

高原体力劳动强度评价指标研究

徐菁佩¹, 张尧², 王艳², 罗丽霞³, 赵立强¹, 周鼎伦¹

摘要:

[目的] 探讨高原地区心率(HR)、肺通气量(VE)与摄氧量(VO₂)之间的关系, 并拟合最优函数, 以探索用于高原体力劳动强度评价的简易指标。

[方法] 选取不同海拔高度的78名在岗男性工人, 用功率车模拟劳动负荷, 心肺功能测试系统记录不同劳动负荷下的VE、HR、VO₂。用曲线拟合VO₂与HR、VE的关系, 建立最优回归方程。

[结果] 同等劳动强度下, 不同海拔的工人VO₂(P=0.505)和HR(P=0.306)的差异没有统计学意义, VE的差异有统计学意义(P<0.001); 相同海拔高度, 不同劳动强度的工人VO₂、HR、VE的差异均有统计学意义(P<0.001)。曲线拟合显示, VE与VO₂、HR与VO₂的最大决定系数(R²)分别为0.903、0.583, 可看出VE与VO₂的幂函数效果最佳。进一步分析发现标准状况下的肺通气量(VE_{STPD})与VO₂的拟合效果更好; 拟合的函数为 $\hat{y}_{VO_2}=0.06x_{VE_{STPD}}^{0.861}$, R²=0.930。

[结论] 进行高原体力劳动强度评价时, VE_{STPD}可作为替代VO₂的简易评价指标。建立的函数可对作为现行体力劳动强度国家标准的补充和优化。

关键词: 高原; 体力劳动强度; 摄氧量; 肺通气量; 心率

引用: 徐菁佩, 张尧, 王艳, 等. 高原体力劳动强度评价指标研究[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(10): 864-867. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.17216

Study on evaluation index of physical workload in plateau XU Jing-pei¹, ZHANG Yao², WANG Yan², LUO Li-xia³, ZHAO Li-qiang¹, ZHOU Ding-lun¹ (1. West China School of Public Health, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Sichuan Electrical Power Hospital, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. Chongqing Mental Health Center, Chongqing 401147, China). Address correspondence to ZHOU Ding-lun, E-mail: zhoudinglun@163.com • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract:

[Objective] To assess the relationship among heart rate (HR), minute ventilation (VE), and oxygen uptake (VO₂), and choose an optimal fitting function to find simple indicators for the evaluation of physical workload in plateau.

[Methods] Seventy-eight healthy males working at different altitudes were recruited in the study. An incremental cycle ergometer test until volitional fatigue was performed on all participants. Physiologic parameters, including VO₂, VE, and HR, were recorded in a computerized test system. The optimal regression equation was chosen from fitting curves between VO₂ and VE and between VO₂ and HR.

[Results] Under the same physical workload and at varied altitudes, VO₂ (P=0.505) and heart rate (P=0.306) did not show differences, but VE were significantly different (P<0.001). At the same altitude and under varied physical workloads, VO₂, HR, and VE were statistically different among the workers (P<0.001). The optimal regression equation showed that the relationship between VE and VO₂ (R²=0.903) was stronger than that between HR and VO₂ (R²=0.583), which indicated that the power function of VE and VO₂ was the best in data fitting. Further analysis found that VE under standard temperature and pressure, dry (VE_{STPD}) was better fitted with VO₂ than VE. The resulted fitting function was $\hat{y}_{VO_2}=0.06x_{VE_{STPD}}^{0.861}$, R²=0.930.

[Conclusion] VE_{STPD} could replace VO₂ to assess physical workload in plateau. The established function may supplement and improve existing national standard of physical workload.

Keywords: plateau; physical workload; oxygen uptake; minute ventilation; heart rate

Citation: XU Jing-pei, ZHANG Yao, WANG Yan, et al. Study on evaluation index of physical workload in plateau[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017, 34(10): 864-867. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.17216

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

[作者简介]徐菁佩(1992—), 女, 硕士生; 研究方向: 职业中毒; E-mail: xujingpeipearl@163.com

[通信作者]周鼎伦, E-mail: zhoudinglun@163.com

[作者单位]1.四川大学华西公共卫生学院, 四川 成都 610041; 2.四川电力医院, 四川 成都 610065; 3.重庆精神卫生中心, 重庆 401147

在高原低氧环境从事体力劳动会加重机体的缺氧程度和生理负荷,使个体的劳动能力下降^[1-3],然而迄今为止我国尚未制订专门针对高原环境的体力劳动强度国家标准。我国现有的体力劳动强度国家标准是GBZ/T 189.10—2007《工作场所物理因素测量体力劳动强度分级》^[4],该标准的核心是计算体力劳动时的能量代谢率,而能量代谢率是根据肺通气量计算得来的。那么,该标准能否适用于高原环境,需要实证研究。另外,现行国家标准在计算能量代谢率时,只适用于不超过30.9 L/min的肺通气量的计算,但课题组在前期调研中发现,在劳动强度较大时,肺通气量远超过30.9 L/min,即现行国家标准并不适用于劳动强度很大的情况。因此,随着在高原劳动的人群逐渐增多,亟须研究高原体力劳动强度评价指标。

有研究表明,摄氧量(VO_2)与体力劳动强度密切相关,而与海拔关系不大^[2,5],可以用于高原体力劳动强度评价。然而,测量 VO_2 的仪器昂贵,测定方法较复杂,不适合推广,更不适合用于野外作业的体力劳动强度评价。心率(HR)和肺通气量(VE)的测试方法较为简单,且与体力劳动强度负相关^[6]。因此,本文拟探讨HR、VE与 VO_2 的关系,并拟合函数,以探索适用于高原体力劳动强度评价的简易测试指标,为高原体力劳动强度评价研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究对象来源于某公司的电力输送线路巡视维护、变电站运行维护男性一线工人,共78人。前者以野外作业为主,每周工作5 d,每日工作8~10 h;后者施行两班倒,每日工作12 h。所有工人都为从平原进入高原,进高原前经过健康体检并身体状况良好,习惯2周后进入工作岗位。工人常驻高原,仅休假时回平原。

1.2 研究设计

采用横断面调查的方法,对7个工作点的调查对象开展测试,海拔高度分别为500、2 500、2 800、3 100、3 300、3 700、4 000 m。测试前告知调查对象此次调查的目的、意义、程序和内容,获得知情同意后逐一开展测试。调查现场的所有工人均自愿参与测试。

对每个调查对象开展三项调查:首先,采用自编问卷调查工人的年龄、高原工作总时间;其次,测量工人的身高和体重,并计算体质质量指数(body mass

index, BMI)和体表面积(body surface area, BSA);最后,采用运动心肺功能测试仪(MetaLyzer 3B, Cortex, 德国)收集不同劳动负荷下的 VO_2 、HR和VE。用功率车(EC3000, Customed, 德国)模拟不同强度的劳动负荷,劳动负荷水平以阶梯方式递增,从0 W开始,每次增加30 W,直至诱发出最大耗氧量或受试者达到主观疲劳不能坚持。每个负荷水平测试2 min。

记录测量地点的气压和温度。根据海拔高度,划分为四组,分别为500、2 000~、3 000~、4 000 m。

1.3 劳动负荷测量方法

采用功率车模拟不同劳动负荷,被测试者坐姿蹬踏自行车,保持转速60~70 r/min。采用运动心肺测试仪实时记录运动时的 VO_2 、HR和VE。经过校正后开始测试,该测试系统的传感器会根据受试者的呼吸,自动采集每一次呼吸时的 VO_2 和VE,同时记录HR。所有原始数据均保存在系统中,并可导出。

考虑到海拔不同,1 L气体中的氧气含量不同,故分析时引入标准状况(standard temperature and pressure, dry, STPD)下的肺通气量(VE_{STPD}),以排除气压、温度的影响。BSA是影响机体代谢率的重要指标,为排除BSA的影响,构建了另一个指标,即每单位体表面积下的标准状况下肺通气量(简称为 $\text{VE}_{\text{STPD/BSA}}$)。

1.4 统计学分析

将测试数据导出为Excel格式,经过整理后导入SPSS 12.0进行统计处理。一般人口学特征的比较用完全随机设计资料的方差分析;计算 VO_2 、HR和VE在不同劳动负荷下的平均值,采用重复测量的方差分析分别研究海拔对三者的影响。采用回归分析进行曲线拟合构建 VO_2 与VE、HR的关系。拟探索的模型包括线性、对数、二次、三次、幂、指数函数,并选出决定系数(R^2)最高的模型建立指标之间的回归方程。检验水准 $\alpha=0.05$,双侧检验。

2 结果

2.1 一般人口学特征

不同海拔高度研究对象的年龄差异有统计学意义($P<0.05$),500 m海拔的研究对象年龄最小;身高、体重、BMI、BSA、高原工作时间的差异均无统计学意义。见表1。

2.2 海拔对 VO_2 、HR和VE的影响

在劳动负荷相同的情况下,不同海拔的工人 VO_2 差异没有统计学意义($P=0.505$),提示 VO_2 不受

海拔的影响；海拔对HR的影响也没有统计学意义($P=0.306$)；但不同海拔的工人VE差异有统计学意义($P<0.001$)。相同海拔高度，随着负荷的增加，研究对象的 VO_2 、HR和VE差异均具有统计学意义($P<0.001$)。见表2。

2.3 VO_2 与HR、VE关系的曲线拟合

采用不同的函数拟合 VO_2 与VE和HR的关系，根

据 R^2 判断拟合效果。由表3可见，VE与 VO_2 的拟合效果较好，且以幂函数的拟合效果最佳($R^2=0.903$)，拟合的函数为 $\hat{y}_{\text{VO}_2}=0.048x_{\text{VE}}^{0.837}$ 。

为排除气压和体表面积的影响，分别构建 VO_2 与 VE_{STPD} 和 $\text{VE}_{\text{STPD/BSA}}$ 的函数关系。由表4可见， VE_{STPD} 与 VO_2 的拟合效果较好，且以幂函数的拟合效果最佳($R^2=0.930$)，拟合的函数为 $\hat{y}_{\text{VO}_2}=0.06x_{\text{VE}_{\text{STPD}}}^{0.861}$ 。

表1 研究对象的一般人口学特征

Table 1 Demographic characteristics of study subjects

海拔(m) Altitude	n	年龄(岁) Age(Years)	身高(cm) Height	体重(kg) Weight	体质质量指数(kg/cm ²) Body mass index	体表面积(m ²) Body surface area	高原工作时间(年) Seniority in plateau(Years)
500	9	26.0 ± 4.1	172.7 ± 4.7	66.0 ± 9.6	22.1 ± 3.0	1.7 ± 0.1	—*
2000~	35	35.8 ± 7.8	168.5 ± 5.4	65.9 ± 11.4	23.2 ± 3.7	1.7 ± 0.2	1.8 ± 1.1
3000~	19	32.1 ± 7.3	168.7 ± 4.4	64.4 ± 8.2	22.6 ± 2.2	1.7 ± 0.1	1.1 ± 0.7
4000	15	37.1 ± 7.5	168.3 ± 5.4	63.7 ± 9.0	22.5 ± 3.1	1.7 ± 0.1	1.8 ± 1.2
F		5.572	1.751	0.216	0.349	0.323	2.182
P		0.028	0.164	0.885	0.790	0.809	0.124

[注]*：500m不属于高原。

[Note]*：An altitude at 500m is not plateau.

表2 不同海拔和不同劳动强度的 VO_2 、HR、VE比较

Table 2 VO_2 , HR, and VE at different altitudes and under different workloads

海拔(Altitude, m)	劳动强度(Workload, W)						F/P
	0	30	60	90	120	150	
VO_2 (L/min)							$F=466.922, P<0.001$
500	0.49 ± 0.06	0.63 ± 0.06	0.91 ± 0.08	1.21 ± 0.14	1.51 ± 0.11	1.84 ± 0.11	
2000~	0.52 ± 0.08	0.63 ± 0.08	0.89 ± 0.09	1.19 ± 0.10	1.50 ± 0.13	1.85 ± 0.18	
3000~	0.51 ± 0.06	0.62 ± 0.05	0.87 ± 0.04	1.18 ± 0.06	1.49 ± 0.10	1.86 ± 0.12	
4000	0.51 ± 0.07	0.62 ± 0.06	0.88 ± 0.06	1.20 ± 0.09	1.53 ± 0.11	1.82 ± 0.12	
F/P							$F=0.866, P=0.505$
HR (bpm)							$F=43.065, P<0.001$
500	78 ± 21	95 ± 8	106 ± 8	119 ± 15	126 ± 27	147 ± 34	
2000~	98 ± 17	106 ± 12	119 ± 12	135 ± 14	151 ± 15	166 ± 17	
3000~	101 ± 11	107 ± 11	120 ± 13	137 ± 15	149 ± 28	162 ± 27	
4000	85 ± 25	91 ± 26	103 ± 29	120 ± 34	137 ± 39	147 ± 48	
F/P							$F=1.206, P=0.306$
VE (L/min)							$F=64.264, P<0.001$
500	14.9 ± 2.5	17.3 ± 2.2	23.9 ± 2.3	32.0 ± 2.8	42.5 ± 5.8	57.5 ± 7.6	
2000~	18.4 ± 3.4	22.0 ± 3.5	30.7 ± 3.8	43.0 ± 5.6	58.0 ± 7.9	77.9 ± 10.4	
3000~	18.1 ± 2.4	22.0 ± 2.8	30.7 ± 3.1	45.4 ± 6.0	62.4 ± 8.3	85.5 ± 12.3	
4000	19.4 ± 2.9	23.0 ± 2.4	33.1 ± 3.0	48.5 ± 5.9	69.7 ± 9.5	94.6 ± 13.8	
F/P							$F=39.081, P<0.001$

表3 VE、HR与 VO_2 关系的曲线拟合(R^2)

Table 3 Curves fitting between VE & VO_2 and HR & VO_2

函数类型(Function type)	VE & VO_2	HR & VO_2
线性(Linear)	0.852	0.564
对数(Logarithmic)	0.757	0.552
二次(Quadratic)	0.854	0.582
三次(Cubic)	0.857	0.583
幂(Power)	0.903	0.518
指数(Exponential)	0.883	0.512

表4 VE_{STPD} 、 $\text{VE}_{\text{STPD/BSA}}$ 与 VO_2 关系的曲线拟合(R^2)

Table 4 Curves fitting between VO_2 & VE_{STPD} and VO_2 & $\text{VE}_{\text{STPD/BSA}}$

函数类型(Function type)	$\text{VE}_{\text{STPD}} & \text{VO}_2$	$\text{VE}_{\text{STPD/BSA}} & \text{VO}_2$
线性(Linear)	0.904	0.867
对数(Logarithmic)	0.799	0.770
二次(Quadratic)	0.907	0.870
三次(Cubic)	0.911	0.873
幂(Power)	0.930	0.907
指数(Exponential)	0.915	0.891

3 讨论

目前,关于体力劳动强度的国家标准并未标明是否适用于高原环境,两个行业标准(铁道行业和石油野外作业)虽涉及高原环境^[7-8],但其核心指标(能量代谢率、VE)的计算完全沿用国家标准。鉴于能量代谢率是根据VE计算出的,因此问题的关键是VE的计算,及其是否受海拔高度的影响。

研究结果提示,VO₂与体力劳动强度有关,而与海拔无关,与Pugh等^[5]的研究结果类似。而VO₂的测量较繁琐,需要分析气体成分,测量仪器也很昂贵。目前普遍的方法是采用测量VE的间接法,也有部分采用HR。因此,本文以VO₂为核心,构建VO₂与HR和VE的函数关系,以寻找可以替代VO₂测量的简易指标。研究结果显示,VO₂与HR拟合的效果远不及其与VE拟合的效果;而且,VE_{STPD}与VO₂的拟合效果最好。拟合时,采用幂函数的效果最好,与我国现行的体力劳动强度分级标准相吻合^[4]。VE_{STPD}在计算时已经排除了海拔高度和温度对气体成分的影响,这可能是VE_{STPD}最能体现VO₂的缘故。同时,这意味着在评价高原体力劳动强度时,只需要将VE转化为VE_{STPD},然后按照同一个公式($\hat{y}_{\text{VO}_2} = 0.06 x_{\text{VE}_{\text{STPD}}}^{0.861}$)进行计算即可,而不需要考虑海拔的影响。现行国家标准在计算能量代谢率时,只适用于不超过30.9 L/min的VE_{STPD}的计算,且不同范围(3.0~7.3、7.3~8.0、8.0~30.9 L/min)需套用不同的公式。因此,相对于现行国家标准,本研究结果简化了这一计算过程。课题组前期研究发现无论在平原还是高原,在劳动强度很大的时候,VE_{STPD}往往超过这个范围,甚至超过100 L/min。因此,本研究的计算公式弥补了这一缺陷,不受VE的限制,可以用于高强度的体力劳动强度评价。

本研究解决了高原地区能量代谢率的计算问题,但并不代表现行的体力劳动强度国家标准适用于高原。一是,海拔增加会导致基础心率和同等劳动强度下的心率增加,因此,GBZ 2.2—2007《工业场所有害因素职业接触限值第2部分:物理因素》中规定的“工作日内从事任何单项体力工作时,最大心率值不应超过150次/min,单项作业时最大心率值平均不应超过120次/min”^[9],并不能简单地应用于高原体力劳动强

度的评价。二是,现行国家标准是以体力劳动强度指数和工作日总能量消耗为评价标准的,强调的是以工作日为单位,而高原的一个特殊性是大强度体力劳动容易诱发急性高原反应,因此除了关注工作日的劳动强度外,还应特别重视单项体力劳动强度的界值。

虽然尚未有文献表明体力劳动强度随海拔高度的变化存在性别差异,但本研究的对象只纳入了男性工人,故该结果是否适用于女性群体,还需要开展进一步的研究。

综上,本研究发现采用VE_{STPD}拟合VO₂的效果最好,且不受海拔高度的影响。构建的函数关系为 $\hat{y}_{\text{VO}_2} = 0.06 x_{\text{VE}_{\text{STPD}}}^{0.861}$ 。本研究为高原体力劳动强度分级与评价提供了有利的依据,并可作为现行体力劳动国家标准的补充和优化。

参考文献

- [1] 张世杰,李建国,宋长平,等.高原体力劳动强度分级标准研究[J].中华劳动卫生职业病杂志,1994,12(2): 112-114.
- [2] West JB, Boyer SJ, Gruber DJ, et al. Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest[J]. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol, 1983, 55(3): 688-698.
- [3] 李岳,吴扬帆.高原地区养路工体力劳动强度分级调查研究[J].环境与职业医学,2006,23(4): 355-356.
- [4] 工作场所物理因素测量 第10部分:体力劳动强度分级: GBZ/T 189.10—2007[S].北京:人民出版社,2007.
- [5] Pugh LG, Gill MB, Lahiri S, et al. Muscular exercise at great altitudes[J]. J Appl Physiol, 1964, 19: 431-440.
- [6] 李文选,汪济民,窦兰君,等.军事体力劳动强度评价和分级标准的研究[J].中华劳动卫生职业病杂志,1997,15(2): 97-99.
- [7] 铁道行业体力劳动强度分级: TB/T 2607—2006[S].北京:中国铁道出版社,2006.
- [8] 石油野外作业体力劳动强度分级: SY/T 6358—2008[S].北京:石油工业出版社,2008.
- [9] 工作场所有害因素职业接触限值 第2部分:物理因素: GBZ 2.2—2007[S].北京:人民卫生出版社,2007.

(收稿日期:2017-03-15;录用日期:2017-08-14)

(英文编辑:汪源;编辑:汪源;校对:丁瑾瑜)