DOI:10.16016/j.1000-5404.201909215

2019 年度重庆市出版专项资金资助栏目论文

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

李 鹏[1,4],谢慎威[2],向 彬[1,4],黄 河[3,4],张 钢[1,4],高钰琪[3,4] 400038 重庆,陆军军医大学:高原军事医学系高原作业医学教研室[1];高原军事医学系高原特需药品与器材研究室[2],极端环境医学教育部重点实验室,全军高原医学重点实验室[3];857000 西藏日喀则,陆军军医大学第二附属医院日喀则分院[2]

[**摘要**] **目的** 比较基于运动心率和血氧饱和度的系列指标评价久居高原军人有氧运动能力的准确性。**方法** 在常驻 3 850 m、4 100 m、4 550 m 3 个海拔的高原军人 240 人和平原对照组 76 人中,进行了 3 000 m 跑成绩和期间 Borg 自觉用力程度评分的调查,通过两级定量负荷踏阶观察了运动前、中、后心率(heart rate,HR)与血氧饱和度(SaO_2),在此基础上计算 $PWC_{170/150}$,根据军标方法估算最大摄氧量(VO_{2max})和台阶指数,并计算运动前后血氧饱和度差值(ΔSaO_2)。同时测定运动后血乳酸和心肌酶。对各数据进行海拔间比较和指标间关联性分析。**结果** 在 4 100 m 以上高原,较高强度运动后心率增高幅度相比平原受限且个体差异较大,导致 $PWC_{170/150}$ 不符合体能随海拔增高而下降的事实和个体 3 000 m 跑成绩。由较低强度运动后即刻心率推算的 VO_{2max} 和由运动后恢复期心率衍生出的台阶指数和个体实际体能与心肌酶有一定相关性。相比之下,踏阶运动前后血氧饱和度差值 ΔSaO_2 与海拔高度、个体实际体能、运动后血液乳酸和心肌酶谱等生化指标的相关性最好。**结论** 运动后血氧饱和度降低值是评价高原军人有氧运动能力的较可靠指标。

[**关键词**] 高原;有氧运动能力;评价;血氧饱和度;作业能力;体能

[**中图法分类号**] R339.54; R821.2; R87 [**文献标志码**] A

Comparison of different indexes for assessing aerobic exercise capacity in military staff in high-altitude regions

LI Peng[1,4], XIE Shenwei[2], XIANG Bin[1,4], HUANG He[3,4], ZHANG Gang[1,4], GAO Yuqi[3,4] [1]Department of High Altitude Operational Medicine; [2]Institute of Medicine and Hygienic Equipment for High Altitude Region; [3]Key Laboratory of Extreme Environmental Medicine of Ministry of Education, Key Laboratory of High Altitude Medicine of PLA, Faculty of High Altitude Military Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038; [4]Shigatse Hospital of Second Affiliated Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Shigatse, Tibet Autonomous Region, 857000, China

[**Abstract**] **Objective** To compare the accuracy of different indexes based on heart rate and blood oxygen saturation level for evaluating aerobic exercise capacity among the military staff serving in high-altitude regions. **Methods** We recruited 240 subjects from the military staff stationed in high-altitude (ranging from 3 850 m, 4 100 m and 4550 m) regions and 76 subjects serving in a low-altitude (below 500 m) region. We tested the performance of the subjects in 3000-meter running and assessed their Borg's rating of perceived exertion (RPE) during the exercise. The heart rate (HR) and blood oxygen saturation (SaO_2) were recorded before, during and after two-level quantitative loaded step exercise to calculate the physical work capacity at 170/150 beats/min ($PWC_{170/150}$), maximal volume of oxygen uptake (VO_{2max}) and step index. The difference in SaO_2 (ΔSaO_2) before and after the exercise was analyzed, and the changes in blood lactate levels and myocardial enzymes were measured. The data were compared between the 2 altitude groups to analyze the

[**基金项目**] 军队后勤科研重大项目(AWS14L005)与重点项目(BWS17J031),军事医学创新工程项目(16CXZ014)

[**通信作者**] 高钰琪,E-mail: gaoy66@yahoo.com

correlation of the indexes with the exercise capacity of the subjects. **Results** At a high altitude, the elevation based on HR after intense exercise was more limited and showed a greater individual variation than at a low altitude, which caused $PWC_{170/150}$-based assessment to show discrepancy between the fact that physical exercise capacity decreases with the elevation of altitudes and the performance of the individual subjects in 3000-meter running. VO_{2max} estimated from immediate HR after low-intensity exercise and the step index derived from HRs during post-exercise recovery period were mildly correlated with the physical capacity and myocardial enzyme profiles of the subjects. ΔSaO_2 after step exercise showed the best correlation with the altitudes, physical exercise capacity, blood lactic acid level and myocardial enzyme profiles after exercise. **Conclusion** The decrease of oxygen saturation after exercise is a reliable index for evaluating aerobic exercise capacity among military staff in high-altitude regions.

[**Key words**] high altitudes; aerobic exercise capacity; evaluation; oxygen saturation; physical work capacity; physical fitness

Supported by the Major Project of Military Logistics Scientific Research (AWS14L005), the Key Project of Military Logistic Scientific Research (BWS17J031) and the Innovation Project of Military Medicine (16CXZ014). Corresponding author: GAO Yuqi, E-mail: gaoy66@yahoo.com

高原低氧环境下人的运动体能明显下降,严重削弱高原军人的作业能力[1]。高原体能下降具有普遍性,即使在较低的海拔和不出现急慢性高原病的情况下,也会出现明显的体能下降,以有氧运动能力的降低为主[2-3]。一般初入高原时体能下降最明显,随着对低氧的习服可以有所恢复,但始终达不到其在平原的水平[4]。

高原环境下体能的下降程度与海拔高度、机体的缺氧程度、个体体质等因素有关。从维护军事作业能力的角度,准确客观评价高原军人群体与个体的体能,有利于指导部队合理科学训练和预防过度疲劳与机体损伤,有利于采取针对性的卫生防护措施,也有利于因人施训和特殊岗位人员选拔,对维护部队在高原的战斗力具有重要意义。

由于高原体力负荷时机体呼吸、循环各系统代偿变化与生理调节不同于平原,高原环境运动负荷下心率、血氧饱和度等生理指标的变化有其特殊规律,这导致平原常规基于运动心率计算的最大摄氧量、$PWC_{150/170}$、心功能指数等有氧运动能力评价指标可能不适用于高原。血氧饱和度作为能指示高原低氧环境下静息和运动状态时机体缺氧程度的简单指标,其在评价有氧运动能力方面的可靠性也尚无系统研究。因此,本研究旨在综合比较上述系列指标评价常驻高原军人有氧运动能力的准确性。

1 对象与方法

1.1 研究对象

2017-2018年对常驻青藏高原3个海拔高度的移居高原青年军人240人(包括海拔3 850 m地区110人,4 100 m地区68人和4 550 m地区62人),作为对照的常驻平原地区(<500 m)青年军人78人进行了研究。高原军人高原居留时间在8个月至12年之间,各海拔平均高原居留年限无显著差异。各组年龄均在18~30岁之间,组间平均年龄、身高和体质量无显著差异。

1.2 研究方法

受试者被组织进行两项运动,一项是踏阶运动,采用40 cm高的踏凳分别以22.5/min和30/min的踏阶速率(左右脚分别上下为1次)进行两次不同运动功率的定量负荷运动,每次踏阶5 min,两次踏阶间隔30 min以上。另一项运动是全力3 000 m跑。踏阶测试和3 000 m跑分别安排在一天的上午和下午进行。在两项运动的基础上进行下列指标的检测和计算。

1.2.1 心率170/min和150/min对应体力作功能力(Physical work capacity at heart rate of 170/150 beat/minute, PWC170/150) 使用V800胸带式心率表(Polar,芬兰),测得受试者在两次不同负荷(22.5和30次/min)的5 min踏阶运动最后即刻心率,按照直线方程,换算每分钟170次或150次运动心率时所对应的运动负荷功率(kg.m/min)。

1.2.2 最大摄氧量(maximal oxygen consumption, VO_{2max}) 按照军标GJB1337-92进行求算,按踏阶次数22.5次/min,阶高40 cm进行踏阶运动5 min后,根据即刻心率(HR)及体质量(BW)间接计算最大摄氧量,其计算公式是 VO_{2max}(mL/min·kg)=$10^{(0.438621-0.002626HR+0.006238BW)}\times 1\,000/BW$。

1.2.3 台阶指数 受试者以22.5/min的频率进行40 cm高踏阶,持续5 min。运动结束后,受使者坐在椅子上休息,测心率恢复期第2、3、4分钟的每分钟后30 s心率计为P1、P2、P3。台阶指数=[300×100/[(P1+P2+P3)]×2。

1.2.4 踏阶运动前后血氧饱和度的变化 ΔSaO_2 分别在静息状态和两级踏阶运动结束即刻使用Tuffsat手持指夹透射血氧饱和度仪(GE Datex Ohmeda,美国)

检测指端动脉血氧饱和度,计算每名受试者不同负荷运动前后血氧饱和度降低值。

1.2.5 3 000 m 跑完成时间与自觉用力程度 共有3 850 m 组中的 110 人和 4 100 m 组中的 36 人(合计146 人)进行了 3 000 m 跑测试。测试时,按照每组 20 人组织受试者在训练场或平坦公路上完成 3 000 m 全力跑,记录从起点到终点完成时间,到达终点稍作休息后使用 Borg 自觉用力程度(rating of perceived exertion,RPE)量表,在专业人员的解释下,完成 3 000 m 跑过程中的主观困难调查,该量表根据体力活动中的自我感觉从轻松到费力分为 15 个等级,分别计 6~20 分。

1.2.6 运动后血乳酸与心肌酶谱 所有受试者在第二次踏阶运动后使用采血针刺破指尖皮肤,采集指血后使用 EKF Lactate 便携式乳酸分析仪(Scout,德国)及配套测试试纸进行血乳酸的快速测定,共测 2 次取平均值。同时完成踏阶测试和 3 000 m 跑的高原受试者,于第二日的清晨,采集空腹静脉血 5 mL,包括 3 850 m 组 89 人和 4 100 m 组 36 人(合计 125 人),血液标本静置后分离上层血清,使用 ELISA 试剂盒(R&D,美国)进行血清肌酸激酶同工酶(MB isoenzymes of creatine kinase,CK-MB)水平的检测。

1.3 统计学处理

应用 SPSS 13.0 软件完成数据统计分析,数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间比较进行单因素方差分析,均值间两两比较采用 LSD 法。不同指标间的相关分析采用 Pearson 或 Spearman 相关分析法。

2 结果

2.1 久居不同海拔高原环境对运动前后心率的影响

如表 1 所示,久居高原环境时静息心率与平原相比显著增高($P<0.01$),但在 3 850 、4 100 和 4 600 m 组间无差异。在较低运动负荷(22.5/min 踏阶)下,各海拔高原组运动结束后即刻心率均显著高于平原组($P<0.01$),且 4 100 m 组和 4 550 m 组显著高于 3 850 m 组($P<0.05$),但 4 100 m 和 4 550 m 两组间无差异。在较高运动负荷(30/min 踏阶)时,虽然各海拔高原组运动结束后即刻心率非常显著高于平原组($P<0.01$),同时相比于同海拔较低运动负荷踏阶时有显著增高。但是,在 30 次/min 踏阶负荷时,随着海拔的增高,4 100 m 和 4 550 m 两组的运动心率相比于 3 850 m 反而有显著下降($P<0.01$)。

对不同海拔运动后恢复期心率的测试表明,高原运动结束后第 2、3、4 分钟的心率显著高于平原($P<0.01$),且总体上随着海拔上升呈现增高的趋势,在 4 550 m 时,运动后第 3、4 分钟的心率显著高于 3 850 m($P<0.05$)。

2.2 常驻不同海拔高原环境下由运动心率衍生的运动能力系列评价指标的比较

如表 2 所示,根据军标采用 22.5/min 踏阶 5 min 后的即刻心率估算最大摄氧量,结果表明,常驻各海拔高原军人 VO_{2max} 相比平原均有显著下降($P<0.01$),4 100 m 和 4 550 m 相比 3 850 m 下降更显著($P<0.05$),但 4 550 m 与 4 100 m 两组间无差异。

根据两级运动负荷下的心率推算 PWC_{150} 和 PWC_{170},结果表明,尽管 3 个高原组 PWC_{150} 和 PWC_{170} 均低于平原($P<0.01$),但不同海拔间的 PWC_{150} 的计算结果无差异,4 100 m 和 4 550 m 组的 PWC_{170} 的计算结果甚至高于 3 850 m($P<0.05$)。根据 22.5/分踏阶运动结束后第 2~4 分钟的恢复期心率计算的台阶指数结果表明,高原各组台阶指数相比于平原均显著下降($P<0.01$),且在 3 850、4 100 和 4 550 m 各海拔梯度间均有统计学差异($P<0.05$)。

2.3 不同海拔高原环境下运动前后血氧饱和度的变化

如表 3 所示,久居高原者静息状态下的血氧饱和度显著低于平原($P<0.01$),4 100、4 550 m 相比与 3 850 m 更低($P<0.01$)。相比于静息状态,运动负荷下的血氧饱和度随着高原海拔的增高呈现更大的程度的下降,各海拔组间均有差异($P<0.05$),且运动负荷越大,高原运动负荷后血氧饱和度相对越低。对运动前后血氧饱和度的变化绝对值 ΔSaO_2 分析发现,其随着海拔高度和运动负荷的增高而增大,在平原、3 850 m、4 100 m、4 550 m 四个海拔高度中每两个相邻海拔间均有显著差异($P<0.05$)。

表 1 常驻不同海拔高原军人运动前后心率的比较($\bar{x}\pm s$)

组别	n	静息 HR	22.5 次/min× 5min 踏阶踏阶后即刻 HR	踏阶后第 1.5~2 min HR	踏阶后第 2.5~3 min HR	踏阶后第 3.5~4 min HR	30 次/min×5 min 踏阶踏阶后即刻 HR
平原	78	69.6±6.8	116.2±8.8	88.7±11.5	77.1±9.5	72.5±7.8	139.9±15.1
3 850 m	110	76.6±8.3[a]	135.2±15.6[a]	102±17.5[a]	90.8±16.9[a]	88.3±13.5[a]	164.7±15.0[a]
4 100 m	68	76.3±7.4[a]	139.2±12.3[ab]	103.7±16.5[a]	92.4±13.5[a]	89.2±10.9[a]	157.4±15.6[ac]
4 550 m	62	76.7±7.9[a]	140.7±12.4[ab]	104.3±18.1[a]	94.5±13.7[ab]	92.3±11.5[ab]	158.9±12.4[ac]

a: $P<0.01$, 与平原组比较;b: $P<0.05$, c: $P<0.01$, 与3 850 m 组比较;d: $P<0.05$, 与 4 100 m 组比较

表 2 常驻不同海拔高原军人运动心率衍生的系列运动能力评价指标的比较（$\bar{x}\pm s$）

组别	n	估算 VO_{2max}(ml/kg·min)	PWC150(kg·m/min)	PWC170(kg·m/min)	台阶指数
平原	78	47.42±4.38	859±232	1 089±256	64.95±6.15
3 850 m	110	43.65±3.28[a]	713±177[a]	802±216[a]	57.30±6.56[a]
4 100 m	68	41.56±4.68[ab]	743±159[a]	857±193[ab]	53.81±6.89[ab]
4 550 m	62	41.29±3.56[ab]	714±145[a]	849±190[ab]	51.50±8.44[acd]

a：$P<0.01$，与平原组比较；b：$P<0.05$，c：$P<0.01$，与3 850 m 组比较；d：$P<0.05$，与 4 100 m 组比较

表 3 常驻不同海拔高原军人运动前后血氧饱和度的比较（$\bar{x}\pm s$）

组别	n	静息 SaO_2	踏阶后即刻 SaO_2	22.5 次/min×5 min 踏阶踏阶后 ΔSaO_2	踏阶后即刻 SaO_2	30 次/min×5 min 踏阶踏阶后 ΔSaO_2
平原	78	97.6±0.8	96.9±0.9	0.8±1.2	96.5±0.8	1.1±1.0
3 850 m	110	91.7±1.4[a]	88.5±2.6[a]	3.3±2.8[a]	87.3±2.0[a]	4.5±2.4[a]
4 100 m	68	89.3±2.2[ac]	84.6±3.6[ac]	4.7±2.6[ac]	83.7±4.6[ac]	5.6±3.8[ab]
4 550 m	62	89.1±2.1[ac]	83.0±3.8[acd]	6.1±2.7[ace]	81.7±3.2[ace]	7.3±2.9[ace]

a：$P<0.01$，与平原组比较；b：$P<0.05$，c：$P<0.01$，与 3 850 m 组比较；d：$P<0.05$，e：$P<0.01$，与 4 100m 组比较

2.4 各有氧运动能力指标与 3 000 m 跑成绩及主观费力程度的相关性

在 3 850 m 和 4 100 m 组，共有 146 人完成了 3 000 m 跑测试，将 3 000 m 跑完成时间和评价完成 3 000 m 跑过程中主观困难程度的 RPE 分数与有氧运动能力评价指标 VO_{2max}、PWC_{150}、PWC_{170}、台阶指数和不同体力负荷下的 SaO_2 变化值进行相关性分析，结果发现（表 4）：个体 VO_{2max} 值越大，3 000 m 跑成绩相对越好（$P<0.05$），但与 3 000 m 跑过程中的主观困难程度没有相关性。PWC_{150}、PWC_{170} 与 3 000 m 跑完成时间及 RPE 评分均无相关性。台阶指数与 3 000 m 跑成绩和 RPE 评分均有轻度的相关性（$P<0.05$）。在所有指标中，与 3 000 m 跑成绩和 RPE 评分同时具有良好相关性是踏阶测试后的 SaO_2 降低值（$P<0.05$）。

表 4 常驻高原军人有氧运动能力指标与 3 000 m 跑成绩及 RPE 的相关性（$n=146$）

组别	3 000 m 跑完成时间		3 000 m 跑 RPE 评分	
	r	P	r	P
估算 VO_{2max}	−0.193	0.037	−0.186	0.061
PWC150	−0.166	0.108	−0.178	0.144
PWC170	−0.063	0.411	−0.058	0.379
台阶指数	−0.225	0.040	−0.265	0.033
22.5 次/min×5 min 踏阶 ΔSaO_2	0.361	0.021	0.428	0.002
30 次/min×5 min 踏阶 ΔSaO_2	0.427	0.016	0.495	0.000

2.5 各有氧运动能力指标与运动后血乳酸和心肌酶 CK-MB 的相关性

将 3 850~4 550 m 高原军人 240 人的运动后血乳酸，以及其中 3 850、4 100 m 共 125 人的血浆肌酸激酶同工酶 MB 亚单位（CK-MB）浓度与各运动能力评价指标进行相关性分析，结果如表 5 所示：VO_{2max} 值与血乳酸未发现相关性，但与血 CK-MB 水平轻度相关（$P<0.05$）；PWC_{150}、PWC_{170} 与运动后血乳酸和 CK-MB 均无相关性；台阶指数与血 CK-MB 有负相关性（$P<0.05$）。两次踏阶测试后的 SaO_2 降低值，与血乳酸和心肌酶 CK-MB 均呈现出较强的正相关性（$P<0.01$）。

表 5 常驻高原军人各有氧运动能力评价指标与运动后乳酸和心肌酶 CK-MB 的相关性

组别	运动后血乳酸（$n=240$）		心肌酶 CK-MB（$n=125$）	
	r	P	r	P
估算 VO_{2max}	−0.131	0.115	−0.172	0.041
PWC150	−0.157	0.108	−0.160	0.062
PWC170	0.057	0.389	−0.089	0.160
台阶指数	−0.104	0.276	−0.273	0.014
22.5 次/min×5 min 踏阶 ΔSaO_2	0.421	0.000	0.285	0.008
30 次/min×5 min 踏阶 ΔSaO_2	0.396	0.000	0.334	0.002

3 讨论

本课题组系统比较了常规基于运动过程中心率变化的系列有氧运动能力评价指标，以及运动负荷下的血氧饱和度变化值用于评价高原有氧运动能力的可靠

性。结果发现,由于高原低氧环境下人体运动生理的特殊性,部分常规有氧运动能力评价指标,如 $PWC_{150/170}$ 可能不适合于高原。运动负荷下的血氧饱和度降低值用作高原环境尤其是较高海拔时的有氧运动能力评价,在准确性上总体优于利用运动后心率估算的 VO_{2max},也优于利用恢复期心率计算的台阶指数。

在评价有氧运动能力方面,VO_{2max} 是公认最客观的指标,其反映与体能耐力密切相关的肺通气与弥散能力、心脏泵血功能、血液载氧能力和骨骼肌特性等[5]。但直接最大摄氧量对仪器设备要求较高,且要求受试者进行力竭运动,在高原实施存在一定难度和安全风险。测量最大摄氧量的另一个替代方法是用耐力运动成绩(如国际上常用 12 min 用力跑距离[6])或用耐力运动后的心率(如军标中的 5 min 踏阶后心率)进行估算。类似地,常用的评价有氧运动能力的指标还包括由运动后心率衍生出的 PWC_{170} 和 PWC_{150},或根据运动后恢复期心率计算的台阶指数(又称心功能适应指数)等。这些指标本质上都是根据生理数据估算有氧运动能力,虽然简单,但与受试者实际体能存在一定偏差。此外,我军曾制定了《高原士兵体能评价标准》(GJB 2559-1996),其根据静息时的肺活量和心率来估算 VO_{2max},虽然规避了高海拔体能测试时剧烈活动所带来的安全隐患,但多年来发现高原静息时的生理指标并不能很好反映个体的运动储备能力。

本研究利用踏阶测试过程中的心率,比较了 VO_{2max}、PWC_{170}、PWC_{150}、心功能指数等指标在常驻不同海拔军人中的差异。结果发现,VO_{2max} 和心功能指数的变化,符合随着高原海拔高度的增高有氧运动能力逐渐下降这一客观事实。但军标计算 VO_{2max} 和心功能指数所要求踏阶频率较低,严格说并不能代表机体承担重体力活动的能力。相比之下,$PWC_{150/170}$ 的测试涉及较重的体力负荷,但是,本研究实际测得的 PWC_{150} 在 4 100 m、4 550 m 和 3 850 m 却无差别,PWC_{170} 在 4 100 m 以上的两个海拔高度甚至好于 3 850 m,这不符合实际情况。究其原因,是由于 $PWC_{150/170}$ 的测定原理是依据两级运动负荷下心率的直线方程求得,在较高海拔时,由于缺氧条件下机体的内环境调节和心脏的自我保护机制[7-9],许多人的心率不能像低海拔时那样随运动强度增大升高达 170/min 以上,而是升高到大约 150/min 后不再上升。有研究观察到高原战士进行 5 km 跑时,从始至终最大心率都低于平原相应的水平[10],这是制约高原极量运动能力的重要因素之一。因此,在较高海拔亚极量以上运动强度时,运动心率的变化并不能真实体现体力负荷强度和运动困难程度。

本研究结果表明,高海拔运动负荷下的 SaO_2 既大幅低于同海拔静息时的水平,也显著低于低海拔时相同运动负荷下的血氧水平。运动前后 SaO_2 下降值与海拔高度和运动负荷均呈现很好的线性关系,即海拔越高,体力负荷越大,SaO_2 下降得越显著。总体上,运动前后血氧饱和度的差值能够很好地吻合不同海拔高原体力劳动能力下降的趋势,是一个较好的高原体能评价潜在指标。SaO_2 主要取决于肺泡通气量(VA)与氧分压、肺血流量(QL)、VA 与 QL 的匹配度、肺内静脉分流率、肺弥散能力(其取决于肺泡毛细血管界面的大小、肺泡膜和毛细血管膜的性质,以及肺毛细血管的血容量)以及血红蛋白对 O_2 的亲和力等。在平原地区进行体力活动时,需氧量增加,机体可通过代偿调节呼吸和循环功能,提高氧气的摄取和交换,基本可维持运动时机体的氧平衡,SaO_2 不变或仅有轻度下降。但在高原环境下运动时,由于环境氧分压的下降、肺对氧气的弥散动力下降和心脏代偿功能受限等原因[11-12],使运动负荷下血液内氧含量明显降低。在高原运动时,导致机体不能对 SaO_2 有效代偿,主要有以下方面原因:一是高原低氧时呼吸肌剧烈做功后易发生疲劳,同时心肺生理负荷增大后胸腹协调性降低,加之呼吸节奏紊乱,使运动时通气不足[13];二是由于高原最大心率及心脏每搏输出量的限制,运动时心输出量的加大可能跟不上肺通气量的增加,通气血流比值升高,部分肺泡得不到充分血液灌流;三是久居高原者在慢性缺氧条件下还存在不同程度的肺动脉压增高和红细胞增多,这些因素使肺血流重新分布和静脉分流增加,导致通气和灌流不适宜情况加重,肺弥散受限等,进一步使肺血氧合效率和 SaO_2 下降[14]。

3 000 m 或 5 000 m 跑是军人常规体能测试项目,能较好地反映高原官兵实际耐力体能。运动后血乳酸主要反映运动过程中机体的缺氧情况,而血心肌酶 CK-MB 的水平与慢性缺氧过程中心脏的习服和损伤状况有关。本研究发现 $PWC_{150/170}$、根据军标计算的 VO_{2max} 和由恢复期心率计算的心功能指数无论与 3 000 m 跑能力,还是血乳酸和心肌酶或无相关性,或相关性不太理想。令人满意的是,即使在较低负荷的 5 min 踏阶运动时,运动后的 SaO_2 降低值与 3 000 m 跑主观和客观难易程度、血乳酸和心肌酶均有良好的相关性,提示心肺功能与有氧代谢储备能力越差者,高原运动后血氧饱和度下降越明显[15-16]。曾也有其他研究观察到血氧饱和度下降程度与高原长跑成绩的关联性[17]。可以认为,高原运动时血氧饱和度的显著下降是机体呼吸系统的通气和换气功能,以及循环系统的泵血和血液运输功能不能满足有氧运动需求后的一个最终综

合结果,是个体高原实际有氧运动能力的客观反映[18]。需要指出的是,运动停止后 SaO_2 一般能快速恢复到静息水平,从技术要求上讲,只有在运动过程中实时检测的 SaO_2,才能有效指示高原环境下的有氧运动能力。因此,部队实际训练中应用该指标时,最好有适合运动状态佩戴、同时在身体移动状态时具备较高准确性的 SaO_2 检测设备可供使用。

总之,本研究发现运动负荷下的血氧饱和度相比静息时的降低值对高原官兵的实际有氧运动能力具有良好指示性,可作为评价高原官兵体能的较理想指标。推广应用该指标,有望对监测常驻高原官兵全维健康,指导高原科学训练和探索高原官兵体力作业效能维护提升措施上发挥较大的作用。

参考文献:

[1] MARTIN D S, LEVETT D Z, GROCOTT M P, *et al*. Variation in human performance in the hypoxic mountain environment[J]. Exp Physiol, 2010, 95(3): 463-470. DOI: 10.1113/expphysiol.2009.047589.

[2] KAYSER B. Pro: All dwellers at high altitude are persons of impaired physical and mentalPowers[J]. High Alt Med Biol, 2013, 14(3): 205-207. DOI: 10.1089/ham.2013.1045.

[3] HAMLIN M J, HOPKINS W G, HOLLINGS S C. Effects of altitude on performance of elite track-and-field athletes[J]. Int J Sports Physiol Perform, 2015, 10(7): 881-887. DOI: 10.1123/ijspp.2014-0261.

[4] 马强, 张志清, 陈学伟, 等. 高原作训部队军人作业能力现场评估分析[J]. 军事医学, 2014, 38(9): 668-671.
MA Q, ZHANG Z Q, CHEN X W, *et al*. Site assessment and analysis of military operation ability of plateau training troops [J]. Mil Med Sci, 2014, 38(9): 668-671.

[5] FERRETTI G. Maximal oxygen consumption in healthy humans: theories andfacts[J]. Eur J Appl Physiol, 2014, 114(10): 2007-2036. DOI: 10.1007/s00421-014-2911-0.

[6] BANDYOPADHYAY A. Validity of Cooper's 12-minute run test for estimation of maximum oxygen uptake in male universitystudents[J]. Biol Sport, 2015, 32(1): 59-63. DOI: 10.5604/20831862.1127283.

[7] RAMOS-CAMPO D J, RUBIO-ARIAS J A, DUFOUR S, *et al*. Biochemical responses and physical performance during high-intensity resistance circuit training in hypoxia and normoxia[J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(4): 809-818. DOI: 10.1007/s00421-017-3571-7.

[8] STEMBRIDGE M, AINSLIE P N, SHAVE R. Mechanisms underlying reductions in stroke volume at rest and during exercise at high altitude[J]. Eur J Sport Sci, 2016, 16(5): 577-584. DOI: 10.1080/17461391.2015.1071876.

[9] RILEY C J, GAVIN M. Physiological changes to the cardiovascular system at high altitude and its effects on cardiovasculardisease[J]. High Alt Med Biol, 2017, 18(2): 102-113. DOI: 10.1089/ham.2016.0112.

[10] 郝占国, 雷志勇, 秦永生, 等. 不同海拔地区战士耐力跑的时间、心率和血乳酸变化[J]. 武警医学, 2007, 18(8): 580-584. DOI: 10.14010/j.cnki.wjyx.2007.08.031.
HAO Z G, LEI Z Y, QIN Y S, *et al*. Temporal changes of heart rate and blood lactate level in soldiers during and after 5000 m running at different altitude areas[J]. Med J Chin People's Armed Police Forces, 2007, 18(8): 580-584. DOI: 10.14010/j.cnki.wjyx.2007.08.031.

[11] AGOSTONI P, SWENSON E R, FUMAGALLI R, *et al*. Acute high-altitude exposure reduces lung diffusion: data from the HIGHCARE Alps project[J]. Respir Physiol Neurobiol, 2013, 188(2): 223-228. DOI: 10.1016/j.resp.2013.04.005.

[12] NAEIJE R, HUEZ S, LAMOTTE M, *et al*. Pulmonary artery pressure limits exercise capacity at high altitude[J]. Eur Respir J, 2010, 36(5): 1049-1055. DOI: 10.1183/09031936.00024410.

[13] BERNARDI E, PRATALI L, MANDOLESI G, *et al*. Thoraco-abdominal coordination and performance during uphill running at altitude [J]. PLoS ONE, 2017, 12(3): e0174927. DOI: 10.1371/journal.pone.0174927.

[14] BRUTSAERT T D, ARAOZ M, SORIA R, *et al*. Higher arterial oxygen saturation during submaximal exercise in Bolivian Aymara compared to European sojourners and Europeans born and raised at high altitude[J]. Am J Phys Anthropol, 2000, 113(2): 169-181. DOI: 10.1002/1096-8644(200010)113: 2<169::AID-AJPA3>3.0.CO;2-9.

[15] VALLI G, COGO A, PASSINO C, *et al*. Exercise intolerance at high altitude (5050 m): critical power and W′[J]. Respir Physiol Neurobiol, 2011, 177(3): 333-341. DOI: 10.1016/j.resp.2011.05.014.

[16] TAYLOR B J, COFFMAN K E, SUMMERFIELD D T, *et al*. Pulmonary capillary reserve and exercise capacity at high altitude in healthy humans[J]. Eur J Appl Physiol, 2016, 116(2): 427-437. DOI: 10.1007/s00421-015-3299-1.

[17] CHAPMAN R F, STAGER J M, TANNER D A, *et al*. Impairment of 3000-m run time at altitude is influenced by arterial oxyhemoglobin saturation[J]. Med Sci Sports Exerc, 2011, 43(9): 1649-1656. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318211bf45.

[18] OZDEMIR A, DOGRUEL D, YILMAZ O. Oxygen saturation/minute heart rate index: Simple lung function test forchildren[J]. Pediatr Int, 2017, 59(2): 209-212. DOI: 10.1111/ped.13081.

(**收稿**:2019-09-28;**修回**:2019-10-31)

(编辑 黄 超)