

## 心率-摄氧量线性指标推测18~25岁大学生最大摄氧量的研究

### A Study of Heart Rate-Oxygen Uptake Linear Index to Predict Maximum Oxygen Uptake of College Students Aged 18 to 25 Years

李闯涛, 高晓麟\*, 吴东哲, 王昊

LI Chuangtao, GAO Xiaolin\*, WU Dongzhe, WANG Hao

**摘要:**目的:探讨心率-摄氧量线性指标(K)推测18~25岁大学生最大摄氧量( $\dot{V}O_{2max}$ )的可行性。方法:随机招募健康、无专业运动经历的高校学生266名,分为方程建立组( $n=200$ )和回代检验组( $n=66$ )。测量身高、体重和安静心率等指标,并按照要求完成心肺运动试验测得 $\dot{V}O_{2max}$ 。采用逐步回归法建立方程,选取最优方程进行回代检验。结果:最优方程为:绝对 $\dot{V}O_{2max}=2.248+0.253\times$ 性别 $+0.03\times$ 体重 $+0.339\times K-0.011\times$ 安静心率 [ $R=0.939$ ,  $SEE=0.239\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $P<0.01$ ), 性别:男=1、女=0]。方差分析、拟合优度检验、VIF检验、Shapiro-Wilk检验、Durbin-Watson检验提示方程信度较好;皮尔逊积矩相关分析、配对 $t$ 检验、Bland-Altman一致性检验提示方程效度较好。结论:采用K建立的回归方程能够用于推测18~25岁大学生的 $\dot{V}O_{2max}$ 。

**关键词:** 心率;摄氧量;运动;大学生

**Abstract:** Objective: To explore the feasibility of predicting the maximum oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ) of college students aged 18 to 25 years by the heart rate-oxygen uptake linear index (K). Methods: 266 healthy, college students without professional exercise experience were randomly recruited and divided into equation building group ( $n=200$ ) and back generation test group ( $n=66$ ). Height, body mass and quiet heart rate were measured, and  $\dot{V}O_{2max}$  was measured by cardiorespiratory exercise test. The equation was established by stepwise regression method, and the best equation was selected for back generation testing. Results: The best equation was: absolute  $\dot{V}O_{2max}=2.248+0.253\times$  gender $+0.03\times$  body mass $+0.339\times K-0.011\times$  quiet heart rate [ $R=0.939$ ,  $SEE=0.239\text{ L}/\text{min}$  ( $P<0.01$ ), gender: male=1, female=0]. ANOVA, goodness of fit test, VIF test, Shapiro-Wilk test, and Durbin-Watson test suggested good reliability of the equation. Pearson product moment correlation analysis, paired  $t$ -test and Bland-Altman consistency test suggested good validity of the equation. Conclusions: The regression equation based on K can be used to predict  $\dot{V}O_{2max}$  of college students aged 18 to 25 years.

**Keywords:** heart rate; oxygen uptake; exercise; college students

**中图分类号:** G804.2 **文献标识码:** A

#### 基金项目:

国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目(基本19-18)

#### 第一作者简介:

李闯涛(1995-),男,硕士,主要研究方向为运动心脏医学监督, E-mail: 18600687882@163.com。

#### \*通信作者简介:

高晓麟(1974-),男,研究员,博士,主要研究方向为运动损伤与运动性心血管意外的风险评估、预防与康复, E-mail: gaomiaolin@ciss.cn。

#### 作者单位:

国家体育总局体育科学研究所,北京100061  
China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China.

心肺耐力代表心血管及呼吸系统的整体功能(Mun et al., 2021; Toulouse et al., 2021),是预测全因死亡率和心血管疾病的重要指标(刘晓丽等,2018; Rossi Neto et al., 2019)。最大摄氧量(maximum oxygen uptake,  $\dot{V}O_{2max}$ )是评价心肺耐力的“金指标”(Skattebo et al., 2021),被广泛应用于竞技体育、全民健身领域(范超群等,2019)。 $\dot{V}O_{2max}$ 通常采用心肺运动试验直接测定,通过分析受试者递增负荷运动过程中的气体代谢推算 $\dot{V}O_{2max}$ (高理升等,2022;王飞等,2021),该方法测试成本较高,且运动需要达到极限状态,不适合儿童、老人及身体机能较差的人群。因而,间接测定法备受青睐,受试者进行亚极限运动后根据运动强度、心率等推算 $\dot{V}O_{2max}$ (刘海云,2019),可对大规模人群进行测量。采用间接法推算

$\dot{V}O_{2max}$  时, 研究大多以受试者自身的非运动特征参数(性别、身高、体重和身体质量指数等)、运动特征参数(5 000 m 跑时间、12 min 跑距离、血压、心输出量、每搏输出量、氧脉搏和肺活量等)作为自变量, 或者结合体力活动问卷调查结果(贺晓玉等, 2021; 刘祥茂, 2021; 孙忠伟等, 2016; 王念辉等, 2018; 杨慧君, 2020; Nevill et al., 2020)。

有研究指出, 在直接测定  $\dot{V}O_{2max}$  的负荷递增运动中, 心率与摄氧量呈正线性相关, 即二者随着运动负荷递增而线性增大(郝璐等, 2021)。将心率和摄氧量进行一次方拟合可以得到心率-摄氧量曲线, 其斜率  $K$  作为一个动态指标, 以此来验证  $K$  值与  $\dot{V}O_{2max}$  的关系。本研究主要利用  $K$ , 结合受试者性别、体重和安静心率, 通过多元线性逐步回归分析法评估  $\dot{V}O_{2max}$ , 基于 Bland-Altman 分析法比较实际测量值和方程预测值的一致性, 探索  $K$  预测 18~25 岁大学生  $\dot{V}O_{2max}$  的可靠性。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

受试者纳入标准: 1) 年龄 18~25 岁健康在校大学生; 2) 无专业运动经历; 3) 能够理解实验并自愿配合测试过程。排除标准: 1) 心、脑、血管等方面疾病以及家族猝死史; 2) 未通过常规心电图、血压和血液筛查; 3) 近期有手术、外伤和疼痛等情况。受试者数量分析: 通过 G-power 软件, 前期预实验效应值为 0.2,  $\alpha$  取 0.05, 检验效能为 0.80, 计算得出方程建立组需要 76 人。基于以上标准, 招募方程建立组 200 人(男 101 人, 女 99 人), 回代检验组 66 人(男 33 人, 女 33 人)。测试前, 所有受试者均熟知试验内容和流程, 通过风险筛查, 并签署知情同意书。测试过程中, 所有受试者身体无不良状况, 积极配合并按照要求完成身体形态、心肺运动试验, 均可视为有效数据。方程建立组和回代检验组的基本资料无显著差异 ( $P > 0.05$ , 表 1), 说明两组受试者具有同质性。

表 1 受试者基本信息

	男性		女性	
	方程建立组 (n=101)	回代检验组 (n=33)	方程建立组 (n=99)	回代检验组 (n=33)
年龄/岁	21.4 ± 1.8	21.8 ± 1.6	21.9 ± 2.0	21.4 ± 1.9
身高/cm	176.4 ± 6.8	175.9 ± 6.5	161.9 ± 5.5	160.7 ± 4.9
体重/kg	74.3 ± 14.5	73.7 ± 15.1	53.5 ± 8.3	54.3 ± 7.9
BMI/(kg·m <sup>2</sup> )	23.7 ± 3.5	22.8 ± 3.9	20.3 ± 2.5	21.1 ± 2.2

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验流程图

根据研究设计, 具体试验流程详见图 1。

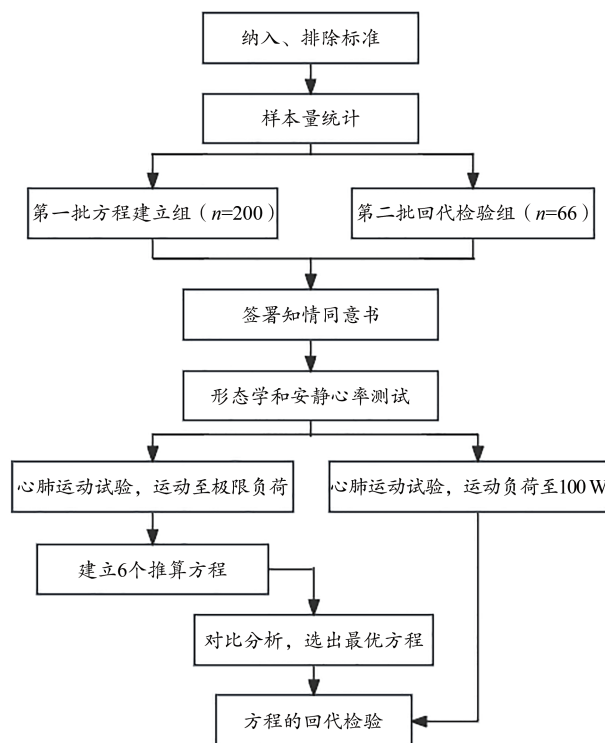


图 1 试验流程图

Figure 1. Experimental Flow Chart

#### 1.2.2 形态学指标与安静心率的测量

参照《国民体质测定标准》(教育部, 2014)测试方法, 身高和体重分别使用身高测量仪和电子体重计测量。计算获得身体质量指数(BMI)=体重/身高<sup>2</sup>。受试者到达实验室, 保持清醒、安静状态静坐 30 min 后测得心率即为安静心率。

#### 1.2.3 心肺功能评估

试验仪器: 心肺功能测试系统(Metalyaer 3B, Cortex, 德国); 功率自行车(Ergoline 100, Ergoline Academy, 德国)、心率带(POLAR H10, 芬兰)、呼吸面罩 3 个(大、中、小各 1 个)、头套 3 个。

运动试验方案(美国运动医学学会, 2015):  $\dot{V}O_{2max}$  测试采用功率自行车递增负荷运动方案, 德国台式 Cortex Metalyzer 3B 系统和美国 Cheetah NICOM 系统实时监测气体代谢和心功能。测试方案: 受试者到达实验室, 保持清醒、安静状态静坐 30 min 后, 佩戴好传感器上功率车, 调整座椅高度, 在功率自行车上静坐 5 min 采集静息数据; 热身阶段, 男、女起始负荷均为 40 W 且持续 2 min; 线性递增负荷运动, 递增速率为 20 W/min (男)、15 W/min (女), 运动至极限状态, 然后以 20 W 的功率踏车 3 min 进行恢复, 最后停止测试, 全程转速均保持在 60~70 r/min。满足以下任意 3 个条件即可停止测试(美国运动医学学会, 2015): 1) 心率上升至 180 次/min 或 2 min 内不再上升; 2) 呼吸商  $\geq 1.15$ ; 3) 相邻摄氧量增值不变或下降; 4) 主观感觉等级接近 19, 经反复鼓励不能继续运动。其中, 方程建立组运动至极限状态, 回代检验组负荷递增至 100 W

时终止测试,分别拟合出两组受试者的K值。

### 1.3 方程的建立和信效度检验

#### 1.3.1 方程的建立

以实际测得的绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 和相对 $\dot{V}O_{2max}$ 为因变量,通过皮尔逊积矩相关性分析筛选出与绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 具备相关性的指标为自变量进行逐步回归,建立方程。

#### 1.3.2 信度检验

使用方差分析、拟合优度检验、VIF检验、Shapiro-Wilk检验、Durbin-Watson检验等对建立的方程进行信度检验,选取最优方程。

#### 1.3.3 效度检验

使用样本外回代检验,将对应指标代入所选方程,使用皮尔逊积矩相关分析、配对 $t$ 检验、Bland-Altman一致性检验等分析实际测量值与方程预测值的差异。

### 1.4 主要观察指标

1)身高、体重、身体质量指数等身体形态指标;2)安静心率;3)绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ ;4)根据研究设计方程建立组选取40 W至极限负荷的数据,回代检验组选取40~100 W的数据,采用Matlab以 $\dot{V}O_2$ 为横坐标,心率(heart rate, HR)为纵坐标,拟合递增负荷运动中HR直线: $\dot{V}O_2=K \times HR+b$ ,获得K值,本研究中K值的拟合已获得国家体育总局体育科学研究所专家审核通过,K值的有效性为0.85;

5)绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 与身体形态、安静心率、K值等指标的相关性结果,推算方程的信、效度检验结果。

### 1.5 统计学分析

使用SPSS 26.0进行原始数据录入和逻辑筛查,针对各指标进行描述性统计,结果以 $\bar{x} \pm s$ 形式表示。组间比较采用独立样本 $t$ 检验;采用皮尔逊积矩相关分析筛选指标;以具备相关性的指标作为自变量,绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 作为因变量,数据分为男性组、女性组和总体组,共进行6次逐步回归,通过方差分析、拟合优度检验、VIF检验、Shapiro-Wilk检验、Durbin-Watson检验等选取拟合优度最优的方程。对最优方程进行回代检验,通过皮尔逊积矩相关分析、配对 $t$ 检验、Bland-Altman一致性检验观察实际测量值与方程预测值间的差异。以 $P < 0.05$ 为显著差异, $P < 0.01$ 为极显著差异。

## 2 结果

### 2.1 心肺运动试验测试结果

如表2所示,男性K值、安静心率显著低于女性( $P < 0.01$ );绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 显著高于女性( $P < 0.01$ )。

### 2.2 $\dot{V}O_{2max}$ 与各指标的相关性分析

通过简单相关分析,各指标与绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 的相关性如表3所示。

表2 不同性别心肺运动试验结果比较

指标	男性( $n=101$ )	女性( $n=99$ )	总体( $n=200$ )
K值	2.994 $\pm$ 0.682	3.444 $\pm$ 0.637*	3.218 $\pm$ 0.696
安静心率/(次 $\cdot$ min $^{-1}$ )	82.8 $\pm$ 14.2	86.5 $\pm$ 13.5*	84.6 $\pm$ 14.0
绝对 $\dot{V}O_{2max}$ /(L $\cdot$ min $^{-1}$ )	2.779 $\pm$ 0.601	1.682 $\pm$ 0.336*	2.242 $\pm$ 0.736
相对 $\dot{V}O_{2max}$ /(mL $\cdot$ kg $^{-1}$ $\cdot$ min $^{-1}$ )	37.74 $\pm$ 7.26	31.25 $\pm$ 4.41*	34.56 $\pm$ 6.84

注:与男性相比,\* $P < 0.01$ 。

表3  $\dot{V}O_{2max}$ 与各指标的相关性

	男性( $n=101$ )		女性( $n=99$ )		总体( $n=200$ )	
	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$
性别					0.748*	0.475*
年龄/岁	-0.023	0.014	0.028	-0.042	-0.084	-0.059
身高/cm	0.378*	-0.150	0.443*	0.077	0.741*	0.321*
体重/kg	0.563*	-0.295*	0.609*	-0.091	0.784*	0.158#
BMI/(kg $\cdot$ m $^{-2}$ )	0.493*	-0.313*	0.483*	-0.145	0.649*	0.031
K值	-0.311*	-0.693*	-0.270*	-0.484*	-0.401*	-0.657*
安静心率/(次 $\cdot$ min $^{-1}$ )	-0.388*	-0.437*	-0.381*	-0.359*	-0.377*	-0.407*

注:# $P < 0.05$ ,\* $P < 0.01$ 。

### 2.3 回归方程的建立

通过相关性分析,以具备相关性的指标为自变量,绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 和相对 $\dot{V}O_{2max}$ 为因变量,分别对男性、女性、总体

3组数据共进行6次逐步回归分析(表4):在总体中绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 回归方程的拟合度最好:绝对 $\dot{V}O_{2max}=2.248+0.253 \times$ 性别 $+0.03 \times$ 体重 $+0.339 \times$ K $-0.011 \times$ 安静心率。

$R=0.939, R^2=0.880, R^2_{adj}=0.877, SEE=0.239$  L/min, 性别: 男=1, 女=0。最优方程模型标准化系数(表 5), 自变量对绝对  $\dot{V}O_{2max}$  作用由大到小依次为体重、K 值、安静心率、性别。经逐步回归分析, 男性绝对  $\dot{V}O_{2max}$  比女性高 0.253 L/min; 体重

与绝对  $\dot{V}O_{2max}$  呈正相关, 体重每增加 1 kg, 绝对  $\dot{V}O_{2max}$  提高 0.03 L/min; K 值与绝对  $\dot{V}O_{2max}$  呈负相关, K 值每增加 1 个单位, 绝对  $\dot{V}O_{2max}$  下降 0.339 L/min; 安静心率与绝对  $\dot{V}O_{2max}$  呈负相关, 安静心率每增加 1 次/min, 绝对  $\dot{V}O_{2max}$  下降 0.011 L/min。

表 4 回归方程  
Table 4 Regression Equations

	男性(n=101)		女性(n=99)		总体(n=200)	
	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$	绝对 $\dot{V}O_{2max}$	相对 $\dot{V}O_{2max}$
方程汇总						
截距	2.924	69.851	1.914	61.367	2.248	64.124
性别	—	—	—	—	0.253	3.132
年龄/岁	—	—	—	—	—	—
身高/cm	—	—	—	—	—	—
体重/kg	0.031	—	0.027	—	0.030	—
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	—	—	—	—	—	—
K 值	-0.480	-6.353	-0.237	-4.404	-0.339	-5.287
安静心率/(次·min <sup>-1</sup> )	-0.012	-0.161	-0.010	-0.174	-0.011	-0.172
方程检验统计量						
F	25.945	29.104	36.945	47.872	22.133	32.225
方差分析 P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R	0.842	0.783	0.794	0.703	0.938	0.818
R <sup>2</sup>	0.708	0.614	0.631	0.495	0.880	0.670
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0.699	0.606	0.619	0.484	0.877	0.664
SEE	0.328	4.053	0.205	3.143	0.239	3.541
Durbin-Watson	2.153	2.248	1.974	1.937	1.929	1.951
容差	0.846~0.968	0.984	0.892~0.940	0.927	0.435~0.972	0.896~0.983
VIF	1.033~1.183	1.017	1.064~1.121	1.079	1.029~2.299	1.017~1.116
标准残差 K-S 检验 P	0.722	0.563	0.462	0.358	0.765	0.619

表 5 最优方程绝对  $\dot{V}O_{2max}$  模型回归系数  
Table 5 Optimal Equation Absolute  $\dot{V}O_{2max}$  Model Regression Coefficients

	非标准化系数		标准化系数 $\beta$	t	P	共线性统计	
	B	标准误差				容差	VIF
常量	2.248	0.169		13.293	0.000		
体重	0.030	0.002	0.646	17.301	0.000	0.472	2.119
K 值	-0.339	0.028	-0.337	-12.000	0.000	0.836	1.196
安静心率	-0.011	0.001	-0.230	-8.822	0.000	0.972	1.029
性别	0.253	0.054	0.183	4.705	0.000	0.435	2.299

### 3 讨论

本研究共获得 6 个回归方程, 均不包含年龄、身高和 BMI 等指标, 由于本研究的受试者为 18~25 岁的健康在校大学生, 个体间的年龄差异较小, 与  $\dot{V}O_{2max}$  的关系较弱。身高、BMI 与  $\dot{V}O_{2max}$  具备相关性, 但与体重存有多重共线性, 故在逐步回归过程中被剔除出方程。以绝对  $\dot{V}O_{2max}$  为自变量的方程中均有体重指标, 而以相对  $\dot{V}O_{2max}$  为因变

量的方程中不包含体重指标, 可能是因为相对  $\dot{V}O_{2max}$  是绝对  $\dot{V}O_{2max}$  与体重比值的形式, 已经消除了体重的影响, 皮尔逊积矩相关分析显示相关系数从 0.784 下降到 0.158, 体重对方程的贡献度大幅度下降。另外, 本研究所选取的新指标, K 值在 6 个回归方程中对  $\dot{V}O_{2max}$  的预测作用最大, 反映了心率和摄氧量随着运动负荷递增的变化规律, 是贯穿心肺运动试验的整个运动阶段的动态指标, 能够

更为直观地反映出受试者运动状态时的心肺功能,故可视为预测大学生有氧运动能力的一个新型指标。同时,6个预测方程中均包含安静心率,Fonseca等(2022)和Gilbert等(2022)研究发现,安静心率和绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 、相对 $\dot{V}O_{2max}$ 呈高度负相关,是预测 $\dot{V}O_{2max}$ 的良好指标,且方便易得。

本研究建立的6个回归方程的信度使用方差分析、拟合优度检验、VIF检验、Shapiro-Wilk检验、Durbin-Watson检验进行检验。最终选取最优方程,总体组中绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 为因变量的回归方程:绝对 $\dot{V}O_{2max}=2.248+0.253\times$ 性别 $+0.03\times$ 体重 $+0.339\times$ K $-0.011\times$ 安静心率( $R=0.939, R^2=0.880, R^2_{adj}=0.877, SEE=0.239$  L/min, 性别:男=1,女=0)。对方程进行方差分析, $F=22.133(P<0.01)$ ,说明方程显著。对方程进行拟合优度检验,以判断所纳入的自变量能解释因变量的程度(冯展鹏等,2022),结果显示该方程: $R=0.939, R^2=0.880, R^2_{adj}=0.877, SEE=0.239$  L/min,说明拟合度较好。另外,多重共线性也会影响方程的准确性,主要体现在容差和VIF上。米欢(2016)研究指出,当容差 $<0.1$ 、VIF $>5$ 时,方程存在多重共线性,且VIF越大,共线性越严重。本研究方程的容差和VIF范围分别在0.435~0.972和1.029~2.299。根据容忍度和VIF判断,纳入方程的自变量不存在共线性问题。除了满足以上检验,回归方程的残差应满足正态分布和残差间的相互独立,常用Shapiro-Wilk检验正态性(方积乾,2002),检验发现方程的残差符合正态分布,进一步对方程的残差进行Durbin-Watson检验,当统计量接近于2时,认为残差间相互独立(宁宏伟,2012),本研究Durbin-Watson值为1.929,提示方程的残差相互独立。

由上可知,本研究最优方程所涉及的自变量为性别、体重、K值和安静心率。王云翔等(1989)研究指出,不同性别 $\dot{V}O_{2max}$ 存在差异。通常男性大于女性,这与女性的心容积、心输出量和血红蛋白含量均低于男性有关(宁宏伟,2012)。范超群等(2019)研究发现,男性绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 和相对 $\dot{V}O_{2max}$ 均显著高于女性。体重和绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 显著正相关,王云翔等(1989)提出体重对 $\dot{V}O_{2max}$ 具有重要作用,在绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 最优方程中,均入选了体重因素,而在相对 $\dot{V}O_{2max}$ 的最优回归方程中,体重对于 $\dot{V}O_{2max}$ 的影响不再显示,故该变量被剔除出方程。K值与绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 呈显著负相关,提示较小的K值有利于机体的有氧运动能力。当HR一定时,K值随 $\dot{V}O_2$ 增大而减小;当 $\dot{V}O_2$ 一定时,K值随HR增大而增大。因此,可以通过训练降低心率,从而降低K值。安静心率和绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 呈显著负相关,Y·休恩费尔德等(1983)以600名20~60岁健康男性为研究对象,结果显示,安静心率与 $\dot{V}O_{2max}$ 之间呈显著负相关( $r=-0.331, P<0.05$ )。这与Zourdos等(2017)研究结果一致,有氧运动能力每提高10%,安静心率下降约5次/min。

本研究采用样本外回代检验对选取的最优方程进行效度检验,将回代检验组( $n=66$ )对应的指标回代入方程,并对实际测量值和方程预测值进行皮尔逊积矩相关分析、配对t检验和Bland-Altman一致性检验。其中,Bland-Altman一致性检验是利用实际测量值与方程预测值的一致性界限,并用图形来直观反应(冯展鹏等,2022)。本研究发现,方程预测值略高于实际测量值,可能与受试者个体差异以及心肺耐力差异有关,同时,皮尔逊积矩相关分析显示二者高度相关,配对t检验发现二者无显著性差异。进一步对实际测量值和方程预测值差值的均数进行估计,发现二者差值的分布服从于正态分布,回代检验组66名受试者仅有1名差数均值位于 $M\pm 1.96SD$ 区间(即95%的一致性界限)外,由于2种方法获得绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 差值均位于95%的一致性界限内(图3),说明本研究所选取总体组中绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 最优方程效度较好。

表6 实际测量值与方程预测值的对比分析

Table 6 Comparative Analysis of the Actual Measured Value and the Equation Predicted Value

实际测量值/ (L·min <sup>-1</sup> )	方程预测值/ (L·min <sup>-1</sup> )	Pearson相关性		配对t检验	
		r	P	t	P
数值 2.136±0.493	2.190±0.397	0.892	<0.01	-1.949	>0.05

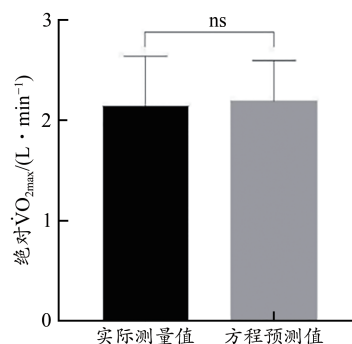


图2 实际测量值与方程预测值的配对t检验

Figure 2. Paired t-Test of the Actual Measured Value and the Equation Predicted Value

注:ns表示 $P>0.05$ ,无显著性差异。

本研究建立的绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 预测方程为评估高校学生有氧运动能力提供了一种便捷的方法,可以满足大规模的应用。在较低的运动强度时,根据心率-摄氧量曲线拟合出斜率K值,同时结合受试者的性别、体重和安静心率推测出受试者的绝对 $\dot{V}O_{2max}$ 。以上指标均可在亚极限运动状态下获得,但相较于直接法,受试者无需运动至极限状态,能有效避免运动风险的发生。因此,心率-摄氧量曲线斜率K值可以作为新的指标纳入到预测 $\dot{V}O_{2max}$ 的回归方程中。

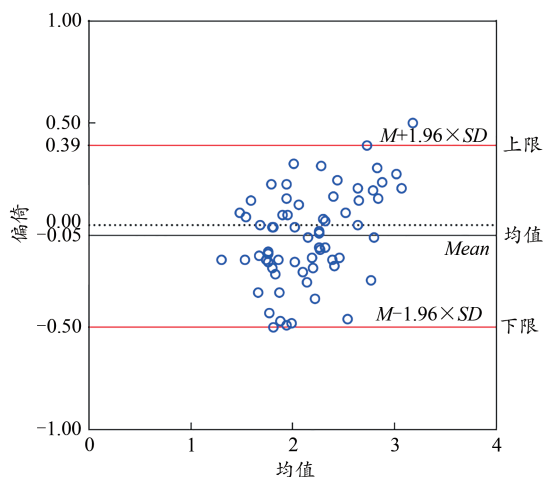


图3 实际测量值与方程预测值均值系统性误差

Figure 3. Systematic Error between the Mean Value of the Actual Measured Value and the Equation Predicted Value

#### 4 结论

本研究建立的预测方程为:绝对 $\dot{V}O_{2max}=2.248+0.253 \times$ 性别 $+0.03 \times$ 体重 $+0.339 \times K-0.011 \times$ 安静心率(其中,K为心率-摄氧量曲线斜率;性别:男=1,女=0),所使用的速率-摄氧量线性指标K不需要运动至极限状态便可获得,且信、效度检验良好,适合在大样本人群中推广。

#### 参考文献:

范超群,徐凯,聂明剑,等,2019.心肺耐力的科学测评:心肺运动试验与6 min 二级台阶试验的比较[J].中国组织工程研究,23(23):3686-3691.

方积乾,2002.现代医学统计学[M].北京:人民卫生出版社:538,549-574.

冯展鹏,姜岩,冯雪松,2022.青年人峰值氧脉搏推算方程的建立[J].中国组织工程研究,26(29):4693-4698.

高理升,李关东,叶玉琪,等,2022.一种基于摄氧量计算的心肺耐力测量方法及系统:CN202011096901.7[P].2022-02-11.

郭辉,刘韵婷,孔振兴,等,2020.基于BP神经网络的最大摄氧量预测方法研究[J].实验室科学,23(5):44-48.

郝璐,孙兴国,宋雅,等,2021.不同功率递增速率对正常人心肺运动试验整体功能的影响II:亚极限运动相关指标的影响[J].中国应用生理学杂志,37(2):120-124,134.

贺晓玉,温英英,2021.运用 verification phase 判定男大学生最大摄氧量的研究[J].中国运动医学杂志,40(2):92-97.

教育部,2014.教育部关于印发《国家学生体质健康标准(2014年修订)的通知》[J].体育教学,34(9):10-11.

刘海云,2019.20米折返跑与800/1000米跑评价中学生心肺耐力的比较研究[D].北京:北京体育大学.

刘祥茂,2021.普通大学生身体活动与最大摄氧量关系研究[D].徐州:中国矿业大学.

刘晓丽,刘超能,王人卫,等,2018.心肺功能在健康风险预测中的应

用[J].中国运动医学杂志,37(2):158-165.

美国运动医学学会,2015.ACSM运动测试与运动处方指南(第8版)[M].王正珍,译.北京:北京体育大学出版社:83-86,114.

米欢,2016.1公里步行试验推测40~49岁人群最大摄氧量回归方程的研究[D].北京:北京体育大学.

宁宏伟,2012.我国部分冬季项目运动员身体成分与身体机能的检测及相关性研究[D].沈阳:沈阳体育学院.

孙忠伟,马永平,马慧敏,等,2016.基于BP神经网络的大学生最大摄氧量估测模型研究[J].中国体育科技,52(3):56-60.

王飞,付海霞,王新雨,等,2021.一种多参数筛选预测最大摄氧量的方法:CN112863681A[P].2021-05-28.

王念辉,洪平,苏中军,2018.基于身高、体重及肺活量的大学一年级男生最大摄氧量推算方法研究[J].中国运动医学杂志,37(3):202-207.

王云翔,佟万仁,陈越秀,等,1989.逐级增加体力负荷时我国正常男子的最大摄氧量和次最大摄氧量与年龄、身高、体重的关系[J].中国应用生理学杂志,5(1):109-112.

杨慧君,2020.基于心功能、血液、体成分指标预测大学生最大摄氧量的研究[D].北京:国家体育总局体育科学研究所.

Y·休恩费尔德,邢华城,1983.根据年龄、体重和安静心率来预测有氧能力[J].体育科技(1):53-55.

FONSECA G W P, BISPO H N, RONDON E, et al., 2022. Association of sarcopenia and oxygen uptake efficiency slope in male patients with heart failure: The skeletal muscle hypothesis in practice [J]. Eur J Prev Cardiol, doi: 10.1093/eurjpc/zwac056.011.

GILBERT M J H, ADAMS O A, FARRELL A P, 2022. A sudden change of heart: Warm acclimation can produce a rapid adjustment of maximum heart rate and cardiac thermal sensitivity in rainbow trout[J]. Curr Res Physiol, 17(5): 179-183.

MUN J B, CHOI Y H, KIM J W, et al., 2021. Relationship among field tests to assess cardiorespiratory endurance in the military fitness test[J]. Korean J Sports Sci, 30(3): 1111-1122.

NEVILL A M, DUNCAN M J, SANDERCOCK G, 2020. Modeling the dose-response rate/associations between  $\dot{V}O_{2max}$  and self-reported Physical Activity Questionnaire in children and adolescents[J]. J Sport Health Sci, 9(1): 90-95.

ROSSI NETO J M, TEBEXRENI A S, ALVES A N F, et al., 2019. Cardiorespiratory fitness data from 18 189 participants who underwent treadmill cardiopulmonary exercise testing in a Brazilian population[J]. PLoS One, doi: 10.1371/journal.pone.0209897.

SKATTEBO Ø, JOHANSEN E S, CAPELLI C, et al., 2021. Effects of 150 and 450 mL acute blood losses on maximal oxygen uptake and exercise capacity[J]. Med Sci Sports Exerc, 53(8): 1729-1738.

TOULOUSE L, MUCCI P, PEZÉ T, et al., 2021. Influence of grade of obesity on the achievement of  $\dot{V}O_{2max}$  using an incremental treadmill test in youths[J]. J Sports Sci, 39(15): 1717-1722.

ZOURDOS M C, BAZYLER C D, JO E, et al., 2017. Impact of a submaximal warm-up on endurance performance in highly trained and competitive male runners [J]. Res Q Exerc Sport, 88(1): 114-119.

(收稿日期:2022-11-24; 修订日期:2023-09-23; 编辑:尹航)