doi:10.11659/jjssx.12E025142

·临床研究·

穿戴式无线脑血氧监测头带应用于急诊环境的可行性研究

蒋 杨[1],田师宇[2],周人杰[1],刘 波[1] (1.陆军军医大学第二附属医院急诊科,重庆 400038;2.重庆市綦江区赶水镇中心卫生院,重庆 401437)

[摘 要] **目的** 评估无线式脑血氧监测头带在急诊复杂环境中的应用,验证其是否可为急救场景提供快速、连续、精准的局部脑氧饱和度(rSO_2)。**方法** 比较有线脑血氧、无线脑血氧监测的建立时间,并招募健康志愿者评估体位变化与运动状态下无线脑血氧监测的稳定性。在急诊场景中,监测不同急诊状态患者在诊疗操作前、中、后的rSO_2变化。**结果** 无线脑血氧监测建立时间显著短于有线脑血氧监测($P<0.01$)。在动态测试中,受试者蹲踞后即刻rSO_2较站立时显著升高($P<0.01$),而恢复站立后rSO_2与站立基线值相比无明显差异($P>0.01$),表明设备在动态动作中具有良好的响应稳定性。跑步运动全程无线式脑血氧监测头带监测信号连续无中断。救护车转运场景下,无线式脑血氧监测头带与有线脑血氧监测设备在信号脱落和信号干扰方面无显著差异($P>0.01$),两者在静态、运动扰动时、颠簸时测得的rSO_2值呈线性相关。患者在急诊环境中的有创操作、放射检查及电除颤/电复律前、中、后三个阶段的rSO_2测量值无显著变化($P>0.01$)。**结论** 无线式脑血氧监测头带适用于急救场景,可提供连续可靠的rSO_2监测数据,具有急诊应用价值。

[关键词] 近红外光谱;局部脑氧饱和度;心肺复苏;急诊医学;无线式脑血氧监测仪
[中图分类号] R459.7 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-12-30

A feasibility study on the application of wearable wireless cerebral oximetry monitoring headbands in emergency environment

JIANG Yang[1], TIAN Shi-yu[2], ZHOU Ren-jie[1], LIU Bo[1] (1. Department of Emergency, the Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400038, China; 2. Ganshui Town Central Health Center of Qijiang District in Chongqing, Chongqing 401437, China)

Abstract: Objective To evaluate the application of wireless cerebral oximetry monitoring headbands in the complex emergency environment and verify whether they can provide rapid, continuous and accurate regional cerebral oxygen saturation (rSO_2) for emergency scenarios. **Methods** The establishment times of wired and wireless cerebral oximetry monitoring were compared, and healthy volunteers were recruited to evaluate the stability of wireless cerebral oximetry monitoring under changes in body position and during exercise. In emergency scenarios, the changes of rSO_2 of patients were monitored before, during and after diagnosis and treatment procedures on different emergency conditions. **Results** The establishment time of wireless cerebral oximetry monitoring was significantly shorter than that of wired cerebral oximetry monitoring ($P<0.01$). In the dynamic test, the rSO_2 of subjects immediately after squatting was significantly higher than that at standing ($P<0.01$), but there was no significant difference in rSO_2 of subjects after returning to standing compared with the baseline value of standing ($P>0.01$), indicating that the device had good response stability during dynamic movements. The wireless cerebral oximetry monitoring headband throughout the running exercise provides continuous and uninterrupted monitoring signals. In the ambulance transfer scenario, there was no significant difference between wireless cerebral oximetry monitoring headband and wired cerebral oximetry monitoring devices in terms of signal shedding and signal interference ($P>0.01$), the rSO_2 values measured by the two were linearly correlated under static, motion disturbances, and jolts conditions. There was no significant change in the rSO_2 values of patients before, during and after invasive operation, radiological examination or electrical defibrillation/electrical cardioversion in the emergency environment ($P>0.01$). **Conclusion** Wireless cerebral oximetry monitoring headbands are suitable for emergency scenarios and can provide continuous and reliable rSO_2 monitoring data, which has emergency application value.

Keywords: near-infrared spectroscopy; regional cerebral oxygen saturation; cardio-pulmonary resuscitation; emergency medicine; wireless cerebral oximetry monitor

[基金项目] 重庆市卫生健康委医学科研项目(2024WSJK071);重庆市临床重点专科(精品项目)-急诊医学科
[通信作者] 刘 波,E-mail:sdx0724@tmmu.edu.cn;周人杰,E-mail:Zhou_rj@aliyun.com

在急诊医疗环境中,快速评估生命体征是救治的关键。然而,常规监测(如心电图、血压、血氧饱和度)虽能反映循环呼吸功能,却无法直接评估对缺氧最敏感的脑组织。这一缺陷在心肺复苏患者中表现得尤为明显,凸显了现有监测方式的不足。近年来,通过近红外光谱技术(near-infrared spectroscopy,NIRS)监测局部脑氧饱和度(regional cerebral oxygen saturation,rSO_2)可无创评估脑组织的氧供需是否平衡,对患者的脑功能保护以及预后具有重要价值,被视为一种具备潜力的评估工具[1-3]。目前,rSO_2主要应用于麻醉与围术期管理、休克、神经外科与脑血管诊疗、脑科学研究与功能评估、心脏与大血管手术等静态医疗环境中,为患者救治提供精准指导[4]。传统rSO_2监测设备体积庞大,需要有线连接且操作复杂,而有线的贴片式探头在运动状态下不易建立及监测,在动态急救场景中应用十分局限[5]。尤其用于急诊动态场景时,胸外按压会导致头胸部晃动,院前救护车空间狭小、患者转运途中路面颠簸及体位改变,以及影像学检查需远距离观察等,往往难以实现信号连续稳定和远程采集。因此,应用一种基于NIRS的rSO_2监测,兼具快捷、实时、连续与精确特性,对于提升急诊环境中的抢救效能具有重要意义。

针对上述问题,本研究团队测试了一种新型无线式脑血氧监测头带,其通过蓝牙与平板或手机APP连接,实现数据的无线传输与实时查看。本研究将头带式监测仪置于多种急救场景中进行测试,具体考察急诊环境中的心肺复苏脑血氧建立、有创操作、放射检查、电除颤/电复律,以及救护车颠簸及运输速度等对信号采集质量和蓝牙连接稳定性的影响,并招募健康受试者在运动状态下佩戴使用,从而明确该设备是否适用于心肺复苏等复杂急救环境,实现rSO_2快速、连续、精准的可靠监测,为无线式脑血氧监测设备在急诊环境中的应用以及设备稳定性提供理论支撑。

1 资料与方法

1.1 临床资料

蹲踞、跑步、救护车转运实验:招募30名健康青年志愿者,年龄22~38岁,平均(27.5±5.1)岁。急诊环境的无线式脑血氧监测头带监测:纳入急诊科接受有创操作(气管插管、“四大穿刺”、动静脉置管、留置胃管、尿管)、放射检查、转运、电除颤/电复律的患者,年龄17~88岁。排除标准:额部皮肤存在伤口、感染、金属植入物或敷料,前额区域严重畸形。本研究已通过陆军军医大学第二附属医院伦理委员会审核(批准号:2024-研第194-02),所有参与者均签署知情同意书。

1.2 实验器材

主要实验设备包括心肺复苏机(深圳市安保医疗科技股份有限公司)、多参数生命体征监护仪(深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)、有线脑血氧饱和度监测仪(BRS-300,中科搏锐北京医疗器械有限公司)、无线式脑血氧监测头带(BRS-2,中科搏锐北京医疗器械有限公司)、平板(HUAWEI MatePad SE)、电动跑步机(重庆久哥商贸有限公司)。

1.3 无线式脑血氧监测头带快捷性测试

采用心肺复苏高仿真模拟人进行测试,遵循《2020年美国心脏协会心肺复苏与心血管急救指南》标准[6]。以1医2护心肺复苏抢救模式,1名担任组长,负责指挥抢救与计时、通气并迅速在患者前额部建立rSO_2监测及气管插管,另外2名成员每2 min交换角色,1名负责胸外按压或操作自动心肺复苏机,1名负责操作监护仪、AED/除颤仪、给药,每组重复操作3次,计时以抢救开始至脑血氧监测建立完成。无线式脑血氧监测头带建立方法:专业人员将探头的中心传感区域放置于眉弓正上方2~4 cm处;在垂直方向上,光极需远离额窦和颞浅动脉的位置,消除额窦含气空腔对脑灌注监测的潜在干扰[7]。在外侧,无线式脑血氧监测头带松紧带距耳尖约1 cm(图1)。在心肺复苏的场景中,模拟人无线、有线脑血氧建立的具体位置见图2。

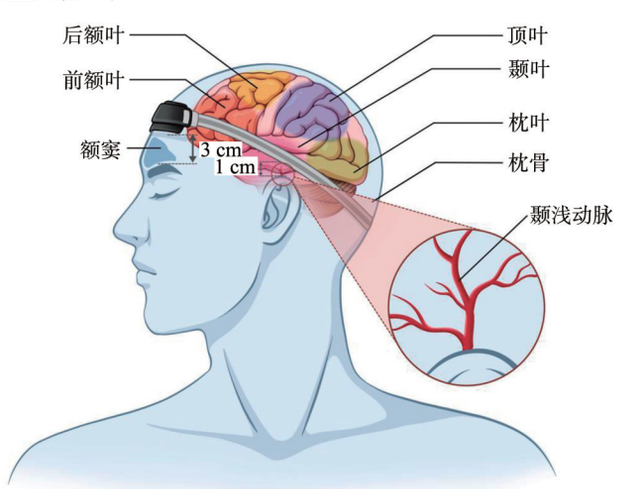
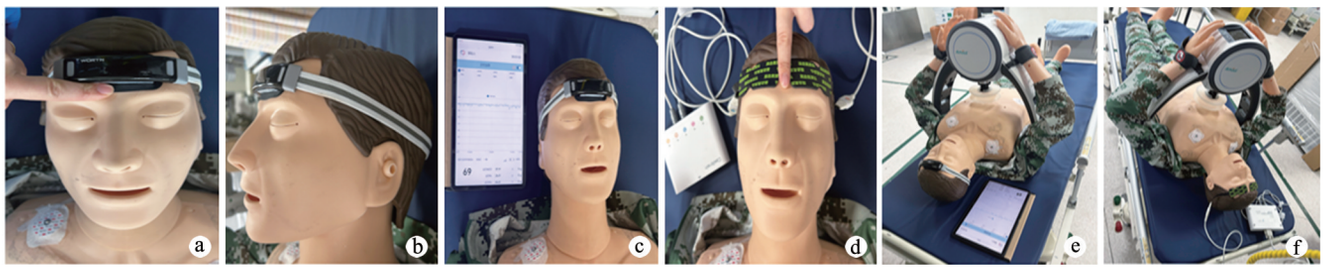


图1 无线式脑血氧监测头带放置的解剖位置

1.4 无线式脑血氧监测头带稳定性测试

1.4.1 蹲踞实验 30名受试者执行标准蹲踞流程:规范佩戴无线式脑血氧监测头带,起始姿势为双脚与肩同宽站立,手臂胸前交叉或自然下垂,目视固定点60 s;随后听到下蹲指令以自然速度下蹲至个人



a、b:无线式脑血氧监测头带佩戴于模拟人额头的正视图及侧视图;c:佩戴无线式脑血氧监测头带的模拟人以及同步展示数据可视化界面;d:有线脑血氧监测设备佩戴于模拟人额头的俯视图;e:心肺复苏模拟场景中,无线式脑血氧监测头带的动态佩戴应用;f:心肺复苏模拟场景中,有线脑血氧监测设备的操作应用

图2　模拟人无线、有线脑血氧建立的位置

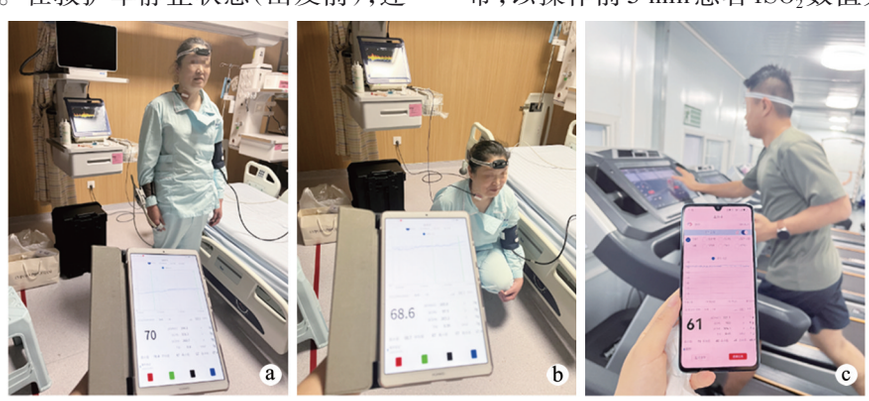
舒适最大深度,保持60 s;然后听到指令后恢复站立姿势保持60 s[8]。标记下蹲及起立时间,分析蹲踞前后变化。数据记录后更换受试者重复上述过程,见图3a、b。

1.4.2　跑步实验　　30名受试者身穿运动装备,规范佩戴无线式脑血氧监测头带,记录基本信息及静息血压、心率、脉搏血氧饱和度和rSO_2。受试者使用改良布鲁斯方案在跑步机上完成测试[9]。全程监测rSO_2,记录跑步前及跑步后的生理参数数据,观察跑步前、跑步中及跑步后rSO_2的数据,结束后更换受试者重复上述过程,见图3c。

1.4.3　救护车转运　　救护车转运实验为自主设计,30名受试者规范佩戴无线式脑血氧监测头带及有线脑血氧监测设备。在救护车静止状态(出发前),连续记录5 min受试者的rSO_2数据作为基线值,随后模拟执行常规出诊任务,选择我院到歌乐山路段,该路线涵盖城市典型路况(柏油路、水泥路、弯道、红绿灯、不平整路段、减速带),以救护车转运过程中车辆经历速度变化、弯道定义为运动扰动状态并标记,以救护车转运过程中车辆经历减速带、凹凸路面定义为颠簸状态并标记。全程记录标记静态、运动扰动及颠簸状态下受试者的心率、血压、脉搏血氧饱和度、rSO_2,评估救护车转运过程中无线式脑血氧监测头带的准确性及稳定性,见图4。

1.5　无线式脑血氧监测头带在急诊环境中的应用

1.5.1　有创操作　　对急诊中开展气管插管、穿刺、置管的20例患者进行规范佩戴无线式脑血氧监测头带,以操作前5 min患者rSO_2数值为基线值,标记操作



a:受试者站立状态;b:受试者蹲踞状态;c:受试者跑步状态

图3　动态体位测试中受试者状态

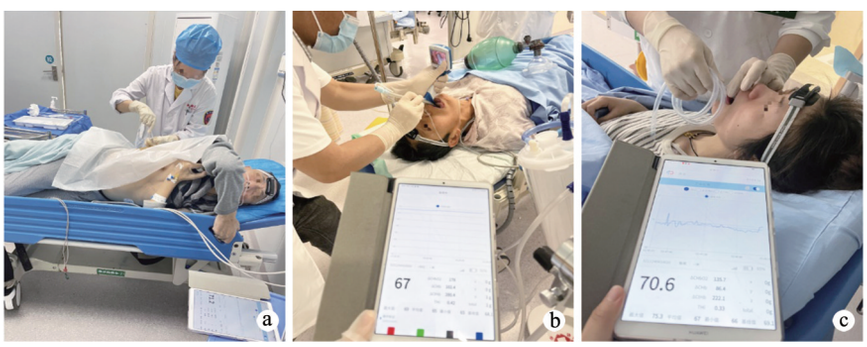


图4　救护车转运途中真实场景

开始时间及结束时间，操作结束后再连续记录5 min患者的rSO_2值，比较操作前、中、后患者的rSO_2平均值，并观察操作过程中rSO_2是否中断，见图5。

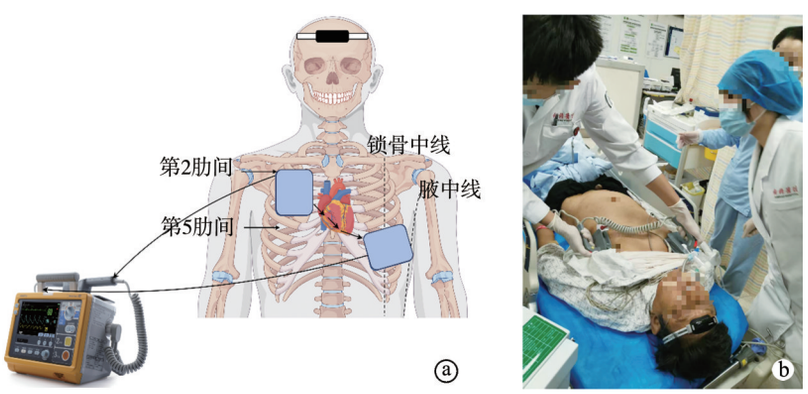
1.5.2 电复律/电除颤 对20例开展电复律/电除颤的急诊患者进行规范佩戴无线式脑血氧监测头带（不干扰抢救），探头避开电极板位置，标记放电事件并观察信号中断情况，见图6。对比放电前（5 s）、放电中（1~2 s）、放电后（5 s）患者的rSO_2值。电极板放置严格参照体表骨性标志：标准前-侧位时，前电极板置于右侧锁骨下区，紧贴胸骨右缘第2~3肋间，下缘避开胸骨角；侧电极板置于左侧腋中线第5~6肋间（心尖投影区）。前-后位时，后电极板置于左肩胛下角内侧，沿肩胛骨脊柱缘定位，确保电流覆盖左心室后壁。

1.5.3 放射检查 20例急诊患者于CT检查前5 min规范佩戴无线式脑血氧监测头带，采集稳定基线rSO_2数据。患者平躺于CT平台后，研究者于控制台操作椅位置（距扫描架中心6 m，在蓝牙连接范围内）手持平板标记CT开始及结束时间，观察并记录rSO_2信号是否中断。操作结束后，立即再连续记录5 min的rSO_2数据。对比分析患者检查前、中、后的rSO_2值，评估CT放射环境对无线式脑血氧监测头带的影响，见图7。



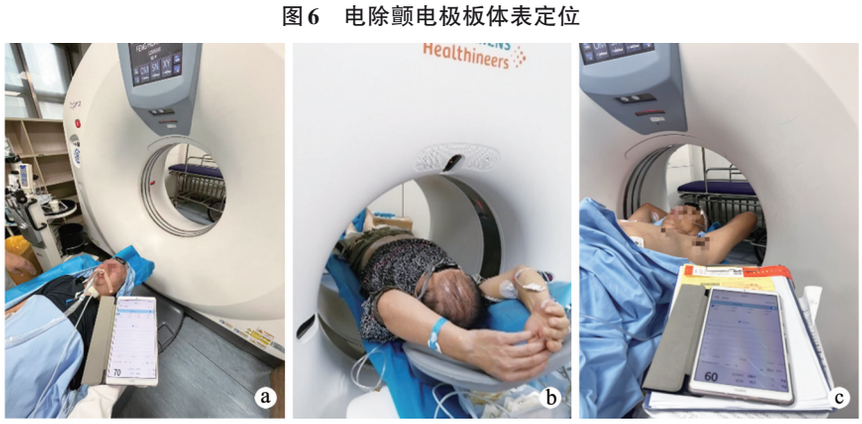
a：穿刺场景；b：气管插管场景；c：置管场景

图5 有创操作中患者状态



a：电除颤电极片在体表的标准解剖定位示意图；b：临床场景中的电除颤操作

图6 电除颤电极板体表定位



a：放射检查前无线脑血氧监测；b、c：放射检查过程中无线脑血氧监测

图7 放射检查患者状态

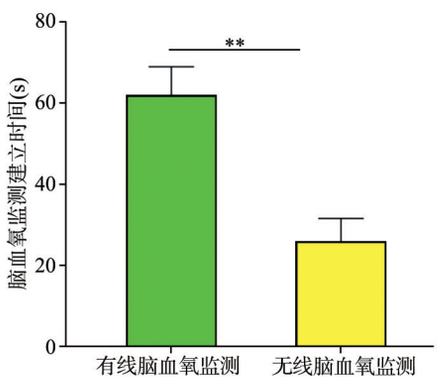
1.6 统计学方法

采用SPSS 24.0软件进行数据分析。计量资料用均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,计数资料用率(%)表示,组间比较采用独立样本 t 检验或 *Mann-Whitney U* 检验,*Spearman* 秩相关系数进行相关性分析,以 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 无线脑血氧监测建立、有线脑血氧监测建立的时间比较

模拟急诊心肺复苏抢救场景,结果显示,无线脑血氧监测建立时间显著短于有线脑血氧监测($P<0.01$),见图8。



**:$P<0.01$

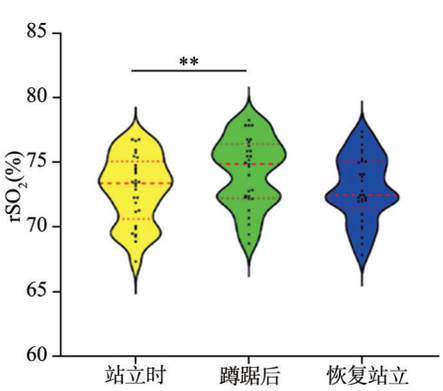
图8 模拟人无线、有线脑血氧监测建立时间比较

2.2 蹲踞实验中无线式脑血氧监测头带的稳定性

监测显示(图9),受试者蹲踞后即刻 rSO_2 显著升高($P<0.01$),站立时与恢复站立后 rSO_2 无明显差异($P>0.01$),动作周期后 rSO_2 准确恢复至基线值,无显著漂移,证明无线式脑血氧监测头带稳定性良好。

2.3 跑步实验中无线式脑血氧监测头带的稳定性

与跑步前相比,跑步后受试者血压、心率显著升高($P<0.01$),脉搏血氧饱和度、rSO_2 下降($P<0.01$),无线式脑血氧监测头带跑步全程无信号中断,见表1、图10。

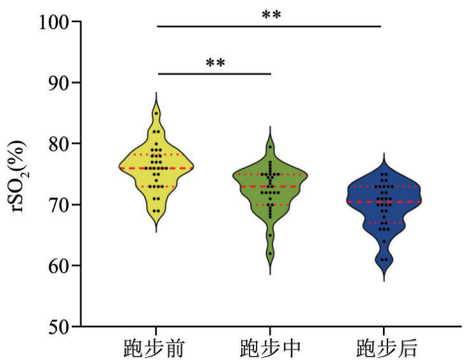


**:$P<0.01$

图9 蹲踞实验中受试者 rSO_2 变化情况

表1 正常人跑步机生理指标

项目	跑步前	跑步后	P
血压(mmHg)	88±8	95±7	<0.01
心率(次/分)	75±20	106±16	<0.01
脉搏血氧饱和度(%)	98.4±0.9	96.2±1.2	<0.01



**:$P<0.01$

图10 跑步实验中受试者 rSO_2 变化情况

2.4 救护车转运实验中无线式脑血氧监测头带的稳定性

在信号脱落方面,无线式脑血氧监测头带发生脱落2例(6.67%),有线脑血氧监测设备发生脱落1例(3.33%),差异无统计学意义($P=0.99$)。在信号干扰方面,无线式脑血氧监测头带干扰4例(13.33%),有线脑血氧监测设备干扰2例(6.67%),差异无统计学意义($P=0.67$)。

相关性分析显示,静态($r=0.8590$)、运动扰动时($r=0.9666$)、颠簸时($r=0.8721$)有线脑血氧监测设备和无线式脑血氧监测头带测量值呈线性相关,见表2、图11。

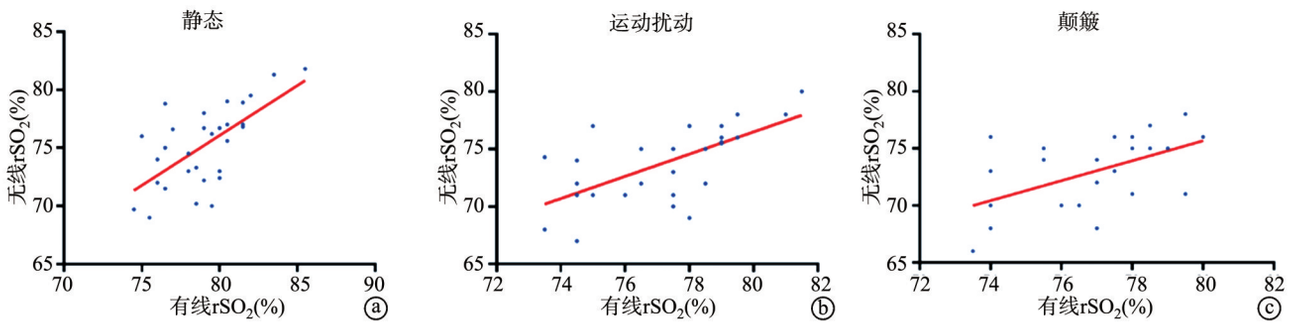
2.5 急诊环境中无线式脑血氧监测头带的稳定性

急诊环境中,患者规范佩戴无线式脑血氧监测头

表2 救护车转运途中三种环境下基础循环监测情况

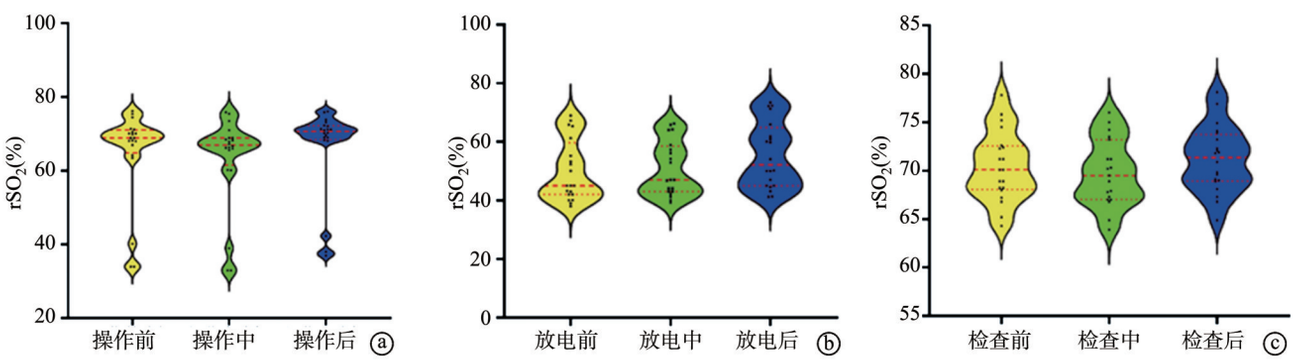
事件	指标	有线脑血氧监测	无线脑血氧监测	P
静态	心率(次/分)	70.60±4.45	72.47±6.89	0.35
	血压(mmHg)	84.84±6.75	87.05±7.93	0.18
	脉搏血氧饱和度(%)	98.17±1.34	98.07±1.48	0.53
	rSO_2(%)	78.98±2.57	75.19±3.44	<0.01
运动扰动	心率(次/分)	73.97±4.90	74.90±7.16	0.72
	血压(mmHg)	88.01±7.06	87.92±7.10	0.95
	脉搏血氧饱和度(%)	96.90±1.12	97.33±1.24	0.36
	rSO_2(%)	77.27±2.15	73.85±3.23	<0.01
颠簸	心率(次/分)	76.93±5.06	78.57±7.31	0.53
	血压(mmHg)	91.44±6.30	91.81±7.59	0.59
	脉搏血氧饱和度(%)	96.33±1.03	96.63±1.22	0.27
	rSO_2(%)	77.07±1.80	73.10±3.02	<0.01

带进行有创操作、电除颤/电复律及放射检查前、中、后的rSO_2监测值在集中趋势与离散程度上均呈高度相似性，差异无统计学意义（$P>0.01$），见图12。这表明高能电击产生的电磁干扰及剧烈的生理波动，均未导致该设备监测信号出现系统性偏移。在整个放射检查过程中，rSO_2监测信号稳定，无线式脑血氧监测头带的信号采集与数据传输，在电离辐射环境或常规医疗设备运行状态下，均未受到显著干扰。数据连续性好，该设备在此类影像学检查条件下具有可靠的抗干扰能力。



a：救护车转运时静态下受试者rSO_2；b：救护车转运中运动扰动时受试者rSO_2；c：救护车转运中颠簸时受试者rSO_2

图11 救护车转运过程中受试者rSO_2变化的一致性



a：有创操作时患者的rSO_2变化；b：电除颤/电复律时患者的rSO_2变化；c：放射检查时患者的rSO_2变化

图12 急诊环境中患者rSO_2变化情况

3 讨论

本研究通过对比健康人群在运动场景及救护车转运场景下脑血氧饱和度的变化，验证了无线式脑血氧监测头带在运动场景下的稳定性和灵敏性；再通过观察急诊环境中佩戴无线式脑血氧监测头带的患者数据，证实了本仪器可以应用于急诊环境。

相关文献报道，有线脑血氧监测设备的标准放置位置为双侧前额叶[10-12]。本研究通过模拟CPR场景，发现无线式脑血氧监测头带的建立时间显著短于有线脑血氧监测设备。这表明无线式脑血氧监测头带的设计克服了传统设备在急救中布线耗时的问题，实现了功能性与操作便捷性的统一，可为心肺复苏黄金抢救期内快速启动rSO_2监测提供关键技术支撑[13-15]。本研究采用改良布鲁斯方案，使受试者快速达到一般运动强度，以评估无线式脑血氧监测头带在运动状态下的稳定性及其抗汗液干扰能力。跑步实验结果显示，该设备能够有效抵御躯体晃动干扰，准确反映运动过程中的生理信号变化，表明其适用于院前急救、康复训练及运动医学等存在显著躯体运动的场景。本研究发现，在站立-蹲踞-恢复站立这一包含体位变化的完整动作周期中，该监测设备在经历动态生理负荷后，其读数能准确、稳定地回归基线水平，未出现明显的信号差异，并且有线与无线脑血氧监测仪的测量值在不同监测场景中均具有较高的一致性；在救护车转运的静态、运动扰动及颠簸状态下，两者均表现出良好的相关性，且无线式脑血氧监测头带有较好的抗干扰能力，证实该设备在连续监测过程中具有出色的稳定性和可重复性，为其在临床动态场景（如心肺复苏、康复训练、术中体位变动等）中提供可靠数据奠定基础。

国外试验证实，不同NIRS仪器测得的rSO_2值存在显著差异。例如，INVOS 5100C、FORSIGHT等设备在健康志愿者缺氧期间的差异达9.1%，而NIRO 200等四种仪器的差异高达12.66%，这些偏差与仪器采用的动静脉比例加权、光源波长、算法、检测位置及个体

差异等因素有关[16-17]。因此,在救护车转运中无线与有线设备rSO_2绝对值存在统计学差异是正常情况。尽管如此,无线式脑血氧监测头带在静态、颠簸、运动扰动等多种状态下,其测量信号与有线设备信号之间保持了高度一致的相对变化趋势和良好的相关性,这表明无线式脑血氧监测头带在动态环境下具有可靠的监测性能。

本研究发现,即使在有创操作临床场景下,无线式脑血氧监测头带所测得的rSO_2值在操作前、中、后均保持稳定,未出现系统性偏移。这一结果与前述运动状态、转运场景下的稳定性测试结论相互印证,共同表明该无线式脑血氧监测头带在真实、复杂的临床操作环境中信号稳定。此外,在电复律/电除颤这一最具挑战性的场景中,电除颤/电复律前、中、后的rSO_2监测值在集中趋势与离散程度上均呈高度相似性,这直接表明该设备在强电磁干扰下仍能保持信号稳定。该稳定性可确保在心脏骤停抢救的最关键阶段——电击前后,临床医生能够获得连续、稳定的rSO_2数据,这对于指导复苏后管理、评估神经预后具有不可替代的价值,极大地增强了临床医生在复杂抢救环境中使用该设备的信心,证明其在急诊室、ICU抢救场景中的可用性[18-20]。值得注意的是,在放射检查这一特定场景中,无线式脑血氧监测头带同样表现出良好的信号稳定性。放射检查环境通常存在间歇性的强电磁辐射与机械运动(如CT扫描架的旋转、PET-CT检查床的移动),这对电子监测设备的抗电磁干扰能力与在复杂机械振动下的信号保真度提出了较高要求。本研究结果显示,在该环境下,rSO_2监测值在检查前、中、后均无统计学差异,表明该无线式脑血氧监测头带能够有效抵御此类间歇性、高强度环境干扰,未发生因设备受扰而导致的信号系统性偏移或瞬时失真。这一结果为该设备在影像科、介入手术室等存在类似电磁与机械干扰的复杂医疗环境中的应用,提供了重要的前期数据支持。

但本研究中无线式脑血氧监测头带仍有不足:在救护车转运的过程中,观察到强光直射可能对无线式脑血氧监测头带的信号稳定性构成挑战,这是一个值得关注的潜在干扰因素。未来的研究可系统性地设计对照实验,以量化不同光照强度、角度与环境光对设备性能的影响,从而进一步完善其在复杂户外及院前环境下的应用。Tobias[21]也曾报道强光源可显著降低信号质量,部分设备甚至出现假性低rSO_2读数或信号丢失,设备的光学屏蔽设计和信号滤波算法在抵御环境光干扰方面起关键作用。未来可通过进一步优化传感器感光元件、信号滤波算法、改良遮光材料以避免强光干扰。

综上,无线式脑血氧监测头带可应用于急诊环境中,与有线脑血氧监测相比,该仪器更具便携性,且灵敏性及稳定性相当。未来无线式脑血氧监测头带可在急诊环境进行更广泛的研究和应用,特别是心肺复苏等场景中,精确指导心肺复苏按压参数,以达到个体化、精准化治疗。

[参考文献]

[1] Pries PJ, Mutch WAC, Funk DJ. Characterizing drivers of change in intraoperative cerebral saturation using supervised machine learning [J]. J Clin Monit Comput, 2025, 39(3): 559-569. doi: 10.1007/s10877-025-01265-3.

[2] Bertini P, Marabotti A, Paternoster G, et al. Regional cerebral oxygen saturation to predict favorable outcome in extracorporeal cardiopulmonary resuscitation: a systematic review and meta-analysis [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2023, 37(7): 1265-1272. doi: 10.1053/j.jvca.2023.01.007.

[3] Van den Bempt S, Wauters L, Dewolf P. Pulseless electrical activity: detection of underlying causes in a prehospital setting [J]. Med Princ Pract, 2021, 30(3): 212-222. doi: 10.1159/000513431.

[4] Moerman A, Wouters P. Near-infrared spectroscopy (NIRS) monitoring in contemporary anesthesia and critical care [J]. Acta Anaesthesiol Belg, 2010, 61(4): 185-194.

[5] Jaeger M, Soehle M, Meixensberger J. Brain tissue oxygen ($PtiO_2$): a clinical comparison of two monitoring devices [J]. Acta Neurochir Suppl, 2005, 95: 79-81. doi: 10.1007/3-211-32318-x_17.

[6] Cheng A, Magid DJ, Auerbach M, et al. Part 6: Resuscitation Education Science: 2020 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care [J]. Circulation, 2020, 142: s551-s579. doi: 10.1161/CIR.0000000000000903.

[7] Gregory AJ, Hatem MA, Yee K, et al. Optimal placement of cerebral oximeter monitors to avoid the frontal sinus as determined by computed tomography [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2016, 30(1): 127-133. doi: 10.1053/j.jvca.2015.07.004.

[8] Juanning SI, Zhang X, Meng LI, et al. Wearable wireless real-time cerebral oximeter for measuring regional cerebral oxygen saturation [J]. Information Sciences, 2021, 64(1): 112203. doi: 10.3389/fneur.2024.1445563.

[9] McInnis KJ, Balady GJ. Comparison of submaximal exercise responses using the Bruce vs modified Bruce protocols [J]. Med Sci Sports Exerc, 1994, 26(1): 103-107.

[10] El-Baba RM, Schury MP. Neuroanatomy, frontal cortex [M]. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025.

[11] Hogue CW, Levine A, Hudson A, et al. Clinical applications of near-infrared spectroscopy monitoring in cardiovascular surgery [J]. Anesthesiology, 2021, 134(5): 784-791. doi: 10.1097/ALN.0000000000003700.

[12] Tribuddharat S, Ngamsaengsirisup K, Mahothorn P, et al. Correlation and agreement of regional cerebral oxygen saturation measured from sensor sites at frontal and temporal areas in adult patients undergoing cardiovascular anesthesia [J]. Peer J, 2022, 10: e14058. doi: 10.7717/peerj.14058.