

本文引用: 冉丽艳, 吴孝军, 崔浩宁, 等. 中国心血管疾病患者峰值摄氧量非运动性预测[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(6): 506-517. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.06.003.

· 心脏康复专栏 ·

[文章编号] 1007-3949(2026)34-06-0506-12

中国心血管疾病患者峰值摄氧量非运动性预测

冉丽艳^{1,2}, 吴孝军^{1,2}, 崔浩宁^{1,2}, 刘家琦^{1,2}, 史宏岩⁵, 袁丽霞⁶, 栾天蔚⁷, 李大军⁸, 刘海霞⁹, 拜芳芳¹⁰, 王时宇^{1,2}, 郑祥慧^{1,2}, 侯欣宇¹, 李奇峰^{1,2}, 曹天辉^{1,2}, 于波^{1,3,4}, 房超^{1,2,3}, 吴健^{1,2,3,4}

1. 哈尔滨医科大学附属第二医院心血管内科, 2. 哈尔滨医科大学附属第二医院心脏康复中心, 黑龙江省哈尔滨市 150086;
3. 哈尔滨医科大学心肌缺血教育部重点实验室, 黑龙江省哈尔滨市 150001;
4. 哈尔滨医科大学寒地心血管病全国重点实验室, 黑龙江省哈尔滨市 150081;
5. 泰达国际心血管病医院, 天津市 300457; 6. 郑州市第七人民医院, 河南省郑州市 450016;
7. 哈尔滨市道里区人民医院, 黑龙江省哈尔滨市 150010; 8. 伊春市中心医院, 黑龙江省伊春市 153000;
9. 阿勒泰市人民医院, 新疆阿勒泰市 836500; 10. 山西省心血管病医院心内科, 山西省太原市 030024

[摘要] [目的] 旨在开发适用于中国心血管疾病(CVD)患者的峰值摄氧量(VO_2 peak)预测方程。[方法]

本研究是一项回顾性多中心研究, 纳入2018年1月至2024年12月期间来自20家医院21 402例接受心肺运动试验(CPET)的CVD患者, 根据7:3的比例随机分为开发组($n=14\,981$)和验证组($n=6\,421$)。采用多元向前逐步回归分析法建立适用于中国CVD患者的 VO_2 peak预测方程, 并与其他队列已建立的预测方程进行比较。

[结果] 本研究将年龄、性别、身高、体重和CVD诊断纳入预测方程的关键影响因素建立的预测方程为: VO_2 peak (mL/min) = $246.206 - [9.858 \times \text{年龄(岁)}] + [187.643 \times \text{性别(男=1, 女=0)}] + [4.500 \times \text{身高(cm)}] + [10.250 \times \text{体重(kg)}] + [94.969 \times \text{稳定型心绞痛(是=1, 否=0)}] - [39.293 \times \text{经皮冠状动脉介入治疗(是=1, 否=0)}] - [110.124 \times \text{心肌梗死(是=1, 否=0)}] - [208.447 \times \text{心力衰竭(是=1, 否=0)}]$ 。调整后 $R^2=0.51$, $SE=264.0\text{ mL/min}$ 。验证组分析显示, Wasserman 预测方程(152%)、Friend 健康人群预测方程(197%)、Friend CVD 预测方程(117%)、中国健康人群 PUTH 预测方程(292%)及中国健康人群 X-ET 预测方程(109%)均高估了中国CVD患者的 VO_2 peak, 而本研究开发的中国CVD预测方程(104%)的预测结果与实测值更为接近。[结论] 本研究开发了适用于中国CVD患者的 VO_2 peak 预测方程, 相较于现有方程, 该方程预测误差更小, 更适用于中国人群。

[关键词] 心血管疾病; 峰值摄氧量; 心肺运动试验; 预测方程

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Non-exercise prediction of peak oxygen uptake in Chinese patients with cardiovascular disease

RAN Liyan^{1,2}, WU Xiaojun^{1,2}, CUI Haoning^{1,2}, LIU Jiaqi^{1,2}, SHI Hongyan⁵, YUAN Lixia⁶, LUAN Tianwei⁷, LI Dajun⁸, LIU Haixia⁹, BAI Fangfang¹⁰, WANG Shiyu^{1,2}, ZHENG Xianghui^{1,2}, HOU Xinyu¹, LI Qifeng^{1,2}, CAO Tianhui^{1,2}, YU Bo^{1,3,4}, FANG Chao^{1,2,3}, WU Jian^{1,2,3,4}

1. Department of Cardiology, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 2. Cardiac Rehabilitation Center, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 3. Key Laboratory of Myocardial Ischemia, Ministry of Education, Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150001, China; 4. State Key Laboratory of Frigid Zone Cardiovascular Diseases, Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150081, China; 5. TEDA International Cardiovascular Hospital, Tianjin 300457, China; 6. The 7th

[收稿日期] 2026-01-24

[修回日期] 2026-03-31

[基金项目] 黑龙江省卫生健康委科研课题(20240303010021); 国家自然科学基金面上项目(82372565); 黑龙江省自然科学基金项目(ZL2024H007)

[作者简介] 冉丽艳, 硕士研究生, 主要从事心脏康复研究, E-mail: 992084789@qq.com。通信作者吴健, 医学博士, 主任医师, 博士研究生导师, 主要从事心脏康复及心脏疾病的免疫学机制研究, E-mail: wujian780805@163.com。通信作者房超, 医学博士, 副主任医师, 博士研究生导师, 主要从事冠心病与动脉粥样硬化机制研究, E-mail: fangchaodr@163.com。

People's Hospital of Zhengzhou, Zhengzhou, Hebei 450016, China; 7. Daoli District People's Hospital, Harbin, Heilongjiang 150010, China; 8. Yichun Central Hospital, Yichun, Heilongjiang 153000, China; 9. Altay City People's Hospital, Altay, Xinjiang 836500, China; 10. Department of Cardiology, Shanxi Cardiovascular Hospital, Taiyuan, Shanxi 030024, China

[**ABSTRACT**] **Aim** To develop a peak oxygen uptake (VO_2 peak) prediction equation applicable to Chinese cardiovascular disease (CVD) patients. **Methods** This study was a retrospective multicenter study that included 21 402

CVD patients who underwent cardiopulmonary exercise testing (CPET) from 20 hospitals between January 2018 and December 2024, and randomly divided into a development group ($n=14\,981$) and a verification group ($n=6\,421$) at a ratio of 7 : 3. Multiple forward stepwise regression analysis method was used to establish a VO_2 peak prediction equation suitable for Chinese CVD patients, which was compared with prediction equations established from other cohorts. **Re-**

sults This study incorporated age, sex, height, body weight and CVD diagnosis as key influencing factors into the predictive equation, resulting in the final predictive model: $\text{VO}_2 \text{ peak (mL/min)} = 246.206 - (9.858 \times \text{age (years)}) + (187.643 \times \text{sex (male=1, female=0)}) + (4.500 \times \text{height (cm)}) + (10.250 \times \text{weight (kg)}) + (94.969 \times \text{SA (yes=1, no=0)}) - (39.293 \times \text{PCI (yes=1, no=0)}) - (110.124 \times \text{MI (yes=1, no=0)}) - (208.447 \times \text{HF (yes=1, no=0)})$. Adjusted $R^2 = 0.51$, $SE = 264.0 \text{ mL/min}$. The validation group analysis showed that the Wasserman prediction equation (152%), Friend healthy population prediction equation (197%), Friend CVD prediction equation (117%), Chinese healthy population PUTH prediction equation (292%), and Chinese healthy population X-ET prediction equation (109%) all overestimated the VO_2 peak of Chinese CVD patients, while the prediction results of the Chinese CVD prediction equation (104%) developed in this study were closer to the measured values. **Conclusion** This study developed a VO_2 peak prediction equation suitable for Chinese CVD patients, which has smaller prediction errors compared to existing equations and is more suitable for the Chinese population.

[**KEY WORDS**] cardiovascular disease; peak oxygen uptake; cardiopulmonary exercise testing; prediction equation

心血管疾病 (cardiovascular disease, CVD) 是一种严重威胁患者生活质量和预期寿命的疾病^[1-5]。在 CVD 中, 较低的峰值摄氧量 (peak oxygen uptake, VO_2 peak) 水平与早期死亡、未来心血管事件发生风险及更高的医疗负担显著相关^[6-7]。心肺运动试验 (cardiopulmonary exercise testing, CPET) 作为测量 VO_2 peak 的金标准, 能够直接、准确地评估个体在极量运动时的最大摄氧能力^[8-10]。虽然 VO_2 peak 可通过 CPET 直接测量, 但该方法存在成本较高、耗时较长、专业设备与技术人员相对缺乏, 以及部分患者因病情不适合进行测试等限制^[11]。非运动预测方程作为一种评估 VO_2 peak 的简便方法, 其优势在于无需进行运动测试, 且所需信息通常可便捷地从电子病历中获取^[7]。在临床中常用非运动预测方程来预测 VO_2 peak^[12-13], 然而目前用于预测 VO_2 peak 的非运动预测方程大多基于健康人群或美国 CVD 患者的队列开发, 这些方程在中国 CVD 患者中的适用性尚未得到验证, 直接应用可能会影响个性化治疗方案和康复计划制定的准确性。因此, 本研究旨在基于中国 CVD 患者的 CPET 数据构建 VO_2 peak 非运动预测方程 (中国 CVD 方程), 为中国 CVD 患者提供简便、准确的 VO_2 peak 预测工具。

1 资料和方法

1.1 研究人群

纳入 2018 年 1 月至 2024 年 12 月期间来自全国 20 家医院 21 402 例 CVD 患者的 CPET 数据, 所有入组受试者均采用首次 CPET 数据进行分析。本研究为回顾性观察性研究, 所有数据均为匿名化历史数据, 不涉及患者干预或额外生物样本采集; 所有个人信息已完成去标识化处理, 经哈尔滨医科大学附属第二医院伦理审查委员会审查同意豁免知情同意 (批准号: KY2025-031)。各参与研究医院的数据均经过严格审查, 包括核查数据记录的完整性、排除因设备故障或操作失误导致的明显异常值, 确保数据真实可靠后才纳入本研究。纳入标准为: (1) 目前或既往发生心肌梗死 (myocardial infarction, MI)、经皮冠状动脉介入治疗 (percutaneous coronary intervention, PCI)、心力衰竭 (heart failure, HF)、稳定型心绞痛 (stable angina, SA) 或诊断为其他 CVD; (2) 在自行车测力仪上进行症状限制性 CPET; (3) 年龄在 30 ~ 79 岁之间; (4) 峰值呼吸交换比 (respiratory exchange ratio, RER) ≥ 1.0 。纳入的 CVD 类别包括 MI、PCI、HF、SA 及其他, 具体定义如下: MI 类别包括所有报告过 MI 的患者, 以及仅接受过 PCI 但未报告过 HF 的患者; PCI 类别为接受

过 PCI 手术的患者,排除报告过 MI 或 HF 的患者; HF 类别包括所有报告过 HF 的患者,不排除同时合并 MI、PCI 或 SA 的患者;SA 类别为诊断为 SA 的患者,排除有 MI 史、HF 史或 PCI 史的患者;其他类别则为不属于 PCI、HF、MI、SA 这四类的患者。最终,本研究共纳入 21 402 例 CPET 数据。采用随机抽样方法,将其中 70% ($n=14\ 981$) 的受试者用于建立预测方程,其余 30% ($n=6\ 421$) 的受试者用于验证方程。

1.2 VO₂ peak 定义

最大摄氧量(maximum oxygen uptake, VO₂ max) 又称最大有氧运动能力。在递增运动试验中, VO₂ max 是指测试者运动后期循环系统与呼吸系统功能达峰值时,摄氧量(oxygen uptake, VO₂) 不再随运动功率增加而上升并出现平台,且 1 min 内相邻两次 VO₂ 差值<150 mL/min;为消除体重影响,也可用相邻两次差值<2 mL/(kg·min)表示。然而,部分患者无法持续运动至极限状态,其 VO₂ 未出现平台,此时的最高 VO₂ 称为 VO₂ peak。在功率递增试验中,多数人在达到 VO₂ peak 后,因活动受限难以进一步达到 VO₂ max,因此临床通常以 VO₂ peak 评估个体的有氧运动能力及心肺功能状态。

1.3 CPET

采用功率自行车开展症状限制性 CPET,各中心均由经验丰富的人员操作执行,所有流程严格遵循美国心脏病学会发布的《测试与训练运动标准》声明^[14-15];试验终止指征则严格参照《心肺运动试验临床规范应用中国专家共识》^[16]。在测试过程中,所有中心均通过面罩式设备精准采集分钟通气量、摄氧量及二氧化碳排出量等参数,并严格执行气体浓度分析仪的定期校准流程。试验全程使用 CPET 设备收集 VO₂ 等指标,采用 Ramp 方案,每分钟递增负荷为最大功率的 1/8 至 1/12,目标测试时长为 8~12 min,试验将持续进行直至受试者出现限制性症状时终止。

CPET 包含静息期、热身期、负荷期及恢复期四个阶段:(1)静息期:受试者静坐 3 min,采集静息状态下的心率和血压;(2)热身期:无负荷踏车 3 min;(3)负荷期:按照既定功率急性递增负荷,直至受试者出现症状限制;(4)恢复期:依次进行无负荷踏车 3 min 与静坐 3 min。所有阶段均在标准环境条件下开展,由经认证的专业技术人员操作,以确保数据采集的准确性及测试过程的安全性。

1.4 统计学分析

在开发组中,采用多元向前逐步回归分析法构

建 VO₂ peak 预测方程,纳入的变量包括年龄、性别、身高、体重及 CVD 诊断。为评估该方程的稳健性与泛化误差,通过 10 折交叉验证计算其均方根误差(root mean square error, RMSE),选择 RMSE 最小的模型作为最佳模型,并基于该模型的相关变量构建回归方程。在验证组中,通过计算预测值占实测值的百分比、估计的标准误差(standard error, SE)、相关系数、调整后的决定系数及组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)来评估本研究构建方程的性能,并将 Wasserman 方程^[17]、Friend 健康人群方程^[18]、Friend CVD 方程^[7]、中国健康人群 PUTH 方程^[19]和中国健康人群 X-ET 方程^[20]预测的 VO₂ peak 与实测 VO₂ peak 进行比较。除了在验证组中进行总体分析,还按照性别、CVD 诊断类别进行分组分析。

正态分布的连续变量以 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间比较采用 *t* 检验;非正态分布的连续变量以中位数和四分位数表示,组间比较采用 Mann-Whitney *U* 检验;分类变量以例数(%)表示,组间比较采用卡方检验。双侧 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。所有统计分析均采用 R 4.3.2 软件完成。

2 结 果

2.1 患者基线特征

本研究共纳入 21 402 例接受 CPET 的 CVD 患者,其中,男性的身高、体重及体重指数(body mass index, BMI)显著高于女性,男性 PCI、MI 及 HF 的占比显著高于女性,而男性 SA 及其他 CVD 的占比显著低于女性,男性 VO₂ peak 水平显著高于女性(均 $P<0.001$;表 1)。

开发组($n=14\ 981$)与验证组($n=6\ 421$)在年龄、性别、身高、体重、BMI 及其他 CVD 等基线特征上均无显著差异($P>0.05$)。开发组与验证组的 VO₂ peak 实测值分别为 1 269.2 mL/min 和 1 270.0 mL/min(表 2)。

2.2 中国 CVD 预测方程的建立

逐步多元前向回归分析结果显示,年龄、性别、身高、体重和 CVD 诊断对预测 VO₂ peak 的回归方程均有显著贡献(表 3)。随着纳入变量的增加, RMSE 从 310.9 降至 264.0 mL/min。为评估自变量间的多重共线性,本研究计算了方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)。所有变量的 VIF 值均低于 5(最高值为 4.44),表明模型不存在严重的共线

性问题。中国 CVD 患者的 VO₂ peak 预测方程为：
VO₂ peak (mL/min) = 246.206 - [9.858 × 年龄(岁)] + [187.643 × 性别(男 = 1, 女 = 0)] + [4.500 × 身高(cm)] + [10.250 × 体重(kg)] + [94.969 × SA(是 = 1, 否 = 0)] - [39.293 × PCI(是 = 1, 否 = 0)] - [110.124 × MI(是 = 1, 否 = 0)] - [208.447 × HF(是 = 1, 否 = 0)]。调整后 R² = 0.51, SE = 264.0 mL/min。

表 1. 中国 CVD 队列的描述性特征

Table 1. Descriptive characteristics of the Chinese CVD cohort

项目	男性(<i>n</i> = 14 562)	女性(<i>n</i> = 6 840)	<i>P</i>
年龄/岁	57(50,64)	59(52,66)	<0.001
身高/cm	172.0(168.0,175.0)	160.0(157.0,164.0)	<0.001
体重/kg	75.0(70.0,84.0)	62.0(56.0,69.0)	<0.001
BMI/(kg/m ²)	25.8(23.8,28.0)	24.2(22.2,26.6)	<0.001
PCI/[例(%)]	3 618(24.8)	1 025(15.0)	<0.001
SA/[例(%)]	5 889(40.4)	4 234(61.9)	<0.001
HF/[例(%)]	1 256(8.6)	414(6.1)	<0.001
MI/[例(%)]	3 017(20.7)	580(8.5)	<0.001
其他 CVD/[例(%)]	782(5.4)	587(8.6)	<0.001
峰值 RER	1.1(1.1,1.2)	1.1(1.1,1.2)	<0.001
峰值心率/(次/分)	129(116,143)	134(120,149)	<0.001
VO ₂ peak 实测值/(mL/min)	1 386.0(1 160.0,1 650.0)	1 050.0(876.75,1 242.0)	<0.001
VO ₂ peak 实测值/[mL/(kg · min)]	18.2(15.5,21.5)	16.7(14.2,19.6)	<0.001
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 414.4(1 265.6,1 571.3)	1 076.5(942.2,1 202.2)	<0.001
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	18.5(17.2,20.0)	17.1(15.3,18.8)	<0.001
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 182.9(1 926.1,2 460.8)	1 336.5(1 211.2,1 480.5)	<0.001
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	28.7(26.1,31.4)	21.3(19.3,23.7)	<0.001
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 646.4(1 447.9,1 864.9)	1 113.6(986.7,1 256.2)	<0.001
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	21.9(20.2,23.6)	17.9(16.3,19.6)	<0.001
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 849.6(2 574.8,3 155.5)	1 662.3(1 492.0,1 859.1)	<0.001
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	37.8(35.1,40.7)	26.8(24.1,29.8)	<0.001
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 884.6(2 678.3,3 090.4)	2 183.2(2 056.8,2314.0)	<0.001
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	37.8(35.5,40.3)	35.1(32.7,37.5)	<0.001
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 528.8(1 394.0,1 650.7)	1 016.0(921.6,1 123.7)	<0.001
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg · min)]	19.9(19.0,21.0)	16.2(15.1,17.4)	<0.001

表 2. 开发组和验证组的描述性特征

Table 2. Descriptive characteristics of the development group and validation group

项目	开发组(<i>n</i> = 14 981)	验证组(<i>n</i> = 6 421)	<i>P</i>
年龄/岁	58(51,65)	58(50,65)	0.064
性别/[例(%)]			
女性	4 776(31.9)	2 064(32.1)	0.716
男性	1 0205(68.1)	4 357(67.9)	
身高/cm	169.0(162.0,173.0)	169.0(162.0,174.0)	0.750
体重/kg	71.0(63.0,80.0)	72.0(63.5,80.0)	0.760
BMI/(kg/m ²)	25.3(23.2,27.7)	25.3(23.2,27.5)	0.803
PCI/[例(%)]	3 262(21.8)	1 381(21.5)	0.678
SA/[例(%)]	7 058(47.1)	3 065(47.7)	0.413
HF/[例(%)]	1 147(7.7)	523(8.1)	0.233

续表

项目	开发组 ($n=14\ 981$)	验证组 ($n=6\ 421$)	P
MI/[例(%)]	2 547(17.0)	1 050(16.4)	0.253
其他 CVD/[例(%)]	967(6.5)	402(6.3)	0.616
峰值 RER	1.1(1.1,1.2)	1.1(1.1,1.2)	0.301
峰值心率/(次/分)	130(117,145)	131(117,145)	0.414
VO ₂ peak 实测值/(mL/min)	1 269.2(1 032.5,1 530.8)	1 270.0(1 040.0,1 550.0)	0.160
VO ₂ peak 实测值/[mL/(kg·min)]	17.7(15.0,20.9)	17.8(15.1,21.0)	0.130
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 305.2(1 119.7,1 492.5)	1 307.5(1 125.2,1 500.9)	0.429
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	18.1(16.7,19.7)	18.2(16.7,19.7)	0.389
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 939.3(1 471.2,2 315.8)	1 952.8(1 478.3,2 325.8)	0.355
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	26.7(22.9,30.1)	26.8(22.9,30.2)	0.404
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 481.1(1 197.4,1 757.7)	1 486.3(1 197.3,1 763.3)	0.480
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	20.8(18.3,22.8)	20.9(18.3,22.9)	0.409
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 597.0(1 885.6,2 991.2)	2 601.5(1 886.4,3 004.0)	0.439
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	35.6(29.7,39.2)	35.6(29.6,39.4)	0.507
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 691.3(2 297.2,2 988.6)	2 707.3(2 297.7,2 987.3)	0.431
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	37.0(34.5,39.6)	37.0(34.5,39.6)	0.737
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 402.2(1 128.6,1 584.5)	1 412.1(1 131.9,1 586.1)	0.497
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	19.2(17.3,20.5)	19.2(17.3,20.5)	0.598

表 3. 年龄、性别、身高、体重和 CVD 类别预测 VO₂ peak 的多元向前逐步回归分析Table 3. Multiple forward stepwise regression analysis of predicting VO₂ peak from age, sex, height, body weight and CVD types

项目	RMSE/(mL/min)	R^2	P	t
体重/kg	310.9	0.321	<0.001	52.041
年龄/岁	291.5	0.403	<0.001	-52.769
SA	282.4	0.440	<0.001	12.747
性别	269.1	0.491	<0.001	34.883
HF	266.4	0.501	<0.001	-21.444
MI	265.1	0.506	<0.001	-13.249
身高/cm	264.2	0.509	<0.001	11.923
PCI	264.0	0.510	<0.001	-4.305

2.3 与其他预测方程的性能比较

在验证组中,中国 CVD 方程的预测值(1 311.6 mL/min)最接近实测值(1 315.6 mL/min)。Wasserman 方程、Friend CVD 方程、Friend 健康人群方程、中国健康人群 PUTH 方程和中国健康人群 X-ET 方程的预测值

(1 939.9、1 496.1、2 508.7、2 665.6、1 371.0 mL/min)均高于实测值(1 311.6 mL/min)。中国 CVD 方程的 Pearson 相关系数为 0.71, ICC 为 0.68; Wasserman 方程、Friend CVD 方程、Friend 健康人群方程、中国健康人群 PUTH 方程和中国健康人群 X-ET 方程的 Pearson 相关系数分别为 0.64、0.68、0.63、0.64 和 0.65, ICC 分别为 0.31、0.61、0.09、0.10 和 0.62; 中国 CVD 方程预测的 Pearson 相关系数和 ICC 均高于其他预测方程。在性别分层分析中,中国 CVD 方程对男女患者 VO₂ peak 的预测百分比均为 101%,与实测值的贴合度最高; Wasserman 方程、Friend CVD 方程、Friend 健康人群方程及中国健康人群 PUTH 方程对不同性别中国 CVD 患者的 VO₂ peak 均存在不同程度高估,其中男性预测百分比分别为 157%、118%、206%、267%,女性分别为 128%、105%、160%、316%; 中国健康人群 X-ET 方程则呈现性别差异,对男性患者 VO₂ peak 为轻度高估(110%),对女性患者则为低估(97%; 表 4)。

表 4. 不同性别 VO₂ peak 实测值与各方程预测值的比较Table 4. Comparison of measured VO₂ peak values and predicted values from various equations by gender

项目	总例数($n=6\ 421$)	男性($n=4\ 357$)	女性($n=2\ 064$)
VO ₂ peak 实测值/(mL/min)	1 315.6±376.0	1 390.0(1 169.0,1 660.0)	1 054.0(880.0,1 251.0)
VO ₂ peak 实测值/[mL/(kg·min)]	18.3±4.3	18.3(15.5,21.6)	16.7(14.3,19.6)

续表

项目	总例数(<i>n</i> =6 421)	男性(<i>n</i> =4 357)	女性(<i>n</i> =2 064)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 311.6±270.1	1 419.9(1 266.7,1 568.1)	1 079.6(946.7,1 200.3)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	18.2±2.4	18.6(17.2,20.0)	17.1(15.4,18.8)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	104	101	101
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 939.9±524.2 ^a	2 184.0(1 936.0,2 471.4) ^a	1 341.0(1 212.5,1 486.3) ^a
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	26.8±5.2 ^a	28.7(26.2,31.4) ^a	21.3(19.2,23.7) ^a
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	152	157	128
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 496.1±385.4 ^a	1 647.2(1 456.7,1 868.8) ^a	1 114.2(986.3,1 254.1) ^a
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	20.6±3.4 ^a	22.0(20.2,23.6) ^a	17.9(16.3,19.6) ^a
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	117	118	105
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 508.7±676.3 ^a	2 850.0(2 587.3,3 158.2) ^a	1 665.4(1 492.5,1 861.5) ^a
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	34.6±6.6 ^a	37.9(35.2,40.7) ^a	26.8(24.1,29.8) ^a
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	197	206	160
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 665.6±427.6 ^a	2 886.2(2 690.9,3 094.2) ^a	2 186.1(2 056.2,2 313.4) ^a
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	37.2±4.1 ^a	37.8(35.6,40.4) ^a	35.0(32.7,37.5) ^a
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	292	267	316
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 371.0±296.2 ^a	1 516.6(1 398.9,1 649.1) ^a	1 019.2(923.2,1 125.7) ^a
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	18.9±2.4 ^a	20.0(19.0,21.0) ^a	16.2(15.2,17.3) ^a
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	109	110	97
RMSE/(mL/min)			
中国 CVD 方程	263.6	288.4	200.6
Wasserman 方程	288.8	310.3	228.3
Friend CVD 方程	277.4	302.1	216.0
Friend 健康人群方程	291.8	309.4	229.3
中国健康人群 PUTH 方程	288.1	312.7	220.1
中国健康人群 X-ET 方程	287.1	309.4	218.5
Pearson 相关系数			
中国 CVD 方程	0.71 ^b	0.62 ^b	0.66 ^b
Wasserman 方程	0.64 ^{bc}	0.53 ^{bc}	0.52 ^{bc}
Friend CVD 方程	0.68 ^{bc}	0.57 ^{bc}	0.59 ^{bc}
Friend 健康人群方程	0.63 ^{bc}	0.54 ^{bc}	0.51 ^{bc}
中国健康人群 PUTH 方程	0.64 ^{bc}	0.53 ^{bc}	0.56 ^{bc}
中国健康人群 X-ET 方程	0.65 ^{bc}	0.54 ^{bc}	0.57 ^{bc}
ICC(95% CI)			
中国 CVD 方程	0.68(0.66,0.69) ^d	0.55(0.53,0.57) ^d	0.63(0.60,0.65) ^d
Wasserman 方程	0.31(-0.10,0.62) ^d	0.10(-0.04,0.32) ^d	0.29(-0.07,0.55) ^d
Friend CVD 方程	0.61(0.38,0.74) ^d	0.45(0.13,0.64) ^d	0.56(0.52,0.61) ^d
Friend 健康人群方程	0.09(-0.04,0.31) ^d	0.07(-0.03,0.25) ^d	0.14(-0.06,0.40) ^d
中国健康人群 PUTH 方程	0.10(-0.03,0.33) ^d	0.05(-0.02,0.19) ^d	0.04(-0.02,0.18) ^d
中国健康人群 X-ET 方程	0.62(0.59,0.65) ^d	0.41(0.34,0.48) ^d	0.49(0.45,0.53) ^d

注:a 为 $P<0.05$,与 VO₂ peak 实测值比较;b 为 $P<0.05$,表示显著相关;c 为 $P<0.05$,与中国 CVD 队列方程比较;d 为 $P<0.05$,表示 ICC 有显著差异。

在验证组中,针对 PCI、MI、HF、SA 类型,中国 CVD 方程 VO₂ peak 预测百分比(100% ~ 102%)与实测值最为接近;而 Wasserman 方程、Friend CVD 方程、Friend 健康人群方程、中国健康人群 PUTH 方程对不同 CVD 类型患者 VO₂ peak 的预测百分比均高

于实测值,分别为 134% ~ 176%、107% ~ 128%、173% ~ 231%、265% ~ 334%;中国健康人群 X-ET 方程的预测百分比为 96% ~ 127%,其中 SA 类型呈低估(96%),PCI、MI、HF 类型则呈高估(表 5)。

表 5. 不同 CVD 类型 VO₂ peak 实测值与各方程预测值的比较Table 5. Comparison of VO₂ peak measured values and predicted values by various equations for different CVD types

项目	PCI(<i>n</i> =1 381)	MI(<i>n</i> =1 050)	HF(<i>n</i> =523)	SA(<i>n</i> =3 065)
VO ₂ peak 实测值/(mL/min)	1 263.5 (1 031.4, 1 520.0)	1 231.9 (1 015.0, 1 452.3)	1 050.0 (840.0, 1 280.0)	1 330.0 (1 098.0, 1 630.0)
VO ₂ peak 实测值/[mL/(kg·min)]	17.3(14.8, 20.2)	16.6(14.2, 19.1)	14.8(12.0, 17.5)	19.0(16.3, 22.4)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 304.5 (1 135.8, 1 448.1)	1 270.3 (1 122.1, 1 424.9)	1 098.3 (903.5, 1 245.5)	1 376.6 (1 168.6, 1 572.6)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	17.7(16.5, 18.8)	17.1(16.0, 18.0)	15.0(13.7, 16.1)	19.4(18.1, 20.8)
中国 CVD 方程 VO ₂ peak 预测百分比/(%)	101	102	100	101
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 005.2 (1 632.8, 2 311.0) ^a	2 109.6 (1 778.3, 2 424.3) ^a	1 897.0 (1 481.1, 2 225.2) ^a	1 836.4 (1 407.7, 2 296.8) ^a
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	27.0(23.9, 30.0) ^a	28.3(25.1, 31.1) ^a	26.0(22.6, 29.1) ^a	26.2(22.2, 30.0) ^a
Wasserman 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	151	166	176	134
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 576.2 (1 337.1, 1 800.0) ^a	1 585.4 (1 369.1, 1 828.1) ^a	1 164.8 (949.0, 1 373.6) ^a	1 453.4 (1 173.8, 1 753.7) ^a
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	21.5(19.6, 23.3) ^a	21.5(19.7, 23.2) ^a	16.1(14.0, 17.9) ^a	20.8(18.5, 22.9) ^a
Friend CVD 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	121	128	108	107
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 669.6 (2 261.9, 2 985.1) ^a	2 768.1 (2 429.8, 3 106.4) ^a	2 555.9 (2 055.4, 2 894.0) ^a	2 484.0 (1 761.8, 2 963.9) ^a
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	36.2(31.9, 39.5) ^a	37.6(33.5, 40.3) ^a	35.1(29.9, 38.4) ^a	34.7(28.4, 39.0) ^a
Friend 健康人群方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	199	216	231	173
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	2 756.1 (2 417.5, 2 986.4) ^a	2 814.4 (2 549.3, 3 067.0) ^a	2 689.8 (2 323.9, 2 926.5) ^a	2 606.6 (2 234.0, 2 960.7) ^a
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	37.0(34.8, 39.5) ^a	37.6(35.1, 39.9) ^a	36.3(34.2, 39.0) ^a	36.9(34.3, 39.7) ^a
中国健康人群 PUTH 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	286	297	334	265
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/(mL/min)	1 435.4 (1 251.4, 1 582.8) ^a	1 478.4 (1 316.1, 1 632.5) ^a	1 403.8 (1 168.6, 1 549.7) ^a	1 360.7 (1 069.0, 1 566.4) ^a
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测值/[mL/(kg·min)]	19.4(18.0, 20.6) ^a	19.8(18.5, 20.9) ^a	19.0(17.4, 20.2) ^a	19.0(16.8, 20.5) ^a
中国健康人群 X-ET 方程 VO ₂ peak 预测百分比/%	110	117	127	96
RMSE/(mL/min)				
中国 CVD 方程	257.2	254.5	236.9	269.2
Wasserman 方程	259.6	255.7	242.0	279.1
Friend CVD 方程	259.6	254.1	242.9	271.7
Friend 健康人群方程	260.1	257.2	243.9	279.4
中国健康人群 PUTH 方程	259.9	257.2	241.1	275.9
中国健康人群 X-ET 方程	257.7	255.6	238.4	272.7
Pearson 相关系数				
中国 CVD 方程	0.68 ^b	0.64 ^b	0.67 ^b	0.72 ^b
Wasserman 方程	0.68 ^b	0.64 ^b	0.65 ^b	0.69 ^b
Friend CVD 方程	0.68 ^b	0.65 ^b	0.65 ^b	0.71 ^b
Friend 健康人群方程	0.68 ^b	0.63 ^b	0.65 ^b	0.69 ^b
中国健康人群 PUTH 方程	0.64 ^{bc}	0.66 ^{bc}	0.65 ^{bc}	0.65 ^{bc}
中国健康人群 X-ET 方程	0.64 ^{bc}	0.66 ^{bc}	0.66 ^{bc}	0.65 ^{bc}
ICC(95% CI)				
中国 CVD 方程	0.64(0.61, 0.67) ^d	0.61(0.57, 0.65) ^d	0.66(0.60, 0.70) ^d	0.67(0.65, 0.69) ^d
Wasserman 方程	0.28(-0.09, 0.61) ^d	0.20(-0.07, 0.51) ^d	0.21(-0.07, 0.52) ^d	0.42(-0.08, 0.70) ^d
Friend CVD 方程	0.53(0.06, 0.74) ^d	0.43(-0.06, 0.70) ^d	0.63(0.54, 0.70) ^d	0.69(0.62, 0.74) ^d
Friend 健康人群方程	0.14(-0.05, 0.41) ^d	0.10(-0.04, 0.32) ^d	0.11(-0.05, 0.34) ^d	0.22(-0.08, 0.53) ^d
中国健康人群 PUTH 方程	0.09(-0.02, 0.30) ^d	0.06(-0.02, 0.24) ^d	0.07(-0.02, 0.25) ^d	0.08(-0.02, 0.28) ^d
中国健康人群 X-ET 方程	0.63(0.53, 0.71) ^d	0.52(0.17, 0.70) ^d	0.47(-0.04, 0.72) ^d	0.57(0.36, 0.70) ^d

注:a 为 $P<0.05$, 与 VO₂ peak 实测值比较;b 为 $P<0.05$, 表示显著相关;c 为 $P<0.05$, 与中国 CVD 队列方程比较;d 为 $P<0.05$, 表示 ICC 有显著差异。

图 1 展示了验证组中实测与预测 VO_2 peak 的 Bland-Altman 图。在验证组中, 中国 CVD 方程、Wasserman 方程、Friend CVD 方程、Friend 健康人群

方程、中国健康人群 PUTH 方程及中国健康人群 X-ET 方程的预测偏差分别为 -4.0 、 624.2 、 180.4 、 $1\ 193.1$ 、 $1\ 350.0$ 及 55.4 mL/min 。

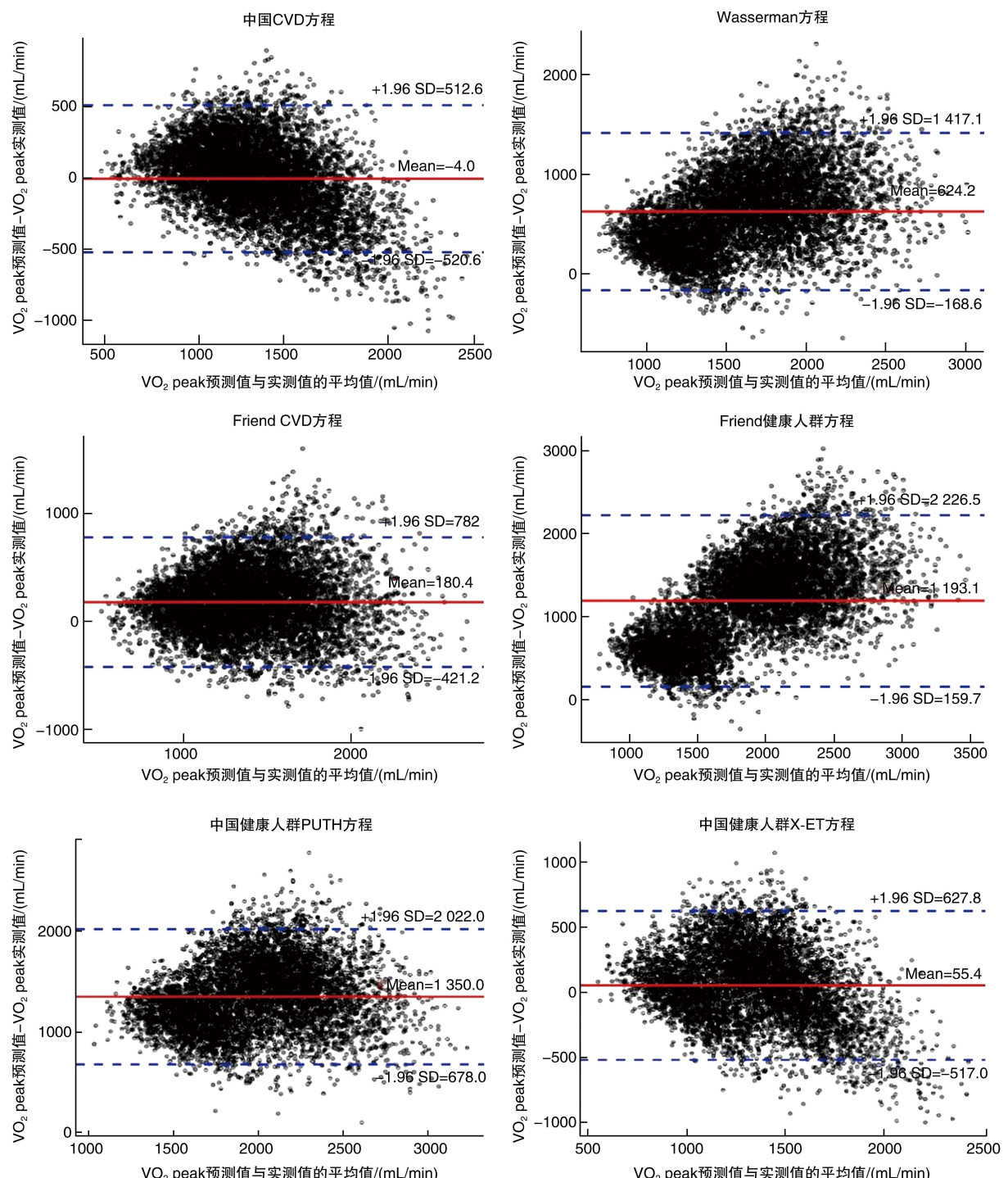


图 1. 验证组实测与预测 VO_2 peak 的 Bland-Altman 图

Figure 1. Bland-Altman plots of the measured and predicted VO_2 peak in the validation group

图 2 展示了验证集中预测值与实测值在代谢当量 (metabolic equivalent, MET) 尺度上的一致性比较。MET 是一种用于描述相对运动强度的标准化

指标, 临床和流行病学研究中通常采用 $1\text{ MET} = 3.5\text{ mL}/(\text{kg} \cdot \text{min})$ 作为统一换算基准, 以便于不同研究和人群之间的比较。

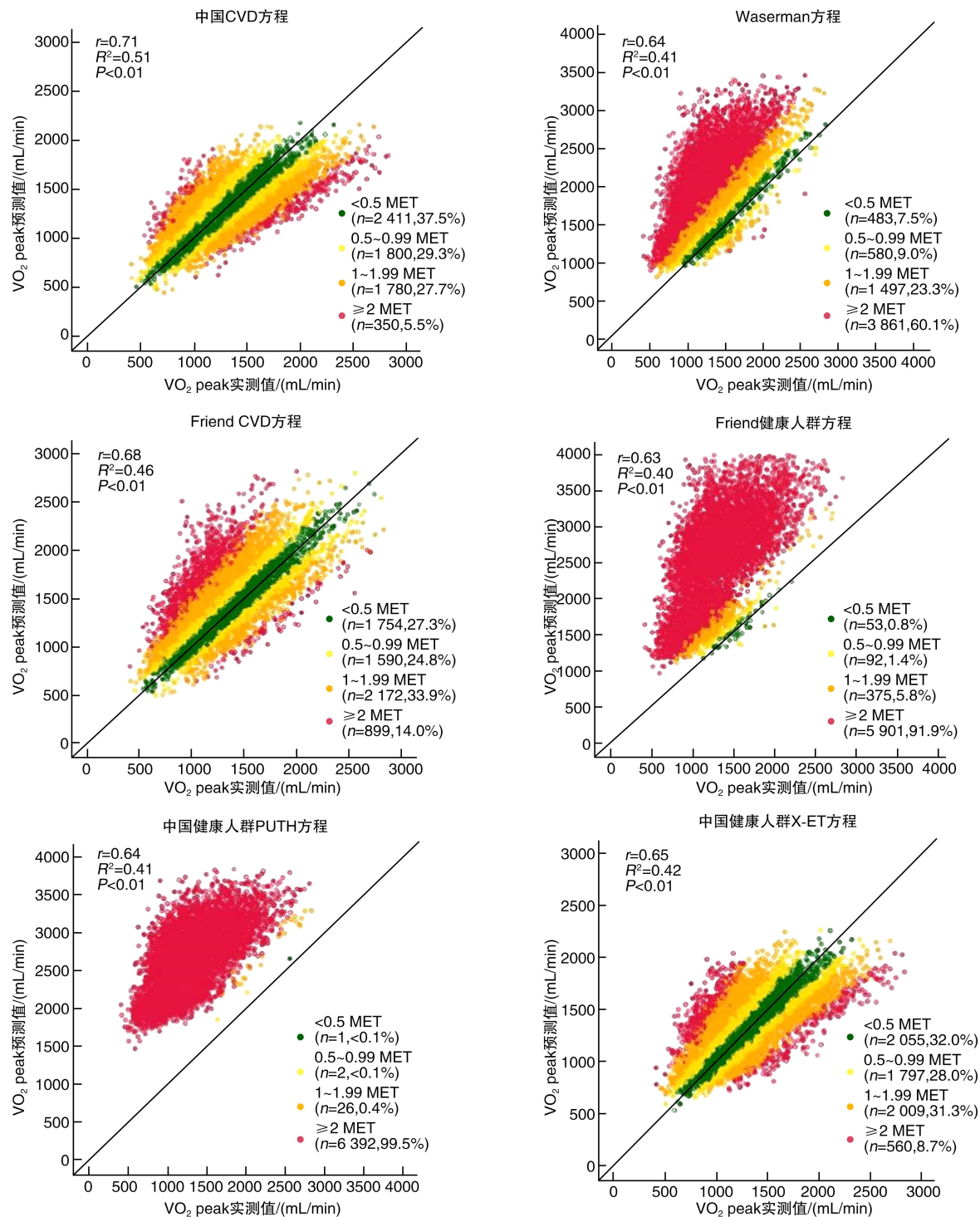


图 2. 验证组 VO_2 peak 实测值与预测值的比较

Figure 2. Comparison of measured and predicted values of VO_2 peak in the validation group

鉴于 MET 作为标准化的心肺适能指标,可消除体重差异并便于不同个体及研究间的比较,本研究将实测与预测的 VO_2 peak 统一转换为 MET 形式进行分析,以增强结果的可解释性和临床可推广性。使用中国 CVD 方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 2 411 人(占 37.5%),而偏差

≥ 2 MET 的个体共为 350 人(占 5.5%), R^2 为 0.51。使用 Wasserman 方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 483 人(占 7.5%),而 ≥ 2 MET 的个体共为 3 861 人(占 60.1%), R^2 为 0.41。使用 Friend CVD 方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 1 754 人(占 27.3%),而 ≥ 2

MET 的个体共为 899 人(占 14.0%), R^2 为 0.46。使用 Friend 健康人群方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 53 人(占 0.8%),而 ≥ 2 MET 的个体共为 5 901 人(占 91.9%), R^2 为 0.40。使用中国健康人群 PUTH 方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 1 人(占 $<0.1\%$),而 ≥ 2 MET 的个体共为 6 392 人(占 99.5%), R^2 为 0.41。使用中国健康人群 X-ET 方程时,实测与预测 VO_2 peak 偏差 <0.5 MET 的个体共为 2 055 人(占 32.0%),而 ≥ 2 MET 的个体共为 560 人(占 8.7%), R^2 为 0.42。

3 讨 论

VO_2 peak 是评估 CVD 患者预后的重要指标,与全因死亡率及心血管事件发生率呈显著负相关,且作为独立的预测因子,其预测价值优于肥胖、糖尿病、血脂异常等传统风险因素^[21]。美国心脏病学会已明确建议将 VO_2 peak 作为常规生命体征进行定期临床评估。然而,在实际临床工作中, VO_2 peak 的直接测定仍主要依赖 CPET,但该检测手段受限于设备配置、专业人员操作要求及患者耐受性等因素,难以在我国各级医疗机构中广泛开展。在此背景下,开发一种不依赖 CPET 且适用于 CVD 患者的 VO_2 peak 预测工具,具有明确的现实必要性。既往基于西方人群建立的 VO_2 peak 预测方程,在种族特征、疾病谱及体型结构等方面与中国 CVD 患者存在差异,其在中国人群中的适用性和预测精度仍有待验证。本研究基于全国 20 家医院的大样本 CPET 数据,构建并验证了适用于中国 CVD 患者的 VO_2 peak 预测方程,其预测准确性显著优于现有其他方程。该方程纳入年龄、性别、身高、体重及 CVD 诊断易获取指标,为基层临床场景及无法开展 CPET 的患者提供了可靠的 VO_2 peak 预测工具,具有重要的临床应用价值。

目前广泛应用的 VO_2 peak 非运动预测方程,多基于健康人群或美国 CVD 人群数据开发^[7,22]。本研究结果显示,这些预测方程对中国 CVD 患者的 VO_2 peak 普遍存在高估现象,即便针对 CVD 人群专门开发的方程,也存在显著高估问题,提示其在中国 CVD 患者中的适用性有限。究其原因,中国和西方人群在生理功能、遗传背景及环境因素等方面存在显著差异^[17,23-24],这可能导致对中国 CVD 患者 VO_2 peak 的系统性误判^[25]。本研究发现,中国健康

人群 PUTH 方程对中国 CVD 患者的 VO_2 peak 预测存在全面高估;而中国健康人群 X-ET 方程则呈现明显的性别异质性,对男性患者为轻度高估,对女性患者则为低估。究其原因,健康人群与 CVD 患者的心肺功能存在本质病理差异,且这一差异在女性群体中更为突出。本研究将中国 CVD 患者分为 SA、MI、PCI、HF 四类,旨在探讨不同疾病状态对 VO_2 peak 的影响。该分组方式并非传统的 CVD 临床分类,而是基于不同疾病类型的临床特征差异,以更精确地评估运动耐量并为个体化治疗提供依据。研究结果显示, VO_2 peak 的差异与疾病类型显著相关,且在性别及各疾病分组中呈现稳定的分层特征:四组患者的 VO_2 peak 值按 SA 组、PCI 组、MI 组、HF 组的顺序依次递减。这一结果与美国 CVD 研究人群的结果一致^[26],其差异可能源于不同疾病状态下心肌损伤程度、冠状动脉狭窄或闭塞情况及骨骼肌功能的不同^[13,26-29]。通过中国 CVD 方程获得的 PCI、MI、HF 和 SA 患者的 VO_2 peak 预测值与实测值极为接近,表明该方程在预测不同 CVD 类型患者的 VO_2 peak 方面具有较高的准确性。相比之下,Wasserman 方程、Friend 健康人群方程、Friend CVD 方程和中国健康人群 PUTH 方程均存在不同程度的高估现象;中国健康人群 X-ET 方程中 SA 类型为低估,PCI、MI、HF 类型为高估。应用这些方程计算 VO_2 peak 值时产生的偏差,不仅会导致运动耐量评估不准确,干扰康复方案的制定,还可能因运动强度设定不当增加运动安全风险。

心脏康复是 CVD 长期管理的重要组成部分^[30-31],心脏康复发展受医疗资源、专业人员等制约^[32-38]。在此背景下,本研究所开发的中国 CVD 患者 VO_2 peak 预测方程,在一定程度上弥补了资源受限条件下心肺适能评估手段不足的现实缺口。该预测工具可在缺乏 CPET 条件的临床环境中,对患者心肺功能水平进行定量估计,从而支持临床医师制定更个体化、可操作的心脏康复运动处方,并为心脏康复在基层医院的推广提供技术层面的补充支持。具体而言:首先, VO_2 peak 是 CVD 患者重要的危险分层工具,其实测值占预测值的百分比是评估患者预后的关键指标,具有重要的临床意义^[39]。该百分比可反映患者心肺功能相对于正常预期水平的损害程度,尤其是当该百分比低于 50% 时,提示患者心血管功能已严重受损,预后显著恶化^[7]。在临床应用中,可将预测方程编程为计算模块嵌入 CPET 系统,录入年龄、性别、身高、体重及 CVD 诊断

后,系统即可自动计算 VO_2 peak 预测值,并结合 CPET 得出 VO_2 peak 实测值,自动生成对应的百分比。其次,在无法开展 CPET 的基层单位或门诊,或患者无法耐受运动测试时,康复医师可借助该方程的预测结果为患者制定初始的个体化运动康复处方,根据预测的 VO_2 peak 设定初始最佳运动强度。尽管本研究开发的中国 CVD 患者 VO_2 peak 预测方程能提供较为准确的预测值,但可能因个体生理差异产生偏差,因此在使用预测值时应结合患者实际身体状态与临床症状综合判断。基于此,临床实践中仍建议优先采用 CPET 评估 VO_2 peak (若条件允许),尤其是在需要精准制定运动处方、评估手术风险或判断预后的场景中。

本研究存在一些局限性:首先,本研究仅纳入踏车式 CPET 数据,未来需进一步探索平板模式下的 CPET 数据;其次,为提高预测方程的普适性,本研究在设计时未将高血压、糖尿病、肺部疾病或骨科疾病等潜在合并症纳入预测方程,未来需进一步分析这些合并症对 VO_2 peak 预测的影响;第三,尽管所有测试均在经验丰富的医院开展,但所使用的设备及测试人员的差异仍可能影响 VO_2 peak 的测定结果;第四,本研究为回顾性观察性研究,可能存在选择偏倚。

综上所述,本研究基于多中心大规模 CPET 数据,建立了适用于中国 CVD 患者的非运动状态下 VO_2 peak 预测方程,为中国 CVD 患者的 VO_2 peak 评估提供了更可靠的预测工具。与现有方程相比,本研究构建的中国 CVD 患者专属预测方程在预测该人群 VO_2 peak 时,具有更小的预测误差和更高的准确性。

[参考文献]

- [1] MEHTA L S, VELARDE G P, LEWEY J, et al. Cardiovascular disease risk factors in women: the impact of race and ethnicity: a scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2023, 147(19): 1471-1487.
- [2] SOPPERT J, LEHRKE M, MARX N, et al. Lipoproteins and lipids in cardiovascular disease: from mechanistic insights to therapeutic targeting[J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2020, 159: 4-33.
- [3] 王旋,温贤秀,苟莉,等.心脏康复依从性评估工具测量学属性的系统评价[J]. *中华护理杂志*, 2024, 59(6): 736-743.
WANG X, WEN X X, GOU L, et al. The cardiac rehabilitation adherence assessment tools: a systematic review of psychometric properties[J]. *Chin J Nurs*, 2024, 59(6): 736-743.
- [4] 丁荣晶.谈现代医疗技术下心脏康复/二级预防的应用价值[J]. *中国心血管杂志*, 2024, 29(6): 499-503.
DING R J. Talking about the application value of cardiac rehabilitation/secondary prevention under modern medical technology[J]. *Chin J Cardiovasc Med*, 2024, 29(6): 499-503.
- [5] 高倩,宋晓霞,张笑茹,等.血管周围脂肪组织参与改善心血管疾病的研究进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2025, 33(4): 363-368.
GAO Q, SONG X X, ZHANG X R, et al. Research progress on the involvement of perivascular adipose tissue in improving cardiovascular diseases[J]. *Chin J Arterioscler*, 2025, 33(4): 363-368.
- [6] ROSS R, BLAIR S N, ARENA R, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: a case for fitness as a clinical vital sign; a scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2016, 134(24): e653-e699.
- [7] PETERMAN J E, ARENA R, MYERS J, et al. A nonexercise prediction of peak oxygen uptake for patients with cardiovascular disease: data from the fitness registry and the importance of exercise international database (friend) [J]. *J Cardiopulm Rehabil Prev*, 2023, 43(2): 115-121.
- [8] 王枫,刘若江,秦晋梅,等.基于阈值的个体化运动处方在代谢综合征中的临床应用进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2024, 32(11): 1006-1012.
WANG F, LIU R J, QIN J M, et al. Progress in clinical application of individualized exercise prescription based on threshold in metabolic syndrome[J]. *Chin J Arterioscler*, 2024, 32(11): 1006-1012.
- [9] MALHOTRA R, BAKKEN K, D'ELIA E, et al. Cardiopulmonary exercise testing in heart failure[J]. *JACC Heart Fail*, 2016, 4(8): 607-616.
- [10] PUGLIESE N R, DE BIASE N, CONTE L, et al. Cardiac reserve and exercise capacity: insights from combined cardiopulmonary and exercise echocardiography stress testing[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2021, 34(1): 38-50.
- [11] HANSEN M T, RØMER T, HØJGAARD A, et al. Validity and reliability of seismocardiography for the estimation of cardiorespiratory fitness[J]. *Cardiovasc Digit Health J*, 2023, 4(5): 155-163.
- [12] CHIARANDA G, MYERS J, ARENA R, et al. Prognostic comparison of the FRIEND and Wasserman/Hansen peak VO_2 equations applied to a submaximal walking test in outpatients with cardiovascular disease[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2021, 28(3): 287-292.
- [13] BALADY G J, ARENA R, SIETSEMA K, et al. Clinician's guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2010, 122(2): 191-225.
- [14] FLETCHER G F, BALADY G J, AMSTERDAM E A, et al. Exercise standards for testing and training: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2001, 104(14): 1694-1740.
- [15] FLETCHER G F, ADES P A, KLIGFIELD P, et al. Exercise standards for testing and training: a scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2013, 128(8): 873-934.
- [16] 中华医学会心血管病学分会,中国康复医学会心肺预防与康复专业委员会,中华心血管病杂志编辑委员会.心肺运动试验临床规范应用中国专家共识[J]. *中华心血管病杂志*, 2022, 50(10): 973-986.

- The Chinese Society of Cardiovascular Diseases, the Committee of Cardiopulmonary Prevention and Rehabilitation of the Chinese Association of Rehabilitation Medicine, and the Editorial Board of Chinese Journal of Cardiology. Chinese expert consensus on standardized clinical application of cardiopulmonary exercise testing[J]. Chin J Cardiol, 2022, 50(10): 973-986.
- [17] WASSERMAN K. Coupling of external to cellular respiration during exercise; the wisdom of the body revisited[J]. Am J Physiol Endocrinol Metab, 1994, 266(4): E519-E539.
- [18] DE SOUZA E SILVA C G, KAMINSKY L A, ARENA R, et al. A reference equation for maximal aerobic power for treadmill and cycle ergometer exercise testing: analysis from the FRIEND registry[J]. Eur J Prev Cardiol, 2018, 25(7): 742-750.
- [19] WANG J, REN C, XU S, et al. A reference equation for peak oxygen uptake for cycle ergometry in Chinese adult participants[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 10876.
- [20] DUN Y, OLSON T P, LI C, et al. Characteristics and reference values for cardiopulmonary exercise testing in the adult Chinese population-the Xiangya hospital exercise testing project (the X-ET project)[J]. Int J Cardiol, 2021, 332: 15-21.
- [21] MIKKELSEN N, CADARSO-SUÁREZ C, LADO-BALEATO O, et al. Improvement in VO_2 peak predicts readmissions for cardiovascular disease and mortality in patients undergoing cardiac rehabilitation[J]. Eur J Prev Cardiol, 2020, 27(8): 811-819.
- [22] KAMINSKY L A, ARENA R, MYERS J, et al. Updated reference standards for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing: data from the fitness registry and the importance of exercise national database (FRIEND)[J]. Mayo Clin Proc, 2022, 97(2): 285-293.
- [23] WILLIAMS D R, STERNTHAL M. Understanding racial-ethnic disparities in health: sociological contributions[J]. J Health Soc Behav, 2010, 51 Suppl(Suppl): S15-S27.
- [24] BOUCHARD C, DAW E W, RICE T, et al. Familial resemblance for VO_2 max in the sedentary state: the HERITAGE family study[J]. Med Sci Sports Exerc, 1998, 30(2): 252-258.
- [25] WANG Y, LI H, WANG J, et al. Normal references of peak oxygen uptake for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing in Chinese adults[J]. J Clin Med, 2022, 11(16): 4904.
- [26] PETERMAN J E, ARENA R, MYERS J, et al. Reference standards for cardiorespiratory fitness by cardiovascular disease category and testing modality: data from FRIEND[J]. J Am Heart Assoc, 2021, 10(22): e022336.
- [27] DALLAS K, DINAS P C, CHRYSSANTHOPOULOS C, et al. The effects of exercise on VO_2 peak, quality of life and hospitalization in heart failure patients: a systematic review with meta-analyses[J]. Eur J Sport Sci, 2021, 21(9): 1337-1350.
- [28] HEIDENREICH P A, BOZKURT B, AGUILAR D, et al. 2022 AHA/ACC/HFSA guideline for the management of heart failure: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. Circulation, 2022, 145(18): e895-e1032.
- [29] AKBARI T, AL-LAMEE R. Percutaneous coronary intervention in multi-vessel disease[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2022, 44: 80-91.
- [30] 张晓雪, 郭卫婷, 刘建萍, 等. 心血管疾病患者远程康复体验质性研究的 Meta 整合[J]. 中华护理杂志, 2023, 58(15): 1899-1906.
- ZHANG X X, GUO W T, LIU J P, et al. Meta-synthesis of qualitative research on the real experience of telerehabilitation for patients with cardiovascular diseases[J]. Chin J Nurs, 2023, 58(15): 1899-1906.
- [31] 葛里格, 郭航, 胡博, 等. 女性心血管疾病患者心脏康复的研究进展[J]. 中国心血管杂志, 2023, 28(2): 179-183.
- GE L G, GUO H, HU B, et al. Review on the progress of women cardiac rehabilitation[J]. Chin J Cardiovasc Med, 2023, 28(2): 179-183.
- [32] WEI W, ZHAO J, MENG L, et al. Clinical status of cardiac rehabilitation manners and models[J]. Cardiol Res Pract, 2022, 2022: 9554984.
- [33] LI S, XU H. The development of cardiac rehabilitation in China: current status and future perspectives[J]. Rev Cardiovasc Med, 2024, 25(7): 233.
- [34] TURK-ADAWI K, SUPERVIA M, LOPEZ-JIMENEZ F, et al. Cardiac rehabilitation availability and density around the globe[J]. EClinicalMedicine, 2019, 13: 31-45.
- [35] SUPERVIA M, TURK-ADAWI K, LOPEZ-JIMENEZ F, et al. Nature of cardiac rehabilitation around the globe[J]. EClinicalMedicine, 2019, 13: 46-56.
- [36] 徐亚伟, 孙逸凡. “互联网+”时代移动医疗助力心脏康复[J]. 中国心血管杂志, 2022, 27(5): 399-402.
- XU Y W, SUN Y F. Mobile health empower cardiac rehabilitation in the era of “internet+”[J]. Chin J Cardiovasc Med, 2022, 27(5): 399-402.
- [37] CHINDHY S, TAUB P R, LAVIE C J, et al. Current challenges in cardiac rehabilitation: strategies to overcome social factors and attendance barriers[J]. Expert Rev Cardiovasc Ther, 2020, 18(11): 777-789.
- [38] TAYLOR R S, FREDERICKS S, JONES I, et al. Global perspectives on heart disease rehabilitation and secondary prevention: a scientific statement from the Association of Cardiovascular Nursing and Allied Professions, European Association of Preventive Cardiology, and International Council of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation[J]. Eur Heart J, 2023, 44(28): 2515-2525.
- [39] GUAZZI M, ADAMS V, CONRAADS V, et al. EACPR/AHA scientific statement. clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations[J]. Circulation, 2012, 126(18): 2261-2274.
- (此文编辑 文玉珊)