	数字涡轮	电化学	ND 红外	BXB, spir, I-ECG
Sensormedics	VmaxST	数字涡轮	电化学	ND 红外	BXB, spir, I-ECG
Jaeger	Oxycon mobile	数字涡轮	电化学	Thermal conductivity	BXB, ECG, Heart Rate monitoring, SpO <sub>2</sub>
Medical Graphics	VO2000	PTM	电化学	ND 红外	BXB
Aerosport	VO2000	PTM	电化学	ND 红外	BXB

注:ND 红外: nondispersive infrared; BXB=breath-by-breath; spir=spirometry, 肺活量测定法; ECG=心电图; PTM: Pneumotachometer, 层流压差式流量传感器。

### 2 常见便携式遥测气体代谢仪测量的信度和效度

便携式遥测气体代谢仪的出现,使得更为自由活动状态下的体力活动能量消耗量测试成为现实。这些便携式遥测气体代谢仪测量是否准确,需要对其核心指标——VO<sub>2</sub>、VCO<sub>2</sub> 和 V<sub>E</sub> 的测量信度和效度进行分析。

信度(Reliability)分析反映气体代谢仪的重复测量的一致性,研究往往采用模拟设备重复进行不同流速的特定气体交换或采用同一批受试者进行不同形式、不同强度的重复运动测试。效度(Validity)分析对气体代谢仪的测量值与模拟值或“金标准”DB 方法测量值进行分析,评价测量的有效性。常采用相关分析, Bland-Altman 散点分析<sup>[17]</sup>等,用相关系数(Cor-

relation Coefficient)r、变异系数(Coefficient of Variance, CV)、标准误(Standard Error of Measurement, SEM, 或 Typical Error of Measurement, TEM)<sup>[18]</sup> 等指标进行评价。

变异系数(CV)=重量测量的标准差/重复测量的均值×100%

$$SEM=TEM=\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad TEM\%=TEM/\text{均值}$$

#### 2.1 Cosmed K4b<sup>2</sup> 气体代谢仪测量的信度和效度

Cosmed K4b<sup>2</sup>便携式遥测气体代谢仪(意大利, Cosmed 公司)是在 K4 系统的基础上发展的一种气体代谢系统。目前,关于这套系统测量信度和效度的研究比较多,具体研究情况见表 2。

信度方面的研究多集中于安静状态,不同步行



和跑步速度,上、下楼梯等。以 CV 值 < 10%<sup>[40]</sup>,或  $r > 0.85$ ,或 TEM% < 5% 做为评判标准,多数的研究认为 K4b<sup>2</sup> 在规律、强度较低的运动时有较好的信度,但其在安静、上楼梯、大强度运动(1 min 冲刺跑)下,重复测量的一致性中等。其中,安静时可能与其通气量较小有关;下楼梯时重测信度差,原因可能是未采用定频节奏,而是采用自我控制节奏。建议应

用 K4b<sup>2</sup> 开展其它体力活动状态下的重复测量信度研究。

效度方面的研究较少,仅有步行、跑、功率自行车状态下的测量效度研究,但有限的研究提示,K4b<sup>2</sup> 的 VO<sub>2</sub> 的测量效度尚可,而 VCO<sub>2</sub> 在大强度时可能存在低估的现象,仍需更多气体代谢仪在大强度运动和不同体力活动状态下的测量效度研究。

表 2 Cosmed K4b<sup>2</sup> 气体代谢仪测量的信度和效度研究

Table II Variability and Validity of the Gas Metabolic System Cosmed K4b<sup>2</sup>

性质	研究者 (年份)	研究对象 (人数)	研究方法	研究结果	研究结论
信度分析研究	张磊等 <sup>[19]</sup> (2003)	健康男性大学生 (N=10)	静卧状态,每次气体交换 5min,重复 5 次,每次间隔 30min。	VO <sub>2</sub> : $p > 0.05$ , CV=10.12(3.78~15.54), $r=0.17-0.81$ . VCO <sub>2</sub> : $p < 0.05$ , CV=11.57(3.81~19.02), $r=0.34-0.81$ . V <sub>E</sub> : $p > 0.05$ , CV=8.38(2.25~15.68), $r=0.62-0.93$ .	静息状态下,重测信度较好。(以 CV 小于 10% 为标准)
	Stookey 等 <sup>[20]</sup> (2013)	轻度中风幸存者 (N=23, 11 男, 12 女)	6 min 步行测试 (6-minute walk, 6MW), 重复 2 次。	相对 VO <sub>2</sub> : $r=0.90(0.79-0.95, 95\%CI)$ ; 绝对 VO <sub>2</sub> : $r=0.93(0.86-0.97, 95\%CI)$ . VCO <sub>2</sub> : $r=0.93(0.86-0.97, 95\%CI)$ . V <sub>E</sub> : $r=0.95(0.89-0.98, 95\%CI)$ .	$r$ 均高于 0.85, 重测信度高。
	Darter 等 <sup>[21]</sup> (2013)	受试者 (N=22, 11 男, 11 女)	安静和 6 个不同速度步行 (由 0.71~1.65m/s, 或 2.556~5.94km/h), 重复 2 次。	安静: VO <sub>2</sub> : CV=7.3, $r=0.43(-0.41-0.77, 95\%CI)$ , SEM=0.32. 步行: VO <sub>2</sub> : CV=2.0~2.6, $r=0.85-0.96$ SEM=0.27~0.46; V <sub>E</sub> : CV=2.0~2.6, $r=0.84-0.93$ ; SEM=0.01.	$r$ 均高于 0.85, 重测信度高。
	Keefer 等 <sup>[22]</sup> (2013)	成年受试者 (N=13)	不同条件下 (便携式设备固定在身上、固定在体外、固定在体外并倾斜 60~90°、固定于体外并模拟垂直颠簸 0~6.25cm) 在跑台上步行 5min, 速度为 1.8m/s 或 6.48km/h, 重复 3 次, 第 1 次为适应。	VO <sub>2</sub> : CV=2.7~3.8.	设备在不同状态下, 重测信度高。
	Veluswamy 等 <sup>[23]</sup> (2015)	受试者 (N=12~20)	步行(500m), 上楼梯和下楼梯 (4 层, 15cm×96 个台阶), 重复 2 次, 中间间歇 7~10min。	步行: VO <sub>2</sub> 和 VCO <sub>2</sub> : $r=0.91(0.72-0.97, 95\%CI)$ . 上楼梯: VO <sub>2</sub> : $r=0.82 (0.6-0.93, 95\%CI)$ , VCO <sub>2</sub> : $r=0.73 (0.44-0.88, 95\%CI)$ . 下楼梯: VO <sub>2</sub> : $r=0.67 (0.33-0.85, 95\%CI)$ , VCO <sub>2</sub> : $r=0.51 (0.1-0.77, 95\%CI)$ .	重测信度高( $r \geq 0.9$ ). 中等的重测信度( $r \geq 0.7$ , 且 $r < 0.9$ ). 重测信度较差( $r < 0.7$ ).
	Duffield 等 <sup>[24]</sup> (2004)	男性受试者 (N=12)	慢跑(easy run)、快速跑(hard run)、冲刺跑(sprint)	慢跑:VO <sub>2</sub> : $r=0.85$ , TEM=0.14, TEM%=4.17; VCO <sub>2</sub> : $r=0.81$ , TEM=0.13, TEM%=4.26; V <sub>E</sub> : $r=0.88$ , TEM=3.39, TEM%=4.21. 快速跑:VO <sub>2</sub> : $r=0.87$ , TEM=0.19, TEM%=4.01; VCO <sub>2</sub> : $r=0.72$ , TEM=0.26, TEM%=5.58; V <sub>E</sub> : $r=0.78$ , TEM=6.53, TEM%=5.14. 冲刺跑:V <sub>E</sub> : $r=0.53$ , TEM=0.42, TEM%=12.06; VCO <sub>2</sub> : $r=0.68$ , TEM=0.31, TEM%=10.87; V <sub>E</sub> : $r=0.58$ , TEM=9.80, TEM%=10.37.	重测信度较高。 重测信度中等。(TEM%: 5%~10%)
	刘健敏等 <sup>[25]</sup> (2010)	青年学生 (N=12)	静息状态、中等强度 (跑台坡度 10%, 速度 2.7km/h)、高等强度 (跑台坡度 10%, 速度 5.8km/h)	VCO <sub>2</sub> 在高等强度时, 低于 DB 法 ( $P < 0.05$ ), 其它情况下, VO <sub>2</sub> 和 VCO <sub>2</sub> 与 DB 法测试没有显著性差异。	良好的测量准确性。
	Mclaughlin JE 等 <sup>[16]</sup> (2001)	受试者 (N=10)	功率自行车 (50、100、150、200、250W)	VO <sub>2</sub> 在安静和 250W 时, 两种方法没有显著性差异; 在 50、100、150、200W 时, K4 b <sup>2</sup> 系统略高于 DB 法 ( $P < 0.05$ ), 均值差异小于 0.1L/min, 或 9.6%~3.0%。 V <sub>E</sub> 和 CO <sub>2</sub> 从安静到 150W 略高于 DB 法, 但没有显著性差异, 在 200W 和 250W 时, K4b <sup>2</sup> 系统的测量值低于 DB 法。	在一个较大运动强度范围里, 核心指标 VO <sub>2</sub> 的测量值是可接受的。



## 2.2 Metamax 3B 气体代谢仪测量的信度和效度

Metamax 3B(德国,Cortex)是德国 CORTEX Biophysik 公司 1999 年研制的产品,是基于 Metalyzer 3B 发展的便携遥测气体代谢仪。2001 年时,该公司为美国 Sensormedics 公司生产的 Metamax 3B, 在市场上的商品名为 VmaxST。

对于这套系统的信度和效度的研究多针对于 VmaxST 气体代谢仪。VmaxST 气体代谢仪与 Metamax 3B 气体代谢仪的区别在于 VmaxST 气体代谢仪采用的软件版本为 Metasoft 1.0, 而后继的 Metamax 3B 气体代谢仪采用的是更新的软件版本(新的已到 Metasoft 3.9.7)。有关这套系统信度和效度分析方面的研究较多,具体研究情况见表 3。

信度方面的研究多采用模拟气体交换设备,以 TEM% < 3% [26] 为测量信度高的标准,多数研究结果

Metamax 3B/VmaxST 重复测量的一致程度高。而人体进行不同速度的步行和跑步时, CV 升高,特别是 VCO<sub>2</sub> 的 CV 超过了 10%, 提示 VmaxST 在大强运动(跑步速度 9.65 km/h)时,其信度略差。未见 Metamax 3B 人体的重复测量信度的研究,建议对软件升级后气体代谢仪的信度进行研究,特别是人体研究。

效度方面的研究,早期版本的 VmaxST VCO<sub>2</sub> 的测量值存在低估现象,而新版本 Metamax 3B 在进行较大强度运动时,则存在高估的问题,特别是 VCO<sub>2</sub> 的测量值,这会造成体力活动量被高估或有氧供能比例增加的现象,对于某一特定运动项目能量供应特征的研究,可能带来较大的误差,因而,在应用时需考虑其准确的测试范围。但由于 Metamax 3B 具有较好的信度,对于同一个体前后的测量数据还是可以进行对比分析。

表 3 Metamax 3B/VmaxST 气体代谢仪核心指标测量的信度和效度研究

Table III Variability and Validity of the Core Measurement Indexes of the Gas Metabolic System Metamax 3B/VmaxST

性 质	研究者 (年份)	设备	研究 对象 (人数)	研究方法	研究结果	研究结论
	Prieur 等 <sup>[27]</sup> (2003)	Vmax ST	—	GESS 模拟气体交换 20min, 通气量为 80L/min。吸入气体为 20℃ 的周围空气, 呼出气体为 30℃, 水蒸汽饱和且已知 O <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 浓度的气体, 重复模拟运动稳态时的气体交换 6 次。	仅第 13 min 末的 30s 的 VCO <sub>2</sub> 显著高于第 1 min 末(P<0.05, 其余各指标 VO <sub>2</sub> 、VCO <sub>2</sub> 和 V <sub>E</sub> 各时间点的测量值没有差异。VO <sub>2</sub> 的 CV= (0.79±0.91)%, VCO <sub>2</sub> 的 CV= (1.61±1.34)%, V <sub>E</sub> 的 CV= (0.19±0.08)%。	测量稳定可靠。
信 度 分 析	Perkin CD 等 <sup>[28]</sup> (2002)	Vmax ST	15 男, 15 女	受试者 跑台上重复运动负荷实验(步行: (N=30, 3mph, 0%; 3.5mph, 5%; 跑 6mph, 0%, 然后以每分钟递增 2.5% 坡度直至力竭)	VO <sub>2</sub> : r=0.97~0.99(0.94~1, 95%CI), SEM=0.03~0.08L/min	VmaxST 系统具有很好的重复测量信度和较低的测量误差。
	Blessing er J 等 <sup>[29]</sup> (2009)	Vmax ST	(N=41)	3 个步行速度(53.6m/min、80.5m/min、107.3m/min, 或约 3.2km/h、4.8km/h、6.4km/h) 和一个跑步速度(160.9m/min 或 9.65km/h)	系统测试不同速度的 V <sub>E</sub> 和 VO <sub>2</sub> 的 CV 为 5.2%~7.6%, r=0.77~0.92。不同速度的 VCO <sub>2</sub> 的 CV 为 10%~12%, r=0.70~0.81。	VmaxST 在 VO <sub>2</sub> 小于 2.2L/min 的运动强度, 即相当于 75% V̇O <sub>2max</sub> 强度范围内的测试 V <sub>E</sub> 、VO <sub>2</sub> 具有较好的信度, 而测量 VCO <sub>2</sub> 的信度则要差一些。
	Vogler AJ 等 <sup>[30]</sup> (2010)	Meta max 3B	—	Calibrator 模拟生理范围气体交换, 已知气体成分不同通气量(50~240L/min), 共 5 组, 重复测量 2 次。	VO <sub>2</sub> 重复测试误差-4.2~1.7%, VCO <sub>2</sub> 重复测试误差-2.0%~1.4%, V <sub>E</sub> 重复测试误差-0.7%~0.2%, 差异均小于 2%~3%。	具有很好的重复测量信度。
	Macfarla ne D 等 <sup>[26]</sup> (2012)	Meta max 3B	—	GESV 模拟不同呼吸频率的气体交换	两次测量的 V <sub>E</sub> 、VO <sub>2</sub> 、VCO <sub>2</sub> 差异小于 2%, TEM% 小于 1.5%。	小于澳大利亚运动委员会 TEM% 小于 3% 的标准, 因而认为其具有较高的重测信度。



续表 3

效 度 分 析 研 究	Brehm MA 等 <sup>[10]</sup> (2004)	患有运 动障碍 症的病 人 (N=10)	安静、80W 功率自行车试验 (交叉实 验设计)	安静和运动状态下, 两种方法所测的 VO <sub>2</sub> 均有差异(P<0.05), 但差值很小, 小于 3%, V <sub>E</sub> 在安静状态下, 有所差异(P<0.05), VCO <sub>2</sub> 在两种状态下, 均无显著性差异。	VO <sub>2</sub> 测量具有很好的效度。	
	Priour 等 <sup>[27]</sup> (2003)		GESS 重复模拟递增负荷气体交换(通 气量 0.3~5.6L/min, 气体成份不变)7 次, 每 2min 递增一级, 共进行 24min。	与模拟值相比, VO <sub>2</sub> 低 8±2.3%(-12.6%~-3.4%, P<0.01); VCO <sub>2</sub> 低 4.6±3.7% (-12.0%~-2.8%, P<0.01); VmaxST VO <sub>2</sub> 约低估 8%, VCO <sub>2</sub> V <sub>E</sub> 没有显著性差异 (-0.7±2.0) %。VO <sub>2</sub> 、 VCO <sub>2</sub> 和 V <sub>E</sub> 与模拟值的相关系数分别为 0.999、0.996、0.999。		
			成年受 试者 (N=11)	递增负荷跑台实验, 每一级 3~4min, 中间隔开 1min, DB 法收集每一级最 后 30s 气体。	与 DB 法相比, VO <sub>2</sub> 低 0.5% (-14.3%~-13.3%); VCO <sub>2</sub> 低 6.3% (-20.9%~-8.3%); V <sub>E</sub> 低 9.9% (-25.5%~-5.7%), 两种测试方法各指标均 没有显著性差异。VO <sub>2</sub> 、VCO <sub>2</sub> 和 V <sub>E</sub> 与 DB 法的相关系数分别为 0.916、0.933、 0.961。	而在真实的人体实验中, 测量的 偏差变小了, 但测量值的波动性 增加。
		Macfarla ne D 等 <sup>[26]</sup> (2012)	Meta max 3B	受试者 (N=8)	中等和大强度自行车运动时, VO <sub>2</sub> , VCO <sub>2</sub> 的 TEM% 约高于 DB 法 10%~17%	Metamax 3B 系统的测量存在高 估的现象, 效度不佳。
			Meta max 3B	Calibrator 模拟生理范围气体交换, 已 知气体成分不同通气量 (50~240L/min), 共 5 组。	与模拟值相比, VO <sub>2</sub> 差值小于 0.2L/min (-3.0%~7.8%), V <sub>E</sub> 差值小于 6.15L/min (2.5%~4.0%), VCO <sub>2</sub> 差值略大 (-0.8%~10.2%)。	并不十分精确, 但可满足体力活 量测量需要。
		Vogler AJ 等 <sup>[30]</sup> (2010)	Meta max 3B	赛艇运 动员 (N=8, 6 男, 2 女)	用赛艇测功仪, 进行 4 个不同强度负 荷划桨 (60%、70%、80%、90%最大 输出), 每组 4min, 组间间歇 1 民, 以及最大速度划桨 4min, 开始前休息 5min。	与 DB 法相比, VO <sub>2</sub> 差值小于 0.16L/min (2.8%~4.1%), VCO <sub>2</sub> 差值小于 0.32L/min (6.1%~7.7%), V <sub>E</sub> 差值小于 3.22L/min (0.5%~4.9%)。Metamax 3B 系统存在高估的现 象, 特别是 VCO <sub>2</sub> 。

### 2.3 Oxycon Mobile 气体代谢仪测量的信度和效度

Oxycon Mobile 是德国耶格(Jaeger)公司的产品, 其便携式遥测气体代谢仪共有 Oxycon Mobile I 和 II 两代产品。有关设备测量信度和效度的文章较少, 未见信度方面研究, 但其测量的稳定性较高, 在模拟有不同方向风、不同低温高湿[(12±2)°C, (86±7)%; (5±4)°C, (69±16.5)%]条件下, 至少可以稳定测试 45 min<sup>[31]</sup>。

效度方面, Rosdahl H 等对 I 和 II 代 Oxycon Mobile 气体代谢仪分别与 DB 法进行了的效度分析<sup>[32]</sup>。结果显示, Oxycon Mobile I 在次极量强度(40%~60% VO<sub>2max</sub>)时, VO<sub>2</sub> 和 VCO<sub>2</sub> 分别比 DB 法高 6%~14% 和 5%~9%, 而达到最大摄氧量时, Oxycon Mobile I 测量值又比 DB 法低, VO<sub>2</sub> 和 VCO<sub>2</sub> 分别低 4.1% 和 2.8%。Oxycon Mobile II 在 V<sub>E</sub> 为 1~5.5 L/min 时, 测量的准确性较高, 而 VCO<sub>2</sub> 比 DB 法高估了 3%~7%。

两代产品的 V<sub>E</sub> 在次极量强度时较为准确, 而在最大摄氧量时, 约低估了 4%~8%。总体而言, 测量效度 II 代优于 I 代, 但还需要有更多的研究对其效度进行分析。

### 2.4 VO2000 气体代谢仪测量的信度和效度

VO2000 气体代谢仪是美国 Medical Graphics 的产品, 这套系统与 Aerosport 的 VO2000 系统为同一系统。关于这套系统核心测量指标的信度和效度研究很少。

信度方面, Crouter SE 等, 对 10 名成年男性受试者两次安静、50 W、100 W、150 W、200 W、250 W 的功率自行车实验, 整个实验过程持续 10~12 min, 研究采用交叉设计, 先随机选择 5 名受试者在实验的前半段用 VO2000 系统, 实验后半段用 DB 法进行



测试,第二次测试,将测试系统反过来进行<sup>[12]</sup>。结果显示,VO2000系统 $V_E$ 较为接近,CV在7.3%~8.8%; $VO_2$ 和 $VCO_2$ 的CV为14.2%~15.8%,而DB法的CV为5.3%~6.0%,因而认为VO2000系统的重复测量信度较DB法差。同样,若以 $CV < 10\%$ 做为评判标准的话<sup>[40]</sup>,这套系统的测量信度和效度不甚理想。

效度方面,Crouter SE等在同一实验中,VO2000系统测得的 $V_E$ ,在50~100 W时与DB法有显著性差异( $P < 0.05$ ), $VO_2$ 在安静和100~250 W时都高于DB法( $P < 0.05$ ), $VCO_2$ 在安静和200~250 W时,与DB法有显著性差异,该系统测量效度较差<sup>[12]</sup>。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 便携式遥测气体代谢仪存在的问题

对常见的几套便携式遥测气体代谢仪的测量信度和效度分析,结果表明,在运动强度不是特别大时,这几套便携式遥测气体代谢仪的核心指标 $V_E$ 、 $VO_2$ 、 $VCO_2$ 测量的信度和效度较好。而当运动强度较大时,测量的信度和效度不够理想。其原因,一方面可能是部分研究设计造成的,如:在较大运动强度阶段,运动时间较短,运动未达到稳态;另一方面,运动强度较大时,呼出气中的湿度较大,且可能呼出口水,增加了涡轮扇片的转动摩擦力,导致 $V_E$ 测量不准确,进而引起 $VO_2$ 、 $VCO_2$ 测量的误差。

另外,在采用便携式气体代谢仪(也是基于间接测热法)去评价体力活动量时,需要注意便携式气体代谢仪的能量消耗量公式是基于两个假设。第一个假设是:呼吸交换率(RER)等同于RQ。当进行中、低等强度运动时,机体内的能源物质完全有氧氧化,此时RER相当于RQ。而当进行较大强度运动时,出现乳酸堆积,血液中 $H^+$ 浓度升高,会与碳酸氢盐池中的 $[HCO_3^-]$ 中和,释放 $CO_2$ ,会使得 $RER > RQ$ ,就造成碳水化合物参与供能被高估,脂肪参与供能被低估。因此,Jeukendrup AE等认为,当运动强度 $> 75\% VO_{2max}$ 时,其计算结果的准确性将会受到质疑<sup>[33]</sup>。另一个假设是在机体的代谢过程中,完全没有糖异生(乳酸、丙酮酸、甘油等)。实际上,长时间的耐力运动过程中是会发生糖异生的。糖异生过程需要消耗能量,同时也会影响RQ,因而会影响能量消耗量的计算结果。

#### 3.2 便携式遥测气体代谢仪测量注意事项

影响便携式遥测气体代谢仪测量结果的因素较多<sup>[34]</sup>。因而,为了确保这些便携式遥测仪获得准确有效的测量数据,为避免和减少测量引起的误差,测试

时应注意以下几点。(1)实验前要对气压、流量传感器、 $O_2$ 和 $CO_2$ 分析器进行校准,因为摄氧量测量的准确程度与通气量和气体成分测量的精确性密切相关;(2)要有正确的设置和操作;(3)只有当运动达到稳态时,能量消耗量才能准确确定。通常DB法测试时,只收集运动3~6 min时的呼出气进行测试,因为此时气体交换达到一种稳定状态。

### 4 小结

便携式遥测气体代谢仪可以很好地评价自由活动状态下不同体力活动的能量消耗量。在使用便携式遥测气体代谢仪时,应注意其核心指标测量的信度和效度。其中,Cosmed K4b<sup>2</sup>、Metamax 3B和Oxycon Mobile II这3套典型便携遥测气体分析仪的核心指标 $V_E$ 、 $VO_2$ 、 $VCO_2$ 的测量具有较好的信度和效度,特别是当运动强度低于 $75\% VO_{2max}$ ,而当运动强度高于 $75\% VO_{2max}$ 时,其测量的信度和效度略差。这些设备可以应用于较为广泛的体力活动评价范围(以有氧代谢为主的体力活动)。建议同时测量运动后即刻的血乳酸,判断其是否以有氧代谢为主。另外,VO2000便携式气体代谢仪 $V_E$ 、 $VO_2$ 、 $VCO_2$ 的测量信度和效度较差。因而,在实际的选择和应用中,应考虑这些差别。此外,在测试过程中应严格按规范操作,减少人为造成的测量误差。建议多开展大强度运动和复杂体力活动模式下设备测量的信度和效度研究,以便对仪器的应用范围有更深刻的了解。

### 参考文献:

- [1] 李之俊,向剑锋,刘欣,等.运动促进健康研究新进展[J].体育科研,2012,33(2):1-15.
- [2] 乔玉成,王卫军.全球人口体力活动不足概况及特征[J].体育科学,2015,(8):8-15.
- [3] Cecchini M., Sassi F., Lauer J. A., et al. Tackling of unhealthy diets, physical inactivity, and obesity: health effects and cost-effectiveness[J]. Lancet, 2010, 376(9754): 1775-1784.
- [4] Huang P. L. A comprehensive definition for metabolic syndrome[J]. Dis Model Mech, 2009, 2(5-6):231.
- [5] Yu Z., Ye X., Wang J., et al. Associations of physical activity with inflammatory factors, adipocytokines, and metabolic syndrome in middle-aged and older chinese people [J]. Circulation, 2009, 119(23):2969-2977.
- [6] Lamonte M. J., Blair S. N., Church T. S. Physical activity and diabetes prevention [J]. J Appl Physiol, 2005, 99(3):1205-1213.



- [7] Yates T., Khunti K., Troughton J., et al. The role of physical activity in the management of type 2 diabetes mellitus[J]. *Postgrad Med. J.*, 2009, 85(1001): 129-133.
- [8] Garg P. K., Tian L., Criqui M. H., et al. Physical activity during daily life and mortality in patients with peripheral arterial disease[J]. *Circulation*, 2006, 114(3): 242-248.
- [9] Branson R. D., Johannigman J. A. The measurement of energy expenditure[J]. *Nutr. Clin. Pract.*, 2004, 19(6): 622-636.
- [10] Brehm M. A., Harlaar J., Groepenhof H. Validation of the portable VmaxST system for oxygen-uptake measurement[J]. *Gait posture*, 2004, 20(1):67-73.
- [11] Bassett D. R., Howley E. T., Thompson D. L., et al. Validity of inspiratory and expiratory methods of measuring gas exchange with a computerized system[J]. *J. Appl. Physiol*, 2001, 91(1):218-224.
- [12] Crouter S. E., Antczak A., Hudak J. R., et al. Accuracy and reliability of the ParvoMedics TrueOne 2400 and Med-Graphics VO2000 metabolic systems[J]. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2006, 98(2): 139-151.
- [13] McLaughlin J. E., King G. A., Howley E. T., et al. Validation of the COSMED K4 b2 portable metabolic system [J]. *Int. J. Sports Med.*, 2001, 22(4):280-284.
- [14] Hopker J. G., Jobson S. A., Gregson H. C., et al. Reliability of cycling gross efficiency using the Douglas bag method[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2012, 44(2): 290-296.
- [15] Shephard R. J. A critical examination of the Douglas bag technique[J]. *J. Physiol*, 1955, 127(3):515-524.
- [16] Macfarlane D. J. Automated metabolic gas analysis systems: a review[J]. *Sports Med.*, 2001, 31(12):841-861.
- [17] Bland J. M., Altman D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement[J]. *Lancet*, 1986, 1(8476):307-310.
- [18] Hopkins W G. Measures of reliability in sports medicine and science[J]. *Sports Med.*, 2000, 30(1):1-15.
- [19] 张磊,王绵珍,王治明,等.动静态心肺功能遥测系统重测信度的评价[J].*工业卫生与职业病*,2003,29(1):29-33.
- [20] Stookey A. D., Mccusker M. G., Sorkin J. D., et al. Test-retest reliability of portable metabolic monitoring after disabling stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2013, 27(9):872-877.
- [21] Darter B. J., Rodriguez K. M., Wilken J. M. Test-retest reliability and minimum detectable change using the K4b2: oxygen consumption, gait efficiency, and heart rate for healthy adults during submaximal walking[J]. *Res. Q. Exerc. Sport*, 2013, 84(2):223-231.
- [22] Keefer D. J. Effects of Body Movement on the Reliability of a Portable Gas Analysis System[J]. *Human Movement*, 2013, 14(1):82-86.
- [23] Veluswamy S. K., Guddattu V., Maiya A. G. Test-retest reliability of a portable gas analysis system under free living conditions[J]. *Indian J. Physiol Pharmacol*, 2015, 59(1):117-120.
- [24] Duffield R., Dawson B., Pinnington H. C., et al. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system[J]. *J. Sci. Med. Sport*, 2004, 7(1):11-22.
- [25] 刘健敏,徐增年,李颜,等.心肺功能测定仪与多氏袋测定健康青年能量消耗的对比[J].*中华预防医学杂志*, 2010,44(9):795-799.
- [26] Macfarlane D. J., Wong P. Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system[J]. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2012, 112(7):2539-2547.
- [27] Prieur F., Castells J., Denis C. A methodology to assess the accuracy of a portable metabolic system (VmaxST) [J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2003, 35(5):879-885.
- [28] Perkins C. D., Green M. R., Pivarnik J. M. Reliability and validity of the sensormedics VmaxST portable metabolic analyzer[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2002, 34(5):S4.
- [29] Blessinger J., Sawyer B., Davis C., et al. Reliability of the VmaxST portable metabolic measurement system [J]. *Int. J. Sports Med.*, 2009, 30(1):22-26.
- [30] Vogler A. J., Rice A. J., Gore C. J.. Validity and reliability of the Cortex MetaMax3B portable metabolic system[J]. *J. Sports Sci.*, 2010, 28(7):733-742.
- [31] Sailer Eriksson J., Rosdahl H., Schantz P. Validity of the Oxycon Mobile metabolic system under field measuring conditions[J]. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2012, 112(1):345-355.
- [32] Rosdahl H., Gullstrand L., Sailer-Eriksson J., et al. Evaluation of the Oxycon Mobile metabolic system against the Douglas bag method[J]. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2010, 109(2):159-171.
- [33] Jeukendrup A. E., Wallis G. A. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements[J]. *Int. J. Sports Med.*, 2005, 26 (Suppl 1):S28-S37.
- [34] Atkinson G., Davison R. C., Nevill A. M. Performance characteristics of gas analysis systems: what we know and what we need to know[J]. *Int. J. Sports Med.*, 2005, 26 (Suppl 1):S2-S10.

(责任编辑:何聪)