DOI:10.16016/j.1000-5404.201607043

一种便携式高原增压头盔的研制及其防治急性高原病效果的初步研究

崔中来[1,2,3],张 钢[4],官立彬[5],徐 刚[1,2,3],高钰琪[1,2,3] (400038 重庆,第三军医大学高原军事医学系:高原特需药品与卫生装备研究室[1],高原环境医学教育部重点实验室[2],全军高原医学重点实验室[3],高原军队卫生学教研室[4],高原生理学与高原生物学教研室[5])

[摘要] **目的** 基于增压原理研制一种便携式高原增压头盔,并探讨其防治急性高原病的效果。**方法** 设计、研制的便携式高原增压头盔由加压泵、压力传感器、头罩、颈圈、安全阀、呼吸嘴、反馈回路等部分组成,可通过电动或手动加压方式增加头罩内气压,同时通过压力传感器、安全阀和反馈回路控制等措施确保头罩内气压在预设范围内。在大型低压舱模拟不同海拔高度(3 500 、5 000 m)高原环境下,观察健康青年男性志愿者佩戴头盔(头罩内气压范围分别为0.4~1.0、0.4~1.4、0.4~1.6 kPa)过程中,血氧饱和度(percutaneous oxygen saturation,SpO_2)和心率(heart rate,HR)的变化。进而在海拔3 650 m 高原现场,选择急性高原反应患者按随机数字表简单随机化分为对照组和头盔干预组,观察应用该头盔(头盔内气压为0.4~1.4 kPa)对急性高原反应患者的 SpO_2、HR 和急性高原反应症状评分的影响。**结果** 在模拟海拔3 500、5 000 m 高原环境中,使用头盔可明显提高 SpO_2、降低 HR。在高原现场,与对照组比较,使用头盔可提高急性高原反应患者的 SpO_2,降低患者的 HR 和急性高原反应症状评分($P<0.05$)。**结论** 研制的高原增压头盔携带使用方便,可显著提高血氧饱和度,降低心率,适用于改善高原缺氧和防治急性高原病。

[关键词] 急性高原病;增压头盔;血氧饱和度;心率

[中图法分类号] R197.39; R594.301 [文献标志码] A

A portable plateau pressurized helmet and its application for prevention and treatment of acute mountain sickness: a preliminary study

Cui Zhonglai[1,2,3], Zhang Gang[4], Guan Libin[5], Xu Gang[1,2,3], Gao Yuqi[1,2,3] ([1]Department of Medicine and Hygienic Equipment for High Altitude Region, [2]Key Laboratory of High Altitude Environmental Medicine of Ministry of Education, [3]Key Laboratory of High Altitude Medicine, [4]Department of High Altitude Military Hygiene, [5]Department of High Altitude Physiology and High Altitude Biology, College of High Altitude Military Medicine, Third Military Medical University, Chongqing, 400038, China)

[**Abstract**] **Objective** To design and develop a portable plateau pressurized helmet based on the principle of pressurization, and to determine its effect on prevention and treatment of acute high altitude diseases. **Methods** The portable plateau pressurized helmet contained high pressure pump, pressure sensor, head cover, collar, safety valve, breathing nozzle and feedback loop *etc*. The pressure in the head cover could be increased by electric or manual. At the same time, it could ensure that the pressure was kept in the preset range by using the pressure sensor, safety valve and feedback loop control measures. In the simulated hypoxic environment (3 500 and 5 000 m), the changes of percutaneous oxygen saturation (SpO_2) and heart rate

[基金项目] 全军医学科技"十二五"科研重点项目(BWS11J042);第三军医大学科技成果转化基金(2012)

[通信作者] 高钰琪,E-mail:gaoy66@yahoo.com

[优先出版] http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1095.R.20161021.1700.023.html

(HR) were measured by using helmet (the pressure range in the head cover was 0.4 ~ 1.0, 0.4 ~ 1.4 and 0.4 ~ 1.6 kPa) of the healthy young male volunteers. And further, at the high altitude (3 650 m), selection of acute mountain sickness patients were randomly divided into control group and intervention group. The effect of SpO_2 and HR and symptom score were observed in the acute mountain sickness patients by using the helmet (the pressure range in the head cover was 0.4 ~ 1.4 kPa). **Results** In the simulated hypoxic environment of 3 500 and 5 000 m, the helmet increased the level of SpO_2 and decreased HR obviously. At the high altitude, the helmet increased the level of SpO_2 and decreased HR significantly ($P<0.05$), and the symptom scores of the acute mountain sickness patients was decreased significantly ($P<0.05$), both when compared with the control group. **Conclusion** The portable plateau pressurized helmet, easy to carry and use, can increase the level of SpO_2 and decrease HR significantly, and is suitable to improve high altitude hypoxia, prevent and treat acute high altitude disease.

[**Key words**] acute high altitude disease; pressurized helmet; percutaneous oxygen saturation; heart rate

Supported by Key Project of "Twelfth Five-year Plan" of Medical Research of PLA (BWS11J042) and the Science and Technology Achievement Transformation Fund of Third Military Medical University (2012). Corresponding author: Gao Yuqi, E-mail: gaoy66@yahoo.com

低压缺氧是高原特殊环境影响人体的主要因素[1]。急进高原人员易在低压缺氧的作用下发生急性高原病(acute high altitude disease, AHAD),发病率高达 10% ~90%[2-5]。AHAD 分为轻型和重型两大类,轻型 AHAD 又称为急性高原反应或急性高山病(acute mountain sickness, AMS)。作为重型 AHAD 之一,未治疗的高原肺水肿(high altitude pulmonary edema, HAPE)患者死亡率高达 44%[1,6]。目前,针对高原低压缺氧的特点,围绕增氧和增压的技术手段研制相应的高原特需卫生装备,以用于预防 AHAD 或对患者进行现场急救和辅助医疗后送是一研究热点。现有的增氧装备主要包括便携式制氧机[7]、液态储气罐[8]、高原富氧室[9]等,但受电源和使用环境的制约,不便在野外和流动人群中使用。增压装备主要有增压气袋[10-12]、高原轻便加压舱[13]、加压面罩[14-15]、单兵高原增氧呼吸器[16-17]等,存在结构比较复杂、造价较高、机动性较差等缺点。本研究基于增压原理,研制出一种便携式高原增压头盔(简称头盔),并在大型低压舱模拟高原环境和高原现场实验检验其使用效果,以期为高原卫勤保障提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 头盔研制

1.1.1 头盔设计 头盔主要包括电动加压泵、压力传感器、头罩、颈圈、安全阀、呼吸嘴、反馈回路等组成部分(图 1 ~3)。

1.1.2 工作原理 大气中氧气的百分比含量不随海拔高度变化而改变,而是恒定为 20.93%[1]。由于氧分压 = 大气压 × 氧含量,因此当海拔增高时,氧分压随着大气压的降低呈规律性的降低。在高原低压缺氧环境中,以大气为原料,利用气泵将新鲜空气泵入密闭空间内,通过增加局部环境中空气的压力,在氧气体积百分比含量保持不变的情况下,可使吸入气的氧分压提高。

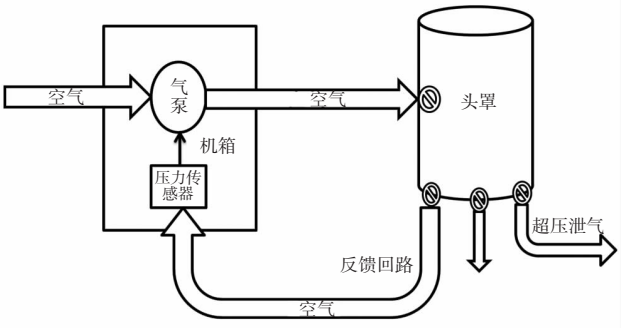


图 1 高原增压头盔原理示意图

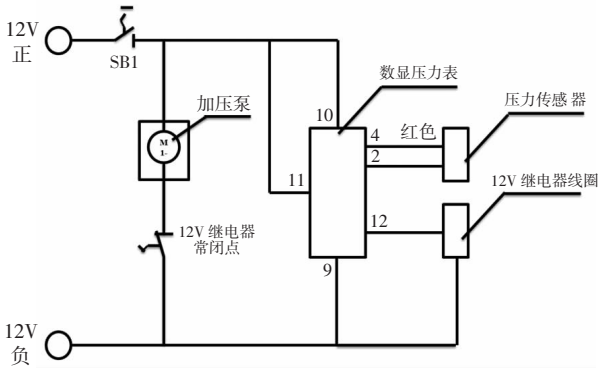


图 2 高原增压头盔电器接线图



图3 高原增压头盔实物图

1.1.3 工作流程 启动电源,进行系统初始化,通过数显压力表设置头盔头罩内气压参数(最大气压和最小气压)。佩戴头盔时,电动加压泵抽取外界大气向头罩内充气增压。当头罩内气压高于预设最大气压时,安全阀自动泄气减压;当头罩内气压低于预设最小气压时,电动加压泵转速增大,头罩内进气量增加使其气压升高。这一循环过程可确保头罩内气压稳定在预设的范围内。

1.1.4 主要特点 便携:系统总质量4.8 kg,机箱体积较小(40 cm×36 cm×23 cm),方便随行携带。内设恒压稳流装置,可直接使用交流电(220 V、50 Hz)或车载电源。安全:使用头盔过程中,可实时监测头罩内的气压,且设有安全阀(最大阈值为2 kPa)进行超压泄气,防止头罩内气压过高对人体造成伤害。呼吸嘴可拆卸更换,既节约又安全。智能:通过反馈回路实现对电动加压泵的自动控制,控制其转速和头罩内的进气量。易用:气源选择功率为300 W、排气量为30 L/min的电动加压泵,可在短时间内将头罩内部气压提高至预设值的范围,并保持正压状态。考虑到灾害救援等特殊条件下正常电力供应不能保障的情况,也可使用手动加压泵(打气筒等)加压。

1.2 *头盔在模拟高原环境中的应用试验*

将8名世居平原的健康男性志愿者分为2组,每组4人。第1组在模拟海拔3 500 m的大型常温低压舱内进行试验,第2组在模拟海拔5 000 m的大型常温低压舱内进行试验。

进入低压舱前,采用美国GE Datex-Ohmeda TuffSat型手掌式脉搏血氧仪,检测志愿者在平原时静息状态下的血氧饱和度(percutaneous oxygen saturation,SpO_2)和心率(heart rate,HR)。进入低压舱后,以3 m/s的速度上升至一定模拟海拔高度并稳定30 min,再次检测志愿者在静息状态下的SpO_2和HR。设置头盔头罩内的气压范围(0.4~1.0 kPa)后,志愿者佩戴、使用头盔。使用头盔过程中,每隔1 min读取1次SpO_2和HR的数据,持续10 min;脱下头盔后,继续观察SpO_2和HR的变化,每隔1 min读取1次数据,持续10 min。

将头盔头罩内气压范围设置为0.4~1.4、0.4~1.6 kPa,重复进行试验。同一组试验对象在不同的头罩内气压范围下进行低压舱试验时,间隔时间为2 d。0.4~1.0 kPa表示头罩内气压稳定在高于环境气压一定范围,0.4~1.4、0.4~1.6 kPa类同。

1.3 *头盔在高原现场的应用试验*

29名世居平原健康男性青年,年龄为(23.19±1.59)岁,均无高原居住史。由重庆(350 m)乘火车急进拉萨(3 650 m)。采用自制的《症状体征量表》进行调查并收集症状体征信息,按照我国国家军用标准《急性高

原反应的诊断和处理原则》(GJB 1098-1991)[18],对AMS患者进行诊断,并依据总计分判别严重度。

根据到达高原第1天的症状评分情况,筛选研究对象中的AMS患者,将其按随机数字表简单随机化分为干预组和对照组。符合重度急性高原病患者(3人)全部纳入干预组,再从符合中度和轻度的AMS患者(共18人)中随机选择4人纳入干预组、7人纳入对照组。干预组佩戴头盔,头罩内的气压阈值范围设定为0.4~1.4 kPa,采用美国GE Datex-OhmedaTuffSat型手掌式脉搏血氧仪检测干预组在使用头盔前、中和脱下头盔后的SpO_2和HR。其中,使用头盔过程中,每隔1 min读取1次SpO_2和HR的数据,持续15 min;脱下头盔后继续观察,每隔1 min记录1次数据,持续10 min。比较AMS患者在使用头盔前后SpO_2和HR的变化。对照组未做任何处理。

到达高原第2天时,采集两组受试者的急性高原反应症状评分,并进行分析比较。

1.4 统计学分析

采用SPSS 19.0统计软件进行多因素方差分析,SpO_2、HR和症状评分的数值用$\bar{x} \pm s$表示,以$P<0.05$表示差异有统计学意义。

2 结果

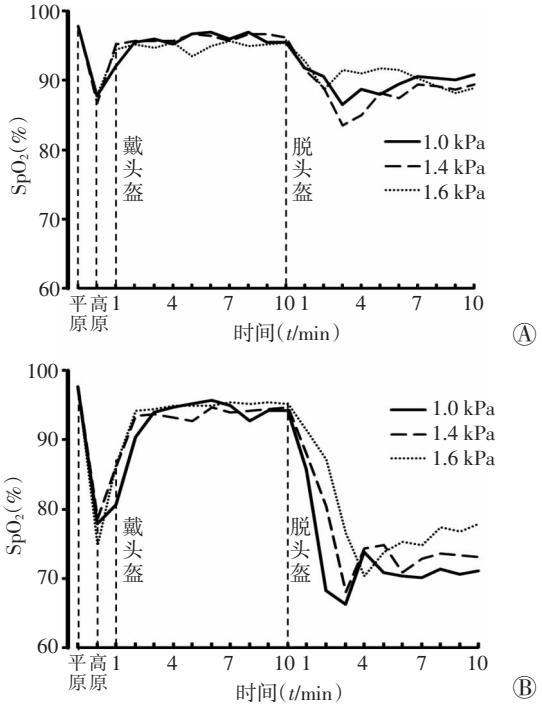
2.1 模拟高原环境下头盔在头罩内不同气压范围使用情况

在低压舱内模拟不同海拔高度(3 500、5 000 m),并将头盔头罩内部气压阈值范围分别设定为0.4~1.0、0.4~1.4、0.4~1.6 kPa时,使用头盔均可明显提高人体SpO_2,降低HR。不同气压范围组间呈一致变化,三者间差异无统计学意义,在0.4~1.4 kPa时的心率变化波动相对较小(图4、5)。

2.2 模拟高原环境下头盔干预对人体SpO_2和HR的影响

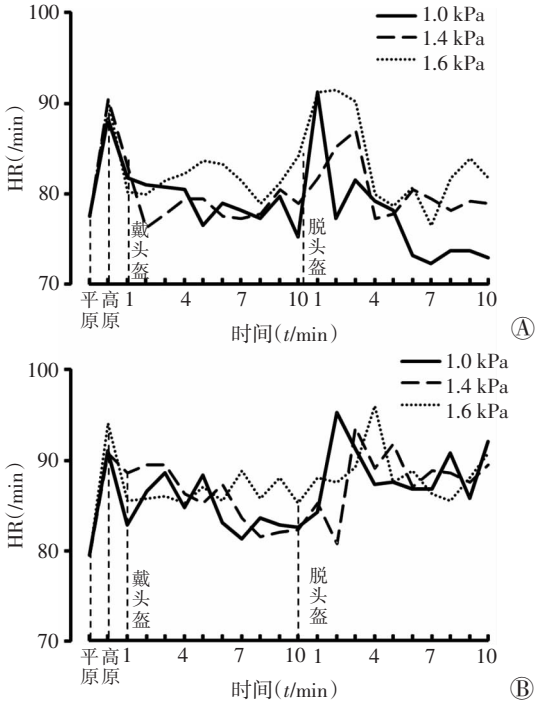
模拟海拔3 500、5 000 m高原环境下,SpO_2较平原条件下明显降低。佩戴头盔后,SpO_2在短时间内明显升高,且在2 min左右达到新的平稳状态,明显高于使用头盔前水平,略低于平原水平;脱下头盔后,SpO_2开始下降,且在3 min左右达到新的平稳状态。在模拟海拔5 000 m时佩戴使用头盔,比模拟海拔3 000 m对SpO_2的改变(升高或降低)幅度更大(图4)。

模拟海拔3 500、5 000 m高原环境下,HR较平原条件下明显升高。佩戴头盔后,HR明显降低,且在2~3 min后达到新的平稳状态,明显低于使用头盔前水平;脱下头盔后,HR先升高后降低,并在3 min后达到新的水平(图5)。



A:模拟海拔3 500 m;B模拟海拔5 000 m

图4 模拟不同海拔高原环境下高原增压头盔在不同气压范围内对SpO_2的影响



A:模拟海拔3 500 m;B模拟海拔5 000 m

图5 模拟不同海拔高原环境下高原增压头盔在不同气压范围内对HR的影响

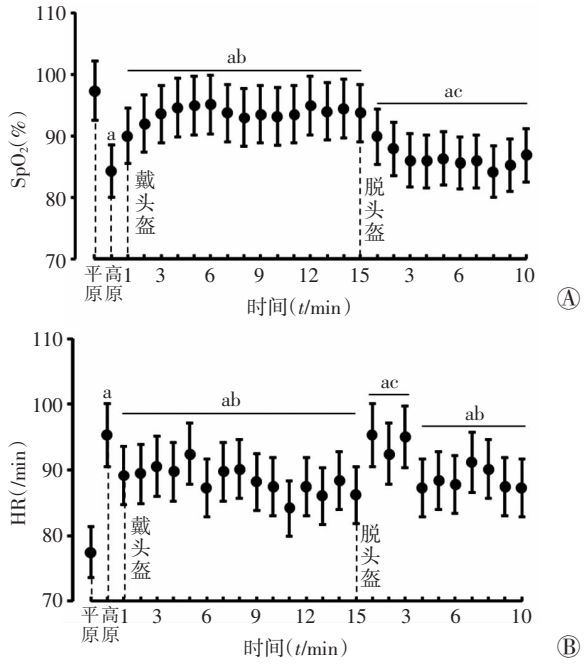
2.3 29 名急进高原的研究对象的 AMS 发病率

29 名受试者急进至 3 650 m 高原后第 1 天,按照国家军用标准《急性高原反应的诊断和处理原则》进行诊断和量化评分,AMS 患者占 82%(21 例)。其中轻度(计分 5~10 分)占 41%(12 例),中度(计分 >10~15 分)占 21%(6 例),重度(计分 >15 分)占 10%(3 例)。

2.4 AMS 患者佩戴头盔前、后 SpO_2 和 HR 的变化

在海拔 3 650 m 的高原现场,SpO_2 较平原时显著降低($P<0.05$)。佩戴头盔后,SpO_2 较佩戴前显著升高($P<0.05$),且在 3 min 左右达到新的平稳状态。脱下头盔后,SpO_2 下降,并在 3 min 后达到新的平稳状态(图 6A)。

在海拔 3 650 m 的高原现场,HR 较平原时显著升高($P<0.05$)。佩戴头盔后,HR 较佩戴前显著降低($P<0.05$),且在 1 min 后达到新的平稳状态。脱下头盔时,HR 在前 3 min 较佩戴头盔时显著升高($P<0.05$),之后恢复到佩戴头盔时的水平(图 6B)。



a:$P<0.05$,与平原比较;b:$P<0.05$,与高原比较;c:$P<0.05$,脱头盔后与戴头盔时比较

图 6 高原现场高原增压头盔对 SpO_2(A)和 HR(B)的影响

2.5 AMS 患者症状评分在头盔干预后的变化

按照国家军用标准《急性高原反应的诊断和处理原则》,对照组第 1 天的评分是(8.57±2.82)分,第 2 天的评分是(8.29±4.86)分,两者差异无统计学意义($P>0.05$);干预组第 2 天的评分是(4.29±2.98)分,较第 1 天的评分[(15.00±4.24)分]显著降低($P<0.05$)。且使用头盔干预后,干预组评分较对照组显著降低($P<0.05$)。

3 讨论

氧对人体的生理作用取决于其在大气中的分压,并非由其在大气中所占体积百分比决定[17,19],因此,通过提高氧分压可从根本上减轻甚至解决高原低压缺氧对机体的影响。

本研究结果显示:在模拟海拔 3 500 m 和 5 000 m 环境中,佩戴头盔均可使人体 SpO_2 较平原明显升高,HR 较平原明显降低,且在 5 000 m 环境中,两者改变程度更大,表明随着海拔高度的升高,人体血红蛋白结合的氧越少,需要心脏更多做功以维持机体的供氧。

头盔头罩内部最大气压为 1.0、1.4 kPa 或 1.6 kPa 时,对 SpO_2 和 HR 的改变并无明显差异。但在最大气压为 1.4 kPa 时,HR 的波动相对平稳,提示该气压范围相对较为适宜。

本研究中 29 名健康男青年乘火车急进高原后第 1 天,根据国家军用标准《急性高原反应的诊断和处理原则》进行诊断,AMS 发病率为 82%。发病率高于国内外研究结果[20-22],原因可能在于乘坐火车时间长、路途远、过度疲劳及未服用预防药物等。

在高原现场,使用头盔对 AMS 患者进行干预,可在短时间内显著提高 SpO_2、降低 HR,表明通过增加头罩内氧分压可提高血红蛋白结合的氧并降低心率。在干预后第 2 天,干预组 AMS 患者的症状评分显著降低,表明使用头盔对 AMS 患者进行增压干预,有助于改善低压缺氧症状,促进对高原环境的习服,对急性高原病有良好的防治作用。

急性高原病是严重影响急进高原人群健康和高原部队战斗力的首要因素,积极研制相应的高原特需卫生装备,用于促进机体对高原环境的习服,防治急性高原病,对急进高原部队的卫勤保障具有重要的现实意义。本研究研制的高原增压头盔,针对高原地区低压缺氧、地形复杂、道路狭窄崎岖、保障能力相对差等特点,为高原地区缺乏药物、交通不便、供氧设施差的边远小散单位人员、野外独立作业人员和冬季徒步巡逻的守防官兵的携行保障,以及战时或突发重大自然灾害时的应急保障,也为突发急性高原病时的现场急救和医疗后送途中的持续增氧治疗等提供了一种有效的解决手段。今后将进一步改进装备性能,深入研究其作用机制,并在大样本人群中推广验证。

参考文献:

[1] 高钰琪. 高原军事医学[M]. 重庆:重庆出版社,2005:250-276.

[2] Wu J, Chen Y, Luo Y. Evaluation of the visual analog score (VAS) to assess acute mountain sickness (AMS) in a hypobaric chamber[J]. PLoS One, 2014, 9(11): e113376. DOI: 10.1371/journal.pone.0113376

[3] Karinen H M, Peltonen J E, Kahonen M, *et al*. Prediction of acute mountain sickness by monitoring arterial oxygen saturation during ascent[J]. High Alt Med Biol, 2010, 11(4): 325-332. DOI: 10.1089/ham.2009.1060

[4] Ren Y, Fu Z, Shen W, *et al*. Incidence of high altitude illnesses among unacclimatized persons who acutely ascended to Tibet[J]. High Alt Med Biol, 2010, 11(1): 39-42. DOI: 10.1089/ham.2009.1049

[5] 邓天富. 急进高原施工人群急性高原病发病情况调查[J]. 检验医学与临床,2013(14):1792-1793.

[6] Bezruchka S. High altitude medicine[J]. Med Clin North Am, 1992, 76(6): 1481-1497.

[7] 陈平,朱孟府,于佳,等. 便携式制氧机研制[J]. 医疗卫生装备,2013,34(10):77-79. DOI:10.7687/J.ISSN.1003-8868.2013.10.077

[8] 张西洲.我国高原病防治研究概况[J]. 人民军医,2008(8):499-500.

[9] 邓昌磊. 高原富氧室研究现状与展望[J]. 高原医学杂志,2009,19(3):42.

[10] Saito S, Aso C, Kanai M, *et al*. Experimental use of a transportable hyperbaric chamber durable for 15 psi at 3700 meters above sea level[J]. Wilderness Environ Med, 2000, 11(1): 21-24.

[11] Freeman K, Shalit M, Stroh G. Use of the Gamow Bag by EMT-basic park rangers for treatment of high-altitude pulmonary edema and high-altitude cerebral edema[J]. Wilderness Environ Med, 2004, 15(3): 198-201.

[12] Zafren K. Gamow bag for high-altitude cerebral oedema[J]. Lancet, 1998, 352(9124): 325-326. DOI: 10.1016/S0140-6736(05)60305-4

[13] 王贺新. 用于轻便加压舱(袋)的呼吸装置研制进展[J]. 医疗卫生装备,1994,(2):17-18.

[14] Launay J C, Nespoulos O, Guinet-Lebreton A, *et al*. Prevention of acute mountain sickness by low positive end-expiratory pressure in field conditions[J]. Scand J Work Environ Health, 2004, 30(4): 322-326.

[15] Koch R O, Hinterhuber L, Faulhaber M, *et al*. A successful therapy of high-altitude pulmonary edema with a CPAP helmet on Lenin Peak[J]. Clin J Sport Med, 2009, 19(1): 72-73. DOI: 10.1097/JSM.0b013e3181915cce

[16] 金川,罗二平,申广浩,等. 增氧呼吸器在不同海拔高度下对血氧饱和度和心率的影响[J]. 医疗卫生装备,2006,27(7):10-11.

[17] 罗二平,申广浩,胡文东,等. 增氧呼吸器在模拟缺氧条件下对血氧饱和度和心率的影响[J]. 第四军医大学学报,2005,26(17):1567-1569.

[18] 尹昭云,谢印芝,牛文忠,等. 急性高原反应的诊断和处理原则[J]. 解放军预防医学杂志,1997,15(6):395-397.

[19] 肖华军. 航空供氧装备与防护生理学的发展历程[J]. 解放军医学杂志,2004,29(10):833-835.

[20] Waeber B, Kayser B, Dumont L, *et al*. Impact of Study Design on Reported Incidences of Acute Mountain Sickness: A Systematic Review[J]. High Alt Med Biol, 2015, 16(3): 204-215. DOI: 10.1089/ham.2015.0022

[21] 柴自杰,鱼敏,曾艳,等. 快速反应部队急性高原反应研究[J]. 第四军医大学学报,2004,25(8):749-751.

[22] 郑双锦. 急进高原后心率、血压和血氧饱和度的变化规律及与急性高原病的关系[D]. 重庆:第三军医大学,2013.

(**收稿**:2016-07-06;**修回**:2016-10-01)

(编辑 黄 超)