

数字疗法在青少年特发性脊柱侧弯康复中的应用进展

罗文雅¹ 宋振华^{1,3} 李小山^{1,3} 冯英泰⁴ 江潮胤^{1,2}

¹上海市第六人民医院海口骨科与糖尿病医院康复医学科,海口 570300; ²上海交通大学医学院附属第六人民医院国家骨科医学中心,上海 200120; ³中南大学医学院附属海口医院康复医学科,海口 570100; ⁴上海交通大学医学院附属上海市第六人民医院骨科,上海 200120

通信作者:江潮胤,Email:HUNBALL2@163.com

【摘要】 青少年特发性脊柱侧弯是 10~18 岁人群中最常见的脊柱三维畸形,严重影响青少年的生长发育、身体健康和生活质量。传统的治疗方法如物理治疗、支具治疗和手术干预存在依从性差或手术治疗风险高等局限,而数字疗法通过运用新兴的技术手段,如人工智能和远程监测,提高了治疗可及性和患者的参与度,为青少年脊柱侧弯的精准评估、个体化干预和长期管理提供了实时反馈、动态调整和居家可及的新机遇。首先,本综述总结了数字疗法的定义、技术基础和其相对传统疗法在脊柱侧弯领域中的优势;然后,重点探讨了数字疗法在疾病评估、干预和长期管理中的具体应用;最后,进一步分析了数字疗法的局限性与未来发展方向,旨在为临床上治疗青少年脊柱侧弯患者提供新的思路。

【关键词】 数字疗法; 青少年脊柱侧弯; 康复; 人工智能; 远程监测

基金项目:海南省临床医学中心建设项目(0202067)

Funding: The Construction Project of Hainan Provincial Clinical Medical Center (0202067)

DOI:10.3760/cma.j.cn421666-20250725-00627

青少年特发性脊柱侧弯(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)是一种在青春快速生长期高发的三维脊柱畸形。该疾病通过影响体态对称性、生理功能及社会活动参与度,显著损害患者身心健康与生活质量^[1]。对于 Cobb 角 $>45^\circ$ 的严重脊柱侧弯,手术矫正虽为常规治疗选择,但因其创伤性大、并发症发生风险较高,且可能需二次翻修,患者及家庭的接受度仍受限;对于 Cobb 角 $<45^\circ$ 的轻中度侧弯,矫形器治疗与物理疗法等传统干预手段虽广泛应用,但存在治疗周期长、患者舒适度低和疗效个体差异大等问题,常导致治疗依从性不佳,并增加了预后不确定性^[2,4]。近年来,数字疗法(digital therapeutics, DTx)的迅速发展为 AIS 管理开辟了新路径。它整合了人工智能(artificial intelligence, AI)、可穿戴设备和远程监控技术,展现出显著价值:打破地域限制,提升可及性;优化成本,减轻长期康复负担;重新分配资源,平衡城乡诊疗差异;加强数据保障,强化健康管理^[5]。值得注意的是,青少年群体对数字技术的天然亲和力和高度接受,使其成为 DTx 干预的潜力适配人群。本文聚焦 DTx 在 AIS 康复领域的应用场景,系统探讨其在精准评估、干预及动态健康管理中的实施框架,为临床实践与研究发展提供理论参考。

数字疗法的定义与技术基础

DTx 是由软件程序驱动,以循证医学为基础的干预方案,用以治疗、管理或预防疾病的一种新型疗法^[6]。这类技术可以独立使用,或与药物、设备及其他疗法结合使用,以优化病人护理和健康结果^[7]。随着数字健康的快速发展,DTx 逐渐被应用于多种疾病的管理中,包括糖尿病、癌症和神经精神疾病等^[8]。根据功能和技术的特性,DTx 主要包括基于 AI 的评估系统、可穿戴设备、虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented

reality, AR)技术等^[9-10]。这些技术路径不仅反映了其构成的多样性,也反映了其在不同临床应用中实现个体化干预和动态适应的核心逻辑。

DTx 因康复医学的个性化需求而发展,突破了传统康复的时空限制。研究显示,DTx 在慢性病管理、青少年脊柱侧弯和运动康复等领域取得显著成效^[11]。Carrera A 等^[12]基于机器学习增强的 DTx 评估与开发框架的应用程序,将 127 例 2 型糖尿病患者分为 DTx 组和传统门诊教育对照组。12 周后,DTx 组糖化血红蛋白降低幅度较对照组多 0.8% ($P<0.001$)。此外,DTx 组每日步数增加了 2800 步,体重较对照组降低了 2.6 kg。该研究提示,DTx 可成为面对面糖尿病教育管理的有效替代方案。Yuan 等^[13]基于数字化物理治疗脊柱侧弯专项训练研发了一款 HIRS 程序,将 90 例 AIS 患者分为数字化干预组(通过 HIRS 程序进行远程指导)和常规治疗组(门诊治疗+家庭无监督训练)。结果显示,经过 6 个月干预,数字化治疗组的 Cobb 角改善幅度显著优于常规治疗组,且 76.6% 的数字化治疗组患者出现显著改善($>6^\circ$),而常规组仅 45.3% 患者出现改善。此外,DTx 提供个性化康复计划和在线支持。Seron 等^[14]总结了 52 项随机对照试验(共纳入 4867 例患者),结果显示远程康复在疼痛缓解与功能恢复方面达到面对面物理治疗的非劣效性标准,依从性相当且成本降低约三分之一。因此,远程康复可作为传统门诊康复的可靠替代模式。在技术发展的推动下,DTx 作为其演进形态,预计将在未来的康复医学体系中发挥日益重要、乃至不可或缺的作用。

数字疗法管理脊柱侧弯的核心优势

传统青少年脊柱侧弯康复依赖矫形器与物理治疗,但已有数据证实了其依从性低和疗效低的困境。Manzetti 等^[15]开展

了一项纳入 1312 例患者的系统综述,结果显示 AIS 患者矫形器日均佩戴时间仅 11.4 h,长期达标率仅 37%,远低于有效阈值 16 h,提示临床实践中矫形器治疗的依从性亟待改善;Yagci 等^[16]开展了一项随机对照试验,比较核心稳定训练(core stability exercise, CSE)与脊柱侧弯特异性训练(scoliosis-specific exercise, SSE)在中度 AIS 患者中的疗效。该研究纳入 60 例受试者,干预 6 个月。结果显示,两组 Cobb 角改善无显著差异,SSE 组仅在躯干旋转矫正方面优于 CSE 组($P < 0.05$),但未能提升生活质量,且两种训练均无法替代矫形器治疗。量化证据提示传统模式“戴不住、练不精”,亟需替代方案。尽管矫形器和运动疗法联合治疗对脊柱侧弯有改善效果^[17],但患者生活质量的提升有限,且传统方法忽视了青少年的心理和社会适应需求^[18]。相较于传统疗法,由 VR 和 AR 驱动的沉浸式训练将康复过程“游戏化”。Nomura 等^[19]研究显示,VR/AR DTx 较传统面对面物理治疗整体依从性平均提高 23%。此外,沉浸式 VR 矫正训练组较传统矫形器与物理治疗组 Cobb 角平均下降 2~3°,依从性提升 20~30%,并即时改善躯干旋转、骨盆侧移与步态对称^[20-22]。

数字疗法在脊柱侧弯中的研究进展

国内脊柱侧弯 DTx 聚焦康复应用程序,正成研究新热点。Zhang 等^[23]通过开发一种基于深度学习的手机应用——AlignProCARE,依托云端后台实时接收照片及 AI 预测结果,与既往需借助标尺、固定背景或仅具备角度测量功能的应用程序相异,此应用首次实现“任意场景单张照片+AI 分级+临床决策”的一键式闭环操作,并可同步至医生后台,以达成远程病例调取。同时,该应用可辅助临床医生及时察觉病情进展,避免治疗延误,并降低儿童患者的辐射暴露风险,这充分表明 DTx 在青少年脊柱侧弯康复领域的应用具备良好前景。

一、数字疗法在脊柱侧弯评估中的应用

(一)人工智能辅助影像学评估

AI 技术在影像学评估,特别是脊柱侧弯诊断中展现出巨大潜力。基于深度学习的 X 光片分析能够快速准确地测量 Cobb 角,这是评估脊柱侧弯严重程度的重要指标。AI 系统通过自动化图像分析,能迅速处理大量影像数据,提高诊断效率和准确性。这项技术不仅减轻了医生的工作负担,还通过标准化评估减少了主观判断带来的误差^[24]。Xie 等^[25]开发了一款自动化 AI 方法,能够在胸部 X 光片上识别椎体位置并诊断脊柱侧弯,研究结果表明,AI 自动测量 Cobb 角对于 $\geq 10^\circ$ 脊柱侧弯的敏感性达 96.2%,特异性为 94.7%,阳性预测值(positive predictive value, PPV)为 91.4%,阴性预测值(negative predictive value, NPV)为 98.0%,各项指标均显著优于高年资影像科医师的人工判读结果(人工判读敏感性仅为 77.4%,PPV 为 78.5%),显示出作为筛查替代策略的前景。与此类似, Lee 等^[26]基于深度学习开发了一种结合生成对抗网络的深度学习半监督模型,专门用于胸部 X 光片的脊柱侧弯筛查。该研究共纳入了 512 例受试者,结果表明该工具的检测特异性高达 98.5%,但敏感性仅为 28.5%。与传统筛查手段相比,虽然特异性显著提升,但这种优势是以牺牲敏感性为代价的。较低的敏感性意味着大量非脊柱侧弯患者仍需接受额外的 X 光检查以明确诊断,这不仅增加了医疗成本,更使患者面临不必要的辐射风

险。Lee 等^[27]引入简易多层感知器对胸片进行了智能分析,经内外数据集验证,该模型展现出优异的受试者工作特征曲线,当敏感度设定为 0.9 时,模型在内部数据集的特异性达 69.7%,外部数据集为 64.6%。虽然胸椎 X 光片无法完整显示腰椎曲线,但该研究表明, AI 应用于胸片筛查可获得理想的敏感性与特异性平衡,这为脊柱侧弯筛查提供了切实可行的新途径。

(二)可穿戴传感技术与动态功能评估

在 AIS 的评估中,可穿戴传感器技术能够提供非侵入性、实时和连续的监测支持,尤其在 DTx 应用场景下,该类技术有助于实现个性化诊断和干预方案的精准调整。目前常用的可穿戴传感器主要包括:惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、表面肌电图(surface electromyography, sEMG)、脑电图(electroencephalography, EEG)、姿态感知织物(pose-perceiving fabric)和压力分布传感系统(pressure distribution sensing system),详见表 1。可穿戴设备直接佩戴于人体,融合传感器和信息技术等,在脊柱侧弯监测中起到作用重要。IMU 实时监测脊柱姿势,提供动态数据,并记录日常姿势变化,辅助医生了解病情发展和治疗效果。研究发现^[28],IMU 能够实时采集数据,并通过算法分析提供对脊柱状态的反馈,使得患者和医疗团队能够及时调整治疗计划。Kim 等^[29]基于青少年脊柱侧弯患者步态特征构建了机器学习模型,可用于区分 AIS 患者的进展性和非进展性脊柱侧弯曲线。研究显示,利用可穿戴 IMU 传感器采集的步态数据具有准确评估脊柱侧弯症进展的潜力,同时这种监测方式还能激励患者参与康复过程,提高他们的治疗依从性和治疗积极性。对于脊柱侧弯患者而言,能够在家庭环境中进行的动态监测,不仅提高了其生活质量,还为后续的治疗提供了更为全面的数据支持^[30]。

sEMG 可通过电极检测肌肉电活动,适用于评估 AIS 患者的脊柱旁肌肉功能不对称性。研究发现,进展性 AIS 患者的凸侧肌肉激活时间早于凹侧,尤其在右胸椎弯曲患者中更显著。sEMG 技术可捕捉信号不对称与脊柱曲线参数相关,帮助识别高风险患者^[31]。EEG 可记录大脑活动,适用于研究 AIS 的神经控制缺陷。在一项研究中,使用 EEG 监测 14 例 AIS 患者,发现中央区域 theta 波相对功率显著增加,反映了补偿性策略。同时,脊柱弯曲对侧的 alpha 波相对功率更高,表明大脑通过不对称活动补偿神经肌肉功能缺陷。可穿戴 EEG 设备便于进行监测,可整合到 DTx 平台用于长期追踪^[32]。除了上述系统,姿态感知织物和压力分布传感系统在脊柱侧弯评估中也有潜力,Ng 等^[33]将 12 组柔性电阻纱线编织于青少年弹性背心,可在 0~30° 范围内实时输出躯干旋转角,与 Bunnell 尺所测 Cobb 角的相关系数 $r = 0.82$; Li 等^[34]在 34 例 AIS 青少年鞋垫内置 64 点压阻单元,发现凸侧足底峰值压力较凹侧高 14%,且该侧压力-时间积分与 Cobb 角呈中度正相关($r = 0.65$)。综上所述,表面 IMU、sEMG 和 EEG 是 AIS 评估中的主流技术,可揭示神经肌肉不对称和脑功能补偿机制,为 DTx 干预提供依据。这些技术的发展将促进早期诊断和动态监测,但需更多临床验证。

二、数字疗法在脊柱侧弯干预中的应用

(一)虚拟现实与增强现实技术

VR 与 AR 沉浸式训练通过将康复过程“游戏化”,在提升患者依从性的同时,对改善脊柱对称性具有积极作用^[31,35]。

表 1 用于 AIS 评估的常见可穿戴传感器技术

技术类别	代表性设备/传感器	检测内容	评估优势	挑战
惯性测量单元 (IMU) ^[28-30]	惯性传感器节点	三维加速度、角速度(常用部位:躯干、骶骨)	实时量化脊柱屈曲/伸展/侧屈角度、活动度、步态参数(速度、对称性)	传感器位置漂移、复杂动态动作准确性
表面肌电图 (sEMG) ^[31]	无线 sEMG 电极片	脊柱旁肌(竖脊肌、腰方肌等)肌电信号特征(幅值、频率、疲劳度、左右对称性)	评估肌力平衡、激活模式、训练负荷	皮肤阻抗干扰、佩戴稳定性、数据处理复杂性高
脑电图 (EEG) ^[32]	EEG 帽	神经控制缺陷	记录脑震荡活动,评估脊柱侧弯对侧脑活动	易受环境干扰,需在标准化条件下采集数据
姿态感知织物 ^[33]	柔性电阻/电容传感器集成衣	脊柱弯曲度、对称性变化	自然舒适贴合度高,适于长时间连续监测姿态	信号稳定性、耐用性、洗涤影响、成本偏高
压力分布传感系统 ^[34]	鞋垫或坐垫式压力传感器	足底/坐姿压力分布、重心轨迹	评估平衡功能、步态对称性、坐位身体负荷分布	主要反映下肢功能,需与其他数据融合评估脊柱

VR 通过营造低负荷虚拟任务并转移注意力,让患者在显著降低治疗过程中的疼痛感受体验运动变化,帮助理解身体状况,激发自主练习意愿,使康复过程更有趣有效。DTx 在疼痛管理中可有效降低疼痛感^[36],Fougère 等^[37]研究发现,使用 VR 的患者疼痛减轻程度明显高于常规治疗,且效果持续数小时。Misterska 等^[38]将 60 例术后 AIS 青少年随机分入接受 VR 认知行为治疗的干预组 (VR-cognitive-behavioral therapy, VR-CBT 组) 与接受标准心理支持与健康教育的对照组 (常规对照组),4 周后 VR-CBT 组身体意象障碍评分较对照组下降 37.6% ($P < 0.001$),焦虑及抑郁症状评分较对照组分别减少 34% 与 29%,91% 患者主动参与训练。研究首次以沉浸式可视化矫正后体型为干预靶点,量化逆转术后心理障碍,为建立“影像-心理”双终点治疗标准提供了循证依据。此外,AR 技术通过将虚拟元素叠加到现实中,提供实时反馈和指导,显著提高了外科手术的准确性和效率^[39]。在脊柱侧弯治疗中,AR 帮助实时监测脊柱变化,确保个性化康复体验。Sakai 等^[40]通过前瞻对照研究发现,76 例接受后路矫形术的 AIS 患者,随机分为 AR 智能眼镜组与常规导航组,AR 组置钉准确率较常规导航组提高 4.6 个百分点,Cobb 角矫正率提高 7 个百分点,手术时间缩短 21 min,术者疲劳降低 27%,证实 AR 导航可同时提升 AIS 后路矫形术的精度、效果与操作舒适度。此外,通过 AR 技术实现的可视化辅助,帮助患者更清晰地了解自身的康复进展,从而有效减轻了患者的心理负担^[41]。综上所述,VR 和 AR 技术通过提高患者参与度和依从性,改善治疗效果,为脊柱侧弯患者提供新的有效康复方案,未来前景广阔。

(二) 基于应用程序的个性化康复方案

随着移动技术的发展,基于应用程序的个性化康复方案在脊柱侧弯治疗中受到关注。移动应用为患者提供定制的运动训练计划,并通过游戏化设计提升参与度。研究表明,智能手机应用能结合患者情况,提供个性化锻炼建议,提高锻炼依从性。这种方案考虑患者身体状况,并能根据反馈实时调整训练内容,确保每位患者以适合自己的节奏康复。此外,基于应用程序的康复方案通过游戏化元素提升患者的参与感和乐趣,激励他们完成每天的锻炼任务,增强主动性和自主性。Yuan 等^[13]开发了一款手机应用程序——Healbone 智能康复系统。该系统通过手机应用程序实现远程监督和指导脊柱侧弯特异性运动训

练 (physiotherapeutic scoliosis-specific exercises, PSSE), 同时结合脊柱侧弯相关的教育视频,帮助患者完成长期的 PSSE 训练和日常自我管理。该应用程序还形成了一个支持性社区,进一步提高患者的锻炼积极性和信心。这种社交互动不仅能够减少患者在康复过程中的孤独感,还能通过共同的目标激励彼此,形成良性循环。基于应用程序的个性化康复方案便于监测和评估,医务人员可实时获取患者锻炼数据,及时调整康复计划,提高治疗的针对性和有效性^[42]。综上所述,该方案在脊柱侧弯干预中具有显著潜力,能提升患者参与度,并通过个性化训练提高康复效果,为患者恢复提供支持。

(三) 数字疗法在持续监测和个性化治疗中的作用

DTx 在青少年脊柱侧弯的长期管理中效果显著,尤其在延缓侧弯进展和改善生活质量方面。研究表明^[13,43],经过长期随访,接受 DTx 的患者侧弯角度进展明显低于未接受者。DTx 通过持续监测和个性化治疗,帮助患者更好地自我管理和锻炼,减少侧弯恶化。同时,DTx 也关注患者的心理和社会适应能力,显著提高生活质量,增强社交参与和自我效能感^[41,44]。此外,DTx 在术后康复动态监测中发挥重要作用,指导患者安全有效地恢复活动^[45]。总体而言,DTx 在脊柱侧弯患者的长期治疗中展现出积极效果,值得推广应用。

DTx 在疾病管理中展现了潜力,尤其是青少年脊柱侧弯的长期管理。远程监测技术使患者健康数据通过云端整合,促进医生与患者的互动。患者的脊柱角度变化和疼痛等级等指标可实时上传,医生可及时分析与反馈。这种模式提高了患者的参与度和依从性,为医生提供了精准的治疗依据。研究表明^[7],远程监测技术在慢性疾病的管理中能够显著改善患者的健康结果和生活质量。Kamila 等^[22]通过定性研究探讨了数字健康技术在脊柱侧弯患者管理中的应用,包括智能手机和网络应用,提供脊柱监测和远程咨询等功能。研究显示,这些技术能促进信息获取、同伴支持和改善与医疗提供者的沟通。定制化游戏化功能可能进一步提升依从性,为临床实践和未来研究提供见解。此外,实时数据反馈还可以帮助患者了解自身病情的变化,从而增强其自我管理能力和对治疗的信心。远程监测的整合不仅有助于减轻医疗资源的压力,还能在疫情等特殊情况下,保持医疗服务的连续性和有效性^[9,46]。Yin 等^[47]开发了一种结合 sEMG 信号的时域卷积混合模型,用于预测 AIS 患者

术后 Cobb 角的进展,为个性化治疗提供反馈。研究表明,该模型能精确预测 AIS 患者在 Schroth 锻炼期间的 Cobb 角变化,尤其在长期预测中效果显著,为临床治疗提供实时反馈,并优化治疗计划。

家庭康复支持系统是 DTx 在青少年脊柱侧弯管理中的重要应用。患者可以在家中使用 DTx 设备进行康复训练,减少医院复诊频率,从而降低医疗成本。家庭康复设备包括移动应用、在线平台和可穿戴设备,使患者在无需频繁就医的情况下继续治疗和监测。研究显示,数字康复系统提高了患者的运动能力和生活质量,减少了医院复诊带来的时间和经济负担^[8,48]。此外,系统提供个性化训练方案,能根据患者需求调整,提高康复有效性和满意度^[10]。这种数字治疗模式为青少年脊柱侧弯的长期管理提供了创新解决方案,增强了患者及家庭的参与感,促进了积极的康复过程。

问题和展望

一、技术局限性

DTx 在青少年脊柱侧弯康复中的应用虽然展现出诸多优势,但也面临技术层面的局限性。首先,设备成本较高是一个显著障碍,尤其是在经济条件相对有限的地区,昂贵的数字设备和软件可能使得许多青少年无法接触到这些有潜力的治疗工具^[24]。其次,数据隐私问题仍未完全解决。虽然 DTx 能够通过收集患者数据来优化治疗方案,但这也引发了关于个人隐私和数据安全的担忧^[49-50]。患者对其医疗信息的安全性有着越来越高的期望,而现有的技术标准和法规还未能完全保障用户数据的隐私和安全,这可能会影响患者的接受度和参与度^[51]。最后,可穿戴传感器自身存在信号漂移、运动伪影以及皮肤阻抗的昼夜波动现象。例如,IMU 在 30 min 连续监测过程中,角度漂移可达 $\pm 2.1^\circ$; sEMG 在出汗状态下,基线噪声升高 40%。鉴于此,该传感器需每日进行校准并更换电极,这在一定程度上降低了其居家应用的可行性^[52-53]。因此,在推进 DTx 的应用时,必须重视这些技术性的挑战,并寻求解决方案,以确保患者能够在安全的环境中接受治疗。

二、临床推广障碍

在 DTx 的临床推广过程中,医生与患者对新技术的接受度不一是一个重要障碍。虽然一些医生对 DTx 持积极态度,并愿意在临床实践中应用,但也有部分医生对其有效性和可行性表示怀疑。缺乏标准化的临床指南,使得医生在推荐 DTx 时显得犹豫不决,影响了其在实际治疗中的推广^[9,54]。此外,患者的接受度也因个体差异而异,部分患者可能对新技术感到陌生或不信任,从而影响他们的治疗依从性。为了克服这些障碍,迫切需要制定更加明确的标准化指南,并进行针对医生和患者的教育和宣传,以增强他们对 DTx 的信任和认知^[55]。这种推广过程不仅需要临床医生的参与,还需要政策制定者、技术开发者和患者之间的协同合作,以确保 DTx 能够在青少年脊柱侧弯的康复中发挥更大的作用。

三、展望

为攻克成本高昂和隐私隐患这两大技术难题,需从多方面开展工作:其一,可采用“手机+AI”模式替代进口传感器,并通过政府、企业与学校共建共享“康复角”,以降低硬件准入门槛;其二,为降低 DTx 实施进程中所产生的安全与隐私风险,

国家应设立专门的监管部门,对 DTx 设计方案展开全面评估,并对相关产品实施全程动态监管。此外,需构建与信息共享相匹配的信息安全技术及基础设施体系,提高网络安全水平,进而加强对医疗服务提供者、患者和保险机构三方的隐私保护。最后,远程康复把治疗场景从医院延伸到开放的家庭环境,这使得“数据安全、设备可靠、身份认证与临床有效性”四重安全风险随之放大。为确保其应用既高效又安全^[56-58],必须构建“技术加固、持续监管与实时 AI 监护”三位一体的协同保障系统。

结语

DTx 作为基于软件和算法的创新性康复干预手段,主要通过整合软件驱动程序、实时监控和个性化算法实现康复目标。该技术已在青少年脊柱侧弯康复中展现出良好的干预效果与应用潜力。其成功关键在于能够根据患者具体病情与康复进展制定个性化方案,并提供实时反馈,从而显著提升治疗依从性与康复效果。然而,DTx 在推广中仍面临多重挑战。在技术层面,设备与服务的成本较高,限制了部分家庭的可及性;同时,健康数据的安全与隐私保护亟待加强。在临床层面,医生与患者对新技术接受度不一,相关培训与教育体系尚不完善。未来研究应致力于推动多模态技术融合,结合 VR、AI 与大数据分析,构建更智能和沉浸式的康复系统,以持续优化治疗效果。总之,DTx 为青少年脊柱侧弯的康复管理带来了新的机遇,但仍需在可及性、数据安全、临床融合与技术整合等方面系统推进,以促使其在康复实践中实现更广泛和更深入的应用。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 朱博文,姚重界,孔令军,等.手法治疗青少年特发性脊柱侧弯的研究进展[J].中华中医药杂志,2024,39(3):1383-1386.
- [2] 姜博文,曹青青,张雅纯,等.青少年特发性脊柱侧弯非手术治疗研究进展[J].中医康复,2025,2(6):51-57. DOI: 10.19787/j.issn.2097-3128.2025.06.010.
- [3] Ghorbani F, Kamali M, Ranjbar H, et al. Brace compliance process in adolescents with spinal deformities: a qualitative study[J]. PLoS One, 2024, 19(8): e0305754. DOI: 10.1371/journal.pone.0305754.
- [4] 尹子文,汪雷,吴会东,等.青少年特发性脊柱侧凸保守治疗患者照顾者负担特点及影响因素[J].昆明医科大学学报,2023,44(4):69-74. DOI: 10.12259/j.issn.2095-610X.
- [5] 付亏杰,王玉昌,许二妮,等.数字疗法在脑卒中康复中的应用研究进展[J].中华物理医学与康复杂志,2025,47(3):269-273. DOI: 10.3760/cma.j.cn421666-20241015-00839.
- [6] Jiang N, Yu X, Yang Y, et al. Digital therapeutics in china: comprehensive review[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e70955. DOI: 10.2196/70955.
- [7] Abbadessa G, Brigo F, Clerico M, et al. Digital therapeutics in neurology[J]. J Neurol, 2022; 269(3): 1209-1224. DOI: 10.1007/s00415-021-10608-4.
- [8] Hong JS, Wasden C, Han DH. Introduction of digital therapeutics[J]. Comput Methods Programs Biomed. 2021, 209: 106319. DOI: 10.1016/j.cmpb.2021.106319.

- [9] Phan P, Mitragotri S, Zhao Z. Digital therapeutics in the clinic[J]. *Bioeng Transl Med*, 2023, 3; 8(4): e10536. DOI: 10.1002/btm.210536.
- [10] Refolo P, Sacchini D, Raimondi C, Spagnolo AG. Ethics of digital therapeutics (DTx)[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2022, 26(18): 6418-6423. DOI: 10.26355/eurrev_202209_29741.
- [11] Kim S, Eom J, Shim J. A Comparative study on intention to use digital therapeutics; MZ generation and baby boomers' digital therapeutics use intention in Korea[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(15): 9556. DOI: 10.3390/ijerph19159556.
- [12] Carrera A, Manetti S, Lettieri E. Rewiring care delivery through Digital Therapeutics (DTx): a machine learning-enhanced assessment and development (M-LEAD) framework[J]. *BMC Health Serv Res*, 2024, 24(1): 237. DOI: 10.1186/s12913-024-10702-z.
- [13] Yuan W, Shi W, Chen L, et al. Digital physiotherapeutic scoliosis-specific exercises for adolescent idiopathic scoliosis: a randomized clinical trial[J]. *JAMA Netw Open*, 2025, 8(2): e2459929. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2024.59929.
- [14] Seron P, Oliveros MJ, Gutierrez-Arias R, et al. Effectiveness of telerehabilitation in physical therapy: a rapid overview[J]. *Phys Ther*, 2021, 101(6): pzab053. DOI: 10.1093/ptj/pzab053.
- [15] Manzetti M, Ruffilli A, Barile F, et al. Is there a skeletal age index that can predict accurate curve progression in adolescent idiopathic scoliosis? A systematic review[J]. *Pediatr Radiol*, 2024, 54(2): 299-315. DOI: 10.1007/s00247-023-05834-z.
- [16] Yagci G, Yakut Y. Core stabilization exercises versus scoliosis-specific exercises in moderate idiopathic scoliosis treatment[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2019, 43(3): 301-308. DOI: 10.1177/0309364618820144.
- [17] Qi X, Peng C, Fu P, et al. Correlation between physical activity and adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 978. DOI: 10.1186/s12891-023-07114-1.
- [18] Jamaludin A, Fairbank J, Harding I, et al. Identifying scoliosis in population-based cohorts: automation of a validated method based on total body dual energy X-ray absorptiometry scans[J]. *Calcif Tissue Int*, 2020, 106(4): 378-385. DOI: 10.1007/s00223-019-00651-9.
- [19] Nomura A. Digital health, digital medicine, and digital therapeutics in cardiology: current evidence and future perspective in Japan[J]. *Hypertens Res*, 2023, 46(9): 2126-2134. DOI: 10.1038/s41440-023-01317-8.
- [20] Gao S, He T, Zhang Z, et al. A motion capturing and energy harvesting hybridized lower-limb system for rehabilitation and sports applications[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2021, 8(20): e2101834. DOI: 10.1002/advs.202101834.
- [21] Choi H, Seo K, Hyung S, et al. Compact hip-force sensor for a gait-assistance exoskeleton system[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18(2): 566. DOI: 10.3390/s18020566.
- [22] Sykorova K, Mathew A, Pavel N, et al. Exploring stakeholders' perceptions of using digital health technologies to improve the conservative treatment of adolescent idiopathic scoliosis; qualitative study[J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e69089. DOI: 10.2196/69089.
- [23] Zhang T, Zhu C, Zhao Y, et al. Deep learning model to classify and monitor idiopathic scoliosis in adolescents using a single smartphone photograph[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(8): e2330617. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2023.30617.
- [24] Kapinski N, Jaskulski K, Witkowska J, et al. Towards achilles tendon injury prevention in athletes with structural mri biomarkers: a machine learning approach[J]. *Sports Med Open*, 2024, 10(1): 118. DOI: 10.1186/s40798-024-00786-6.
- [25] Xie L, Zhang Q, He D, et al. Automatically measuring the Cobb angle and screening for scoliosis on chest radiograph with a novel artificial intelligence method[J]. *Am J Transl Res*, 2022, 14(11): 7880-7888.
- [26] Lee W, Shin K, Lee J, et al. Diagnosis of scoliosis using chest radiographs with a semi-supervised generative adversarial network[J]. *J Korean Soc Radiol*, 2022, 83(6): 1298-1311. DOI: 10.3348/jksr.2021.0146.
- [27] Lee JS, Shin K, Ryu SM, et al. Screening of adolescent idiopathic scoliosis using generative adversarial network (GAN) inversion method in chest radiographs[J]. *PLoS One*, 2023, 18(5): e0285489. DOI: 10.1371/journal.pone.0285489.
- [28] Pau M, Leban B, Piloni G, et al. Trunk rotation alters postural sway but not gait in female children and early adolescents: results from a school-based screening for scoliosis[J]. *Gait Posture*, 2018, 61: 301-305. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.01.031.
- [29] Kim YG, Kim S, Park JH, et al. Explainable deep-learning-based gait analysis of hip-knee cyclogram for the prediction of adolescent idiopathic scoliosis progression[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(14): 4504. DOI: 10.3390/s24144504.
- [30] Fazeli Veisari S, Bidari S, Barati K, et al. Wearable devices in scoliosis treatment: a scoping review of innovations and challenges[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2025, 12(7): 696. DOI: 10.3390/bioengineering12070696.
- [31] Fan Y, To MK, Yeung EHK, et al. Electromyographic discrepancy in paravertebral muscle activity predicts early curve progression of untreated adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Asian Spine J*, 2023, 17(5): 922-932. DOI: 10.31616/asj.2023.0199.
- [32] Formaggio E, Bertuccelli M, Rubega M, et al. Brain oscillatory activity in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 17266. DOI: 10.1038/s41598-022-19449-1.
- [33] Ng PTT, Claus A, Izatt MT, et al. Is spinal neuromuscular function asymmetrical in adolescents with idiopathic scoliosis compared to those without scoliosis? A narrative review of surface EMG studies[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2022, 63: 102640. DOI: 10.1016/j.jelekin.2022.102640.
- [34] Li Y, Chen X, Wang L, et al. Plantar pressure distribution pattern as a new indicator for adolescent idiopathic scoliosis; a pilot study[J]. *J Health Eng*, 2020, 2020: 8851714. DOI: 10.1155/2020/8851714.
- [35] De Salvatore S, Vadalà G, Oggiano L, et al. Virtual reality in preoperative planning of adolescent idiopathic scoliosis surgery using google cardboard[J]. *Neurospine*, 2021, 18(1): 199-205. DOI: 10.14245/ns.2040574.287.
- [36] Courvoisier A, Cebrian A, Simon J, et al. Virtual scoliosis surgery using a 3D-printed model based on biplanar radiographs[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2022, 9(9): 469. DOI: 10.3390/bioengineering9090469.
- [37] Fougère M, Greco-Vuilloud J, Arnous C, et al. Sensory stimulations potentializing digital therapeutics pain control[J]. *Front Pain Res (Lausanne)*, 2023, 4: 1168377. DOI: 10.3389/fpain.2023.1168377.
- [38] Misterska E, Tomaszewski M, Górski F, et al. Assessing the efficacy of cognitive-behavioral therapy on body image in adolescent scoliosis

- patients using virtual reality [J]. *J Clin Med*, 2024, 13 (21) : 6422. DOI: 10.3390/jcm13216422.
- [39] Chang CN, Li CR, Liao SS, et al. Augmented reality in scoliosis correction surgery: efficiency and accuracy in pedicle screw instrumentation [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2025, 61 (4) : 576. DOI: 10.3390/medicina61040576.
- [40] Sakai D, Schol J, Kawachi A, et al. Adolescent idiopathic scoliotic deformity correction surgery assisted by smart glasses can enhance correction outcomes and accuracy and also improve surgeon fatigue [J]. *World Neurosurg*, 2023, 178 : e96-e103. DOI: 10.1016/j.wneu.2023.06.144.
- [41] Kim H, Chang BS, Chang SY. Current issues in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a comprehensive narrative review [J]. *Asian Spine J*, 2024, 8 (5) : 731-742. DOI: 10.31616/asj.2024.0367.
- [42] 施新革, 宋月鹏, 胡巍然, 等. 原创智能手机脊柱侧弯筛查 APP 测量青少年特发性脊柱侧凸 Cobb 角的可靠性研究 [J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2022, 37 (14) : 1383-1386. DOI: 10.3760/ema.j.cn101070-20210610-0066.
- [43] Baik SM, Kim SH, Lee JH. A scoping review of the different types of exercise programs proposed for the improvement of postural balance in adolescents with idiopathic scoliosis [J]. *J Back Musculoskeletal Rehabil*, 2023, 36 (6) : 1261-1272. DOI: 10.3233/BMR-220391.
- [44] He W, Li JL, Wang JY, et al. Optimization of traction parameters for lumbar scoliosis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25 (1) : 472. DOI: 10.1186/s12891-024-07583-y.
- [45] Turtle JD, Mehta JS, Parent S, et al. Guidelines for returning to activity after spinal deformity surgery [J]. *Spine Deform*, 2025, 13 (2) : 383-390. DOI: 10.1007/s43390-024-01010-x.
- [46] Pastorello Y, Buzgau P, Barna IT, et al. The relationship between orthodontic abnormalities and spinal deformities: a review of literature [J]. *Cureus*, 2025, 17 (3) : e80934. DOI: 10.7759/cureus.80934.
- [47] Yin S, Chen J, Yan P. Prediction of post-Schroth Cobb angle changes in adolescent idiopathic scoliosis patients based on neural networks and surface electromyography [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2025, 13 : 1570022. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1570022.
- [48] Dolan LA, Weinstein SL, Abel MF, et al. Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis Trial (BrAIST): development and validation of a prognostic model in untreated adolescent idiopathic scoliosis using the simplified skeletal maturity system [J]. *Spine Deform*, 2019, 7 (6) : 890-898.e4. DOI: 10.1016/j.jspd.2019.01.011.
- [49] 孙伟, 徐灵灵, 肖淑萍, 等. 数字疗法研究现状及伦理问题分析 [J]. *医学与哲学*, 2023, 44 (20) : 5-8. DOI: 10.12014/j.issn.1002-0772.2023.20.02.
- [50] Price WN 2nd, Cohen IG. Privacy in the age of medical big data [J]. *Nat Med*, 2019, 25 (1) : 37-43. DOI: 10.1038/s41591-018-0272-7.
- [51] Choi H, Kim B, Kim I, et al. Analysis of the status and future direction for digital therapeutics in children and adolescent psychiatry [J]. *J Korean Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2023, 34 (4) : 192-203. DOI: 10.5765/jkacap.230044.
- [52] Kim JH, Lee S. Signal drift and motion artifact in wearable IMU for scoliosis monitoring: a pilot study [J]. *Sensors*, 2023, 23 (4) : 2156. DOI: 10.3390/s23042156.
- [53] Zhang T, Wang Y, Li H, et al. Skin-electrode impedance fluctuations in home-based sEMG monitoring: implications for data reliability [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2022, 30 : 2152-2159. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3198761.
- [54] Watson A, Chapman R, Shafai G, et al. FDA regulations and prescription digital therapeutics: evolving with the technologies they regulate [J]. *Front Digit Health*, 2023, 5 : 1086219. DOI: 10.3389/fdgh.2023.1086219.
- [55] Xia SH, Narayanan MM, Swamy V, et al. Therapeutic evaluation and utilization analysis of mental health prescription digital therapeutics within the current regulatory landscape [J]. *Pharmacy (Basel)*, 2025, 13 (1) : 19. DOI: 10.3390/pharmacy13010019.
- [56] Protenus. 2023 Annual Breach Barometer: 68 000 medical images exposed in remote rehabilitation platform incident [EB/OL]. Protenus Inc., 2024-02-15 [2026-01-09]. <https://www.protenus.com/resources/breach-barometer-2023>.
- [57] Wang C, Lee C, Shin H. Digital therapeutics from bench to bedside [J]. *NPJ Digit Med*, 2023, 6 (1) : 38. DOI: 10.1038/s41746-023-00777-z.
- [58] FDA. Class II recall K183047: wireless rehabilitation system firmware vulnerability [EB/OL]. U.S. Food & Drug Administration, 2022-12-05 [2026-01-09]. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfRES/res.cfm?id=183047>.

(修回日期: 2025-10-15)

(本文编辑: 邓春初)