沙漠干热环境下骨骼肌损伤诊疗质量控制研究

赵 娜[1,2]，惠华强[1,2]

1 新疆医科大学 公共卫生学院，新疆 乌鲁木齐 830017；2 新疆军区总医院 荒漠医学实验室，新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：沙漠干热环境改变骨骼肌损伤的病理生理过程，增加诊疗难度与并发症风险。本文通过检索知网、维普、PubMed及Web of Science数据库2004年1月—2026年2月干热环境与骨骼肌损伤诊疗相关文献，系统分析沙漠干热环境下骨骼肌损伤的独特机制、临床表现与治疗挑战，明确质量控制目标与原则，以结构质量、过程质量及结果质量为核心，结合先进技术，构建覆盖预防预警、现场识别急救、院内评估诊断、治疗干预、康复随访全流程的质量控制体系，以期为极端环境下骨骼肌损伤的安全高效诊疗提供参考。

关键词：沙漠干热环境；骨骼肌损伤；质量控制；诊疗

中图分类号：R12；R873 **文献标识码：**A DOI：10.13885/j.issn.2097-681X.T20260012

Research on quality control of diagnosis and treatment of skeletal muscle injury in hot and dry desert environment

ZHAO Na[1,2], HUI Huaqiang[1,2]

1 School of Public Health, Xinjiang Medical University, Urumqi 830017, China; 2 Desert Medicine Laboratory, General Hospital of Xinjiang Military Command, Urumqi 830000, China

Abstract: The hot and dry desert environment alters the pathophysiological process of skeletal muscle injury, increasing the difficulty of diagnosis and treatment as well as the risk of complications. This article retrieved relevant literatures on the diagnosis and treatment of skeletal muscle injury in the dry and hot environment from January 2004 to February 2026 in the databases of CNKI, VIP, PubMed and Web of Science, systematically analyzed the unique mechanism, clinical manifestations and challenges of skeletal muscle injury, and clarified the goals and principles of quality control. Taking structural quality, process quality and outcome quality as the core dimensions, and combining advanced technologies, a quality control system covering the entire process of prevention and early warning, on-site identification and first aid, in-hospital assessment and diagnosis, treatment and intervention, rehabilitation and follow-up was constructed, with the aim of providing a reference for the safe and efficient diagnosis and treatment of skeletal muscle injuries in extreme environments.

Keywords: hot and dry desert environment; skeletal muscle injury; quality control; diagnosis and treatment

《中国气候变化蓝皮书（2024）》中指出，全球变暖导致极端高温事件频发[1]。中国干旱区面积广阔，集中在西北沙漠戈壁，是资源开发与国防建设的关键区域，夏季呈现极端高温、少雨、强辐射和昼夜温差大等特点，在此环境下进行高强度作业或训练，机体面临严峻热应激挑战，骨骼肌作为运动与产热的器官，损伤风险显著升高[2]。

收稿日期：2026-01-28 **修回日期：**2026-02-08 **接受日期：**2026-02-18

基金项目：新疆维吾尔自治区区域协同创新专项资助项目（2022E02121）

作者简介：惠华强，男，副主任医师，研究方向为公共卫生与预防医学/医院管理学，e-mail：xjykdxhhq@xjmu.edu.cn，通信作者

沙漠干热环境对骨骼肌损伤的影响特殊而复杂，诊疗面临诸多挑战。脱水与电解质紊乱降低肌肉血流与抗损伤能力，高温加速肌细胞代谢、能量耗竭并导致钙稳态失衡，双重作用下损伤易感性升高[3]；同时诱发炎症与氧化应激，加快并加重肌损伤，使横纹肌溶解症（rhabdomyolysis, RM）的发生率与严重程度上升，急性肾损伤（acute kidney injury, AKI）、弥散性血管内凝血（disseminated intravascular coagulation, DIC）等并发症的发生风险增加[4-5]。另外，恶劣的环境导致现场识别与初步诊断困难，肌肉损伤症状易被中暑及热射病等掩盖，野外缺乏快速检测设备，肌酸激酶（creatine kinase, CK）等关键指标难以实时检测[6]；院前降温、液体复苏等急救措施受物资短缺、转运条件差等限制，难以规范实施，样本运输耗时长导致实验室检查滞后、结果受高温干扰；后期持续性干热状态会延缓肌肉修复、提升再损伤风险，加上偏远地区康复资源不足、多学科协作不畅，严重制约了患者的功能恢复。

当前骨骼肌损伤研究处于碎片化和初步探索阶段，主要围绕病理机制、诊断标志物、治疗干预及环境适应性展开。国际上，美国在热应激相关肌肉损伤领域研究领先，通过被动热应激模型系统评估了神经肌肉功能与基因信号通路的变化[7]；DUNN等[8]聚焦高温环境下士兵的肌肉功能维持与损伤预防，发现高温下肌肉损伤性运动可以降低后续热暴露时的细胞应激水平；构建了热环境肌肉损伤的预防、现场快速诊断及阶梯救治体系[9]。以色列在半干旱地区训练冻伤防治领域经验丰富[10]。日本研究团队[11]聚焦慢性热应激对小鼠骨骼肌线粒体呼吸功能的影响，提供了重要的动物实验数据。但上述研究均未限定“沙漠干热”这一特定环境，也未建立相应的诊疗质控框架。在国内，已有学者开始关注特殊环境下的骨骼肌损伤问题。武堂晓等[4]利用西北特殊环境人工实验舱模拟沙漠干热环境，成功构建了大鼠骨骼肌损伤模型并筛选评价指标，这标志着国内在环境特异性建模方面迈出了关键一步。同时，在治疗策略探索方面，国内研究呈现多元化趋势：没食子酸、姜黄素、大麻二酚等药物及径向体外冲击波等物理治疗对骨骼肌损伤具有保护作用[12-15]；训练伤防治策略逐步完善[6]。但是，由于对沙漠干热环境骨骼肌损伤的系统性研究，尤其全程质量控制体系构建相对薄弱，缺乏统一的操作规范与质控标准，基层执行存在差异。

因此，建立一套针对沙漠干热环境下骨骼肌损伤的标准化、规范化诊疗流程，并实施严格的质量控制，对提升救治成功率、降低伤残率、保障人员健康与任务完成意义重大。

1　沙漠干热环境对骨骼肌损伤的影响

1.1　环境特点及其生理病理效应

沙漠干热环境具有高温、低湿度、强辐射等特点，对人体健康产生系统性影响，而骨骼肌作为“环境–机体”交互的前沿器官，其响应机制尤为突出[4]。生理层面，当湿球黑球温度（wet bulb globe temperature, WBGT）指数≥32 °C时，人体皮肤辐射、传导、对流散热受阻，仅靠汗液蒸发散热[16]。大量出汗易引发脱水与电解质紊乱，改变肌肉兴奋性，升高骨骼肌损伤风险[3]。心血管系统因皮肤血管扩张、血容量减少，血液碱储备和pH降低，引发代谢性酸中毒，当失水量大于体重的2%时心率显著加快，达3%～4%易发生中暑，肌肉血液灌注减少，抗损伤能力下降[17]。免疫系统因高温影响，T/B淋巴细胞与巨噬细胞功能被抑制，强紫外线加剧肌细胞膜脂质过氧化，炎症因子大量释放，氧化应激水平显著升高，RM与AKI等发生风险增加[18]。受高温影响，神经传导速度减慢、神经递质分泌异常，疲劳、注意力下降、反应迟钝，在进行高强度作业或训练时，动作控制能力下降，骨骼肌损伤的发生风险增加；高温导致神经元兴奋性异常、突触传递效率下降以及下丘脑体温调节中枢功能紊乱，削弱大脑对骨骼肌运动单位的精确募集与协调控制能力，诱发继发性肌肉损伤[18]。骨骼肌细胞层面，高温加速肌细胞代谢，能量消耗大幅提升，在脱水与电解质紊乱导致的肌肉血流与氧供不足情况下，极易引发能量耗竭[19]；热应激导致细胞内钙稳态失衡，肌浆网对钙离子的摄取与释放异常，过多钙离子涌入细胞质，激活蛋白水解酶和磷脂酶，破坏肌纤维结构；短期热应激触发强烈氧化应激并激活细胞凋亡信号通路[2]；持续热暴露导致自噬功能异常时，受损线粒体等细胞器无法及时清除，加剧细胞损伤，降低运动能力和抗损伤性能。

1.2 骨骼肌损伤的常见类型与沙漠环境下的特殊性

沙漠环境下的骨骼肌损伤类型独特，包括肌肉拉伤或撕裂、延迟性肌肉酸痛、肌肉痉挛以及劳力性热相关肌肉损伤与RM，风险与表现和普通环境有显著差异。肌肉拉伤或者撕裂的发生风险较普通环境显著升高，高温下肌肉弹性和协调性下降，脱水降低结缔组织韧性，抗拉伸能力下降，损伤风险增加，且职业紧张程度高的人群肌肉拉伤的发生率高于职业紧张程度低的人群[4,20]。延迟性肌肉酸痛的程度更剧烈，持续时间更长，恢复更慢，可能是干热环境破坏了身体的内环境稳定，增加炎症介质释放并抑制修复进程[4]。肌肉痉挛极为常见，沙漠环境下运动时大量出汗会导致电解质失衡，神经肌肉兴奋性异常增高，引发肌肉痉挛且不易缓解，通常被视为劳力性热射病（exertional heat stroke, EHS）的前驱表现[18]。EHS相关肌肉损伤与RM最严重，二者常并存，具有起病急、CK值骤升、肌红蛋白尿及AKI风险高等特点；适应性训练与补水不足、过度负重、忽视早期症状是诱因[21-22]。

2 沙漠干热环境下骨骼肌损伤诊疗的质量控制体系构建

质量控制的核心是通过标准化流程、明确责任、动态监测与持续改进，确保诊疗活动安全、有效、及时、规范。本体系以“结构-过程-结果”三维质量为模型，以提高早期识别率、降低并发症的发生率和降低伤残率为目标，以患者为核心，以预防为主、多学科协作为原则，构建包括预防与预警、现场识别与急救、院内评估与诊断、治疗与干预以及康复与随访的全流程质量控制体系，整个体系的结构如图1所示。

2.1 关键环节质量控制点与标准

2.1.1 预防与预警

预防与预警环节的质控点包括热适应训练执行率、水盐补给方案落实、环境风险监测与预警发布、人员健康筛查与风险评估。热适应训练通过神经、内分泌和代谢等多系统的适应性调节，提高机体的耐热能力，增强心血管系统和体温调节系统的稳定性，降低热相关疾病发生率[6]。合理的水盐补给能维持水盐平衡，缓解肌肉力量和耐力，保障肌肉正常生理功能[23]。实时的环境监测可为风险评估提供依据[24]，当前针对沙漠干热环境的暴露评估方法包括三类：一是实时监测法，即动态采集作业环境温度等参数，结合个体活动强度计算热应激指数[16]；二是个体暴露模型法，即基于“环境参数-活动时长-生理指标”三维数据，构建个体骨骼肌损伤风险预测模型，如通过心率变异性与CK水平关联分析，实现损伤风险分级预警[25]；三是回顾性评估法，即通过收集作业人员既往暴露史、症状发生时间线及环境气象记录，追溯损伤的环境诱因，如KJELLSTROM等[26]运用环境暴露—反应关系模型，通过对不同WBGT指数下人群骨骼肌损伤发生率的监测分

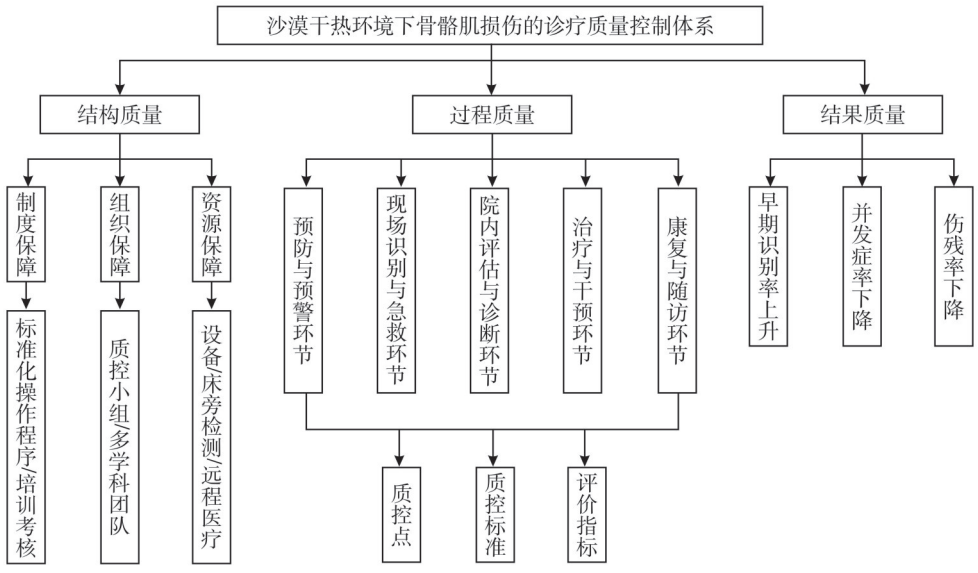


图1 沙漠干热环境下骨骼肌损伤的诊疗质量控制体系结构图

析，得出当WBGT指数超过32 °C时，骨骼肌损伤风险呈指数级上升的结论，为预警阈值的设定提供了科学依据。在预警分级方面，可划分为三个级别，一级预警（WBGT指数28～31°C）：应加强环境监测频率，适当调整作业强度；二级预警（WBGT指数32～34°C）：需缩短单次作业时间，增加休息频次；三级预警（WBGT指数≥35°C）：需立即停止户外作业，启动紧急医疗救援预案，全面筛查人员既往史，精准识别高危人群并对其实施“一人一策”专项防护方案[16]。

质控标准包括进入沙漠完成7～14 d渐进负荷的规定周期热适应训练、制定并严格执行个体化的定时定量水盐补充方案、实时监测WBGT指数并建立分级预警机制、全面筛查高危个体。

评价指标包括热相关疾病的发生率趋近于零；脱水发生率可通过尿比重（urine specific gravity, USG）评估：USG≥1.020提示轻度脱水，≥1.030提示显著脱水，因此预估目标应为训练前USG<1.020；预警响应时间≤5 min及执行符合率≥95%[27]。

2.1.2　现场识别与急救

现场识别与急救环节的质控点包括症状识别能力、快速降温启动时间与效果、液体复苏启动时间与用量、初步处理规范性、转运决策及时性、信息传递完整性。

质控标准包括识别、降温、液体复苏、初步处理、转运以及信息传递等多方面。培训一线人员掌握严重肌痛、无力、痉挛、意识改变、酱油色尿等肌肉损伤的核心症状，遵循“黄金30 min”原则，在怀疑中暑或严重RM时立即启动降温，30 min内核心体温降至39°C以下，首选冷水浸泡或湿衣扇风，次选大血管处冰敷，单次冰袋放置时间不应超过30 min，冰敷时应监测局部肤色变化，以避免冻伤[27]，如有条件可持续监测体温。清醒、无呕吐者需立即口服含钠电解质溶液，为疑似EHS合并RM或意识障碍者建立静脉通路，快速输注生理盐水并根据反应调整，维持尿量>200 mL/h，同时重点观察意识、皮肤状态。停止活动，疑似严重拉伤或者撕裂时制动患肢，避免使用非甾体抗炎药，以免增加AKI风险。对EHS、严重RM、无法口服补液、意识障碍、持续肌痛或者痉挛者，立即后送，确保转运途中持续降温、补液和监护，并向接收单位完整传递患者关键信息。

评价指标包括现场识别正确率≥95%、降温启动时间<5 min、核心体温达标率≥80%、静脉通路建立时间≤10 min、转运决策时间≤15 min、信息传递完整率达100%，以评估现场急救的效果。

2.1.3　院内评估与诊断环节

院内评估与诊断环节的质控点包括快速分诊、病史采集完整性、体格检查规范性、关键实验室检查及时性与准确性、影像学检查指征的把握与结果判读、EHS合并RM早期诊断率。

质控标准包括分诊、病史、查体、实验室检查、影像学以及诊断标准等方面。疑似EHS合并RM者优先进入抢救室，详细记录既往史，全面评估各体征，重点评估有无EHS三联征及RM表现。入院1 h内完成CK、肌红蛋白、电解质等检测，对初始CK极高或疑似进展者进行动态监测，每4～6 h复查CK至峰值下降。另外，还要进行肾功能和电解质的复查，并立即查尿液分析，若尿常规结果显示潜血强阳性但镜检无红细胞，则提示肌红蛋白尿，有条件时可检测尿肌红蛋白并记录尿量。影像学检查包括超声和磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）检查，超声检查需操作规范，报告准确描述损伤部位、范围、性质，快速评估肌肉结构、筋膜室压力以及血管情况；MRI检查是金标准，应严格把握如疑似严重结构性损伤或常规检查无法明确的指征，评估软组织损伤程度、范围，明确诊断复杂拉伤、撕裂及骨挫伤[28]，及时完成并由资深放射科医生审核。另外，需应用统一标准诊断，如RM：CK>1 000 U/L或>5倍健康人群高限，伴肌痛、无力或者酱油色尿；EHS：暴露于热环境/高强度运动+核心体温>40°C+多器官功能损伤+中枢神经系统功能障碍+ DIC[27]。

评价指标包括分诊时间低于5 min率≥90%、关键实验室检查完成时间低于1 h率≥95%、肌红蛋白尿检出率为100%、EHS合并RM确诊时间≤2 h、影像学检查指征符合率≥95%、误诊或漏诊率≤5%[21, 27]。

2.1.4　治疗与干预环节

治疗干预环节的质控点包括容量管理方案执行与调整、并发症防治措施落实、专科会诊及时

性、有创操作指征与时机、镇痛镇静管理以及营养支持。

质控标准包括容量复苏、碱化尿液、利尿剂的使用、并发症防治、专科协作以及其他治疗方面。容量复苏首选输含钠液体，可在补液的同时补充流失的盐分，维持充足尿量[27]。CK极高或持续升高者积极扩容，除非明确低钾，否则避免使用含钾液体。对于CK极高或肌红蛋白尿、尿pH<6.5的患者需碱化尿液，目标为尿pH值为6.5~7.0，减少肌红蛋白管型形成[29]。利尿剂仅用于充分扩容后仍少尿且排除肾性因素。重点防治AKI、高钾血症、DIC、筋膜室综合征等并发症，AKI按改善全球肾病预后组织（Kidney Disease: Improving Global Outcomes, KDIGO）标准及时启动肾替代治疗（renal replace ment therapy, RRT）。高钾血症需紧急处理，48 h内频繁监测。密切监测凝血功能，及时补充凝血因子、血小板，预防DIC。筋膜室综合征要高度警惕，筋膜室压力>30 mmHg或进行性增高，需紧急筋膜切开减压。开展专科协作，重症医学的EHS合并RM、多器官功能障碍者需尽早转入重症监护室，肾内科的AKI患者应早期介入，骨科或血管外科的疑筋膜室综合征、大血管损伤、严重肌肉断裂需手术者及时干预，同时做好镇痛、降温、营养支持和心理疏导。

评价指标包括AKI发生率≤15%[21]、高钾血症发生率≤10%、筋膜室综合征发生时手术及时率达100%且手术减压在诊断后≤6 h内完成、液体平衡达标率≥85%、专科会诊响应时间低于30 min率≥90%、ICU入住指征符合率、RRT启动时间应依据KDIGO标准，在出现严重酸中毒、高钾血症或容量超负荷时及时启动，延迟不应超过诊断AKI后6 h。

2.1.5 康复与随访环节

康复与随访环节的质控点包括康复介入时机、康复方案个体化与依从性、功能评估、再损伤、深静脉血栓等并发症的预防、长期随访、心理社会支持。

质控标准包括介入时机、康复方案、急性期/恢复期/重返活动或岗位评估、并发症预防、长期随访、心理支持等方面。生命体征稳定、AKI炎症期过后，尽早开始康复评估与介入，遵循PRICE原则，即“保护(Protection)-休息(Rest)-冰敷(Ice)-加压包扎(Compression)-抬高(Elevation)”渐进负荷的个性化康复方案，包括急性期、恢复期、重返评估三阶段。急性期进行轻柔活动度训练、淋巴引流、冷疗、经皮神经电刺激（transcutaneous electric nerve stimulation, TENS）等理疗[30-31]；恢复期逐步增加肌力、柔韧性、本体感觉及功能性训练；重返活动或岗位评估需满足肌力正常、无痛、功能及充分热适应恢复。积预防并发症，早期活动预防深静脉血栓，避免过早或过强训练导致再损伤，监测恢复期CK。出院后1、3、6个月定期随访，评估功能、慢性疼痛及心理状态。全程心理支持，重点关注重症患者。

评价指标包括康复评估启动时间低于7 d率≥90%、个体化康复计划制定率应达100%、重返活动时间应该控制在伤后7~21 d的窗口期内[22]、Lysholm评分≥85分、肌力测试等功能恢复优良率≥80%、6个月内再损伤率≤5%、3个月随访率≥95%、患者满意度≥90%。

2.2 质量控制的组织保障与技术支持

为确保诊疗质量控制体系的有效运行，需构建完善的组织保障与技术支持体系。组织架构方面，成立由医务领导、多学科专家、护理、检验、影像、信息工程师组成的沙漠医疗保障质量控制小组，明确各环节责任人及职责，并建立定期与事件触发相结合的质量控制例会制度。制度与规范方面，制定并发布相关标准与规范，设计包含关键质量控制点的标准化病历模板，建立不良事件报告、分析与反馈制度。人员培训与考核方面，对一线人员和医护人员开展环境风险、损伤识别、急救技能、标准化操作程序（standard operating procedure, SOP）及质量控制要求等培训，定期组织模拟演练，并实施技能考核与认证。

信息技术支持是体系高效运转的重要支撑。通过在电子病历系统中嵌入质控提醒与标准化模板，搭建远程医疗平台、开发移动医疗APP、配备便携式检测设备及可穿戴设备等，辅助一线人员进行症状识别、急救流程指引及数据记录与上传，实现风险预警与康复监测。此外，还需保证降温设备、补液制剂、即时现场检测或床边检测、急救药品等充足供应与维护，保障通信与后送工具的可靠。

2.3　质量评价指标与持续改进

2.3.1　质量评价指标体系

质量评价指标体系涵盖结构、过程及结果指标。

结构指标：包括人员资质达标率、设备配备完好率、SOP覆盖率以及信息系统可用率，用于评估质量管理的基础条件与资源保障水平。

过程指标：以各环节质控标准为依据，聚焦具体时间节点、任务完成度及操作符合率，例如现场降温启动<5 min率、关键化验<1 h完成率、液体平衡达标率等，旨在监控诊疗流程的规范性与效率。

结果指标：包括核心指标、诊断指标、治疗指标、康复指标以及预防指标。核心指标包括AKI发生率、筋膜室综合征发生率、与EHS合并RM相关的死亡率、伤残率；诊断指标包括EHS合并RM早期诊断率、误诊或者漏诊率；治疗指标包括连续性RRT、平均住院日；康复指标包括功能恢复优良率、重返岗位率/时间、患者满意度；预防指标指热相关肌肉损伤总发生率。

2.3.2　数据收集与分析

为确保指标监测的系统性与科学性，需建立专用数据库，定期收集分析各项指标数据并进行统计分析，为质量评估与改进提供数据支撑。

2.3.3　基于PDCA循环的持续改进

戴明环（Deming circle），又称PDCA循环，是美国质量管理专家戴明（W. Edwards Deming）博士于20世纪50年代初提出的质量管理工作循环，其核心是确保完成今天的工作并规划明天的工作，它是全面质量管理所应遵循的科学程序，也是医院质量管理的基本方法之一[32]。

采用PDCA循环实现质量管理的持续优化，具体流程如下：

计划阶段（Plan）：基于现状分析、循证医学依据及不良事件复盘，明确改进目标并制定针对性措施。

执行阶段（Do）：落实既定改进措施，包括修订SOP手册、组织专项技能培训、采购所需设备等，确保改进方案落地实施。

检查阶段（Check）：通过持续监测改进后各项指标的变化，对比改进前后的数据差异，客观评估改进措施的实施效果。

处理阶段（Act）：对经实验验证有效的改进措施纳入标准化管理体系；若改进未达预期目标，需深入分析原因，调整方案后进入下一PDCA循环，形成闭环管理。

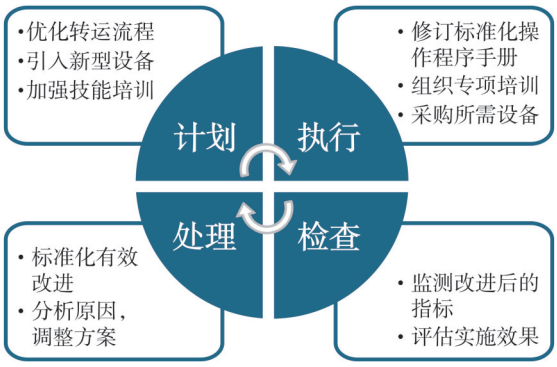


图2　基于PDCA循环的质量管理优化体系

3　先进技术在诊疗质量控制中的应用

先进技术在诊疗质量控制中发挥着关键作用，极大地推动了医疗水平的提升。

POCT提升现场与早期诊断能力，缩短决策时间，是质量控制的关键支撑点。便携CK/肌红蛋白检测仪10～15 min即可出结果，能快速指导启动积极治疗[33]；便携血气电解质分析仪可以指导精准补液与纠治电解质紊乱，使治疗更加科学有效；便携超声可用于现场评估肌肉结构、血肿、筋膜室压力。为更好地将POCT融入诊疗质量控制，需将POCT结果的及时性、准确性纳入质控指标，严格制定POCT操作、校准、质控的SOP，并将结果整合纳入电子病历，确保数据的完整性和可追溯性。

远程医疗突破了地域限制，实现后方专家对前方的实时指导，提升复杂病例的处理能力，保障诊疗规范性。5G空对地协同技术能够实现高质量的远程会诊，提高诊疗效率[34]。远程会诊可指导急救、诊断、治疗决策，为复杂病历提供更专业的解决方案，远程影像及检验结果判读能够提高诊断的准确性和效率，远程培训与考核有助于提升基层人员的专业水平，交互式远程医疗通过实时质控监督来保障诊疗规范性。为实现有效质控整合，应建立远程会诊响应时限，记录会诊意见与执行情况，并将远程医疗纳入多学科协作流程，形成诊疗闭环。

人工智能（artificial intelligence, AI）辅助决

策能对复杂数据进行深入分析，提供预警、诊断提示和治疗建议，减少人为偏差。在预警方面，通过整合各风险因素，预测肌肉损伤高风险个体；辅助诊断时，分析CK趋势等实验室结果，辅助识别EHS、RM、筋膜室综合征；治疗建议上，依据CK峰值等动态数据，推荐个体化补液方案，实现精准诊疗；在影像分析中，AI辅助解读肌肉超声和MRI，提高判读效率与一致性。但需注意，AI建议需经临床医生审核确认，同时要评估AI工具对诊断准确率、治疗规范性提升的效果，并关注算法透明度与伦理。

信息系统与大数据实现了诊疗信息全程共享、质控指标自动抓取、实时预警、效果评价与科研数据积累。在电子病历集成中，结构化录入并强制填写关键质控项，设置逻辑校验与提醒，保证数据的准确性和完整性；质控仪表盘实时展示关键过程与结果指标，便于管理监控；不良事件上报系统提供便捷通道，促进经验教训分享与系统性改进；数据库建设用于分析伤情特点、治疗效果、预后因素，生成本土化循证依据，持续优化SOP和质控标准。在此过程中，信息系统的可用性、数据准确性、报警响应率是质控对象，保障系统的稳定运行和数据质量。

4 预防策略与政策建议

4.1 预防策略

4.1.1 环境适应与作业管控

科学热适应训练是降低沙漠干热环境下骨骼肌损伤风险的关键手段，通过阶梯式热暴露训练提升机体汗腺分泌效率，增加肌肉热休克蛋白70表达量，从而增强肌细胞耐热性[6, 23]。作业中实行动态风险评估与调度，依据WBGT实时监测结果划分作业风险等级，当指数超标时立即调整作业计划，优先选择低温时段开展高强度活动，避免正午高温时段剧烈体力劳动[16]。

4.1.2 营养支持与体液补给

补充维生素C、维生素E及多酚等抗氧化剂，以对抗热应激诱导的氧化损伤，还可增加优质蛋白质的摄入，尤其是运动后，及时补充快速吸收的乳清蛋白，为修复提供必需底物。实施分层补水方案，采用“前-中-后”三段式补水策略，作业前2 h预饮500 mL温水；作业中每15～20 min补充150～200 mL含钠、钾等电解质的饮料，避免单纯饮用清水导致电解质失衡；作业后按15～20 mL/kg体重补充液体，直至尿液颜色恢复淡黄[17]。

4.1.3 个体防护与行为规范

选用透气散热性强的轻量化作业服，配备带遮阳功能的防护头盔与降温护具，并为长时间作业人员配备即时降温喷雾等便携式降温设备，降低体表与肌肉温度。注重作业前关节活动与肌肉激活训练的动态热身；作业中强制设置45～60 min/次的休息降温时段，用冷水擦拭颈部、腋窝等大血管区域辅助散热[27]；作业后进行静态拉伸与肌肉放松，减少肌纤维微损伤积累。

4.1.4 早期预警与应急处置

培训人员识别肌肉痉挛、乏力、酱油色尿等早期信号，出现症状立即停止作业并启动干预。对疑似骨骼肌损伤者立即实施“降温—补水—制动”三联处理，用2～20°C的冷水擦拭全身快速降温，建立静脉通路补充生理盐水，避免随意搬动加重肌肉损伤，同时禁用布洛芬等可能加重肾损伤的药物[27]。

4.2 政策建议

4.2.1 制定相关标准和规范

依据《中国热射病诊断与治疗指南》[35]，制定高温作业相关标准与规范，明确递进式热适应训练方案，并引入生理指标进行量化评估，确保人员完全适应后方可进行高强度作业；强制缩短极端高温作业时间、增加休息频率和延长轮换周期。制定个性化补水策略，推荐含有电解质的饮料，并强制规定补水频率和最小补水量，将尿液颜色作为简便的脱水监测指标。配备具有冷却功能的防护服和便携式冷却设备，携带足够的保温水。建立分级诊疗规范，优先推荐便携式浸泡或湿毛巾等替代降温方案，配备便携式直肠温度计，并明确远程医疗指导和航空医疗转运预案，确保损伤者在2 h内获得规范处置。同时，将RM纳入高温作业职业病监测范畴，并制定沙漠作业人员专用RM筛查和诊断标准。

4.2.2 加强教育培训

实施“双轨培训”制度。对作业人员增加针对沙漠极端气候变化的专项培训，如沙尘暴应急处置等，重点讲授在水资源有限的情况下如何进

行有效热适应、识别早期中暑和RM症状、科学补水技巧，以及野外生存、定位导航和简易急救技能，提高自救互救能力。对医护人员进行沙漠环境和野外急救专项培训，强化中暑等疾病在沙漠环境下的早期诊断与紧急处理能力，并培训其利用卫星通信等技术进行远程医疗指导和航空医疗转运配合。此外，开发高度仿真的沙漠环境VR模拟训练系统和详细的急救手册，通过沉浸式训练提升人员应急处置熟练度，并制作多语种、图文并茂的宣传材料和视频，普及防暑降温知识。

4.2.3　建立监测与评估机制

建立“个体–环境–机构”三维监测网络，并加强针对沙漠环境的预警和数据分析。为所有沙漠作业人员配备具备实时监测基本生命体征、GPS定位和异常数据自动预警功能的智能穿戴设备，并引入便携式快速检测设备进行RM早期筛查。在作业区域布设高密度、移动式的WBGT监测站，实时监测热负荷，并整合气象数据，建立更精准的沙漠热应激风险评估模型，动态发布高温预警和作业指导。医疗机构定期上报中暑和骨骼肌损伤病例数据，建立包含沙漠作业人员数据的全国性数据库。实施年度风险评估制度，结合监测数据优化预防策略，对高风险单位开展强制性专项督查，同时将损伤发生率纳入企业安全生产考核的“一票否决”指标，并鼓励和支持针对沙漠环境特点的防暑降温技术和设备研发。

4.2.4　完善经费保障与政策支持

落实经费保障政策，并强化法律法规衔接，特别关注沙漠偏远地区的特殊需求。强制要求将高性能热防护装备采购、营养补给品供应、人员体检、应急医疗设备配置、远程医疗系统建设等费用纳入企业安全生产成本，并设立专项预算。对在偏远沙漠地区作业的单位给予专项财政补贴和税收优惠，以弥补其在防暑降温和医疗保障方面更高的投入，并推动建立针对沙漠高温作业人员的特殊职业伤害保险，将中暑和RM等热致疾病纳入保障范围。依据相关法律法规，细化和明确企业在沙漠高温作业中预防中暑和骨骼肌损伤的主体责任，加大对违规作业行为的处罚力度，并确保劳动者在高温环境下享有休息权、知情权和拒绝违章作业权，保障劳动者合法权益，同时加强政府部门的监管和指导。

5　小结

沙漠干热环境对骨骼肌损伤的发生、发展及诊疗构成严峻挑战，增加了RM、AKI、筋膜室综合征等并发症的发生风险。质量控制是提升诊疗安全和效率的核心抓手，传统的诊疗模式在极端环境下难以保障救治效果，本研究以标准化操作程序为基础，明确各环节的关键质控点、标准与评价指标，强调时效性管理和关键风险点的重点控制，构建覆盖沙漠环境下骨骼肌损伤“预防预警–现场急救–院内评估–治疗干预–康复随访”全链条的质量控制体系。通过建立健全组织架构、制度规范、全员培训、信息技术支持和物资保障，为质量控制落地提供坚实支撑，并运用PDCA循环机制确保体系的持续优化。未来，质量控制体系的发展应深度融合智能化技术，深化无创监测与新型标志物应用，强化预防性干预。实施并不断完善沙漠干热环境下骨骼肌损伤诊疗的质量控制体系，是保障涉足该极端环境人员生命安全、身心健康与任务效能的必由之路，对提升国家在重要区域的医疗保障能力具有重大现实意义。

利益冲突声明　所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明　赵　娜：总体构思、撰写论文、绘制图表；惠华强：论文设计、对文章重要内容进行关键性修改、对最终提交版本进行确认。

参考文献

[1] 中国气象局气候变化中心.《中国气候变化蓝皮书(2024)》发布[J]. 节能与环保,2024,(7):1.

[2] 武堂晓. 氨基酸维生素对干热环境大鼠运动骨骼肌损伤保护作用实验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆医科大学,2024:3.

[3] 张东辉,薛晓玉,谢志,等. 姜黄素预处理对干热环境大鼠骨骼肌组织学及超微结构变化的影响[J]. 实验动物科学,2018,35(3):1-6.

[4] 武堂晓,杨曦,尹紫依,等. 沙漠干热环境下大鼠运动骨骼肌损伤评价指标的筛选[J]. 陆军军医大学学报,2024,46(8):894-900.

[5] 何龙平,钟林翠,余永春,等. 热习服对热射病康复后军人的热耐力及凝血功能的影响[J]. 血栓与止血学,2023,29(3):111-116.

[6] 曹德康,王欣. 军事训练伤中热射病的特点与预防策略[J]. 武警医学,2019,30(6):461-464,468.

[7] YEN C L, PETRIE M A, SUNEJA M, et al. Neuromuscular and gene signaling responses to passive whole-body heat stress in young adults[J]. Journal of thermal biology, 2023, 118: 103730.

[8] DUNN R A, LUK H Y, APPELL C R, et al. Eccentric muscle-damaging exercise in the heat lowers cellular stress prior to and immediately following future exertional heat exposure[J]. Cell stress and chaperones, 2024, 29(3): 472-482.

[9] BERGERON M F, NINDL B C, DEUSTER P A, et al. Consortium for health and military performance and American college of sports medicine consensus paper on extreme conditioning programs in military personnel[J]. Current sports medicine reports, 2011, 10(6): 383-389.

[10] RAV-ACHA M, HELED Y, MORAN D S. Cold injuries among Israeli soldiers operating and training in a semi-arid zone: a 10-year review[J]. Military medicine, 2004, 169(9): 702-706.

[11] KOMA R, MATSUMOTO T, YAMAZAKI A, et al. Data on mitochondrial respiratory function in skeletal muscle of adult male mice in response to 3-weeks heat stress[J]. Data in brief, 2024, 53: 110091.

[12] YU L K, TIAN D, SU Z S, et al. Gallic acid alleviates exercise-induced muscle damage by inhibiting mitochondrial oxidative stress and ferroptosis[J]. Journal of translational medicine, 2025, 23(1): 30.

[13] WANG M Y, YANG J M, WU Y, et al. Curcumin-activated Wnt5a pathway mediates Ca^{2+} channel opening to affect myoblast differentiation and skeletal muscle regeneration[J]. Journal of Cachexia, sarcopenia and muscle, 2024, 15(5): 1834-1849.

[14] HOU Z Q, WANG Z F, ZHANG J, et al. Effects of cannabidiol on AMPKα2/HIF-1α/BNIP3/NIX signaling pathway in skeletal muscle injury[J]. Frontiers in pharmacology, 2024, 15: 1450513.

[15] WANG S, HUANG S J, XU X R, et al. Effects of radial extracorporeal shock wave with different frequencies on acute skeletal muscle injury in rabbits[J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 21276.

[16] LIPMAN G S, GAUDIO F G, EIFLING K P, et al. Wilderness medical society clinical practice guidelines for the prevention and treatment of heat illness: 2019 update[J]. Wilderness and environmental medicine, 2019, 30(4S): S33-S46.

[17] SHEPHARD R J. American college of sports medicine position stand: exercise and fluid replacement[J]. Yearbook of sports medicine, 2007, 2007: 254-255.

[18] BOUCHAMA A, ABUYASSIN B, LEHE C, et al. Classic and exertional heatstroke[J]. Nature reviews disease primers, 2022, 8(1): 8.

[19] PÉRIARD J D, RACINAIS S, SAWKA M N. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 2015, 25(S1): 20-38.

[20] 朱子豪, 葛华, 李雪, 等. 沙漠环境下石油工人职业紧张水平及肌肉骨骼损伤状况调查[J]. 现代预防医学, 2017, 44(12): 2135-2137, 2153.

[21] OH R C, BURY D C, MCCLURE C J. Exertional rhabdomyolysis: an analysis of 321 hospitalised US military service members and its relationship with heat illness[J]. BMJ military health, 2024, 170(4): 303-307.

[22] GROVER K M, SRIPATHI N. Rhabdomyolysis[J]. Muscle & nerve, 2026, 73(4): 527-533.

[23] 张帅. 高温环境下人体热应变反应及生理热安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2022: 6.

[24] NI W, NASSIKAS N J, FIFFER M, et al. Associations of personal hourly exposures to air temperature and pollution with resting heart rate in chronic obstructive pulmonary disease[J]. Environmental science technology, 2024, 58(41): 18145-18154.

[25] CUDDY J S, SLIVKA D R, HAILES W S, et al. Heart rate variability during high heat exposure: a comparison between dry and humid heat[J]. Wilderness & environmental medicine, 2018, 29(3): 311-319.

[26] KJELLSTROM T, HOLMER I, LEMKE B. Workplace heat stress, health and productivity-an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change[J]. Global health action, 2009, 2(1): 2047.

[27] 刘树元, 宋景春, 毛汉丁, 等. 中国热射病诊断与治疗专家共识[J]. 解放军医学杂志, 2019, 44(3): 181-196.

[28] 徐丰, 霍洪峰. 腘绳肌损伤因素及评估指标体系的构建[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2021, 21(1): 94-100.

[29] SAFARI S, NAJAFI I, AGHILI S H, et al. Urine alkalinization in preventing rhabdomyolysis induced acute kidney injury and need for dialysis: a systematic review and meta-analysis[Z]. 2024.

[30] NORTON C. How to use PRICE treatment for soft tissue injuries[J]. Nursing standard, 2016, 30(52): 48-52.

(下转第90页)

[14] 刘义文,蒲中枢,吉兆华,等. 甘肃省武威市2005—2013年病毒性肝炎发病趋势分析[J]. 中国卫生统计,2016,33(1):148-149,153.
[15] 刘雅娟,朱富伟,刘冬,等. 2008—2023年菏泽市手足口病流行特征及病原学监测结果分析[J]. 医学动物防制,2025,41(2):109-113.
[16] 叶淑鸿,郭致文,吉兆华. 武威乙肝防治示范区建设前后15年(1994—2023年)乙肝发病趋势与防治模式探讨[J]. 中国热带医学,2025,25(3):276-281.
[17] 甘肃省卫生间健康委员会. 关于规范乙型病毒性肝炎诊断与报告工作的通知[EB/OL].(2012-05-23)[2025-09-10]. https://wsjk.gansu.gov.cn/wsjk/c113837/202106/73193bdde2844f8f90de2541c047cf4a.shtml.
[18] 蔡晶,黄淑琼,张鹏,等. 2005—2021年湖北省细菌性痢疾流行特征分析及短期发病预测[J]. 中华疾病控制杂志,2022,26(11):1303-1308.
[19] 王雪,张燕,幸奠国,等. 2005—2015年重庆市细菌性痢疾发病的流行病学特征及时空聚集性分析[J]. 中华疾病控制杂志,2018,22(6):594-598,602.
[20] 张璟,刘伟,刘艳挪,等. 济宁市2009—2016年肠道传染病流行状况及疾病负担分析[J]. 中华疾病控制杂志,2019,23(2):217-222.
[21] 齐孝旗,欧剑鸣,陈武,等. 2016—2020年福建省手足口病流行特征及病原学分析[J]. 中国预防医学杂志,2023,24(9):960-963.
[22] 张儒豪,光旭,何逸飞,等. 2013—2022年广东省深圳市手足口病流行特征和病原学分析[J]. 疾病监测,2024,39(10):1263-1269.
[23] 孙克,邓紫妍,李丽清. 我国肺结核流行的时空动态分布特征及演变规律[J]. 中华疾病控制杂志,2025,29(2):186-192.
[24] 刘新宇,李莲花,杨震,等. 2013—2023年北京市昌平区肺结核流行病学特征及变化趋势分析[J]. 中国防痨杂志,2024,46(S2):47-51.
[25] 庞艳,范君,李婷,等. 2018—2022年川渝地区肺结核空间分布特征分析[J]. 疾病监测,2024,39(7):852-856.
[26] 范君,张娅,张婷,等. 重庆市2015—2020年≥65岁老年肺结核患者治疗转归分析[J]. 中国热带医学,2023,23(7):715-719,724.
[27] 李轩,张宁,吕恒梁,等. 2010—2020年安徽省合肥市和芜湖市温度对水痘发病风险影响的研究[J]. 中国预防医学杂志,2025,26(1):114-118.
[28] REITER P. Global-warming and vector-borne disease in temperate regions and at high altitude[J]. The lancet,1998,351(9105):839-840.
[29] 宋健,韩松,王虎虎,等. 2018—2022年内蒙古自治区人间布鲁氏菌病时空聚集性分析[J]. 中国人兽共患病学报,2023,39(10):993-997.
[30] 吴向林,齐蓉婷,闫芳,等. 2012—2021年宁夏人间布鲁氏菌病流行特征分析及发病趋势预测[J]. 宁夏医学杂志,2023,45(2):107-110,92.
[31] EDELSON P J, HAROLD R, ACKELSBERG J, et al. Climate change and the epidemiology of infectious diseases in the United States[J]. Clinical infectious diseases,2023,76(5):950-956.
[32] 曹海兰,尤小慧,赵金华,等. 1961—2020年青海省法定传染病疾病谱及其变迁规律分析[J]. 疾病监测,2022,37(10):1324-1328.
[33] PRICE H, DUNN D, ZACHARY T, et al. Hepatitis B serological markers and plasma DNA concentrations: baseline results from a treatment-monitoring practices trial[J]. Aids,2017,31(8):1109-1117.
[34] 马玉秀. 2006—2015年济南市槐荫区法定传染病流行趋势及预测分析[D]. 济南:山东大学,2016.
[35] 康小娟,王晓辉,丁中航. 2015—2022年甘肃省传染病流行特点及趋势[J]. 中华疾病控制杂志,2024,28(4):381-388.

(责任编辑:王春燕)

(上接第82页)

[31] ZHU S Y, WANG Z, LIANG Q, et al. Chinese guidelines for the rehabilitation treatment of knee osteoarthritis: an CSPMR evidence-based practice guideline[J]. Journal of evidence-based medicine,2023,16(3): 376-393.
[32] 杨爱益. PDCA循环在医院质量管理中的运用研究[D]. 南昌:南昌大学,2016:5.
[33] SHRIVASTAVA S, TRUNG T Q, LEE N E. Recent progress, challenges, and prospects of fully integrated mobile and wearable point-of-care testing systems for self-testing[J]. Chemical society reviews, 2020, 49(6): 1812-1866.
[34] HAN W, LI ND Y, CHEN RD C, et al. 5G key technologies for helicopter aviation medical rescue[J]. Journal of medical internet research,2024,26: e50355.
[35] 宋景春,宋青,张伟,等. 中国热射病诊断与治疗指南(2025版)[J]. 解放军医学杂志,2025,50(4):367-386.

(责任编辑:金 红)