

富氧室对高原移居者血氧饱和度和心率的影响

李彬¹, 邢鲁艳², 赵家稳¹, 高亮¹, 哈振德¹

1.陆军第九五〇医院高山病研究所,新疆 叶城 844900;2.陆军第九四八医院口腔科,新疆 乌苏 833000

摘要:目的 观察富氧对高原移居者血氧饱和度和心率的影响。方法 在海拔 4 200 m 和 5 100 m 利用不同空间制作富氧室,使氧容积百分比分别维持在 25%和 27%左右,比较受试者富氧前后不同时间段血氧饱和度和心率的变化情况。结果 海拔 4 200 m 和 5 100 m 不同富氧空间,达到 25%和 27%氧浓度需要总氧量 200~3 840 L,平均氧量 32~88.7 L/m³,维持氧流量 2~18 L/min。与基线数据比较,富氧后受试者的血氧饱和度显著升高($P<0.05$ 或 $P<0.01$),心率显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。结论 在海拔 4 200 m 和 5 100 m 高原,氧浓度分别提高至 25%和 27%可以提高血氧饱和度水平并有效降低受试者的心率,高原富氧室建设建议选择容积小且密闭性好的空间。

关键词:高原;富氧;富氧室;血氧饱和度;心率

中图分类号:R459.6;R594.3 文献标志码:A 文章编号:1003-8507(2025)19-3526-04

DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202505441

The effects of oxygen-enriched rooms on blood oxygen saturation and heart rate in plateau migrants

LI Bin*, XING Lu-yan, ZHAO Jia-wen, GAO Liang, HA Zhen-de

*Institute of High Altitude Medicine, The 950th Hospital of the People's Liberation Army, Yecheng, Xinjiang 844900, China

Abstract: **Objective** To observe the effects of oxygen enrichment on blood oxygen saturation and heart rate in plateau migrants. **Methods** Oxygen-enriched rooms were created at altitudes of 4 200 m and 5 100 m using different enclosed spaces, maintaining oxygen volume percentages at approximately 25% and 27%, respectively. Changes in blood oxygen saturation and heart rate at different time points before and after oxygen enrichment were compared among subjects. **Results** Achieving 25% and 27% oxygen concentrations in various enclosed spaces at 4 200 m and 5 100 m required total oxygen volumes of 200-3 840 L, with average oxygen consumption of 32-88.7 L/m³, and maintenance oxygen flow rates of 2-18 L/min. Compared with baseline levels, subjects exhibited significantly increased blood oxygen saturation ($P<0.05$ or $P<0.01$) and significantly decreased heart rate ($P<0.05$ or $P<0.01$) after oxygen enrichment. **Conclusion** At 4 200 m and 5 100 m altitudes, increasing oxygen concentrations to 25% and 27%, respectively, can elevate blood oxygen saturation levels and effectively reduce heart rate in subjects. For constructing high-altitude oxygen-enriched rooms, smaller and well-sealed spaces are recommended.

Keywords: High altitude; Oxygen enrichment; Oxygen-enriched room; Blood oxygen saturation; Heart rate

高原环境对机体产生损伤的最根本原因是缺氧,因此补氧是预防和治疗急慢性高原病的首选方法,也是保障高原居住人群身体健康的有效措施。随着高原基础设施的改善,高原供氧体系逐步完善,但依然以传统供氧方式如氧气钢瓶、供氧带和制氧机等为主。依据“每提高 1%的氧气浓度相当于使海拔高度下降约 300 m”^[1]的理论,个别单位在高原地区建立了富氧室,由于缺乏系统化的设计,无相关行业规范和国家标准,富氧室建设比较杂乱,实际应用效果并不理想。West^[2]认为 3 600 m 以下海拔,不建议对已完成

习服者使用富氧措施,4 200 m 富氧措施虽有益但非必需,而在 5 000 m 以上地区富氧措施极为必要,因此我们在海拔 4 200m 和 5 100 m 地区开展了富氧室制作小样本前瞻性研究。

1 对象与方法

1.1 研究对象 采用随机抽样的方法,选取 20 名男性志愿者进行试验,无基础疾病,曾有高原暴露史,研究期间高原暴露时间 7~12 d,年龄 21~58 岁,平均(37.7±12.7)岁,身高(171.7±5.2)cm,体重(69.7±5.6)kg,均自愿参加试验并对本研究知情同意。

1.2 富氧室制作 海拔 4 200 m 富氧室分别采用潍坊华信氧业有限公司制造的 YC2800 医用空气加压

基金项目:军队后勤科研项目(CLJ19J026)

作者简介:李彬(1980—),男,本科,副研究员,研究方向:高原医学

通信作者:邢鲁艳,E-mail:40551943@qq.com

氧舱(产品标准:GB/T 12130-2020;满员治疗人数:12人;舱室容积:50.5 m³,关闭副舱,只使用主舱,扣除座椅物品及人体所占空间后实际容积 35 m³)和江铃大道皮卡车(车内实际容积 2.9 m³,富氧前关闭门窗和空调外循环)。分别采用舱内氧气吸入器(40 L/min)和 15 L 氧气钢瓶(10 L/min)供氧,氧浓度达到 25%后调整供氧流量维持该浓度 10 min 以上后开门开空调通风直至恢复初始氧浓度。海拔 5 100 m 富氧室分别采用制式房间(实际容积 43.3 m³)和原皮卡车,采用 40 L 钢瓶(80 L/min)和 15 L 钢瓶(16 L/min)供氧,氧浓度达到 27%后调整供氧流量维持该浓度 10 min 以上后开门窗通风直至恢复初始氧浓度。每个富氧空间实验进行二次,其中制式房间分别采用密封门窗和不密封的情况下进行。

1.3 研究方法 氧气浓度检测采用深圳市普利通电子科技有限公司 PLT850-4 语音型四合一气体检测仪,每 2 min 连续监测富氧室氧气浓度,采用芬兰产 Ohmeda TuffSat 掌式血氧仪每 2 min 连续监测受试者富氧前后血氧饱和度(blood oxygen saturation, SaO₂)和心率(heart rate),进入富氧室后、开始供氧前的静息状态值作为基线数据。

1.4 统计学处理 采用 SPSS 21.0 版本软件进行统计分析,数据用($\bar{x} \pm s$)表示,对受试者的富氧前后不同时间点的 SaO₂ 及心率进行重复测量方差分析,并对达到目标氧浓度、富氧结束前、富氧结束后(氧浓度恢复至 20.9%)各时间点数据与基线数据进行配对 *t* 检验,双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 海拔 4 200 m 高压氧舱富氧前后 SaO₂ 和心率的变化 不同时间点测量的 SaO₂ 和心率差异非常显著($F_1=17.526, P_1<0.01; F_2=2.925, P_2<0.05$)。与基线数据比较,到达目标氧浓度、富氧结束前和富氧结束后 SaO₂ 差异非常显著($P<0.01$),而心率在富氧结束前差异非常显著($P<0.01$)。富氧前后关键时间点受试者的血氧饱和度和心率变化见表 1。

表 1 海拔 4 200 m 高压氧舱富氧前后 SaO₂ 和心率变化
[($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

Table 1 Changes in pulse oxygen saturation and heart rate before and after oxygen enrichment in a hyperbaric oxygen chamber at 4 200 m altitude [($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

时间(min)	SaO ₂ (%)	心率(次/min)
0	87.30 ± 2.67	90.80 ± 18.40
30	93.70 ± 1.16*	83.30 ± 19.14
42	93.90 ± 2.77*	78.40 ± 14.98*
60	89.90 ± 1.97*	83.50 ± 17.17

注:与基线比较,* $P<0.01$ 。

2.2 海拔 4 200 m 车内富氧前后 SaO₂ 和心率的变化

不同时间点测量的 SaO₂ 和心率差异非常显著($F_1=12.329, P_1<0.01, F_2=2.233, P_2<0.05$)。与基线数据比较,到达目标氧浓度和富氧结束前 SaO₂ 差异非常显著($P<0.01$),心率在各关键时间点均有显著差异($P<0.05$)。富氧前后关键时间点受试者的 SaO₂ 和心率变化见表 2。

表 2 海拔 4 200 m 车内富氧前后 SaO₂ 和心率变化
[($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

Table 2 Changes in pulse oxygen saturation and heart rate before and after oxygen enrichment inside a pickup truck at 4 200 m altitude [($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

时间(min)	SaO ₂ (%)	心率(次/min)
0	89.40 ± 3.17	96.40 ± 18.63
20	93.50 ± 0.97*	89.90 ± 15.57*
42	93.50 ± 1.18*	90.60 ± 14.66*
60	89.40 ± 2.46	86.20 ± 14.50*

注:与基线比较,* $P<0.05$,* $P<0.01$ 。

2.3 海拔 5 100 m 室内富氧前后 SaO₂ 和心率的变化

不同时间点测量的 SaO₂ 和心率差异非常显著($F_1=7.113, P_1<0.01; F_2=2.957, P_2<0.05$)。与基线数据比较,到达目标氧浓度和富氧结束前 SaO₂ 和心率差异非常显著($P<0.01$)。富氧前后关键时间点受试者的 SaO₂ 和心率变化见表 3。

表 3 海拔 5 100 m 室内富氧前后 SaO₂ 和心率变化[($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

Table 3 Changes in pulse oxygen saturation and heart rate before and after oxygen enrichment in a room at 5 100 m altitude [($\bar{x} \pm s$), $n=10$]

时间(min)	SaO ₂ (%)	心率(次/min)
0	84.20 ± 3.29	105.70 ± 18.22
42	91.20 ± 1.13*	95.10 ± 15.87*
52	90.10 ± 3.14*	96.30 ± 14.92*
60	84.40 ± 3.37	100.50 ± 16.67

注:与基线比较,* $P<0.01$ 。

2.4 海拔 5 100 m 车内富氧前后 SaO₂ 和心率的变化

不同时间点测量的 SaO₂ 和心率差异非常显著($F_1=20.132, P_1<0.01; F_2=4.274, P_2<0.05$)。与基线数据比较,到达目标氧浓度和富氧结束前 SaO₂ 和心率差异非常显著($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。富氧前后关键时间点受试者的 SaO₂ 和心率变化见表 4。

2.5 达到预定氧浓度需氧量及维持氧流量 海拔 4 200 m 和 5 100 m 不同富氧空间,达到 25%和 27%氧浓度需要总氧量 200 ~ 3 840 L,平均氧量 32 ~ 88.7 L/m³,维持氧流量 2 ~ 18 L/min。见表 5。

表 4 海拔 5 200 m 车内富氧前后 SaO₂ 和心率变化表
[($\bar{x} \pm s$), n=10]

Table 4 Changes in pulse oxygen saturation and heart rate before and after oxygen enrichment inside a pickup truck at 5 200 m altitude [($\bar{x} \pm s$), n=10]

时间(min)	SaO ₂ (%)	心率(次/min)
0	83.20 ± 5.86	99.40 ± 16.62
14	93.80 ± 1.68 [#]	84.50 ± 12.07 [*]
30	94.20 ± 1.03 [#]	83.50 ± 8.34 [*]
38	85.70 ± 4.27	88.50 ± 15.15

注:与基线比较,*P<0.05, #P<0.01。

3 讨论

高原低压、低氧等自然地理环境对初入和常驻高原人员的健康状况和作业能力带来严重影响,可造成

智力、思维、记忆和判断能力减退,这种影响与进驻的速度和海拔的高度呈明确的正相关。1995 年,West^[1]首次在智利北部海拔为 4 500 m 的某矿区利用分子筛制氧机将氧气通入室内以营造相对富氧的局部环境,West 教授认为提高室内氧浓度以达到较低的生理等效高度,克服了佩戴鼻导管和呼吸面罩等配件供氧而产生的异物不适感,使人体能在一个舒服自由甚至毫无察觉的条件下进行氧保健^[3],其潜在的作用能使观光旅游者、频繁往返者、较长时间居留人员甚至世居高原人群均可从中获益。此后,国内外大量的研究证实^[4-9]在高原低氧条件下提高局部环境中的氧气浓度可有效降低生理等效高度,缓解缺氧相关的一系列症状及损害,即使在 5 000 m 海拔将氧气浓度提高到 31.5%,也不会增加火灾隐患^[10]。

表 5 不同海拔和空间达到预定氧浓度需氧量及维持氧流量

Table 5 Oxygen requirements and maintenance flow rates to achieve predetermined oxygen concentration at different altitudes and within enclosed spaces

海拔(m)	富氧空间类型	分次	供氧流量(L/min)	所需时间(min)	总氧量(L)	平均氧量(L/m ³)	维持氧流量(L/min)
4 200	高压氧舱	第 1 次	40	28	1 120	32.0	2
		第 2 次	40	32	1 280	36.6	2
	皮卡车内	第 1 次	10	22	220	75.9	6
		第 2 次	10	20	200	69.0	6
5 100	制式房间	第 1 次	80	38	3 040	70.2	16
		第 2 次	80	48	3 840	88.7	18
	皮卡车内	第 1 次	16	14	224	77.2	6
		第 1 次	16	16	256	88.3	6

提高局部环境的氧气浓度,使吸入气氧分压(PO₂)增加,进而提高肺泡气 PO₂ 和 SaO₂,纠正机体的低氧血症,这是富氧室在高原应用的医学理论依据。据此,凡是能使机体发生低氧血症的低氧环境区域(即医学高原,海拔 3 000 m 以上,肺泡气 PO₂ 小于 60 mm Hg, SaO₂ 低于 90%)均可以充分利用富氧室以改善缺氧状况,且不会影响短期高原适应^[11]。海拔 4 500 m 和 5 000 m 舒适氧浓度分别为 25.5%和 27%^[12], Gerard 等证实海拔 5 000 m 将氧浓度增加 6%能改善认知和运动功能^[9],笔者在海拔 4 300 m 和 5 100 m 分别将氧浓度提高至 25%和 27%能满足需要,但从实验结果来看,部分时间点的受试者的心率和 SaO₂ 无明显差异,主要原因是样本量偏小,也提示可以适当增加氧浓度获得更好的富氧效果。

高原富氧室制作一个关键指标是空间的密闭性,密闭系数难以直接获取,但我们可以用实际耗氧量与维持氧流量的比值进行间接计算,人体静息状态耗氧量约为 250 ml/min,5 人耗氧量约为 1.25 L/min,高压氧舱维持氧流量为 2 L/min,由此可知该空间密闭系数为 0.625,同理可推算出车内密闭系数为 0.208,而

封闭和不封闭门窗的普通房间密闭系数仅有 0.078 和 0.069。高压氧舱是相对理想的富氧室空间,我们的目标是制作常压富氧室,所以氧舱没有进行完全封闭,否则密闭系数理论上是 100%。进出高原途中可采用车内富氧,空间相对较小,需氧量不大,但应注意防火。除了特制的高原富氧房,常规富氧室主要依托普通房间,为了提高氧气利用率,应加强空间的密闭性。

高原富氧室制作注意事项:(1)在高原低氧环境制作简易富氧室侧重于实际应用,因此局部空间无需绝对密闭;(2)富氧空间较小、密闭性较高、室内人员较多等情况下,必须考虑到二氧化碳蓄积问题;在富氧室应用基础上可进行有关富氧效应的评价研究;(3)富氧室内应配备便携式测氧仪、二氧化碳检测仪等相关设备;(4)富氧室制作过程中氧源与检测设备两者间的距离和朝向可能会造成测量误差,一般可将氧源置于富氧室周边,检测仪置于相对中央位置;(5)所用检测仪的精确度、灵敏度,以及浮标式流量表的旋钮调节等均会对需氧量的估算造成误差;(6)除密闭系数外,海拔高度、大气压、温度等变化亦会对需氧量的估算产生误差;(7)富氧室制作过程中氧气浓度

的提升幅度应参照 GB/T 35414—2017《高原地区室内空间弥散供氧(氧调)要求》;(8)富氧室实际应用过程中耗氧量可按人均 500 ml/min 粗算(即基础生理需氧量 250 ml/L+ 机体活动耗氧量 250 ml/L)。

关于补氧后机体生理指标改善及效应保留问题的研究亦不多见,McElroy^[4]等在 1 项随机、双盲研究中,24 名海平面居民在 1 天内开车到 3 800 m 的海拔,富氧中睡眠 1 晚后,傍晚和早晨 SaO₂ 显著增高,但没有持续到中午。本次研究富氧结束后 SaO₂ 和心率与富氧前比较无显著差异,说明 SaO₂ 和心率保留时效不长。本课题组^[13]曾在海拔 4 280 m 对 20 名青年用鼻氧管以 2 L/min 流量持续吸氧 20 min,与吸氧前比较,停止吸氧后 10min 受试者的肺活量、右手握力增加,辨别反应时间缩短,但 SaO₂ 和心率无显著性差距,反应了高原氧疗 SaO₂ 和心率保留时效较短,但通过改善身体机能提高机体其他生理指标保留时间较长。

目前高原地区制供氧设施配备齐全,氧气保障模式不断完善,基本能保证高原人群氧气需求,使得简易富氧室有广泛的推广应用前景,有学者用空气调节系统改变了人类在高温环境下工作和生活的理念和现状^[14]。富氧机驱动能源的充足供应、室内气体浓度变化的精确监测和调控、专职技术操作人员的配置并精细管理^[15]、火灾风险的评估及应急预案的制定等是前述所列举的富氧室能成熟应用的有力保证,但也成为了富氧室在高原现场广泛推广应用的主要制约因素,目前很少有简易富氧室制作的标准规范和技术介绍。立足于我部所在区域的具体情况,满足于平时保健和应急保障的需要,针对常用不同场所(班用帐篷、卫生帐篷、指挥帐篷、坑道及制式房屋)及使用装备(指挥车、运输车、救护车、放射车、手术车等),提出可操作性强、简单易掌握、安全且明确的制作技术参数和操作规范,有利于富氧室在高原现场的推广应用。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] West JB. Improving oxygenation at high altitude: acclimatization and O₂ enrichment [J]. High Altitude Medicine & Biology, 2003, 4(3): 389-398.
- [2] West JB. Oxygen enrichment of room air to relieve the hypoxia of high altitude[J]. Respiration Physiology, 1995, 99(2): 225-232.
- [3] 彭双宗. 弥散供氧走进高原[J]. 医用气体工程, 2018, 3(4): 36. Peng SZ. Dispersed oxygen supply applied in high altitude [J]. Gases Engineering, 2018, 3(4): 36.(In Chinese)
- [4] Mcelroy MK, Gerard A, Powell FL, et al. Nocturnal O₂ enrichment of room air at high altitude increases daytime O₂ saturation without

change control of ventilation [J]. High Altitude Medicine & Biology, 2000, 1(3): 197-206.

- [5] 李毅,尹星,李娟,等. 富氧环境对急进高原人体生理指标和工作效能的影响[J]. 临床医学工程, 2014(10): 1236-1238. Li Y, Yin X, Li J, et al. Effects of Oxygen enriched environment on SpO₂, HR and working performance score of rush entry People at high altitude [J]. Clinical Medical & Engineering, 2014 (10): 1236-1238.(In Chinese)
- [6] 李韩斌,金国辉,叶忠明,等. 基于富氧环境的高原习服训练中心的设计与评价[J]. 解放军预防医学杂志, 2012, 30(1): 17-20. Li HB, Jin GH, Ye ZM, et al. Design and evaluation of training center for high altitude acclimatization based on oxygen-enriched air[J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army, 2012, 30(1): 17-20.(In Chinese)
- [7] Yan XD. Cognitive impairments at high altitudes and adaptation[J]. High Altitude Medicine & Biology, 2014, 15(2): 141-145.
- [8] Yan XD, Zhang JX, Gong QY, et al. Adaptive influence of long term high altitude residence on spatial working memory: An fMRI study[J]. Brain and Cognition, 2011, 77(1): 53-59.
- [9] Gerard AB, McElroy MK, Taylor MJ, et al. Six percent Oxygen enrichment of room air at simulated 5,000 m altitude improves neuropsychological function [J]. High Altitude Medicine & Biology, 2000, 1(1): 51-61.
- [10] West JB. Safe upper limits for Oxygen enrichment of room air at high altitude[J]. High Altitude Medicine & Biology, 2001, 2(1): 47-51.
- [11] Rosales AM, Hailes WS, Collins CW, et al. Impact of nocturnal Oxygen enrichment on high-altitude acclimatization [J]. American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2025, 328(2): 172-180.
- [12] 施红生,赵亚林,邱永祥. 青藏铁路旅客列车富氧技术条件研究 [C]//中国铁道科学研究院环控劳卫研究所. 2008 年学术年会论文集. 海口, 2008, 北京: 中国铁道科学研究院环控劳卫研究所, 2008. Shi HS, Zhao YL, Qiu YX. Study on oxygen enrichment technical requirements for passenger trains of the Qinghai-Tibet railway[C] //China Academy of Railway Sciences Environmental Control and Labor Hygiene Research Institute. 2008 Academic papers collection of the China association of work safety. Haikou: 2008, Beijing: China Academy of Railway Sciences Environmental Control and Labor Hygiene Research Institute, 2008.(In Chinese)
- [13] 李彬,郭海平,高亮,等. WYIS-6/90 型高原制氧车实地应用效果评价[J]. 医疗卫生装备, 2018, 39(3): 69-71. Li B, Guo HP, Gao L, et al. Effect of type WYIS-6/90 plateau Oxygen generating vehicle on high altitude spot [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2018, 39(3): 69-71.(In Chinese)
- [14] West JB. A strategy for Oxygen conditioning at high altitude: comparison with air conditioning [J]. Journal of Applied Physiology, 2015, 119(6): 719-723.
- [15] Ripa C, Munshi L, Kuebler WM, et al. Oxygen targets in critically ill patients: from pathophysiology to population enrichment strategies[J]. Medical Gas Research, 2025, 15(3): 409-419.

收稿日期: 2025-05-24