

# 急性高原病的非药物防治现状

马宏博<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 曾魏<sup>2</sup>, 姜清泉<sup>2</sup>, 王雅宁<sup>2</sup>, 何莉莎<sup>2</sup>, 郑川<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>成都中医药大学临床医学院, 四川成都 611137; <sup>2</sup>成都中医药大学附属医院方药量效研究院, 四川成都 610075;

<sup>3</sup>成都中医药大学附属医院代谢与慢病中医药防治四川省重点实验室, 四川成都 610072; <sup>4</sup>成都中医药大学天府中医药创新港四川省天然小分子药物工程技术研究中心, 四川成都 611930

[中图分类号] R594.3 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2340.2026.0416

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 马宏博,刘旭,曾魏等.急性高原病的非药物防治现状[J].解放军医学杂志,DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2340.2026.0416.

[收稿日期] 2025-11-13 [录用日期] 2026-03-01 [上线日期] 2026-04-16

**[摘要]** 急性高原病(AAI)是急进高原人群中的常见疾病,是由高原特殊环境引起的多系统生理功能紊乱。近年来,中西医在非药物防治AAI领域积累了丰富的实践经验:西医采取氧疗、阶梯习服、规范化运动与呼吸训练及环境调控等策略,增强人体生理适应性;中医则运用针灸、传统功法(如启元气功、膈肌导引)等方法,提高机体耐缺氧能力。此外,基于中西医协同的“内调气血、外适环境”防治体系,结合人工智能、可穿戴设备及多维度生物标志物构建高原病风险预警模型,正推动AAI防治模式从单指标评估向多模态智能化精准防治转型。本文系统梳理该领域研究进展,并对国内外相关防治指南进行探讨,旨在为高原健康管理提供更为实用的科学指导策略。

**[关键词]** 急性高原病; 防治; 西医; 中医; 非药物

## Current status of non-pharmacological prophylaxis and therapy for acute high altitude illnesses

Ma Hong-Bo<sup>1</sup>, Liu Xu<sup>1</sup>, Zeng Wei<sup>2</sup>, Jiang Qing-Quan<sup>2</sup>, Wang Ya-Ning<sup>2</sup>, He Li-Sha<sup>2</sup>, Zheng Chuan<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>School of Clinical Medicine, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Sichuan, Chengdu 611137, China

<sup>2</sup>Institute for the Study of Dosage and Efficacy of Herbal Medicines of Chengdu University of TCM, Sichuan, Chengdu 610075, China

<sup>3</sup>TCM Prevention and Treatment of Metabolic and Chronic Diseases Key Laboratory of Sichuan Province, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Sichuan, Chengdu 610072, China

<sup>4</sup>Sichuan Provincial Engineering Technology Research Center of Natural Small Molecule Drug, Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611930, China

\*Corresponding author, E-mail: zhengchuan@cdutcm.edu.cn

This work was supported by the Key Project of the Research Center for Traditional Chinese Medicine Culture and Development (ZYYWH2025004), and the Chengdu University of Traditional Chinese Medicine Joint Innovation Fund (WXLH202403050)

**[Abstract]** Acute High Altitude Illness (AAI) is a prevalent disorder among individuals ascending rapidly to high altitudes, resulting from systemic physiological dysregulation in response to the hypoxic environment. In recent years, significant progress has been made in non-pharmacological management of AAI within both Western and Traditional Chinese Medicine (TCM) frameworks. Western medical includes oxygen therapy, graded acclimatization, regulated physical and respiratory training, and environmental adjustments to promote physiological adaptation. TCM modalities, such as acupuncture and traditional exercises (e.g., Qi-yuan Qigong and guided diaphragmatic breathing), have been shown to enhance hypoxia tolerance. Moreover, the development of risk prediction models incorporating multidimensional indicators has become critical for the early identification of high-risk populations and paves the way for precise prevention and treatment. This review synthesizes current research advances in this field, with the objective of informing more practical, evidence-based strategies for high-altitude health management.

**[Key words]** acute high altitude illnesses; prophylaxis and therapy; Western medicine; Traditional Chinese Medicine; non-pharmacological

[基金项目] 中医药文化与中医药发展研究中心重点项目(ZYYWH2025004); 成都中医药大学委校联合创新基金(WXLH202403050)

[作者简介] 马宏博, 硕士研究生, 主要从事中西医结合防治高原肿瘤共病方面的研究

[通信作者] 郑川, E-mail: zhengchuan@cdutcm.edu.cn

世界卫生组织将海拔 2500 m 以上的区域定为高海拔地区。我国高原地域辽阔, 约占国土总面积的 26%, 且多位于边疆地带, 具有重要的军事战略地位, 相关区域的建设对国家发展具有深远意义。然而, 高原低氧、低温、低压环境易导致急进高原执行任务的部队官兵及施工人员罹患急性高原病(acute altitude illnesses, AAI), 严重威胁其健康与作业安全。因此, AAI 的防治研究已成为军事医学领域的重要课题<sup>[1-2]</sup>。AAI 主要包括急性高原反应(acute mountain sickness, AMS)、高原肺水肿(high-altitude pulmonary edema, HAPE)和高原脑水肿(high-altitude cerebral edema, HACE), 其中 AMS 和 HACE 可单独或伴随 HAPE 发生<sup>[3-4]</sup>, 二者的发生与氧分压、血氧饱和度(saturation of peripheral oxygen, SpO<sub>2</sub>)降低所致的机体有氧代谢功能异常相关<sup>[5]</sup>。流行病学数据显示, 2018—2023 年尼泊尔高原徒步者中高原病总发病率为 11.6%, 其中 AMS 占 81.3%; 秋季发病率达 58.8%, 呈季节相关性; 另有 28.2% 的病例与每天爬升超 500 m 有关<sup>[6]</sup>; 2022 年一项针对 10 956 名高原电网施工人员的大规模研究显示, AAI 发病率达 15.58%, 其中 AMS 合并 HAPE 发病率为 15.53%, 单独 HACE 发病率仅为 0.05%, 且海拔每升高 100 m, AMS 发病风险增加 45%<sup>[7]</sup>。当前, 中西医在 AAI 防治领域各具特色, 非药物防治措施凭借不良反应少、安全性高、源头干预等优势, 展现出巨大的应用潜力。本文基于两种医学体系的视角, 系统梳理非药物措施在 AAI 防治中的研究进展, 以为临床实践提供实践指导。

## 1 西医防治策略

**1.1 氧疗措施** 氧疗预处理是在进入高原前, 通过间歇性低氧训练(intermittent hypoxic training, IHT)、远程肢体缺血预适应(remote ischemic preconditioning, RIPC)以及高压氧(hyperbaric oxygen)或微高压氧预适应 3 种方式提前干预, 从而调节 SpO<sub>2</sub> 等, 是增强机

体高原习服能力、预防 AAI 的有效手段<sup>[8-10]</sup>。

IHT 通过周期性低氧暴露激发生理适应、提升高原耐力。研究表明, IHT 可有效降低 AAI 发病率<sup>[11-12]</sup>, Wang 等<sup>[13]</sup>报道, IHT 使 AMS 发病率由 40% 降至 14%, 并可增强机体缺氧耐受力, 预防急性缺氧损伤; 而合理设置低氧浓度与暴露时长, 可进一步改善低氧通气反应(hypoxia ventilation reaction, HVR), 这是发挥其保护作用的关键<sup>[14-16]</sup>。此外, 循环低氧结合常氧间歇的方案可显著增强缺氧耐受力, 降低 AMS 发病率与严重程度<sup>[17]</sup>。进一步研究发现, IHT 不仅可改善 HVR, 还可提升静息状态下的 SpO<sub>2</sub> 与运动耐力, 可作为高原长期作业人员的替代适应方案<sup>[18-19]</sup>。此外, IHT 对中枢神经系统亦具有保护作用, 表现为脑血流量增加、认知功能障碍和 HACE 改善<sup>[20]</sup>。基于现有证据, 研究者建议进高原前 5~7 d, 每天进行 1.5~2.0 h 模拟海拔 4000 m 以上的低氧训练, 并在训练后 2 d 内进入高原以巩固习服效果<sup>[21-22]</sup>。

RIPC 通过肢体短暂缺血激活内源性保护机制, 实现对心、脑等远隔器官的抗缺血损伤保护, 且该策略无需特殊设备、操作简单, 在临床实践中具有良好的推广前景。研究显示, RIPC 可改善急进高原者的空间记忆与睡眠质量<sup>[23]</sup>; 与乙酰唑胺联用时, 可将 AMS 发病率从 26% 降至 6%, 且未增加不良反应<sup>[24]</sup>。干预周期与频率是影响预防效果的重要因素, 较长周期(如 7 d)的 RIPC 可缓解外周血管阻力过度下降, 促进早期高原适应<sup>[25-26]</sup>。

高压氧或微高压氧预适应通过提高环境压力与氧浓度, 增强氧弥散能力, 从而改善机体氧合状态。研究证实, 入高原前进行高压氧预处理可降低 AMS 发病率和心率(heart rate, HR), 并提高 SpO<sub>2</sub><sup>[27]</sup>。在高原睡眠障碍与头痛的治疗中, 微压氧起效快于常压吸氧, 且疗效随治疗时间延长而提升<sup>[28]</sup>。急性高原病氧疗预防措施研究总结见表 1<sup>[11-21, 23-28]</sup>。

表 1 急性高原病氧疗预防措施研究

Tab.1 Research on oxygen therapy preventive measures for acute high altitude illnesses

氧疗方法	实验海拔高度(m)	干预人群/样本量(n)	给氧时间与频率	防治效果	研究设计	参考文献
间歇性低氧训练(IHT)	1300/4500/4300	高原新兵(60)	低氧呼吸器配合匀速小步快走 10 min+常氧间歇 5 min, ×4 循环, 2 次/d, 持续 5 d	降低 AMS 发病率, 干预效果可保留 5 d, 越早干预效果越好	RCT	[11]
	-	高海拔探险队成员(6)	模拟 4000~5500 m 低压舱, 配合低强度运动, 3~5 h/d, 持续 17 d	提高红细胞计数和血红蛋白浓度, 以及肺通气量、潮气量和 O <sub>2</sub> 摄取量等指标	BA	[12]
	4500	健康志愿者(100)	FiO <sub>2</sub> =13% 10 min+常氧间歇 5 min, ×4 循环, 2 次/d, 连续 5 d	较对照组平均外周 SpO <sub>2</sub> 提高, 颅内压降低	RCT	[13]
	-	健康志愿者(19)	FiO <sub>2</sub> =(12.3±0.2)%, 1 或 3 h/d	不同时间的低氧干预均能增强 HVR 和低氧适应能力	NRCT	[14]

(续表)

氧疗方法	实验海拔高度(m)	干预人群/样本量(n)	给氧时间与频率	防治效果	研究设计	参考文献
	2500/ 4300	男性运动员(18)	FiO <sub>2</sub> =15.5%(模拟海拔2500 m)或12.3%(模拟海拔4300 m), 1 h/d, 持续1周	相较FiO <sub>2</sub> =15.5%组与对照组, FiO <sub>2</sub> =12.3%组HVR增强更明显	NRCT	[15]
	5300	健康志愿者(49)	FiO <sub>2</sub> =11%(模拟海拔5300 m), 1 h/d, 持续7 d	降低LLS评分	RCT	[16]
	4400	健康志愿者(40)	FiO <sub>2</sub> =13%(模拟海拔3800 m) 10 min+常氧间歇5 min, ×4循环, 2次/d, 持续5 d	显著提高耐缺氧能力, 降低AMS发病率	RCT	[17]
	-	健康志愿者(6)	模拟海拔4300 m, 4 h/d, 持续7 d(结合运动/休息), 持续3周	改善受试者运动表现、SpO <sub>2</sub> 和肌肉耐力	BA	[18]
	-	健康志愿者(10)	模拟海拔4300 m, 4 h/d, 持续7 d(结合运动/休息)	提高SpO <sub>2</sub> 、降低心率和自觉用力程度	BA	[19]
	4300	健康男性志愿者(24)	FiO <sub>2</sub> =12.25%(模拟海拔4300 m)5 min+常氧间歇3 min, 8次/d, 连续10 d	增加脑血流量, 减轻脑肿胀, 显著改善认知功能障碍	RCT	[20]
	4020	健康志愿者(92)	模拟海拔4300~4500 m, 2 h/d, 持续7 d	AMS、HAPE和HACE发病率均降低, 预防血压异常升高	NRCT	[21]
远程肢体缺血预处理(RIPC)	3680	健康男性志愿者(82)	远程缺血预处理, 1次/d, 连续7 d	改善AMS, 提高空间记忆能力, 显著提升睡眠质量	RCT	[23]
	4000	健康志愿者(250)	2次/d, 连续6 d或4次/d, 连续3 d; 联合乙酰唑胺2次/d, 持续2 d	改善氧合, 下调血小板衍生生长因子-AB, 降低AMS发病率	RCT	[24]
	4000	军校学员(24)	RIPC 5 min+休息5 min, ×4循环, 连续7 d	缓解外周血管阻力, 抑制脑氧饱和度下降, 提升去甲肾上腺素水平, 减轻心血管代偿反应	RCT	[25]
	3650	健康志愿者(250)	A组1次/d, 持续1周; B组2次/d, 持续1周; C组1次/d, 持续4周; D组2次/d, 持续4周	4周干预显著降低AMS发病率, 效果随干预频率增加而提升, 而短期(1周)干预无效	RCT	[26]
高压氧预适应(hyperbaric oxygen)	5200	军人(39)	进高原前2 d, 2.2 ATA(约222.92 kPa)停留1 h(吸纯氧25 min×2, 中间休息10 min), 1次/d	显著降低心率, 提高SpO <sub>2</sub>	NRCT	[27]
	4200	HAS、HAH/ HAS组(130)、 HAH组(144)	131.72 kPa, 2 h/d	较常压吸氧, 缓解高原睡眠障碍与头痛速度更快, 效果更好	NRCT	[28]

“-”示该研究是在模拟海拔下进行的实验验证, 未到真实高原环境中进行。AMS. 急性高原反应; ATA. 绝对大气压; BA. 自身前后对照试验; FiO<sub>2</sub>. 吸入氧浓度; HACE. 高原脑水肿; HAH. 高原性头痛; HAPE. 高原肺水肿; HAS. 高原性睡眠障碍; HVR. 低氧通气反应; LLS. 路易斯湖评分; NRCT. 非随机对照实验; RCT. 随机对照试验; SpO<sub>2</sub>. 外周血氧饱和度

**1.2 阶梯习服** 控制上升速度的阶梯上升方式是保障高原行程安全的重要原则。荒野医学会建议每天爬升不超过500 m, 每3~4 d安排休息日<sup>[29]</sup>; 尽管遵守指南后仍存在AAI发病风险, 但症状较轻不危及生命, 配合“高爬低睡”可进一步促进习服<sup>[30]</sup>。研究发现, 与缓慢上升相比, 乘飞机快速到达高原者AMS发病率增加4.5倍<sup>[31]</sup>, 故推荐在2500~6121 m区间内每天渐进上升300~500 m, 每升高1000 m休息1 d<sup>[32-33]</sup>; 且一旦超过3000 m, 每晚睡眠海拔上升不宜超过500 m, 并至少在同一海拔高度连续住宿两晚<sup>[34]</sup>。总体而言, 爬升越慢, 习服时间越长, AAI风险越低。另有学者提出在抵达目标海拔前, 先在中等海拔地区(2000~3000 m)适应数天的“阶段性上升”策略, 每天海拔升幅300~500 m, 超过4000 m后应进一步放缓速度, 此方法可降低AAI风险并提高

运动表现<sup>[32,35]</sup>。

**1.3 运动与呼吸训练** 科学合理的运动训练是预防AAI的有效手段。研究表明, 进入高原前在平原地区进行高强度间歇训练和耐力训练, 可有效预防AMS发生并促进高原习服<sup>[36-37]</sup>。刘敏<sup>[38]</sup>针对不同人群制定运动处方, 其中健身运动方(以快走慢跑为主, 配合拉伸等柔韧性训练, 5 d/周, 45~60 min/d)可改善援藏人员体重与心肺功能, 休闲运动方(中低强度的休闲运动, 以登山远足为主, 每月1次或两周1次)可缓解焦虑情绪, 环境适应运动方(进行阶梯式低氧负荷中低等强度有氧运动, 如登高、慢跑两种形式, 并配合柔韧训练; 训练按照人群现处位置, 中海拔地区、高海拔地区、高原日常所在地分3个阶段, 每阶段以5~10 d为1期, 每期运动5~7 d, 每天30~45 min)则可显著提高习服能力。第三军医大

学(现陆军军医大学)研究团队开发的“缺氧复合运动”预适应锻炼(入高原前,连续7 d、每天上下午各进行4组“佩戴低氧呼吸器配合小步快走10 min,间歇休息5 min”的干预训练)可有效保护急进高原人员的脑功能与劳动能力,降低AMS发生风险<sup>[39-40]</sup>。张珂等<sup>[41]</sup>进一步研究发现,急进高原地区人群SpO<sub>2</sub>与肌肉量呈正相关。上述研究均提示系统性运动训练结合其他干预是预防AMS的有效策略。

呼吸训练是另一重要的非药物干预手段,主要包括腹式呼吸和缩唇呼吸。腹式呼吸通过鼻吸气鼓腹、缓慢收腹呼气,提高呼吸协调性与效率;缩唇呼吸通过增加气道阻力延缓小气道闭合,优化气体交换<sup>[42]</sup>。这些训练可增加肺通气量、减少肺功能残气量<sup>[43]</sup>,提高SpO<sub>2</sub><sup>[44]</sup>,稳定血压<sup>[45]</sup>,改善应激状态下的微循环、降低HR<sup>[46]</sup>,抑制交感神经过度兴奋<sup>[47]</sup>,改善胃电活动促进胃功能恢复<sup>[48]</sup>。李博志等<sup>[49]</sup>研究证实,长期坚持腹式呼吸能有效提升高原移居者血氧水平,显著缓解因缺氧所致的睡眠障碍等症。

**1.4 环境干预** 环境干预是指在进入高原后,通过建立富氧室、优化供氧系统等技术手段改善高原驻留人员所处环境的氧气条件,以对抗高原低氧应激,保障认知功能、睡眠质量与整体健康。在固定场所干预方面, Gerard等<sup>[50]</sup>在5000 m高原将高原富氧室氧浓度提高6%,可使SpO<sub>2</sub>由81.6%升至93.0%,并改善受试者的反应速度、手眼协调能力及睡眠质量。李韩斌等<sup>[51]</sup>建立分子筛供氧习服训练中心采用阶梯式降氧方案(26.0%~21.5% O<sub>2</sub>),可缓解AMS症状并加速习服进程。供氧方式优化方面, Yang等<sup>[52]</sup>研发的集成大气压力补偿与闭环调节算法的呼吸干预系统,能显著改善3650 m高原环境下睡眠呼吸暂停患者的通气功能(提高26.3%)和夜间SpO<sub>2</sub>(提高8%);此外,在模拟2000 m海拔进行夜间休息时,可改善长期驻守3500 m高原人员的血压与睡眠氧饱和度、抑制神经内分泌应激反应<sup>[53]</sup>。李理等<sup>[54]</sup>证实弥散富氧可有效改善高原缺氧症状;李静杰等<sup>[55]</sup>研制的新型膜法弥散富氧室则能提高SpO<sub>2</sub>、降低HR并提升基建人员作业效能;冉庄等<sup>[56]</sup>进一步揭示了弥散供氧方式通过精氨酸生物合成,组氨酸代谢,丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢,以及乙醛酸和二羧酸代谢等4条代谢通路,增强心肺供氧能力,调节代谢紊乱。

## 2 中医防治策略

**2.1 针灸与穴位刺激** 针灸与穴位刺激在防治AAI及相关症状方面展现出良好效果。临床研究表明,在模拟海拔3600 m下,针刺内关穴(低氧暴露前,得气后留针15 min)或指压(腕带按压≥4 h),可抑制大

脑中动脉舒张末期流速上升,降低血压,提示其可能通过再平衡脑血流来缓解AMS<sup>[57]</sup>;针刺膻中、气海、内关等穴[入高原(3100 m/3850 m/4350 m)第2天进行,补法为主,1次/d,30 min/次,连续5 d]可提升急进高原人群的SpO<sub>2</sub>,且改善效果随干预时间延长而增强,男性获益更为明显<sup>[58]</sup>。针对AAI常见的头痛与睡眠障碍,针刺联合点穴刺激百会、太阳、神门等穴(急进高原≥2500 m确诊AMS后,2次/d,每次留针30 min、点穴5 min,连续6 d)<sup>[59]</sup>;或使用电掣针对中腕、双侧内关、合谷等穴进行刺激[入高原3650 m后72 h内确诊AMS后,4次/d(晨、午、晚、睡前),1 min/次,留针48 h]能有效缓解头痛和失眠<sup>[60]</sup>;经皮穴位电刺激神门、内关穴(入高原>4200 m后,3次/d,30 min/次,连续5 d)可优化非快速动眼期与快速动眼期的睡眠结构,延长总睡眠时间<sup>[61]</sup>。杨华等<sup>[62]</sup>进一步证实,掣针公孙、内关、中腕和足三里(入高原前7 d至入高原后4 d,每次留针3 d)联合耳穴压籽(入高原前7 d至入高原后7 d,每天按压2~3 min,每2 d换贴)能显著缓解AMS与胃肠应激状态,并降低C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)和皮质醇水平。此外,温和灸肺俞、膏肓俞与脾俞(每穴3 min,1次/d,10次为1个疗程,每疗程间隔3~4 d,共3个疗程)联合西药治疗能改善HAPE患者的动脉血氧合能力,降低血红蛋白浓度与肺动脉压力,缓解疾病症状<sup>[63]</sup>。

**2.2 功法训练** 中医传统养生功法涵盖太极拳、八段锦、导引术等,以中医理论为根基,将调身、调息、调心融为一体,通过肢体运动引导气血循环,以节律呼吸调节脏腑气机,以意念内守实现精神专注,核心在于激发人体自愈潜能,从整体层面重建内外环境的动态平衡<sup>[64-66]</sup>。有研究显示,太极拳改善慢性失眠的短期疗效虽不及认知行为疗法,但经1年以上随访,其睡眠改善效果展现出不劣于后者的持续优势<sup>[67]</sup>。类似的临床证据还体现在高血压<sup>[68]</sup>、老年衰弱<sup>[69]</sup>与帕金森病<sup>[70]</sup>等常见疾病的防治上;更重要的是,这种“形气神协同”的稳态维持机制正成为高原医学的研究热点。“高原健身增氧功”动静结合、简单易学,包括怀中抱月、大鹏展翅、拨云见日、挽弓射箭、丹凤朝阳和叶落归根6个动作,配以腹式呼吸,可疏通全身经脉气血<sup>[71]</sup>。研究表明,在3600 m的高原连续进行“高原健身增氧功”训练5 d,能有效改善呼吸代谢、提高SpO<sub>2</sub>,缓解高原不良生理反应<sup>[71]</sup>;“启元气功”注重丹田修炼,通过回阳润水、展翅沐浴等步骤,强化人体劳宫、神门、百会等多个要穴的活力,在进入高原前8周,每天2次、每次40 min的训练,可改善高原缺氧引起的微循环障碍、降低交感神经兴奋性、增强机体协调性

与高原适应能力<sup>[72]</sup>；“膈肌导引”是一种在吸气时控制膈肌下降，呼气时控制膈肌上升的干预训练，在AMS发生后每天进行3次训练，且每次导引在血氧浓度达到95%后继续坚持5 min，能显著提升SpO<sub>2</sub>、降低HR，从而降低AMS发生率，联合穴位按压效果更优<sup>[73]</sup>。此外，结合中医理论与现代运动科学的单兵功法，可实现生理防护与心理调节的双重效能，为高原特殊人群的防护提供参考方案<sup>[74]</sup>。

### 3 智慧高原健康管理

**3.1 智能化工具助力AAI风险精准防治** 人工智能(AI)技术正改变AAI的防治方式。与既往依赖单一指标或固定阈值的评估不同，机器学习能够整合多源数据、捕捉变量间的复杂关系，构建更精准的风险预测模型<sup>[75]</sup>。研究者基于随机森林算法，仅用5项常规血液指标即可预测高原心肌缺血(AUC=0.86)<sup>[76]</sup>，为大规模人员进入高原前进行快速风险筛查提供了简便工具。另一项研究利用床旁指标(HR、SpO<sub>2</sub>、肺部啰音、咳痰情况)构建了HAPE重症识别模型(AUC达0.86)，由于该模型所选指标无需任何影像设备就可监测，因此有效解决了高原现场影像设备匮乏下的分诊难题<sup>[77]</sup>。在高海拔矿工群体中，通过机器学习分析近5万人的体检数据，发现体重指数(BMI)、血糖等代谢指标是评估“高原适岗性”的核心因子，研究据此提出了从年度静态筛查向可穿戴连续监测转型的策略<sup>[78]</sup>。与上述机器学习侧重于“是否发病”的二分类预测相比，深度学习则将评估维度推进到“严重程度如何”的连续分级。深度学习擅长从时序信号中提取特征，用以分析机体从常态到病态的演变过程，研究者利用这一特性从虚拟现实(VR)模拟高海拔任务的心电信号中提取时序特征，成功将心理应激状态区分为静息、场景适应、任务执行和恢复4个等级(准确率78%)<sup>[79]</sup>，这意味着在AAI发生之前，人体的自主神经变化已可被识别并量化。更精细的分级体现在脑电研究上，借助低压氧舱精确控制海拔梯度，通过深度学习提取脑电信号的时序特征，可将受试者缺氧程度分为正常、轻度、中度、重度4个等级，准确率达86.16%<sup>[80]</sup>。深度学习的这种分级与动态监测能力，不仅提高了预测精度，还可在机体从正常生理状态向异常过渡的过程中识别风险，为早期干预提供可能。

**3.2 可穿戴设备** 可穿戴设备打破了只能在医院等固定场所进行监测的局限，将生理指标的采集拓展到高原等各类复杂环境下的动态场景中，例如集成多模态传感器的智能手表、腕带等设备能实现SpO<sub>2</sub>、心率变异性(heart rate variability, HRV)等指标的实时监测与早期预警<sup>[81-82]</sup>。有研究者在低海拔(300 m)

用智能手表测量最大摄氧量(VO<sub>2</sub>max)，发现其与进入3900 m高原后AMS的发生率明显相关，联合红细胞分布宽度(RDW-CV)构建的预测模型AUC达0.839<sup>[83]</sup>；另一项在海拔4000 m以上的实地研究中，智能手表测得SpO<sub>2</sub>每升高1%，AMS风险降低约8.6%<sup>[84]</sup>。这意味着，个体对高原的耐受能力或许在进入高原前就已在低海拔的日常活动中有所体现，可穿戴设备则通过持续监测捕捉到了这一信号。在更复杂的登山环境中，研究者将可穿戴设备采集的海拔、HR、SpO<sub>2</sub>等多参数数据输入Bagged Trees模型，实现了对AMS的个体化实时预警(敏感度0.999，特异度0.994)<sup>[85]</sup>。但可穿戴设备在高原应用中仍面临验证瓶颈。一项在海拔4554 m的睡眠研究发现，基于光电体积描记设备(photoplethysmography, PPG)提取的HRV指标与心电图存在差异：高频(HF)功率被高估，导致低频(LF)/HF比值(LF/HF反映交感神经与迷走神经之间的平衡状态)被低估<sup>[86]</sup>。这种偏差源于呼吸对脉搏波传导速度的调制作用，故在解读PPG测量的HRV指标时，需注意勿将其等同于心脏的自主神经调节。另有研究显示，智能手表在低海拔测得的SpO<sub>2</sub>与医用血氧仪一致性良好，但快速攀升到4559 m海拔后，其测量值较动脉血气分析平均偏高7%<sup>[85]</sup>，这可能与低温、低氧的高原环境影响光学传感器的准确性有关。此外，不同设备存在可靠性差异，仍需进一步验证以提升临床适用性。

**3.3 AAI预警模型** 根据荒野医学学会指南，AAI风险可分为低、中、高3个等级<sup>[29]</sup>。现有评估工具如步进测试法，可在实地便捷评估AMS易感性<sup>[87]</sup>；基于传统路易斯湖评分(Lake Louise scoring, LLS)提出eLLS标准，则对高海拔认知障碍及血液学变化有更高的敏感性<sup>[88]</sup>。此外在中海拔地区基于中医“治未病”观念构建的渐进海拔适应平台，将饮食调护等个体化措施融入习服过程<sup>[89]</sup>。然而，上述方法多依赖主观评分或单一生理指标，难以满足精准预警需求。

为弥补传统评估方法的局限，研究者正系统引入多维度生物标志物。高原暴露早期体成分变化与AMS严重程度相关：体重、去脂质量、全身水分下降幅度越大，症状越严重<sup>[90-91]</sup>。血常规指标中，平均红细胞血红蛋白浓度升高与HAPE易感性呈正相关，分析原因可能与红细胞内血红蛋白浓度过高影响其变形能力，加重肺循环负荷有关<sup>[92]</sup>。炎症因子方面，低海拔肿瘤坏死因子(TNF)- $\alpha$ 升高可筛选3700 m海拔的AMS易感人群，联合白细胞介素(IL)-2、IL-17A升高可进一步预测5000 m海拔的发病风险<sup>[93]</sup>。功能学指标中，海平面二尖瓣环位移<13.30 mm，即左心室纵向收缩功能储备不足时，患病风险

增加4倍以上<sup>[94-95]</sup>。视网膜微血管作为中枢神经系统唯一可直接观测的毛细血管,在低压舱模拟高原环境后血流密度显著增加,且AMS阳性组增幅远超阴性组<sup>[96]</sup>,说明微血管过度灌注是早期AMS的关键病理生理改变。组学研究则为高原病的机制探索与精准防治提供了全新的技术视角。通过红细胞膜蛋白质组与磷酸化修饰组学的分析,研究者发现AMS患者存在一种“丰度-修饰”解耦联现象,即某些膜蛋白的磷酸化水平显著改变,但其背景蛋白含量无明显变化<sup>[97]</sup>,这说明磷酸化修饰本身可能在AMS发病机制中扮演独立角色;研究人员还发现原癌基因酪氨酸-蛋白激酶/蛋白激酶C $\gamma$ (SRC/PRKCG)活性在AMS患者中明显升高,体外实验证实抑制这两种酶的活性可减轻低氧引起的红细胞膜破坏,为药物干预提供了潜在靶点<sup>[97]</sup>。在代谢层面,基于核磁共振氢谱(<sup>1</sup>H NMR)的尿液代谢组仅凭海平面样本即可预测AMS易感性,其中肌酸高排泄提示个体存在能量储备的先天缺陷<sup>[98]</sup>。这意味着,在暴露于低氧环境之前,某些个体的能量代谢可能已处于“预激活”状态,一旦遭遇低氧应激则更易发生失代偿表现。

此外,机器学习能够整合临床、生理、遗传等高维、异质数据,自动筛选关键特征并构建复杂预测模型,显著提升风险识别精度<sup>[99-100]</sup>。在此基础上,有学者将控制论引入高原医学,提出基于实时生理反馈自动优化供氧策略的“闭环控制系统”,实现主动调控式的高原健康管理<sup>[101]</sup>。VR联合多模态MRI进一步拓展了数据维度:前者结合脑电图发现中枢神经系统动态变化(如枕叶beta/gamma频带功率)可作为早期敏感指标<sup>[102]</sup>;后者基于平原感觉运动网络功能连接特征实现对AAI的预先判别(AUC=86.4%)<sup>[103]</sup>。尽管新型预警模型引入AI和多模态数据,实现了从单指标向智能化预测的转型,但仍面临多源数据标准缺乏、从风险评估到精准干预转化困难等挑战,未来需强化外部验证与模型透明性以保障临床可靠性。

#### 4 多调控视角下的高原病发生与防治机制

深入探究高原病发生防治机制,对于揭示其病理过程及临床防治具有重要价值。低氧诱导因子(HIF)是调控低氧信号通路的核心调控节点,IHT可通过调控肺动脉平滑肌中HIF-1 $\alpha$ /NADPH氧化酶4(NOX4)/过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)/过氧化物酶体增殖物激活受体 $\gamma$ (PPAR- $\gamma$ )轴,抑制细胞过度增殖,减轻低氧诱导的高海拔肺动脉高压<sup>[104]</sup>。在细胞间通讯层面,缺氧预适应的心肌细胞可分泌Stanniocalin-1(STC1),该因子与钙感受受体(CaSR)结合后调控信号转导及转录激活因子3(STAT3)蛋白的S-亚硝基化修饰及磷

酸化,这不仅可移至心肌细胞凋亡与焦亡,还可促进中性粒细胞向抗炎表型极化<sup>[105]</sup>。神经-体液调节同样关键,RIPC的保护信号需依赖迷走神经-脾脏轴实现全身传递<sup>[106]</sup>。此外,IHT诱导的血浆因子中,血小板因子4(PF4)有助于维护血脑屏障完整性,为高原脑损伤防治提供新靶点<sup>[107]</sup>。在抗炎方面,缺氧预适应可上调去泛素化酶A20,抑制受体相互作用蛋白激酶3(RIP3)泛素化以阻断坏死性凋亡复合物形成,从而抑制小胶质细胞向促炎表型极化,减轻缺血性脑损伤<sup>[108]</sup>。同时通过干预细胞修复与再生的关键调控因子也是神经保护的关键机制之一,缺氧预适应上调脑源性神经营养因子,有助于维持急性缺氧所致的基底前脑胆碱能神经元功能障碍,并维持海马突触可塑性<sup>[109]</sup>。

关于能量代谢的重编程,传统观点认为低氧下糖酵解增强以满足能量需求,但最新研究发现,急性缺氧反而抑制肝脏葡萄糖激酶等糖酵解酶活性,同时激活乳酸/氨基酸-丙酮酸-三羧酸循环及脂肪酸氧化途径<sup>[110]</sup>。在此背景下,RIPC通过重塑底物代谢模式发挥保护作用,一方面上调葡萄糖转运蛋白1(Glut1)、己糖激酶2(Hk2)等基因重编程葡萄糖代谢,改善线粒体功能以预防HACE<sup>[111]</sup>;另一方面激活HIF-1 $\alpha$ /PPAR- $\gamma$ /肉碱棕榈酰转移酶1A(CPT1A)轴促进脂肪酸氧化,提高 $\beta$ -羟丁酸和乙酰乙酸水平为肠干细胞供能,加速组织修复<sup>[112]</sup>。肠道微生物亦在低氧适应中发挥作用,乳酸菌株4L3通过上调回肠紧密连接蛋白水平、降低血清二胺氧化酶及IL-6等炎症因子水平,减轻氧化应激,从而缓解缺氧导致的脑水肿、肺水肿和肠损伤<sup>[113]</sup>,人群队列研究进一步揭示肠道核心菌属Blautia A(尤其是*B. wexlerae*)在急进高原后显著富集,机制研究提示该菌属可减轻回肠炎炎症并增强肠道屏障,还可改善缺氧诱导的动脉SpO<sub>2</sub>下降、右心室收缩压升高和肺损伤<sup>[114]</sup>。但非药物疗法是否直接通过调控肠道菌群发挥防治作用,目前仍缺乏直接实验证据。

#### 5 总结与展望

**5.1 基于中西医结合理念的AAI非药物综合防治体系** 高原病的本质是低氧环境与机体应答能力之间的失衡,中西医结合防治AAI的价值正体现在二者“相通”与“互补”的关系之中。相通之处在于二者目标一致,西医的阶梯习服、缺血预处理与中医的“治未病”、功法调理,均着眼于在进入高原前提升机体对低氧的耐受能力;在急性期症状的快速缓解上,西医的高压氧通过改善组织供氧进行直接干预,中医的针灸则可行气活血、醒脑开窍,同样起到缓解头痛、胸闷等急性期症状的作用,只是路径不同,

前者重在从外补充,后者重在从内调动。临床证据为这种关系提供了支撑:针刺联合高压氧在改善脑损伤意识障碍<sup>[115]</sup>、加速脑水肿消除方面具有协同功效<sup>[116]</sup>,这说明二者在急性干预中并非对立,而是功能相通,优势互补,但这种“相通”并不意味着完全等同。除此之外,二者也存在差异性。西医以“调控”为核心,缺氧补氧、水肿则降压,强调精准干预;中医以“调和”为基石,通过调和气血、平衡阴阳,提升机体自身的气血运行与自我调节能力。所以在AAI防治中,西医的快速控制可为中医调节争取时间,而中医的调节又可缓冲西医干预可能诱发的过度反应,维持内环境稳态,机制层面的研究可更好反映这一点:HIF-1 $\alpha$ 作为缺氧适应核心靶点,既是西医氧疗的作用节点,也与针灸调节自主神经的效应相关联,高压氧创造的富氧微环境增强针刺效应,而针灸的自主神经调节又可缓冲高压氧可能诱发的过度氧化应激,二者在“氧化还原调控”与“神经-免疫调节”之间形成良性互动<sup>[115,117]</sup>。由此,中西医“相通互补”,共同构建起“内调气血、外适环境”的系统性防治体系。

**5.2 以循证证据为核心的预防方式推荐考量** 国内外在非药物防治AAI理念上趋同,但实施路径与证据解读存在差异。美国荒野医学会(the Wilderness Medical Society, WMS) 2024版指南将“阶梯式适应”(每天睡眠海拔增幅 $\leq 500$  m,每3~4 d设休息日)作为最高级推荐,但因缺乏随机对照试验(RCT)支持,证据等级自2010年始终为中等质量(1B)<sup>[29,34,118]</sup>;便携式高压氧舱用于AMS/HACE为中等质量、HAPE为低质量,持续气道正压通气(CPAP)因研究不足无法推荐<sup>[29,34]</sup>;同时不建议依赖常压低氧帐篷预适应<sup>[29]</sup>,该技术缺乏系统研究,且暴露超60 h才能有效,300 h为极端海拔最佳准备时长<sup>[3]</sup>。相比之下,国内共识展现场景化与技术驱动特征,针对大规模急进需求,将高压氧治疗(HBOT)系统纳入全程防治(预适应0.10~0.14 MPa/5~7 d, II级C; AMS预防0.03~0.05 MPa, II级B; HAPE/HACE急性期0.08/0.10 MPa, II级C)<sup>[119]</sup>,推广心肺运动试验(CPET)作为评估习服能力的“金标准”<sup>[120]</sup>,并构建递进式筛查体系,明确严重心律失常等禁忌判读标准<sup>[121]</sup>,这与Luks等<sup>[2]</sup>针对基础疾病患者的“四问题”评估框架有相似性。然而,指南落地仍面临挑战。高压氧舱设备依赖性强且转运困难<sup>[3,119]</sup>,CPET与多种监测技术操作门槛高<sup>[2,120,122-123]</sup>,氧疗等设备在偏远地区后勤保障难<sup>[29,34]</sup>,筛查指标如何与个体化适应方案动态结合亦待解决<sup>[2,121]</sup>。当前推荐多基于观察性研究或专家经验,高质量证据匮乏是国内外指南共同面临的难题<sup>[3,34,118]</sup>。

**5.3 研究的挑战与未来方向** 综上,高原病非药物防治是中西医研究的重要方向,在构建多维度个体化防治体系方面具有潜力。但目前研究仍存在局限:缺乏多中心RCT,高质量循证证据不足;中西医协同机制研究薄弱,尤其在分子调控网络及跨系统协同层面尚未阐明;技术转化困难,高压氧舱等设备携带不便、多模态功能监测操作复杂,难以在偏远高原普及;不同智能设备测量可靠性参差,与临床金标准相比仍有偏差;AI预警模型虽整合多源数据,但不同研究的数据格式、采集标准不一、外部验证薄弱,临床精准度与实施效率有待提高。

未来研究可聚焦如下方向:(1)开展多中心、大样本RCT,为指南更新提供高质量依据;(2)开发多模态融合数据库与智能决策系统,利用AI挖掘从海平面到高原的动态标志物,提高预警精度;(3)研发轻量化、低能耗、高可靠性的智能检测设备与治疗仪器,制定高原性能标准。通过多学科交叉与中西医协同创新,推动非药物防治AAI策略的精准化与广泛应用,为高原作业、旅行及驻守官兵提供更加安全、高效的健康保障。

#### 【参考文献】

- [1] 何莉莎,李雪萍,郑川. 中医药防治高原病研究现状及未来发展策略[J]. 中华中医药杂志, 2025, 40(4): 1838-1843.
- [2] Luks AM, Hackett PH. Medical conditions and high-altitude travel [J]. *N Engl J Med*, 2022, 386(4): 364-373.
- [3] Gatterer H, Villafuerte FC, Ulrich S, et al. Altitude illnesses [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2024, 10(1): 43.
- [4] Zhou Y, Ding H, Liang H, et al. Global research trends and emerging hotspots in acute high altitude illness: a bibliometric analysis and review (1937 - 2024) [J]. *Rev Environ Health*, 2025, 40(3): 562-579.
- [5] Richalet JP, Hermand E, Lhuissier FJ. Cardiovascular physiology and pathophysiology at high altitude [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2024, 21(2): 75-88.
- [6] Shrestha S, Kharel S, Acharya S, et al. A retrospective analysis of altitude illness at the himalayan rescue association aid post manang (2018 - 2023) [J]. *High Alt Med Biol*, 2025. doi: 10.1177/15578682251376256.
- [7] 张云静,周虎子威,巩泉泉,等. 高原作业电网施工人员急性高原病发病率及其危险因素分析[J]. 中华医学杂志, 2023, 103(4): 278-286.
- [8] 张玉婷,赵诺,张智健,等. 职业性急性高原病的氧疗研究进展[J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2024, 19(10): 134-137.
- [9] Molano Franco D, Nieto Estrada VH, Gonzalez Garay AG, et al. Interventions for preventing high altitude illness: part 3. Miscellaneous and non-pharmacological interventions [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2019, 4(4): CD013315.
- [10] Gangwar A, Paul S, Ahmad Y, et al. Intermittent hypoxia modulates redox homeostasis, lipid metabolism associated inflammatory processes and redox post-translational modifications: benefits at high altitude [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 7899.

- [11] 黄庆愿,刘福玉,游海燕,等.低氧预适应训练在急进高海拔高原部队中的应用研究[J].中国应用生理学杂志,2011,27(3):304-305,310.
- [12] Casas M, Casas H, Pagés T, *et al.* Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2000, 71(2): 125-130.
- [13] Wang Y, Zhang Q, Ma Q, *et al.* Intermittent hypoxia preconditioning can attenuate acute hypoxic injury after a sustained normobaric hypoxic exposure: a randomized clinical trial[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14662.
- [14] Katayama K, Ishida K, Iwasaki KI, *et al.* Effect of two durations of short-term intermittent hypoxia on ventilatory chemosensitivity in humans[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2009, 105(5): 815-821.
- [15] Katayama K, Sato K, Hotta N, *et al.* Intermittent hypoxia does not increase exercise ventilation at simulated moderate altitude[J]. *Int J Sports Med*, 2007, 28(6): 480-487.
- [16] Trembl B, Kleinsasser A, Hell T, *et al.* Carry-over quality of pre-acclimatization to altitude elicited by intermittent hypoxia: a participant-blinded, randomized controlled trial on antedated acclimatization to altitude[J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 531.
- [17] 黄丹,张琪涵,宋歌,等.间歇性低氧训练预防急性低氧损伤有效性和安全性的研究[J].中国全科医学,2023,26(29):3640-3644.
- [18] Beidleman BA, Muza SR, Fulco CS, *et al.* Intermittent altitude exposures improve muscular performance at 4300 m[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2003, 95(5): 1824-1832.
- [19] Beidleman BA, Muza SR, Fulco CS, *et al.* Seven intermittent exposures to altitude improves exercise performance at 4300 m[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(1): 141-148.
- [20] Zhang G, Yang G, Zhou Y, *et al.* Intermittent hypoxia training effectively protects against cognitive decline caused by acute hypoxia exposure[J]. *Pflugers Arch*, 2024, 476(2): 197-210.
- [21] 柏雪峰.平原常压预缺氧措施预防、预警急性高原病及促高原习服研究[D].拉萨:西藏大学,2025.
- [22] 黄庆愿,蔡明春.急进高原前缺氧预适应措施研究进展[J].解放军预防医学杂志,2012,30(6):459-462.
- [23] Wu Y, Zhou S, Li Y, *et al.* Remote ischemic preconditioning improves spatial memory and sleep of young males during acute high-altitude exposure[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2023, 53: 102576.
- [24] Liu M, Jiao X, Li R, *et al.* Effects of acetazolamide combined with remote ischemic preconditioning on risk of acute mountain sickness: a randomized clinical trial[J]. *BMC Med*, 2024, 22(1): 4.
- [25] 李悦,向伦理,段家翔,等.远端肢体缺血预处理缓解急进高原导致的血循环改变[J].陆军军医大学学报,2022,44(3):203-209.
- [26] Wang Z, Lv B, Zhang L, *et al.* Repeated remote ischaemic preconditioning can prevent acute mountain sickness after rapid ascent to a high altitude[J]. *Eur J Sport Sci*, 2022, 22(8): 1304-1314.
- [27] 马广全,张西洲,崔建华,等.高压氧预防急性高原反应的效果观察[J].高原医学杂志,2008,18(1):17-18.
- [28] 黄洁,王柠,王佳岳,等.微压氧治疗仪治疗高原睡眠障碍及高原性头痛的疗效分析[J].高原医学杂志,2022,32(1):17-22.
- [29] Luks AM, Beidleman BA, Freer L, *et al.* Wilderness medical society clinical practice guidelines for the prevention, diagnosis, and treatment of acute altitude illness: 2024 update[J]. *Wilderness Environ Med*, 2024, 35(1\_suppl): 2S-19S.
- [30] Ken Zafren. Prevention of high altitude illness[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2014, 12(1): 29-39.
- [31] Burtcher J, Swenson ER, Hackett PH, *et al.* Flying to high-altitude destinations: is the risk of acute mountain sickness greater? [J]. *J Travel Med*, 2023, 30(4): taad011.
- [32] Burtcher M, Hefti U, Hefti JP. High-altitude illnesses: old stories and new insights into the pathophysiology, treatment and prevention[J]. *Sports Med Health Sci*, 2021, 3(2): 59-69.
- [33] Richalet JP, Pillard F, Le Moal D, *et al.* Validation of a score for the detection of subjects with high risk for severe high-altitude illness [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2021, 53(6): 1294.
- [34] Derstine M, Small E, Davis AM. Prevention, diagnosis, and treatment of acute altitude illness[J]. *JAMA*, 2024, 332(19): 1665-1666.
- [35] Luks AM, Swenson ER, Bärtsch P. Acute high-altitude sickness[J]. *Eur Respir Rev*, 2017, 26(143): 160096.
- [36] 李勃深,杨军,王芑,等.高原运动效能降低及防治措施[J].中南大学学报(医学版),2023,48(10):1464-1478.
- [37] 王超臣,罗勇军.促进高原习服与提高高原作业能力措施研究进展[J].人民军医,2017,60(3):316-319.
- [38] 刘敏.援藏人员自我健康评价及运动干预研究[D].天津:天津体育学院,2022.
- [39] 高钰琪,黄庆愿,刘福玉,等.预缺氧复合锻炼改善新兵急进高原后的体力劳动能力[J].解放军预防医学杂志,2004,22(4):242-244.
- [40] 蒋春华,黄庆愿,高钰琪,等.预适应锻炼对急进高原新兵脑功能的保护作用[J].解放军预防医学杂志,2005,23(5):323-326.
- [41] 张珂,马璟茹,姚迎春,等.基于体适能的高海拔户外运动风险识别、预警及预防—基于系统综述和四姑娘山徒步登山实证研究[J].中国体育科技,2024,60(12):47-57.
- [42] 王超臣,罗勇军.呼吸训练防治高原病作用研究进展[J].人民军医,2017,60(5):515-517,532.
- [43] 高志君,赵珂,代萌,等.不同自主呼吸训练方法对区域性肺通气影响的对比研究[J].中国康复医学杂志,2024,39(5):634-640.
- [44] 何乾峰,田小溪,郝海水,等.呼吸训练对急性脑梗死病人肺功能的影响[J].护理研究,2021,35(2):316-318.
- [45] 张成孚.6个月腹式呼吸锻炼对老年人血压和肺功能的影响[J].中国运动医学杂志,2013,32(3):245.
- [46] 柳淑云,刘旭光.腹式呼吸对应激状态下微循环及心血管反应性的影响[J].中国老年学杂志,2018,38(24):5903-5905.
- [47] 彩虹,杨向柳,王素丹,等.功能性便秘合并糖尿病腹式呼吸改善的分析[J].糖尿病新世界,2015,3:136.
- [48] 吴彦敏,张文彩,阎克乐,等.腹式呼吸及渐进性放松条件下的胃电变化[J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(4):701-704.
- [49] 李博志,刘清源,张颖,等.腹式呼吸放松训练对高原移居人群血氧饱和度及主观睡眠质量的改善作用[J].中华保健医学杂志,2020,22(6):565-567.
- [50] 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 Alt Med Biol*, 2000, 1(1): 51-61.
- [51] 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.
- [52] Yang Y, Li W, Chen H, *et al.* Closed-loop respiratory intervention

- enhances sleep ventilation and oxygen saturation in healthy participants with rapid high-altitude exposure[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2025, 29(5): 3687-3697.
- [53] 邓琴. 模拟不同海拔夜间休息对高原习服人员血压、儿茶酚胺及RAAS的影响[D]. 遵义: 遵义医科大学, 2025.
- [54] 李理, 漆家学, 翟明明, 等. 高原富氧研究进展[J]. *医用气体工程*, 2018, 3(1): 36-38.
- [55] 李静杰, 颜泽栋, 李理, 等. 新型高原弥散富氧设备的研制及实地性能测试[J]. *医用气体工程*, 2018, 3(3): 12-16.
- [56] 冉庄, 陈郁, 谭超, 等. 基于新型住宿方舱的弥散供氧对移居高原人员生理学效应的影响[J]. *第三军医大学学报*, 2021, 43(8): 707-714.
- [57] Pecchio O, Martinelli M, Lupi G, *et al.* Acupuncture effects on cerebral blood flow during normoxia and normobaric hypoxia: results from a prospective crossover pilot study[J]. *Technologies*, 2021, 9(4): 102-116.
- [58] 樊奥. 针刺疗法用于调节急进高原人群血氧饱和度的应用研究[D]. 泸州: 西南医科大学, 2021.
- [59] 唐波, 杨华. 针刺联合点穴治疗对急进高原人群头痛程度、睡眠质量及氧化应激水平的影响[J]. *四川中医*, 2024, 42(10): 204-207.
- [60] Wang X, Wang G, Jia S, *et al.* Safety and efficacy of electrothumbtack needle for acute mountain sickness patients: a protocol of a randomized, single-blinded, and placebo-controlled study[J]. *BMC Complement Med Ther*, 2024, 24(1): 355.
- [61] 刘晓钰, 张彩玲, 李箫, 等. 经皮穴位电刺激对急进高原健康志愿者睡眠质量的影响[J]. *空军军医大学学报*, 2024, 45(11): 1267-1271.
- [62] 杨华, 唐波. 撤针疗法配合耳穴压籽对急进高原人群高原反应、胃肠应激反应及血清CRP水平的影响[J]. *四川中医*, 2025, 43(1): 198-202.
- [63] 张永刚, 马晓娟, 沈括, 等. 温和灸联合西药对急性高原肺水肿患者血红蛋白及动脉血气的影响[J]. *中国中医急症*, 2019, 28(11): 1973-1975.
- [64] 李阔, 宋秀平. 中国传统体育养生典籍阐释新论[J]. *成都体育学院学报*, 2025, 51(6): 121.
- [65] 李致潇, 李德俊. 中医运动养生功法在养生保健中的应用特征及其对外传播[J]. *时珍国医国药*, 2025, 36(3): 525-529.
- [66] Dong C, Liu R, Li R, *et al.* Effects of traditional chinese exercises on glycemic control in patients with type 2 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Sports Med*, 2024, 54(9): 2327-2355.
- [67] Siu PM, Yu DJ, Yu AP, *et al.* Tai chi or cognitive behavioural therapy for treating insomnia in middle aged and older adults: randomised non-inferiority trial[J]. *BMJ*, 2025, 391: e084320.
- [68] Li X, Chang P, Wu M, *et al.* Effect of tai chi vs aerobic exercise on blood pressure in patients with prehypertension: a randomized clinical trial[J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(2): e2354937.
- [69] Gao J, Chen K, Xie H, *et al.* Baduanjin exercise, with or without vitamin D, outperforms vitamin D alone in reducing frailty among institutionalized older adults: a cluster-based randomized controlled trial[J]. *Nutrients*, 2025, 17(23): 3795.
- [70] Li G, Huang P, Cui SS, *et al.* Mechanisms of motor symptom improvement by long-term tai chi training in parkinson's disease patients[J]. *Transl Neurodegener*, 2022, 11(1): 6.
- [71] 张平安, 虞定海. "高原健身增氧功"的健身作用与机理[J]. *上海体育学院学报*, 2016, 40(2): 51-55.
- [72] 莫非凡, 王鲁戒, 曾祥元, 等. 气功锻炼对人体微循环携氧功能影响的研究[J]. *中国病理生理杂志*, 1992, 5: 112-113.
- [73] 周焱. 膈肌导引联合穴位按压对高原人群的作用研究[D]. 北京: 解放军医学院, 2024.
- [74] 王新, 顾伟. 单兵功法在军事训练伤防治中的作用、地位与展望[J]. *海军军医大学学报*, 2026, 47(1): 126-131.
- [75] Azarfar G, Naimimohasses S, Rambhatla S, *et al.* Responsible adoption of multimodal artificial intelligence in health care: promises and challenges[J]. *Lancet Digit Health*, 2025, 7(12): 100917.
- [76] Chen Y, Zhang X, Ye Q, *et al.* Machine learning-based prediction model for myocardial ischemia under high altitude exposure: a cohort study[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 686.
- [77] Gesang L, Suona Y, Danzeng Z, *et al.* A machine learning-based severity stratification tool for high altitude pulmonary edema[J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2025, 25(1): 171.
- [78] Jorquera R, Droppelmann G, Blanco G, *et al.* Data-driven identification of metabolic and cardiovascular biomarkers in high-altitude workers: a machine learning approach[J]. *Front Public Health*, 2025, 13: 1652605.
- [79] Zhong J, Liu Y, Cheng X, *et al.* Gated recurrent unit network for psychological stress classification using electrocardiograms from wearable devices[J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8664.
- [80] Si Y, Zhang Y, Zhang X, *et al.* A finer-grained high altitude EEG dataset for hypoxia levels assessment[J]. *Sci Data*, 2024, 11(1): 1352.
- [81] 陈正举, 古秋梅, 王贵玉, 等. 智能可穿戴设备在高原心脑血管疾病中的应用研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39(2): 426-432.
- [82] 王慧泉, 马帅, 陈国盛, 等. 可穿戴设备在急性高原病辅助检测、诊断中的应用综述[J]. *医疗卫生装备*, 2025, 46(9): 100-107.
- [83] Ye X, Sun M, Yu S, *et al.* Smartwatch-based maximum oxygen consumption measurement for predicting acute mountain sickness: diagnostic accuracy evaluation study[J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2023, 11: e43340.
- [84] Zeng Z, Li L, Hu L, *et al.* Smartwatch measurement of blood oxygen saturation for predicting acute mountain sickness: diagnostic accuracy and reliability[J]. *Digit Health*, 2024, 10: 20552076241284910.
- [85] Wei CY, Chen PN, Lin SS, *et al.* Using machine learning to determine the correlation between physiological and environmental parameters and the induction of acute mountain sickness[J]. *BMC Bioinformatics*, 2022, 22(Suppl 5): 628.
- [86] Castiglioni P, Meriggi P, Di Rienzo M, *et al.* Heart rate variability from wearable photoplethysmography systems: implications in sleep studies at high altitude[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2891.
- [87] Hermand E, Lesaint L, Denis L, *et al.* A step test to evaluate the susceptibility to severe high-altitude illness in field conditions[J]. *High Alt Med Biol*, 2024, 25(3): 158-163.
- [88] Xu T, Li W, Zhang CY, *et al.* Extended lake louise score: a novel standard evaluation of cognitive impairment for immigrants' rapid ascent to high altitude[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2025, 67: 102907.
- [89] 李军茹, 贾守宁, 马春花, 等. 基于中医治未病思想探讨高原预适应平台的建立[J]. *中国民间疗法*, 2020, 28(22): 89-92.
- [90] Zhou S, Dong H, Huang P, *et al.* Changes in body composition during acute exposure to high altitude is related to acute mountain

- sickness[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2025, 64: 102815.
- [91] Cameron H, McDevitt M, Kayser B, *et al.* Risk determinants of acute mountain sickness in trekkers in the nepali himalaya: a 36-year follow-up[J]. *High Alt Med Biol*, 2026, 27(1): 17-22.
- [92] Sánchez K, Ramírez-Cando L, Machado W, *et al.* Mean corpuscular haemoglobin concentration (MCHC): a new biomarker for high-altitude pulmonary edema in the ecuadorian andes[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 20740.
- [93] Guo H, Wang Q, Li T, *et al.* IL-2, IL-17A and TNF- $\alpha$  hold potential as biomarkers for predicting acute mountain sickness prior to ascent[J]. *Cytokine*, 2024, 181: 156694.
- [94] Wang Y, Zhang Q, Wang K, *et al.* Supine bicycle stress echocardiography at low altitude for identification of susceptibility to acute mountain sickness[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2025, 38(3): 262-272.
- [95] Ke J, Yang J, Liu C, *et al.* A novel echocardiographic parameter to identify individuals susceptible to acute mountain sickness[J]. *Travel Med Infect Dis*, 2021, 44: 102166.
- [96] Xie Y, Yang D, Huang AS, *et al.* Retinal microvasculature is a potential biomarker for acute mountain sickness[J]. *Sci China Life Sci*, 2023, 66(6): 1290-1302.
- [97] Li S, Wang Y, Zhou W, *et al.* Comprehensive proteomics profiling reveals biomarkers of oxidative stress and membrane integrity in red blood cells in acute altitude sickness[J]. *ACS Omega*, 2025, 10(42): 49870-49886.
- [98] Sibomana I, Foose DP, Raymer ML, *et al.* Urinary metabolites as predictors of acute mountain sickness severity[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 709804.
- [99] 李佳, 李霞, 戚海兰, 等. 人工智能在急性高原病早期预警监测中的进展[J]. *中国心血管病研究*, 2026, 24(1): 84-90.
- [100] Wang B, Chen S, Song J, *et al.* Recent advances in predicting acute mountain sickness: from multidimensional cohort studies to cutting-edge model applications[J]. *Front Physiol*, 2024, 15: 1397280.
- [101] Shi D, Chen J, Li M, *et al.* Closing the loop: autonomous intelligent control for hypoxia pre-acclimatization and high-altitude health management[J]. *Natl Sci Rev*, 2025, 12(5): nwa071.
- [102] Aspiotis V, Miltioudou A, Kalafatakis K, *et al.* Assessing electroencephalography as a stress indicator: a VR high-altitude scenario monitored through EEG and ECG[J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5792.
- [103] Zhang W, Feng J, Liu W, *et al.* Investigating sea-level brain predictors for acute mountain sickness: a multimodal MRI study before and after high-altitude exposure[J]. *Am J Neuroradiol*, 2024, 45(6): 809-818.
- [104] Li S, Lyu Q, Shi Q, *et al.* Intermittent short-duration reoxygenation relieves high-altitude pulmonary hypertension via NOX4/H2O2/PPAR- $\gamma$  axis[J]. *Clin Sci (Lond)*, 2024, 138(3): 103-115.
- [105] Huang H, Ruan Y, Li C, *et al.* Hypoxia microenvironment preconditioning attenuated myocardial ischemia-reperfusion injury via Stc1-mediated cardiomyocyte self-protection and neutrophil polarization[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2025, 12(6): e2411880.
- [106] Lieder HR, Paket U, Skyschally A, *et al.* Vago-splenic signal transduction of cardioprotection in humans[J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(34): 3164-3177.
- [107] Liu Y, Gu Y, Jin F, *et al.* Intermittent hypoxia preconditioning protects against ischemic brain injury in mice via a PF4-dependent paracrine mechanism[J]. *Stroke*, 2026, 57(4).
- [108] Qiu M, Zhang W, Dai J, *et al.* A20 negatively regulates necroptosis-induced microglia/macrophages polarization and mediates cerebral ischemic tolerance via inhibiting the ubiquitination of RIP3[J]. *Cell Death Dis*, 2024, 15(12): 904.
- [109] Qin L, Yang Y, Zhang H, *et al.* Hypoxic preconditioning mitigates acute hypoxia induced MS/VDB cholinergic cell loss and memory impairments[J]. *Aging Dis*, 2025, 17(2): 1111-1130.
- [110] Liu G, Li Y, Liao N, *et al.* Energy metabolic mechanisms for high altitude sickness: downregulation of glycolysis and upregulation of the lactic acid/amino acid-pyruvate-TCA pathways and fatty acid oxidation[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 894: 164998.
- [111] Han R, Yang X, Ji X, *et al.* Remote ischemic preconditioning prevents high-altitude cerebral edema by enhancing glucose metabolic reprogramming[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(9): e70026.
- [112] Li L, Liu Y, Zhi N, *et al.* Hypoxic preconditioning accelerates the healing of ischemic intestinal injury by activating HIF-1 $\alpha$ /PPAR $\alpha$  pathway-mediated fatty acid oxidation[J]. *Cell Death Discov*, 2024, 10(1): 164.
- [113] Song K, Ling H, Wang L, *et al.* *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* alleviates acute injury in hypoxic mice[J]. *Nutrients*, 2024, 16(10): 1465.
- [114] Su Q, Zhuang DH, Li YC, *et al.* Gut microbiota contributes to high-altitude hypoxia acclimatization of human populations[J]. *Genome Biol*, 2024, 25(1): 232.
- [115] Li G, Wang B, Fan S, *et al.* The effect of acupuncture combined with hyperbaric oxygenation compared with hyperbaric oxygenation alone for patients with traumatic brain injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Neurol*, 2025, 16: 1538740.
- [116] 冯宝静, 宋国亮, 张天麟, 等. 头针联合高压氧治疗高血压脑出血临床疗效及对患者脑水肿、认知功能的影响[J]. *河北中医*, 2020, 42(2): 264-269.
- [117] Wu D, Cao W, Xiang D, *et al.* Exercise induces tissue hypoxia and HIF-1 $\alpha$  redistribution in the small intestine[J]. *J Sport Health Sci*, 2020, 9(1): 82-89.
- [118] 李晓方, 杜可, 滕岱青, 等. 国际荒野医学协会关于急性高原病预防和治疗循证指南的演变历程及对高原卫勤保障的启示[J]. *军事医学*, 2024, 48(12): 918-925.
- [119] 解放军总医院第六医学中心, 西部战区总医院. 高压氧防治高原病专家共识[J]. *中华航海医学与高气压医学杂志*, 2025, 32(4): 325-331.
- [120] 老年疾病国家临床医学研究中心(解放军总医院), 中国老年保健医学研究会老年心血管病分会, 中国老年学和老年医学学会呼吸与危重症医学分会, 等. 高原地区心肺运动试验应用专家共识[J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2026, 28(1): 32-41.
- [121] 祁生贵, 姚蓓, 张旭东, 等. 进入高原地区健康体检规范专家共识[J]. *健康体检与管理*, 2025, 6(2): 121-132.
- [122] 普布卓玛, 陈文劲, 张恒, 等. 京藏神经重症监测管理专家共识(2025)[J]. *协和医学杂志*, 2026, 17(1): 59-72.
- [123] 普布卓玛, 陈焕, 陈文劲, 等. 高原神经重症患者监测管理专家共识[J]. *协和医学杂志*, 2022, 13(1): 24-38.

(责任编辑: 纪方方)