

7500 米缺氧体验训练对航空人员耐受能力的观察

米喜梅

联勤保障部队临潼康复疗养中心 陕西西安

【摘要】本文以航空生理学为理论基础，通过分析 7500 米缺氧体验训练中航空人员的生理指标变化与耐受表现，探讨该训练对提升机体缺氧代偿能力的作用机制。研究聚焦训练过程中心率（HR）、动脉血氧饱和度（SaO₂）、布兰奇心功能指数（BI）等核心指标的动态特征，结合神经-体液调节机制，阐述训练对心血管系统、呼吸系统及中枢神经系统耐受阈值的影响。结果表明，科学规范的 7500 米缺氧体验训练可通过机体代偿适应性变化，降低 HR 与 SaO₂ 的波动幅度，提升 BI 指标稳定性，其中歼击机飞行员耐受表现优于轰炸机及运输机飞行员。研究结论为优化航空人员缺氧训练方案、建立个性化耐受评估体系提供科学依据，对强化飞行安全保障具有实践价值。

【关键词】7500 米缺氧训练；航空人员；耐受能力

【收稿日期】2026 年 2 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 30 日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260007

Observation of hypoxic experience training at 7500-meter on aviation personnel's tolerance capacity

Ximei Mi

Lintong Rehabilitation and Sanatorium Center of the Joint Logistic, Xi'an, Shaanxi

【Abstract】This study is based on the theoretical foundation of aviation physiology. By analyzing the physiological index changes and tolerance performance of aviation personnel during 7,500-meter hypoxia experience training, it explores the mechanism by which such training enhances the body's hypoxic compensatory capacity. The research focuses on the dynamic characteristics of core indicators during the training process, including heart rate (HR), arterial oxygen saturation (SaO₂), and Brachial Index (BI), combined with neuro-humoral regulatory mechanisms to elucidate the effects of training on the tolerance thresholds of the cardiovascular system, respiratory system, and central nervous system. The results demonstrate that scientifically standardized 7,500-meter hypoxia experience training can reduce the fluctuation amplitude of HR and SaO₂ through compensatory adaptive changes in the body, while improving the stability of BI indicators. Notably, fighter pilots exhibited superior tolerance performance compared to bomber and transport aircraft pilots. The conclusions provide a scientific basis for optimizing hypoxia training protocols for aviation personnel and establishing personalized tolerance assessment systems, offering practical value for enhancing flight safety.

【Keywords】7500-meter hypoxia training; Aviation personnel; Tolerance capability

引言

航空飞行环境中，低压缺氧是威胁航空人员生命安全的核心风险因素之一。随着飞行高度提升，大气压力呈指数下降，7500 米高度的肺泡氧分压仅为海平面的 50% 以下，远超人体生理代偿极限^[1]。在此环境下，未经训练的航空人员会在 3-5 分钟内出现头痛、视野缩小、判断力下降等症状，严重时可迅速发展为意识丧失，而战时或特情状态下的供氧系

统故障更会压缩应急处置时间。数据显示，全球航空事故中约 12% 与缺氧导致的操作失误直接相关，其中 7500 米以上高度的突发缺氧事故致死率高达 85%^[2]。当前，低压缺氧舱模拟训练已成为航空人员必备培训内容，但针对 7500 米这一临界危险高度的专项训练研究仍显不足，尤其缺乏对不同机型航空人员耐受差异的系统分析。基于此，本文通过观察 7500 米缺氧体验训练中航空人员的生理响应与耐受

表现, 揭示训练对提升缺氧适应能力的内在规律, 为完善航空医学训练体系、降低高空缺氧风险提供理论与实践支撑, 这也是航空生理学在飞行安全保障领域的重要应用方向。

1 7500 米缺氧体验训练的核心机制与实施规范

1.1 7500 米高空缺氧环境的生理作用特征

7500 米高空的独特环境决定了其对人体的特殊生理影响, 核心特征体现为氧供不足引发的连锁生理反应。从气体交换机制来看, 该高度大气氧分压降至 8.5kPa 以下, 导致人体肺换气效率显著下降, 血红蛋白与氧气的结合能力减弱, 同时已结合的氧气难以有效释放至组织细胞, 形成“结合难、释放难”的双重困境。这种缺氧状态首先作用于代谢旺盛的中枢神经系统, 由于大脑对缺氧的耐受阈值最低, 其耗氧量占全身总耗氧量的 20%, 却无能量储备功能, 缺氧 30 秒即可出现脑电活动异常, 表现为注意力难以集中、反应速度下降 2-3 倍。心血管系统会启动代偿机制, 通过加快心率、增加心输出量弥补氧供不足, 此时心率通常较海平面升高 30%-50%, 但这种代偿会导致心肌耗氧量同步增加, 形成“代偿性损伤”风险^[4]。这种环境特征决定了 7500 米缺氧训练必须以精准模拟生理刺激为核心, 才能实现提升耐受能力的训练目标。

1.2 缺氧体验训练的阶梯式实施逻辑

7500 米缺氧体验训练并非直接暴露于目标高度, 而是遵循“阶梯适应、循序渐进”的实施逻辑, 这一模式源于高原习服的生理机制, 即通过逐步提升缺氧强度, 激活机体神经-体液调节系统的代偿功能。训练通常以 2500 米为起始高度, 此高度缺氧程度较轻, 仅引发轻微的呼吸频率加快, 可作为机体适应的“基础阈值”。随后以 500 米为阶梯差逐步升高, 在 3000 米、3500 米等高度分别停留 1-3 天, 每天训练 2 小时, 让心血管系统与呼吸系统建立初步代偿机制, 如红细胞比容轻微升高、呼吸中枢敏感性增强等。当训练高度升至 5000 米后, 会增加间歇运动负荷, 通过跑步机等设备让航空人员在缺氧状态下完成轻度运动, 进一步提升心功能储备^[4]。到达 7500 米目标高度后, 训练分为静息与运动两个阶段: 静息阶段持续 60 分钟, 观察基础生理指标稳定性; 运动阶段则以最大摄氧量的 30%为负荷, 持续 5 分钟后休息 10 分钟, 循环 3-4 组, 模拟飞行中的操作负荷。这种阶梯式设计既避免了突发缺氧导致的急性

损伤, 又能让机体在“刺激-适应-再刺激”的循环中逐步提升耐受阈值, 符合航空医学训练的安全性与有效性原则。

1.3 训练中的关键生理监测指标体系

7500 米缺氧体验训练的监测核心是建立“多维度、实时化”的生理指标体系, 通过动态数据捕捉机体耐受状态, 为训练安全与效果评估提供依据。核心监测指标包括三类: 一是氧供与氧耗指标, 以动脉血氧饱和度 (SaO_2) 为核心, 正常海平面 SaO_2 通常在 95%-100%, 7500 米静息状态下训练合格者可维持在 75%-80%, 若低于 70%则需立即终止训练; 同时结合血氧分压 (PaO_2) 监测, 评估肺换气功能^[5]。二是心血管功能指标, 涵盖心率 (HR)、平均动脉压 (MAP) 及布兰奇心功能指数 (BI), HR 波动幅度 (HRSD) 与 BI 稳定性是关键评估依据, 歼击机飞行员在 7500 米训练中 HRSD 通常控制在 10 次/分钟以内, 而运输机飞行员波动较大; BI 指标超过 200 则提示心功能代偿过度, 需调整训练强度^[6]。三是神经功能主观评估指标, 通过标准化量表记录航空人员的头痛程度、视物清晰度、动作协调性等主观感受, 与客观指标形成互补。监测设备采用舱内嵌入式传感器与便携式监测仪结合的方式, SaO_2 与 HR 数据每 5 秒采集一次, BI 指标每 1 分钟计算一次, 异常数据触发声光报警。这套指标体系既满足了训练安全的实时预警需求, 又为后续的耐受能力评估提供了量化依据。

2 缺氧训练对航空人员耐受能力的多系统影响

2.1 心血管系统耐受阈值的提升机制

7500 米缺氧体验训练对心血管系统的核心影响是通过适应性变化提升耐受阈值, 其机制体现为代偿功能优化与应激反应稳定化。训练初期, 机体通过交感神经兴奋引发心率加快、心肌收缩力增强等代偿反应, 此时 HRSD 与 MAP 波动较大, 部分运输机飞行员的 HRSD 可达 16 次/分钟以上。随着训练次数增加, 心血管系统逐渐建立“高效代偿”模式, 表现为 HR 增幅下降但心输出量维持稳定, 这源于心肌细胞线粒体数量增加与有氧代谢酶活性提升, 使单位心肌收缩的氧利用率提高 20%-30%^[7]。同时, 训练可增强血管内皮功能, 改善外周血管阻力调节能力, 避免缺氧导致的血管痉挛, 使 MAP 在缺氧状态下的波动幅度控制在 10mmHg 以内。布兰奇心功能指数 (BI) 的变化最能体现耐受提升效果,

训练前部分轰炸机飞行员在 7500 米缺氧 3 分钟后 BI 超过 200, 提示心功能代偿过度, 而经过 14 天系统训练后, 该指标可降至 180 以下, 且稳定性显著提升。这种变化本质是机体通过神经-体液调节重塑心血管功能稳态, 使心血管系统在缺氧环境下从“被动应激”转向“主动适应”, 从而提升耐受阈值。

2.2 呼吸系统的缺氧适应与功能优化

呼吸系统是机体应对缺氧的第一道防线, 7500 米缺氧体验训练通过激活呼吸中枢适应性及肺功能代偿, 实现耐受能力提升。训练初期, 缺氧刺激颈动脉体化学感受器, 引发呼吸频率加快与潮气量增加, 此时呼吸频率可从海平面的 12-16 次/分钟升至 25-30 次/分钟, 但这种浅快呼吸模式的气体交换效率较低, 易导致呼吸肌疲劳。随着训练进展, 呼吸中枢对缺氧的敏感性阈值降低, 呼吸模式转变为“深慢呼吸”, 潮气量增加 40%以上, 呼吸频率维持在 18-22 次/分钟, 使肺泡通气量提升 35%, 有效改善肺换气效率。同时, 训练可促进肺组织毛细血管增生, 增加肺泡表面积与气体交换面积, 使单位时间内的氧弥散量提高 25%左右。从 SaO₂指标变化来看, 训练前航空人员在 7500 米缺氧 3 分钟后 SaO₂平均降至 72%, 而训练后可维持在 78%以上, 且下降速率明显减缓, 其中轰炸机飞行员的 SaO₂稳定性提升最为显著, SD 值从 5.27 降至 3.89。此外, 训练还能增强呼吸肌的耐力, 减少长时间缺氧导致的胸闷、气促等症状, 使呼吸系统在缺氧环境下的功能维持时间延长至训练前的 2 倍以上, 为应急处置提供充足时间窗口^[8]。

2.3 中枢神经系统的耐受能力强化效应

中枢神经系统对缺氧最为敏感, 7500 米缺氧体验训练通过改善脑氧供、增强神经细胞抗缺氧能力, 实现耐受能力的核心强化。大脑皮层的前额叶与运动皮层是训练的主要作用区域, 缺氧状态下这两个区域的脑电活动(α波与β波)变化直接反映认知与运动功能状态。训练前, 航空人员在 7500 米缺氧 1 分钟后即出现α波幅降低、β波频率紊乱, 表现为注意力分散、动作协调性下降; 经过系统训练后, 相同条件下脑电活动异常出现时间延迟至 3 分钟以上, 且恢复速度提升 50%。这一变化源于训练促进脑血管舒缩功能优化, 缺氧时脑血管可通过主动扩张增加脑血流量 15%-20%, 同时血脑屏障的氧转运效率提升, 使脑组织氧供维持在临界阈值以上。此外, 训练可上调神经细胞内的抗凋亡蛋白表达, 减少缺氧

导致的神经细胞损伤, 增强突触传递效率, 使缺氧状态下的反应时间缩短 18%-22%。从行为学表现来看, 训练后航空人员在 7500 米缺氧环境下的数字记忆测试成绩提升 30%, 模拟操作失误率下降 45%, 其中歼击机飞行员的神经功能耐受表现最优, 这与他们长期接受高应激训练形成的神经适应性密切相关。

3 总结

7500 米缺氧体验训练作为提升航空人员耐受能力的核心手段, 其价值在于通过科学模拟临界危险高度的缺氧环境, 激活机体的代偿适应性变化, 实现多系统耐受阈值的协同提升。本文通过对训练机制与生理影响的系统分析, 明确了 7500 米缺氧环境的生理作用特征, 揭示了阶梯式训练模式的科学依据, 证实了该训练对心血管、呼吸及中枢神经系统耐受能力的强化效应。研究发现, 不同机型航空人员的耐受表现存在显著差异, 歼击机飞行员因基础训练优势, 在 HRSD、SaO₂稳定性及 BI 指标上均优于轰炸机与运输机飞行员, 这为差异化训练设计提供了关键依据。同时, 布兰奇心功能指数与心率标准差可作为评估训练效果的核心量化指标, 其变化规律能精准反映机体耐受能力的提升程度。当前训练中仍需关注年龄、飞行时间等个体因素对耐受表现的影响, 进一步优化个性化训练方案。

参考文献

- [1] 刘峰舟,李亚娟,万群,等.飞行人员频发早搏治愈后在低压缺氧环境下的心血管功能评价研究[J].心脏杂志,2024,36(4):427-432.
- [2] 全军航空航天医学专业委员会.军事飞行人员鼻窦气压功能训练方法与评定指南(2022)[J].解放军医学院学报,2022,43(12):1233-1236,1247.
- [3] 黄炜,何琳,李雪,等.军事飞行人员缺氧耐力评定及缺氧主观症状观察[J].空军航空医学,2021(2):98-101.
- [4] 周清,宋新亮.17 例军事飞行人员缺氧体验训练初训不合格及复训结果分析[J].中华航空航天医学杂志,2021,32(2):2.
- [5] 李晶,陈飞,周家珍,等.不同急性缺氧耐力军事飞行人员血常规参数差异统计分析[J].空军航空医学,2021(2):102-105.

- [6] 周家珍,陈飞,陈安文,等.5 种机型军事飞行人员急性缺氧耐力情况统计分析[J].海军医学杂志,2023,44(7):653-656.
- [7] 江涛,殷娇,赵茜,等.飞行人员航空生理训练的认知调查和影响因素分析[J].空军航空医学,2023,40(6):490-494.
- [8] 米喜梅,王晓慧,耿艳,王丹,郑桥桥,杜蕾,宋新亮.

433 名军事飞行人员缺氧体验训练结果分析[J]. 空军航空医学, 2023, 40 (4): 302-306.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS