DOI:10.16016/j.1000-5404.201912008

2019 年度重庆市出版专项资金资助栏目论文

以相对心率为指标的高原适宜劳动强度评价方法研究

张 钢[1],李 鹏[1],王开发[2],高钰琪[1] 400038 重庆,陆军军医大学(第三军医大学):高原军事医学系,极端环境医学教育部重点实验室,军队高原医学重点实验室[1],生物医学工程系[2]

[**摘要**] **目的** 探讨高原环境运动负荷状态下人体心率变化规律,建立高原适宜劳动强度评价方法。**方法** 采用亚极量踏阶运动试验,在平原(海拔 300 m)和高原(海拔 3 700、4 200、4 600 和 5 100 m)环境对 228 例受试者测定了不同运动负荷状态下运动心率和恢复心率,计算了最大氧耗量(VO_2max)、心率变化幅度(X)和相对心率综合指标(Z)。**结果** 与平原相比,高原 3 700~5 100 m 受试者 VO_2max 显著下降(41.74±2.96, 41.25±2.84, 41.08±2.35, 41.60±2.82 *vs* 46.61±3.74 mL·kg^{-1}·min^{-1},$P<0.05$);相对心率综合指标 Z 值随着心率变化幅度 X 值的增加而呈线性的增加($Z=0.920+0.006X$,$R^2=0.794$);受试者中度劳动强度 Z 值(1.42±0.21)显著小于重度劳动强度(1.52±0.23,$P<0.05$)。**结论** 高原环境人体劳动能力显著下降,高原适宜劳动强度宜在中度劳动强度范围内,$Z=1.42$ 可作为高原环境中度劳动强度判定依据。

[**关键词**] 相对心率;高原;适宜运动强度;氧耗量;运动心率

[**中图法分类号**] R134.1; R331.31; R339.54 [**文献标志码**] A

Evaluation of optimal labor intensity with relative heart rate at plateau

ZHANG Gang[1], LI Peng[1], WANG Kaifa[2], GAO Yuqi[1] [1]Key Laboratory of High Altitude Medicine of PLA, Key Laboratory of Extreme Environmental Medicine of Ministry of Education, Faculty of High Altitude Military Medicine, [2]Faculty of Bioengineering Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038, China

[**Abstract**] **Objective** To explore the law of the change of human heart rate under plateau environmental exercise load and establish an evaluation method of optimal labor intensity at plateau. **Methods** Sub-polar treadmill exercise test was used to measure the exercise heart rate and recovery heart rate of 228 subjects under different exercise load conditions at plain (altitude 300 m) and plateau (altitude 3 700, 4 200, 4 600 and 5 100 m). The maximum oxygen consumption (VO_2max), heart rate change amplitude (X) and relative heart rate comprehensive index (Z) were calculated. **Results** Compared with the plain, VO_2max of subjects from 3 700 m to 5 100 m at high altitude was decreased significantly (41.74±2.96, 41.25±2.84, 41.08±2.35, 41.60±2.82 *vs* 46.61±3.74 mL·kg^{-1}·min^{-1}, $P<0.05$). The Z value of the relative heart rate comprehensive index was increases linearly with the increase of the X value of the heart rate change amplitude ($Z=0.920+0.006X$, $R^2=0.794$). The Z value of moderate labor intensity (1.42±0.21) was obviously lower than that of severe labor intensity (1.52±0.23, $P<0.05$). **Conclusion** Plateau environment significantly decreases the labor capacity of human body. So, the suitable labor intensity at plateau should be within the range of moderate labor intensity. $Z=1.42$ can be used as the cut-off value for judging moderate labor intensity in plateau environment.

[**Key words**] relative heart rate; plateau; optimal labor intensity; oxygen consumption; exercise heart rate

Supported by the Major Project of the "Twelfth Five-Year Plan" of Military Logistic Scientific Research (AWS14L005). Corresponding author: ZHANG Gang, E-mail: zhanggang196868@163.com

[**基金项目**] 全军后勤科研"十二五"重大项目(AWS14L005)

[**通信作者**] 张 钢,E-mail:zhanggang196868@163.com

高原环境缺氧寒冷,严重影响官兵身体健康,同时军事作业能力也显著下降。在高原军事训练时,人体心、肺负荷较平原增大,代偿能力下降,运动能力较平原明显降低[1-2]。在高原若运动训练强度过大,可加重人体高原缺氧症状,妨碍习服过程,诱发或加重缺氧性疾病。因此遵循高原劳动生理学特点,选择适宜训练或劳动强度,对于保障高原官兵身体健康,提高军事训练质量,减轻慢性低氧损伤意义重大。

目前缺乏在高原环境下劳动强度的分级评价标准,无法量化评价高原环境劳动强度。为此,本研究对不同海拔、不同运动强度的人体心率变化规律进行了研究,对氧耗量、运动心率和相对心率的相互关系进行了探讨,旨在建立科学、简单、有效的高原劳动强度评价方法。

1 资料与方法

1.1 样本对象

参加测试总人数 228 例,均为男性,年龄(20.92±1.88)岁,其中平原测试人数为 20 例,高原测试人数为 208 例,高原测试者均为在高原上连续居住时间超过半年且习服良好,身体健康。

1.2 海拔高度

选择了平原(海拔 300 m)、海拔 3 700、4 200、4 600 和 5 100 m 高原开展现场研究。

1.3 评价方法

按照文献[3]方法,采用亚极量踏阶运动法对不同海拔、不同运动负荷(二级)及恢复时间的人体运动心率进行了测定,其中台阶高度 0.4 m,运动时间 5 min,一级负荷选择踏阶速度为 22.5 b/min,此时负荷强度为(783.63±72.75)kg·m·min^{-1};二级负荷选择踏阶速度 25 b/min,此时负荷强度为(870.67±80.83)kg·m·min^{-1}。按照文献[4-6]方法,对受试者氧耗量进行计算。

测试程序由专人负责,试验开始前进行了操作程序、动作规范及数据记录的统一培训,所有现场测试均按照相同模式完成。

1.4 心率指标

相对心率=劳动瞬间心率/静息心率

相对心率综合指标(Z)=(劳动中的平均相对心率+劳动结束后休息 5 min 的平均相对心率+休息 5 min 末的瞬间相对心率)/3

心率变化幅度(X)=(劳动心率-静息心率)/静息心率×100%

1.5 统计学分析

数据用 $\bar{x}\pm s$ 表示,采用 SPSS 10.0 统计软件,两组间比较采用独立样本 t 检验,多组间比较采用单因素方差分析,相关性采用 Pearson 分析,检验水准 $\alpha=0.05$。

2 结果

2.1 高原与平原人体基础体能结果

2.1.1 最大氧耗量 VO_2max 测定了受试者在平原和高原安静和运动状态心率,计算 VO_2max(表 1)。所有受试者身高、体质量均无统计学差异,与平原(海拔 300 m)相比,高原 3 700~5 100 m 受试者 VO_2max 均显著下降($P<0.05$)。

表 1 不同海拔人体最大氧耗量(VO_2max)比较($\bar{x}\pm s$)

海拔/m	n	身高/cm	体质量/kg	静息心率/次·min^{-1}	VO_2max/mL·kg^{-1}·min^{-1}
300	20	170.14±3.19	63.12±5.12	69.55±6.84	46.61±3.74
3 700	108	174.25±5.05	65.23±6.09	76.56±8.26	41.74±2.96[a]
4 200	39	174.41±4.55	60.49±5.72	76.32±7.40	41.25±2.84[a]
4 600	22	174.17±2.78	62.29±4.39	76.41±7.87	41.08±2.35[a]
5 100	39	173.79±6.15	63.27±5.70	83.58±11.70	41.60±2.82[a]

a:$P<0.05$,与平原(300 m)比较

2.1.2 相对心率综合指标 按照方法 1.4 计算受试者相对心率综合指标 Z 值(表 2)。运动心率、恢复心率和 Z 值随负荷强度增加而增加($P<0.05$);相同运动负荷下,高原运动心率较平原增加,运动后恢复心率增大,Z 值增加($P<0.05$)。

2.2 高原与平原人体氧耗量结果

按照文献[5-6]方法计算在平原和海拔 3 700~5 100 m 时受试者在安静和运动负荷时的氧耗量(表 3),安静状态高原氧耗量较平原显著升高($P<0.05$),在相同运动负荷时高原与平原氧耗量无统计学差异。

2.3 高原相对心率综合指标(Z)与氧耗量相关性

对海拔 3 700、4 200、4 600 和 5 100 m 受试者相对心率综合指标(Z)和氧耗量进行 Pearson 相关分析(表 4),两者具有显著相关性($P<0.05$)。

表 2 不同海拔不同劳动强度运动心率、恢复心率和相对心率综合指标(Z)比较($\bar{x}\pm s$)

海拔/m	负荷	n	运动心率/次·min^{-1}	恢复心率/次·min^{-1}			相对心率综合指标(Z)
				1 min	3 min	5 min	
300	一级	20	112.21±8.79	84.70±9.55	75.10±6.51	70.45±5.77	1.25±0.08
	二级		139.94±15.11^{b}	103.95±14.77^{b}	88.10±11.14^{b}	80.23±9.45^{b}	1.56±0.12^{b}
3 700	一级	108	135.22±15.98^{a}	103.00±15.53^{a}	90.78±18.95^{a}	88.28±16.53^{a}	1.39±0.23^{a}
	二级		164.72±15.04^{ab}	115.56±16.84^{ab}	103.72±16.95^{ab}	94.71±13.13^{ab}	1.66±0.24^{ab}
4 200	一级	39	138.04±12.29^{a}	102.68±16.64^{a}	92.36±13.45^{a}	89.16±10.92^{a}	1.42±0.20^{a}
	二级		157.40±13.58^{ab}	113.88±11.31^{ab}	99.24±12.28^{ab}	96.31±11.98^{ab}	1.60±0.18^{ab}
4 600	一级	22	142.18±12.44^{a}	102.32±20.13^{a}	93.50±14.65^{a}	89.41±11.47^{a}	1.43±0.17^{a}
	二级		158.95±12.41^{ab}	115.14±18.72^{ab}	103.14±14.41^{ab}	95.40±9.78^{ab}	1.63±0.20^{ab}
5 100	一级	39	157.96±10.26^{a}	110.47±18.36^{a}	102.42±11.50^{a}	100.20±10.58^{a}	1.47±0.19^{a}
	二级		169.38±8.61^{ab}	120.35±19.23^{a}	109.38±18.34^{a}	103.89±11.45^{a}	1.70±0.15^{ab}

a:$P<0.05$,与平原(300 m)比较;b:$P<0.05$,与一级负荷比较

表 3 不同海拔劳动氧耗量 VO_2 比较(mL·kg^{-1}·min^{-1})

负荷强度	平原($n=20$)	3 700 m($n=108$)	4 200 m($n=39$)	4 600 m($n=22$)	5 100 m($n=39$)
安静	4.20±1.40	8.05±1.38^{a}	9.07±1.78^{a}	8.64±1.63^{a}	9.15±1.09^{a}
一级负荷	16.57±2.92	16.67±2.10	18.68±2.78	16.16±3.42	17.74±2.86
二级负荷	18.23±1.67	19.11±2.23	19.25±3.74	18.89±2.63	19.00±3.01

a:$P<0.05$,与平原比较

表 4 高原相对心率综合指标(Z)与氧耗量相关性分析

负荷强度	≥3 700 m		相关系数	
	Z	VO_2/mL·kg^{-1}·min^{-1}	P 值	R 值
一级	1.43±0.45	16.72±2.23	<0.001	0.464
二级	1.59±0.32	17.56±3.21	0.041	0.201

2.4 高原劳动强度评价

2.4.1 不同劳动强度人群分布 对 3 700~5 100 m 4 个海拔高原 208 名受试者在不同运动负荷时劳动强度进行评价(表 5),随着运动负荷增加,氧耗量显著增加($P<0.05$);与一级运动负荷相比,二级运动负荷时中度劳动强度人群数量显著减少,重度劳动强度人群显著增加($P<0.05$)。

表 5 高原不同劳动强度人群分布比例

负荷	n	氧耗量 VO_2 /mL·kg^{-1}·min^{-1}	劳动强度人群分布(%)	
			中度	重度
一级	208	14.83±2.88	90.38	9.62
二级	208	16.57±2.64^{a}	78.85^{a}	21.15^{a}

a:$P<0.05$,与一级负荷比较

2.4.2 高原劳动强度判定值 将高原 208 名受试者按不同劳动强度分别比较氧耗量和 Z 值(表 6),氧耗量和 Z 值均随劳动强度增加而增加,以 $Z=1.42$ 可显著区别中度和重度劳动强度。

表 6 高原不同劳动强度人群氧耗量和 Z 值比较

指标	劳动强度		P 值
	中度	重度	
VO_2/mL·kg^{-1}·min^{-1}	15.07±2.11	20.39±1.54	<0.001
Z 值	1.42±0.21	1.52±0.23	0.003

2.4.3 高原劳动强度判别式 将 Z 值和心率变化幅度 X 进行回归分析(图 1),得到两者回归关系:

$$Z=0.920+0.006X \quad R^2=0.794 \qquad (1)$$

X 为心率变化幅度,即(劳动瞬间心率-静息心率)/静息心率;Z 为相对心率综合指标。

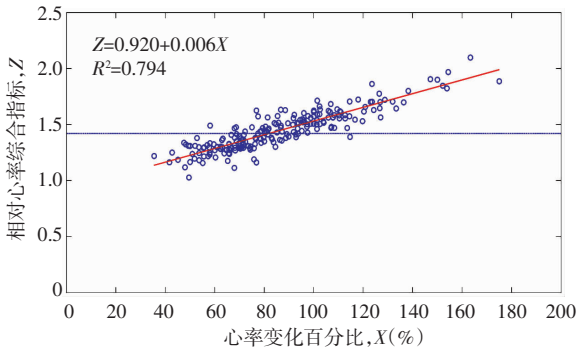


图 1 相对心率综合指标与心率变化回归分析

2.5 回归关系预测与数据实测对比

按照2.4.3式(1),以$Z \leqslant 1.42$为中度劳动强度、$Z>1.42$为重度劳动强度作为判定依据,对受试者预测计算,然后与高原实测结果对比(表7、8),海拔4 000 m以下中度劳动强度预测与实测结果相符30例,不符4例,重度劳动强度相符77例,不符4例,预测符合率92.86%,正确指数83.00%;海拔4 000 m以上中度劳动强度预测与实测结果相符43例,不符5例,重度劳动强度相符57例,不符8例,预测符合率88.37%,正确指数76.06%。

表7 预测与实测相符合和不符合人数比较(例)

劳动强度	海拔4 000 m以下		海拔4 000 m以上	
	相符合	不符合	相符合	不符合
中度	30	4	43	5
重度	77	4	57	8

表8 预测与实测效果比较(%)

模型预测指标	海拔4 000 m以下	海拔4 000 m以上
灵敏度	88.00	84.24
特异度	94.92	91.82
阳性预测值	88.00	89.60
阴性预测值	95.00	87.45
正确指数	83.00	76.06
误诊(假阳性)率	5.08	8.18
漏诊(假阴性)率	12.00	15.76
预测符合率	92.86	88.37

3 讨论

高原低氧环境使得人体劳动能力显著下降,如果劳动强度过大,容易加剧缺氧引起人体损伤,因此建立高原适宜劳动强度的判定方法,对于高原人体劳动保护非常重要,我们前期报道了心率、乳酸和血氧饱和度等指标在高原军人运动能力评价上的适宜性[7],但目前尚缺乏对适宜劳动强度制定的量化方法。

国际劳工局把在正常情境中,人体工作8 h不产生过度疲劳的最大工作负荷值认定为人体最佳工作负荷,明确能量消耗20.93 kJ/min、心率(110~115)次/min、氧耗量为最大氧耗量的33%时的工作负荷为最佳负荷。李文选等[4]在平原环境下依据劳动人体氧脉搏的变化规律,得出适宜劳动强度的上限为心率110次/min,肺通气量25 L/min,氧耗量1.1 L/min。张芳等[5-6]在海拔3 680 m和4 100 m高原建立了间歇递增负荷劳动人体模型,测试了不同劳动负荷下人体劳动心率、耗氧量和血氧饱和度,得出适宜强度时心率为130次/min,氧耗量0.93~0.98 L/min。按照《军事体力劳动强度分级》(GJB1336-92)中劳动强度氧耗量分级标准,以上的劳动强度均处于中等劳动强度范围。因此从劳动卫生学角度,目前一致认为高原适宜劳动强度应处在中等劳动强度范围内,但由于目前缺乏在高原环境下劳动强度的分级标准,因此无法定义和划分高原环境的中等劳动强度。

以往采用劳动心率作为劳动强度分级指标,忽略了受试者静息心率的生理差异,使得在同等负荷下劳动时,受试者瞬间心率有较大的差异,但其瞬间心率与静息心率的比值(相对心率)基本接近。为消除个体差异,我们按照文献[8]报道方法,把劳动期间和劳动结束后恢复期间的相对心率综合考虑,将劳动中的相对心率、劳动结束后休息5 min的相对心率和休息第5 min末的瞬时相对心率的平均值称为相对心率综合指标。通过心率的测定,计算相对心率和相对心率综合指数(Z),以相对心率综合指数定量评价劳动强度。

在"劳动强度分级标准"(国际标准)和"军事体力劳动强度分级"(GJB1336-92)中,均把氧耗量和心率作为主要评价指标。我们采用亚极量踏阶运动法(阶高0.4 m,踏阶速度22.5 b/min和25 b/min,劳动时间5 min),在高原环境不同运动负荷下对人体的氧耗量和心率进行了测定,试验结果表明,负荷状态下劳动强度相同,平原与高原的氧耗量相似,因此氧耗量作为劳动强度的评价指标,在高原上是可行的。

对高原人体在不同劳动状态(一级负荷和二级负荷)下的Z值和氧耗量进行了测定,对Z值和氧耗量两者之间相关性关系进行了Pearson相关系数分析,结果可见两者的相关性在$\alpha=0.05$显著性水平下具有统计学意义。鉴于高原现场氧耗量测定过程繁琐,我们在标准拟定中采用相对心率综合指标(Z)代替氧耗量对高原劳动强度进行评价。

结合以上数据结果,我们建立了高原适宜劳动强度的判定依据:①以氧耗量为指标,采用GJB1336-92氧耗量范围划分高原劳动强度等级;②以中等劳动强度作为高原适宜劳动强度限度;③以相对心率综合指标(Z)评价中等劳动强度,建立高原适宜劳动强度判别值和判别式。

按照GJB1336-92,我们对高原所有人员劳动强度的人群分布进行了评价,可见一级负荷时,中等劳动强

度人数占比为 90.38%,重度劳动强度人数占比为 9.62%;二级负荷时,中等强度人数占比为 78.85%,重度劳动强度人数占比为 21.15%,同时随着劳动强度增加,氧耗量增加,相对心率综合指标(Z)也显著增加,相比之下,Z 值随劳动强度的变化更为敏感。

按照劳动强度人群的分类结果,分别计算了中等和重度劳动强度人群的相对心率综合指标,得到了 Z 值和氧耗量的平均值。结果可见,劳动强度处于中度的人群,其 Z 值为 1.42±0.21,重度劳动强度人群为 1.52±0.23,两者差异具有统计学意义,其变化与氧耗量的变化是一致的。因此,按照以中等劳动强度作为高原适宜劳动强度限度的原则,我们确定了高原适宜劳动强度判定上限为 $Z=1.42$,即当 $Z\leqslant 1.42$ 者,劳动强度为适宜;$Z>1.42$ 者,劳动强度偏大。

在此基础上,我们建立了高原劳动强度判别式(式 1)。为检验判别式预测的准确性,我们对所有数据通过预测和实测进行了比较,在海拔 4 000 m 以下,判别式灵敏度为 88.00%,特异度为 94.92%,诊断符合率为 92.86%;在海拔 4 000 m 以上,判别式灵敏度为 84.24%,特异度为 91.82%,诊断符合率为 88.37%。可见,通过高原劳动强度判别式预测的结果与高原现场试验的实际结果比较吻合,可以作为高原适宜劳动强度的评价方法。

参考文献:

[1] MCCLELLAND G B, SCOTT G R. Evolved mechanisms of aerobic performance and hypoxia resistance in high-altitude natives[J]. Annu Rev Physiol, 2019, 81: 561-583. DOI: 10.1146/annurev-physiol-021317-121527.

[2] FAORO V, DEBOECK G, VICENZI M, *et al*. Pulmonary vascular function and aerobic exercise capacity at moderate altitude[J]. Med Sci Sports Exerc, 2017, 49(10): 2131-2138. DOI:10.1249/MSS.0000000000001320.

[3] 崔建华, 高亮, 张钢, 等. 三七提高高原人体作业能力的现场研究[J]. 解放军药学学报, 2014, 30(6): 497-501.
CUI J H, GAO L, ZHANG G, *et al*. Field study on pahax notoginseng tablets improving operational capability in human body at high altitude[J]. Pharm J Chin PLA, 2014, 30(6): 497-501.

[4] 李文选, 汪济民, 窦兰, 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.
LI W X, WANG J M, DOU L, *et al*. Research on evaluation and grading standard of military physical labor intensity[J]. Chin J Ind Hyg Dccupational Dis, 1997, 15(2): 97-99.

[5] 张芳, 王伟, 王能才, 等. 海拔 3 680 m 体力活动时氧耗量及血氧饱和度的观察[J]. 解放军预防医学杂志, 2002, 20(2): 110-111. DOI:10.3969/j.issn.1001-5248.2002.02.011.
ZHANG F, WANG W, WANG N C, *et al*. Observation on oxygen consumption and oxygen saturation during physical activity at 3 680 m altitude[J]. J Prev Med Chin PLA, 2002, 20(2): 110-111. DOI:10.3969/j.issn.1001-5248.2002.02.011.

[6] 王伟, 王引虎, 张西洲, 等. 海拔 4 100m 人体体力活动时氧耗量及血氧饱和度的观察[J]. 解放军预防医学杂志, 2002, 20(1): 33-34. DOI:10.3969/j.issn.1001-5248.2002.01.010.
WANG W, WANG Y H, ZHANG X Z, *et al*. Observation of oxygen consumption and oxygen saturation in physical activities at 4 100 m altitude[J]. J Prev Med Chin PLA, 2002, 20(1): 33-34. DOI:10.3969/j.issn.1001-5248.2002.01.010.

[7] 李鹏,谢慎威,向彬,等. 应用不同指标评价常驻高原军人有氧运动能力的适宜性比较[J]. 第三军医大学学报, 2020,42(6): 588-593. DOI: 10.16016/j.1000-5404.201909215.
LI P, XIE S W, XIANG B, *et al*. Comparison of different indexes for assessing aerobic exercise capacity in military staff in high-altitude regions[J]. J Third Mil Med Univ, 2020, 42(6):588-593. DOI:10.16016/j.1000-5404.201909215.

[8] 蔡启明. 以动态心率为指标的体力疲劳的评价方法研究[J]. 人类工效学, 1999, 5(1): 27-29. DOI:10.13837/j.issn.1006-8309.1999.01.006.
CAI Q M. Study on methods of evaluating physical fatigue according to dynamic heart rate[J]. Chin Ergon, 1999, 5(1): 27-29. DOI:10.13837/j.issn.1006-8309.1999.01.006.

(**收稿**:2019-12-02;**修回**:2020-03-18)

(编辑 黄 超)