Open Access
DOI:10.3724/zdxbyxb-2025-0617

·原　著·

高原藏族人群血细胞比容与静息状态下低血氧饱和度的非线性关系分析

郭义梅[1]，李荣会[1]，拉巴次仁[1]，闫　琦[1,2]

1. 西藏自治区人民医院手术麻醉科，西藏 拉萨 850002
2. 北京大学人民医院麻醉科，北京 100044

［摘　要］ **目的：**了解高原藏族人群血细胞比容（HCT）与静息状态下低血氧饱和度的关系。**方法：**采用回顾性队列研究，纳入2023年1月至2024年10月西藏自治区人民医院3075例行择期非心胸外科手术的藏族成年住院患者。通过多因素logistic回归分析患者HCT与静息状态下低血氧饱和度（脉搏血氧饱和度低于88%）的关联，并采用限制性立方样条探索其非线性关系。通过分段logistic回归结合最大似然估计法识别HCT阈值。**结果：**多因素logistic回归分析结果显示，HCT增加是患者发生低血氧饱和度的独立危险因素：HCT每增加5个百分点，患者低血氧饱和度风险升高12%（$P<0.01$）。限制性立方样条模型显示，HCT与低血氧饱和度风险呈显著U形关联（$P<0.01$）。在全人群中，HCT阈值为42.8%。当HCT低于42.8%时，其每增加5个百分点，患者低血氧饱和度风险降低22%（OR=0.780，95%CI：0.619~0.982，$P<0.05$）；当HCT为42.8%及以上时，其每增加5个百分点，患者低血氧饱和度风险升高27.2%（OR=1.272，95%CI：1.132~1.429，$P<0.01$）。分层分析显示，女性患者的HCT阈值为40.4%，而男性患者的阈值较高（46.6%）。**结论：**高原藏族人群HCT与静息状态下低血氧饱和度存在U形关联，HCT超过阈值时提示高原适应性红细胞生成反应可能产生由“代偿”向“损伤”转化。

［关键词］ 脉搏血氧饱和度；血细胞比容；高原人群；U形关联；健康管理；回顾性研究
［中图分类号］ R594.3　　［文献标志码］ A

U-shaped association between hematocrit and resting pulse oxygen saturation in Tibetan plateau population

收稿日期（Received）：2025-08-11　修改返回日期（Revised）：2025-11-01　接受日期（Accepted）：2025-11-26　网络预发表日期（Online）：2025-12-29
基金项目（Funding）：北京大学人民医院研究与发展基金（RDE2022-21）；北京市住院医师规范化培训质量提高项目（住培2023011）；西藏自治区自然科学基金［XZ2024ZR-ZY013（Z）］
第一作者（First author）：郭义梅，硕士研究生，主要从事麻醉学研究；E-mail：593594572@qq.com；ORCID：0009-0002-2395-7668
通信作者（Corresponding author）：闫　琦，副主任医师，主要从事麻醉学、围手术期医学研究；E-mail：yanqi04@pku.edu.cn；ORCID：0009-0009-0041-3327

GUO Yimei[1], LI Ronghui[1], LABA Ciren[1], YAN Qi[1,2] (*1. Department of Anesthesiology, Tibet Autonomous Region People's Hospital, Lhasa 850002, China; 2. Department of Anesthesiology, Peking University People's Hospital, Beijing 100044, China*)
Corresponding author: YAN Qi, E-mail: yanqi04@pku.edu.cn, ORCID: 0009-0009-0041-3327

[**Abstract**] **Objective**: To investigate the relationship between hematocrit (HCT) and low resting oxygen saturation in Tibetan plateau population. **Methods**: This retrospective cohort study included 3075 Tibetan adult inpatients who underwent elective non-cardiac, non-thoracic surgery at Tibet Autonomous Region People's Hospital between January 2023 and October 2024. Multivariate logistic regression was used to assess the association between HCT and low resting oxygen saturation (SpO_2<88%). Restricted cubic splines were employed to model non-linear relationships, and piecewise logistic regression, in combination with maximum likelihood estimation, was used to identify the HCT threshold. **Results**: Multivariate logistic regression analysis showed that elevated HCT was an independent risk factor for low oxygen saturation in the patients. For every 5-percentage-point increase in HCT, the risk of low oxygen saturation increased by 12% (P<0.01). The restricted cubic spline model revealed a significant U-shaped association between HCT and the risk of low oxygen saturation (P<0.01). The HCT threshold for the total population was 42.8%. When HCT was below 42.8%, each 5% increase in HCT was associated with a 22% reduction in the risk of low oxygen saturation in the patients (OR=0.780, 95%CI: 0.619–0.982, P<0.05). When HCT was 42.8% or above, the risk increased by 27.2% (OR=1.272, 95%CI: 1.132–1.429, P<0.01). Stratified analysis indicated that the HCT threshold was 40.4% for female patients and 46.6% for male patients. **Conclusions**: There is a U-shaped association between HCT and low resting oxygen saturation in the Tibetan plateau population. An HCT level exceeding the population-specific threshold suggests that the adaptive erythropoietic response to high-altitude hypoxia may transition from being compensatory to potentially detrimental.

[**Key words**] Pulse oxygen saturation; Hematocrit; High-altitude population; U-Shaped association; Health management; Retrospective study

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2026, 55(1): 87-92.]

[**缩略语**] 血细胞比容(hematocrit,HCT);体重指数(body mass index,BMI);脉搏血氧饱和度(pulse oxygen saturation,SpO_2);加强流行病学中观察性研究报告质量(Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology,STROBE);比值比(odds ratio,OR);置信区间(confidence interval,CI)

高原环境的核心特征为低压性低氧,对人类及其他需氧生物的生存构成了严峻的生理挑战[1]。由于吸入氧分压降低,高原人群静息状态下血氧饱和度普遍较低。一项系统回顾与荟萃分析研究指出,海拔2500 m以上高原健康人群的平均动脉血氧饱和度约为90.5%,显著低于海平面人群的98.1%[2]。为应对这种长期缺氧状态,高原人群体内需进行一系列生理性和遗传性的适应性调整,从而维持氧供需平衡,确保组织代谢正常运行[3-4]。机体的缺氧反应通常会激活缺氧诱导因子通路,促进促红细胞生成素的合成和释放,增加红细胞数、血红蛋白浓度及HCT,最终提升血液的携

氧能力[5]。HCT是指血液中红细胞的体积占比，是影响血液携氧能力和氧输送效率的关键参数。HCT对组织氧合的影响是双重且复杂的。理论和模型研究表明，增加HCT虽然能提升血液的携氧能力，但同时也会增加血液黏度，从而加大血流阻力，减缓红细胞在微循环中的流速[6]。在较低氧张力下，流速减缓的负面效应可能超过携氧能力增加的正面效应，从而导致组织氧合水平下降[7]。这种非线性的复杂关系提示HCT可能存在一个最佳范围，而这个范围在不同适应模式的人群中可能有所不同[8-9]。本研究拟通过回顾性队列研究，分析高原藏族人群HCT与静息状态下低血氧饱和度的关系，以期早期、准确地识别可能存在氧供需失衡的个体，为高原地区的临床实践提供依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

收集2023年1月至2024年10月在西藏自治区人民医院拟行择期非心胸外科手术的住院患者。纳入标准：年龄18岁及以上，藏族，在西藏自治区居住3年以上。排除标准：BMI、静息SpO_2、HCT数据缺失；BMI在50 kg/m^{2}以上或10 kg/m^{2}以下[10]；静息SpO_2小于60%（视为伪值）。

研究遵循STROBE指南，最终纳入3075例患者，其中男性1445例，女性1630例。与女性患者比较，男性患者年龄更大，吸烟率和饮酒率更高，而BMI更小、高血压患病率更低（均$P<0.01$）。在实验室指标方面，HCT取术前30 d内最近一次检测值[11]，静息SpO_2取HCT值检测后最近一次检测值。将静息SpO_2小于88%视为低血氧饱和度[12-13]。结果显示，男性HCT显著高于女性（$P<0.01$），两者静息SpO_2中位数均为90.0%，低血氧饱和度的总体发生率为20.0%。见表1。

1.2 研究变量

主要暴露变量为HCT，主要结局指标为患者是否出现低血氧饱和度。为确保数据准确性，由一名不参与患者临床护理且接受过科研培训的住院医师作为独立观察员，将数据集与电子出院记录进行核对验证。

1.3 统计学方法

采用R 4.2.1软件进行统计分析。连续变量通过Kolmogorov-Smirnov检验评估是否呈正态分布，符合正态分布时以均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）描述，非正态分布时采用中位数（上下四分位数）[$M(Q_1,Q_3)$]描述。分类变量以例数（百分比）[n(%)]表示。组间比较根据变量类型分别选用χ^2检验（分类变量）、单因素ANOVA（正态分布连续变量）或Kruskal-Wallis H检验（非正态分布连续变量）。$P<0.05$为差异有统计学意义。

构建多因素logistic回归模型，其协变量筛选基于单因素分析结果及临床考虑。针对潜在非线性关系，采用限制性立方样条模型（设置4个节点于第5、35、65及95百分位）进行探索，节点设置遵循Harrell准则以平衡模型灵活性和过拟合风险。当非线性检验提示存在阈值效应时（$P<0.05$），通过分段logistic回归结合最大似然估计法识别HCT阈值，并采用似然比检验评估阈值两侧关联性差异。

2 结 果

2.1 HCT是低血氧饱和度的独立危险因素

在校正年龄、性别、BMI、高血压病史、吸烟史、肺部影像学异常等混杂因素后，HCT每增加5个百分点，低血氧饱和度的风险升高12%（$P<0.01$）。见表2。提示HCT升高可能是藏族高原人群发生低血氧饱和度的独立危险因素。

2.2 HCT与低血氧饱和度呈非线性关系

通过限制性立方样条模型发现，HCT与人群

表1 高原藏族人群的基线特征

Table 1 Baseline characteristics of the study Tibetan plateau population

[$\bar{x}\pm s$或n(%)或$M(Q_1,Q_3)$]

人　群	n	年龄（岁）	BMI（kg/m^2）	高血压	糖尿病	吸烟史
男性	1445	47±14	23.5±4.0	107(7.4)	26(1.8)	418(28.9)
女性	1630	43±15**	24.1±4.4**	167(10.2)**	20(1.2)	22(1.3)**
人群整体	3075	45±15	23.8±4.2	274(8.9)	46(1.5)	440(14.3)

人　群	n	饮酒史	肺部影像学异常	HCT(%)	静息SpO_2(%)	SpO_2小于88%
男性	1445	408(28.2)	728(50.4)	49.7±6.1	90(88,91)	268(18.5)
女性	1630	95(5.8)**	776(47.6)	43.9±5.8**	90(88,91)	347(21.3)
人群整体	3075	503(16.4)	1504(48.9)	46.6±6.7	90(88,91)	615(20.0)

与男性比较，**$P<0.01$. BMI：体重指数；HCT：血细胞比容；SpO_2：脉搏血氧饱和度.

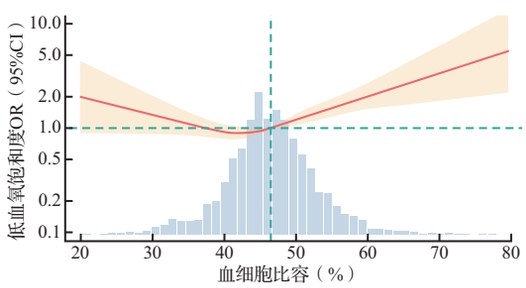
整体、男性人群、女性人群的低血氧饱和度风险均存在显著的非线性关联(均P<0.01),即U形关联,见图1。在全人群中,HCT的阈值为42.8%。当HCT小于42.8%时,HCT每增加5个百分点,患者低血氧饱和度风险降低22.0%(OR=0.780,95%CI:0.619~0.982,P<0.05);当HCT在42.8%及以上时,HCT每增加5个百分点,低血氧饱和度风险升高27.2%(OR=1.272,95%CI:1.132~1.429,P<0.01)。在男性人群中,HCT的阈值较高,为46.6%。当HCT小于46.6%时,HCT的增加与低血氧饱和度风险无显著关联(OR=0.940,95%CI:0.757~1.169,P>0.05);而当HCT在46.6%及以上时,HCT每增加5个百分点,低血氧饱和度风险升高51.6%(OR=1.516,95%CI:1.216~1.889,P<0.01)。在女性人群中,HCT的阈值较低,为40.4%。当HCT小于40.4%时,HCT每增加5个百分点,低血氧饱和度风险降低28.1%(OR=0.719,95%CI:0.565~0.913,P<0.01);当HCT在40.4%及以上时,HCT每增加5个百分点,低血氧饱和度风险升高20.5%(OR=1.205,95%CI:1.027~1.413,P<0.05)。结果提示,高原藏族人群HCT与静息状态下低血氧饱和度之间可能存在稳定的非线性阈值效应,一旦HCT超过特定生理拐点,其升高将不再发挥代偿保护作用,反而显著增加低血氧饱和度的发生风险。

表2 高原藏族人群静息状态下低血氧饱和度影响因素的多因素logistic回归分析结果

Table 2 Results of multivariate logistic regression analysis on factors influencing low resting oxygen saturation in Tibetan plateau population

变 量	OR(95%CI)	P值	校正OR(95%CI)*	校正P值*
HCT(每增加5个百分点)	1.15(1.08~1.23)	<0.01	1.12(1.05~1.20)	<0.01
年龄(岁)	1.01(1.01~1.02)	<0.01	1.01(1.00~1.02)	<0.01
女性	1.19(1.00~1.42)	>0.05	1.02(0.85~1.22)	>0.05
BMI(kg/m^2)	1.07(1.05~1.09)	<0.01	1.02(1.01~1.04)	<0.01
高血压	2.04(1.56~2.68)	<0.01	1.74(1.32~2.30)	<0.01
糖尿病	1.26(0.64~2.50)	>0.05	—	—
吸烟史	1.10(0.86~1.41)	>0.05	1.04(0.81~1.35)	>0.05
饮酒史	0.99(0.78~1.26)	>0.05	—	—
肺部影像学异常	1.76(1.47~2.10)	<0.01	1.60(1.33~1.93)	<0.01

—:无相关数据.*校正年龄、性别、BMI、高血压、吸烟史、肺部影像学异常等.OR:比值比;CI:置信区间;HCT:血细胞比容;BMI:体重指数.



SpO_2:脉搏血氧饱和度.

图1 血细胞比容与患者静息状态下低血氧饱和度风险的限制性立方样条图

Figure 1 Nonlinear association between hematocrit and low resting oxygen saturation in the patients

2.3 HCT水平与人群器官功能临床指标有关联

以人群整体HCT的阈值(42.8%)进行分组,结果显示HCT 42.8%及以上组血肌酐、收缩压和舒张压,以及有高血压病史的比例均高于HCT小于42.8%组(均P<0.05),见表3。结果提示,高原藏族人群肾脏损伤和心血管负荷较高与高HCT相关。

表3 不同HCT水平高原藏族人群血压及器官损害标志物比较

Table 3 Comparison of blood pressure and organ damage markers in Tibetan plateau population with different HCT levels

[$\bar{x}\pm s$或n(%)]

组 别	n	血肌酐(μmol/L)	高血压病史	收缩压(mmHg)	舒张压(mmHg)
HCT小于42.8%组	730	59.2±36.9	50(6.8)	121.4±16.6	74.6±11.9
HCT 42.8%及以上组	2345	68.1±19.5**	224(9.6)*	124.8±16.4**	76.5±12.1**

与HCT小于42.8%组比较,*P<0.05,**P<0.01. HCT:血细胞比容. 1 mmHg=0.133 kPa.

3 讨 论

本研究评估了高原藏族人群住院患者HCT与静息状态下低血氧饱和度风险之间的关系,为高原人群血氧运输动力学提供参考。本文资料显示,HCT水平与高原藏族人群低血氧饱和度风险之间存在U形关联,且在HCT阈值(42.8%)处出现了从生理补偿到过度补偿的转变。研究显示,世居青藏高原的藏族人群体内演化出一套独特

的生理适应策略,最为显著的特征是其对缺氧的红细胞生成反应呈现钝化状态,即在高原环境下依然维持相对较低的血红蛋白和HCT水平,有效避免了因红细胞过度增多而导致的血液高黏滞性及其并发症[14]。除红细胞调控外,其体内还发展了包括一氧化氮代谢增强及血红蛋白氧亲和力增加等多种针对缺氧的补偿机制[15-16]。即使存在多种调节氧供的适应性改变,红细胞增多仍在维持氧供需平衡中发挥最重要的作用。欧洲呼吸学会权威指南中将静息SpO_2小于88%作为实施长期氧疗的指征[12]。另外,一项针对3400~4150 m海拔重症患者的研究建议将SpO_2维持在89%~93%作为氧疗目标[13]。因此,本研究将静息SpO_2小于88%定义为低血氧饱和度。选取"择期非心胸外科手术"患者作为研究对象,排除了急性创伤、失血或应激状态对HCT和血氧饱和度关系的干扰,以及心脏疾病或肺部病变对呼吸循环功能的直接影响。本文资料显示,高原藏族人群HCT与低血氧饱和度风险呈U形关联,人群整体HCT阈值为42.8%,男性和女性HCT阈值分别为46.6%和40.4%,相对客观地反映了高原藏族人群在相对稳态下的HCT与氧合状态的生理关联。

进一步研究发现,HCT 42.8%及以上人群表现出更高的血清肌酐水平。肌酐水平升高通常表明慢性肾脏损害的存在。在高原环境下,这种损害很可能源于长期血液黏稠度增高导致的肾小球灌注不足及慢性缺氧,这是全身性氧供需失衡在肾脏上的直接体现。同时,HCT 42.8%及以上的人群收缩压和舒张压更高。心脏为了克服高黏滞血液带来的外周阻力并补偿动脉血氧含量的不足,必须持续加强做功,这种长期的高度负荷可表现为血压升高。

本研究聚焦于高海拔地区围手术期患者这一特定群体,研究结果对制订个性化围手术期健康管理策略具有重要启示。首先,本研究结果有助于建立基于HCT的围手术期低氧血症预警标准。临床医生在术前评估时,对于HCT偏离阈值较多的患者应警惕低氧风险,根据需要调整围手术期氧疗计划。其次,优化围手术期液体和血液管理策略。在HCT超过阈值后,红细胞的增加已从代偿转为失代偿。这提示在麻醉管理中,对于HCT较高的患者可实施术前血液稀释或术中液体优化策略,可能比单纯提高吸入氧浓度更能从根本上改善组织氧供。最后,强化系统性器官功能保护。鉴于患者肾功能损害及高血压与高HCT存在显著关联,建议对高HCT患者常规进行更严密的肾功能监测及血流动力学管理。

本研究存在以下几点局限性。首先,研究采用回顾性队列研究,尽管通过多变量logistic回归对年龄、性别及基础疾病等均进行了校正,但仍无法排除未测量或未知混杂因素可能造成的影响。其次,数据来源于电子医疗记录,存在信息缺失及固有偏倚的可能,且HCT和SpO_2的测量时间、条件及设备标准化程度无法严格控制。再次,研究对象来自单一中心(西藏自治区人民医院),且均为外科住院患者,样本代表性有限,因此所得结论(如阈值)在推广至其他高原人群、门诊患者或健康个体时须审慎对待。未来需要在多中心、不同海拔高度及以社区为基础的健康队列中进行外部验证,以检验本研究发现的普适性。最后,研究采用静息SpO_2小于88%作为低血氧饱和度的简易替代指标,而非直接临床结局(如心血管事件或死亡率),因此HCT与长期预后的关系仍有待进一步验证。

总之,本研究对适应高海拔生活人群中的最佳HCT水平进行了初步探讨,为高原人群优化血氧运输、预防低氧相关并发症相关策略的制订提供了数据支持。但由于本研究为单中心回顾性设计,无法确立因果关系,且样本均为外科住院患者,可能存在选择偏倚,相关研究结果还需要多中心、大样本的前瞻性队列研究进一步验证,以明确该阈值在高原患者长期预后中的指导价值。

本文附加文件见电子版。

志谢 本研究得到北京大学人民医院研究与发展基金(RDE2022-21)、北京市住院医师规范化培训质量提高项目(住培2023011)和西藏自治区自然科学基金[XZ2024ZR-ZY013(Z)]支持

Acknowledgements This study was supported by Peking University People's Hospital Research and Development Funds (RDE2022-21), Beijing Resident Standardized Training Quality Improvement Project (2023011), and Xizang Autonomous Region Natural Science Foundation [XZ2024ZR-ZY013(Z)]

作者贡献 郭义梅、李荣会、拉巴次仁和闫琦参与论文选

题和设计或参与资料获取、分析或解释,起草研究论文或修改重要智力性内容.所有作者均已阅读并认可最终稿件,并对数据的完整性和安全性负责.具体见电子版

Author Contributions GUO Yimei, LI Ronghui, LABA Ciren and YAN Qi participated in brewing and designing experiments, or acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; drafting the work, or revising it critically for important intellectual content. All authors have read and approved the final manuscript, and take responsibility for the integrity and security of the data. See the electronic version for details

数据可用性 本研究的相关数据可根据合理请求从通信作者(E-mail:yanqi04@pku.edu.cn)处获得

Data Availability All relevant data supporting the findings of this study can be accessed upon reasonable request from the corresponding author at yanqi04@pku.edu.cn

医学伦理 本研究通过西藏自治区人民医院医学伦理委员会批准(ME-TBHP-25-KJ-094)并符合1964年《赫尔辛基宣言》及之后的修订版或类似的伦理标准.本研究豁免患者知情同意

Ethical Approval All procedures performed in this study involving human participants were in accordance with the ethical standards of Tibet Autonomous Region People's Hospital (ME-TBHP-25-KJ-094), and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards. The exemption from informed consent for this study was approved

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献(References)

[1] FORRER A, GAISL T, SEVIK A, et al. Partial pressure of arterial oxygen in healthy adults at high altitudes: a systematic review and meta-analysis[J/OL]. **JAMA Netw Open**, 2023, 6(6): e2318036.

[2] SORIA R, EGGER M, SCHERRER U, et al. Pulmonary artery pressure and arterial oxygen saturation in people living at high or low altitude: systematic review and meta-analysis[J]. **J Appl Physiol**, 2016, 121(5): 1151-1159.

[3] STORZ J F, BAUTISTA N M. Altitude acclimatization, hemoglobin-oxygen affinity, and circulatory oxygen transport in hypoxia[J]. **Mol Aspects Med**, 2022, 84: 101052.

[4] 李 雪, 李文斌, 封士兰, 等. 血红蛋白在高原低氧适应中的机制研究进展[J]. **浙江大学学报(医学版)**, 2019, 48(6): 674-681.
LI Xue, LI Wenbin, FENG Shilan, et al. Research progress on mechanism in adaptation of hemoglobin to plateau hypoxia[J]. **Journal of Zhejiang University (Medical Sciences)**, 2019, 48(6): 674-681. (in Chinese)

[5] BIGHAM A W, LEE F S. Human high-altitude adaptation: forward genetics meets the HIF pathway[J]. **Genes Dev**, 2014, 28(20): 2189-2204.

[6] AMIRI F A, ZHANG J. Tissue oxygenation around capillaries: effects of hematocrit and arteriole oxygen condition[J]. **Bull Math Biol**, 2023, 85(6): 50.

[7] SCHREIER D A, HACKER T A, HUNTER K, et al. Impact of increased hematocrit on right ventricular afterload in response to chronic hypoxia[J]. **J Appl Physiol**, 2014, 117(8): 833-839.

[8] SITINA M, STARK H, SCHUSTER S. Optimal hematocrit theory: a review[J]. **J Appl Physiol**, 2024, 137(3): 494-509.

[9] PIETY N Z, REINHART W H, STUTZ J, et al. Optimal hematocrit in an artificial microvascular network[J]. **Transfusion**, 2017, 57(9): 2257-2266.

[10] KENDALE S M, BLITZ J D. Increasing body mass index and the incidence of intraoperative hypoxemia [J]. **J Clin Anesth**, 2016, 33: 97-104.

[11] ZHAO B C, LEI S H, LIU J M, et al. Sex-specific associations between preoperative hemoglobin and outcomes after major noncardiac surgery: a retrospective cohort study[J]. **Anesth Analg**, 2023, 137(5): 1019-1028.

[12] JACOBS S S, KRISHNAN J A, LEDERER D J, et al. Home oxygen therapy for adults with chronic lung disease. An official American Thoracic Society clinical practice guideline[J/OL]. **Am J Respir Crit Care Med**, 2020, 202(10): e121-e141.

[13] VIRUEZ-SOTO A, ARIAS S, CASAS-MAMANI R, et al. Oxygen therapy limiting peripheral oxygen saturation to 89–93% is associated with a better survival prognosis for critically ill COVID-19 patients at high altitudes [J]. **Respir Physiol Neurobiol**, 2022, 299: 103868.

[14] BASAK N, NORBOO T, MUSTAK M S, et al. Heterogeneity in hematological parameters of high and low altitude Tibetan populations[J]. **J Blood Med**, 2021, 12: 287-298.

[15] PADHY G, GANGWAR A, SHARMA M, et al. Plasma kallikrein-bradykinin pathway promotes circulatory nitric oxide metabolite availability during hypoxia[J]. **Nitric Oxide**, 2016, 55-56: 36-44.

[16] LI C, LI X, LIU J, et al. Investigation of the differences between the Tibetan and Han populations in the hemoglobin-oxygen affinity of red blood cells and in the adaptation to high-altitude environments[J]. **Hematology**, 2018, 23(5): 309-313.

[本文编辑 余 方 刘丽娜]