

# 肺结核患者居家治疗的技术需求与解决方案探究

杜江<sup>1</sup> 耿红<sup>2</sup> 邓云峰<sup>3</sup> 张忠法<sup>4</sup> 高磊<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>中国医学科学院北京协和医学院病原生物学研究所, 北京 102629; <sup>2</sup>山东省公共卫生临床中心政策法规部, 济南 250132; <sup>3</sup>山东省公共卫生临床中心汉光微生物实验室, 济南 250132; <sup>4</sup>山东省公共卫生临床中心, 济南 250132; <sup>5</sup>中国防痨协会, 北京 100101  
通信作者: 高磊, Email: gaolei@ipbcams.ac.cn; 张忠法, Email: zzf235@163.com

**【摘要】** 提高肺结核患者的管理水平、控制结核分枝杆菌传播是结核病防控的重要工作内容。在特定条件下, 居家治疗是解决肺结核患者管理多元需求的模式之一, 在减轻医疗系统负担、提升患者生活质量方面具有其显著优势。然而, 居家治疗尤其是居家隔离治疗的实施面临着诸多管理难题和技术需求。本文提出了适用人群评估标准, 明确远程医疗管理、数字健康监控系统与床旁检测等核心技术需求, 探讨了感染控制、传染性评估、智能药盒及健康教育的解决方案, 并展望了未来在数字化健康营养管理、多组学疗效评价等方向的拓展路径, 为进一步完善居家治疗服务体系、提升居家治疗的规范性和成效提供参考。

**【关键词】** 肺结核; 感染控制; 传染性评估; 即时检验技术; 远程医疗管理; 数字健康监控系统

基金项目: 国家自然科学基金(82473697)

## Exploring the technical requirements and solutions for home-based treatment of pulmonary tuberculosis

Du Jiang<sup>1</sup>, Geng Hong<sup>2</sup>, Deng Yunfeng<sup>3</sup>, Zhang Zhongfa<sup>4</sup>, Gao Lei<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Pathogen Biology, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 102629, China; <sup>2</sup>Policy and Regulation Department of Shandong Public Health Clinical Center, Jinan 250132, China; <sup>3</sup>Hanguang Microbiology Laboratory of Shandong Public Health Clinical Center, Jinan 250132, China; <sup>4</sup>Shandong Public Health Clinical Center, Jinan 250132, China; <sup>5</sup>Chinese Antituberculosis Association, Beijing 100101, China

Corresponding authors: Gao Lei, Email: gaolei@ipbcams.ac.cn; Zhang Zhongfa, Email: zzf235@163.com

**【Abstract】** Improving the management of tuberculosis (TB) patients and controlling the transmission of *Mycobacterium tuberculosis* are key components of TB prevention and control efforts. Under specific conditions, home-based treatment serves as one of the effective models to address the diverse management needs of TB patients, offering significant advantages in reducing the burden on healthcare systems and enhancing patients' quality of life. However, the implementation of home-based treatment, particularly home isolation, faces numerous managerial challenges and technical requirements. This paper proposes criteria for evaluating the suitability of patients for home-based care, identifies core technological needs including remote medical management, digital health monitoring systems, and point-of-care testing, and explores solutions for infection control, transmissibility assessment, intelligent medication dispensers, and health

DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20250310-00582

收稿日期 2025-03-10 本文编辑 吕相征

引用本文: 杜江, 耿红, 邓云峰, 等. 肺结核患者居家治疗的技术需求与解决方案探究[J]. 中华医学杂志, 2025, 105(28): 2340-2347. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20250310-00582.



中华医学杂志社  
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究



education. It also outlines future directions in digital nutritional health management and multi-omics-based treatment evaluation, aiming to inform the refinement of home-based TB care systems and improve their standardization and effectiveness.

**【Key words】** Pulmonary tuberculosis; Infection control; Infectivity assessment; Point-of-care testing technology; Remote medical management; Digital health monitoring system  
**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (82473697)

我国的结核病防治取得了一定进展,但要实现世界卫生组织(WHO)终结结核病流行(End TB)战略仍面临重大挑战<sup>[1]</sup>。近年来,我国不断优化结核病防治措施,其中,患者的规范管理是提升治疗效果、控制疫情传播的重要手段。然而受医院床位数、患者经济条件等诸多因素限制,据估计约有76.83%的涂阳肺结核患者未能实施住院隔离治疗<sup>[2]</sup>。2022年,WHO发布一项强调结核病感染控制的指南<sup>[3]</sup>,建议在医疗机构隔离治疗传染性结核患者,并视当地的医疗条件可采用社区或居家隔离治疗。2024年12月,九部委联合印发的《全国结核病防治规划(2024—2030年)》提出,应对传染性肺结核患者实行规范隔离,并评估其家庭感染风险。2025年9月1日起施行新修订的《中华人民共和国传染病防治法》进一步明确对传染性患者进行隔离治疗及密切接触者筛查。一直以来实践的居家治疗为居家隔离治疗奠定了重要的工作基础,然而在实际操作中落实居家隔离治疗仍面临诸多技术挑战,如必须依赖完善的医疗和管理系统,确保患者不造成传播风险,以及保障安全与治疗效果。因此,本文在综述国内外相关策略、指南和研究进展的基础上,对居家治疗所需要的技术支撑进行了系统归纳,希望能对结核病防治工作者和适宜技术研发者提供有益的参考。

一、居家治疗适用人群的标准探讨

在推动结核病居家治疗模式的过程中,科学评估患者是否具备实施居家治疗的条件是首要且关键的技术要求。这一评估不仅涉及对患者个体病

情的判断,还需综合考察其生活环境和基层医疗支持能力。(1)居家治疗的首要前提是患者临床病情稳定,无需住院支持治疗,传染性较低或已采取有效防控措施;患者应具备良好的依从性和自我管理 ability,能够准确理解医嘱、坚持规律服药和定期复查,无严重精神障碍或认知障碍。(2)患者家庭应具备良好的通风条件和相对独立的生活空间,以降低家庭内传播风险;家庭成员需掌握基本结核病防护知识,能够配合实施戴口罩、咳嗽礼仪、分餐等防护措施,并在患者治疗过程中提供必要的生活与心理支持。(3)开展居家治疗应以完善的社区医疗支持体系为依托,具备开展患者健康评估、依从性筛查、健康教育等服务能力;同时应建立远程随访与数字化服药监督机制,确保治疗期间患者持续获得专业指导与管理。

二、居家治疗管理的适宜技术需求

在结核病患者居家治疗模式下,先进的治疗管理手段是实现患者健康管理和保障治疗效果的关键,不仅能提高患者的治疗依从性,还能有效降低医疗资源的负担,提升家庭和社区的防控能力。本部分内容从远程医疗互动技术、智能药盒和患者健康教育等方面探讨居家治疗患者管理支撑技术的核心需求(表1)及实现途径。

(一)远程医疗互动技术和应急响应管理

远程医疗通过视频、音频、图像传输等技术促进患者与临床医师或多名医师间互动的医疗模式,目前这种模式广泛应用于精神病学、眼科学、皮肤病学等亚专科,并随着新型冠状病毒感染疫情的全

表1 肺结核患者居家治疗中的关键数字健康技术

技术	核心特征	优势	局限性	应用场景
远程医疗互动系统	视频问诊、图像传输、多模态沟通及健康数据反馈与预警功能	降低感染风险,提升依从性,支持vDOT,减轻负担	依赖网络设备,存在数据安全 and 隐私隐患	居家或隔离治疗等远程管理
智能药盒	集成提醒、分药、传感监测与无线传输功能	提高依从性,防漏误服,便于医护追踪服药行为	多药管理与储药环境监控能力有待加强	抗结核多药治疗管理、慢性病长期用药监督
移动互联网健康教育	微信、短视频等平台推送教育内容	灵活便捷,传播迅速	接受度不一,老年人使用困难	居家治疗、用药提醒
智能化健康教育工具(如APP)	利用人工智能定制教育内容并追踪效果	个性化强,可持续优化	开发维护成本高,对技术依赖强	治疗全过程管理

注:vDOT为视频直接面视下的治疗管理;APP为应用程序



球大流行得到进一步推广,成为满足居家或集中隔离需求、降低感染风险的重要工具<sup>[4]</sup>。相较传统的面对面医疗,远程医疗能够更好地满足传染性疾病患者的持续健康需求,通过减少医患接触降低传染病传播风险,其在肺结核的治疗模式中展现了优势。比如,为提高治疗依从性,WHO 建议实施直接面视下的治疗管理(DOT)<sup>[5]</sup>,但因管理成本和资源消耗较大限制了推广。研究发现,视频直接面视下的治疗管理(video-DOT, vDOT)作为替代,通过智能手机同步或异步记录患者服药过程,不仅减少漏服,提高成功率,还降低了经济和心理负担<sup>[6]</sup>。

## (二)智能药盒技术

智能药盒是通过结合物联网技术、嵌入式系统和智能传感器的便携式设备,通过微控制器驱动,集成了机械分药结构、定时提醒模块和远程数据传输功能。设备通过声音、灯光、移动端通知等多种方式提醒患者按时服药,并内置传感器监测药物存取情况,确保服药数据的精确记录。智能药盒将服药记录实时上传至云端,供医护人员和家属查看。它不仅能够提高患者的用药依从性,减少漏服或误服风险,还通过数据分析优化个性化用药管理方案<sup>[7]</sup>。一项在 2018 年 11 月 17 日至 2021 年 10 月 4 日开展的随机对照研究共纳入 278 例患者,结果显示结合电子服药监测等干预措施可显著提升结核患者的依从性与治疗效果,尤其适用于高负担、资源有限地区的结核防控项目<sup>[8]</sup>。未来,智能药盒需进一步改进以满足特殊需求,例如加强对抗结核药物多组分联合治疗方案的管理功能,增加对药物稳定性(如湿度和温度变化)的监测。

## (三)肺结核患者健康教育技术

健康教育在结核病的传播控制及治疗依从性提升中具有重要作用,目前我国现行的健康教育内容主要包括疾病知识、心理支持及家庭防护指导等内容,健康教育的形式主要包含一对一教育(效果最佳,但受限于实际临床资源)、小组教育(针对同类患者群体进行健康教育,节约资源同时促进患者交流)、大众科普(通过纸质宣传、视频播放、互联网和移动终端等形式传播科普知识)。从患者确诊、住院到居家治疗,健康教育贯穿疾病的不同阶段,不同时期的重点有所不同。例如,初治患者更关注疾病知识的普及,而耐药患者则需要更多心理支持与家庭指导<sup>[9]</sup>。

尽管教育形式方式多样化,但教育能力和内容针对性仍显不足,特别是在流动人口和文化水平较

低的患者群体中问题尤为突出<sup>[10]</sup>。同时,移动互联网健康教育虽逐渐普及,但患者接受度有待提升,传统传播方式的影响力有限。针对这些问题,未来需采取多方面的改进策略。首先,应开展深入的患者需求调研,制定细化、个性化的健康教育方案。其次,应推进智能化健康教育工具的研发,例如专属应用程序(APP),充分利用人工智能和大数据技术,实现个性化健康教育内容的精准推送和效果追踪,提高推送内容的趣味性和互动性,从而提升整体教育水平。

## 三、居家治疗效果评价的适宜技术需求

同时,居家治疗还需考虑患者的临床健康状况。如果患者病情严重或存在合并症,导致无法稳定控制病情,仍应优先选择住院治疗;此外,基层医疗卫生机构在结核病防治中承担着重要职责,应定期上门采集痰液和血液样本,评估疗效及监测不良反应。本部分将从围绕居家治疗的数字健康监控系统、传染性评估需求、床旁检测(POCT)的需求、居家治疗样本采集与运输等方面探讨居家治疗传染性评估的技术需求及解决方案(表 2)。

### (一)数字健康监控系统

近年来,欧美国家在医疗健康管理领域构建了功能强大的数字化健康管理系统。例如,基于物联网技术的健康管理终端可实时采集患者的健康数据,通过云计算和人工智能技术分析数据,实时识别患者的高危因素,优化诊疗方案,为疾病诊断和健康管理提供支持。我国在数字化健康管理方面也取得了显著进步,尤其是在新型冠状病毒感染疫情期间,智能采集终端与健康数据服务平台的结合成为居家隔离管理的关键工具,通过物联网设备<sup>[11]</sup>采集患者的体温、血气、血氧饱和度等关键指标,基于网络启用技术(NET)和 Java 的远程监测平台系统动态分析患者的健康数据,使医师能够在线监测患者的病情变化并调整治疗方案,预测潜在风险,优化治疗策略,为疾病监测提供了全周期支持。这种模式有效减少了人员流动和院内感染风险,显著提升了医疗资源的利用效率。目前这一模式已被成功应用于疑似患者的远程健康管理,并逐步推广至其他疾病的家庭治疗场景。

肺结核居家治疗数字化健康监控系统的技术需求,应配备多参数终端,如智能药盒、便携式血气分析仪、血氧监测仪等<sup>[12-13]</sup>,实时记录患者的生命体征和药物服用情况;并基于物联网技术将设备数据传输至上级医疗机构,通过加密算法确保数据安全



表2 肺结核患者居家治疗效果评价的适宜技术及其需求

技术/需求类别	核心特征	优势	局限性	关键应用场景及目标
数字健康监控系统	依托物联网实现远程数据采集与上传,结合人工智能算法辅助诊疗	支持多参数实时记录、数据加密传输、自动提醒与依从性评估,需开发集成化便携终端	设备成本较高,系统集成复杂,用户操作能力与网络条件存在差异	动态监测生命体征与服药行为,识别高危因素,辅助治疗管理
可量化的传染性评估体系	结合病原学、分子生物学与临床指标,MBLA可反映活菌水平	建立标准化指标体系,优化样本转运与处理流程,提升结果可比性与便捷性	技术敏感度依赖样本质量,部分方法仍处于实验推广阶段	分级判断传染性风险,指导个体防护与公共卫生干预
基于免疫学的抗原抗体检测	操作简便、成本低,适合资源有限地区使用	优化检出限与特异性,简化前处理流程,提升POCT的适配性	灵敏度有限,易受宿主状态干扰,部分方法无法定量分析	快速检测,适用于非实验室条件下的诊断
居家样本采集与运输系统	基层医护定期上门采样,样本收集规范,确保检测时效性	制定标准化流程,加强信息互通,优化冷链与转运路径	操作依赖人工,存在资源调配困难与人力成本负担	支持基层医疗机构疗效评估与不良反应监测

注:MBLA为分子细菌负荷检测法;POCT为床旁检测

全<sup>[14]</sup>;此外,系统还应具备主动预警能力<sup>[15]</sup>,针对检测结果中潜在的医疗风险(如低血氧状态、呼吸频率或肝肾功能出现异常等)发出提醒,并通过互动协作快速联动医疗机构,确保患者在突发应急医疗情况下得到精准、及时的干预。未来还需开发一体化便携设备,将采集、检测、分析、传输和反馈功能集成于单一终端,减少操作复杂性。

(二)POCT的需求

肺结核居家治疗模式的需求,对检测手段的便捷性与可及性提出了更高要求。POCT因其快速、操作简便、无需实验室设备等优势,成为满足患者在非住院状态下诊疗需求的重要补充。尤其是在基层医疗机构或社区卫生服务中心,POCT可为患者提供基本的病原学、感染标志物等项目的检测,提升疾病监测的时效性和连续性。

1. 可量化的传染性评估体系需求:在判定肺结核传染性分级时,需综合考虑病原学检测(如痰培养)、分子生物学检测[如结核分枝杆菌(MTB)/利福平耐药基因检测 Xpert® MTB/RIF、MTB RNA 恒温扩增检测技术(SAT-TB)]、影像学及临床表现等。痰培养虽被视为病原学诊断的金标准,但存在培养周期长等问题。常规核酸检测(如qPCR)因快速且敏感,适用于早期发现和耐药筛查,但难以准确反映患者体内排菌活性。qPCR中的循环阈值(Ct值)与样本中MTB载量呈负相关,但其作为定量指标仍需标准曲线支持,且受样本质量、反应效率及菌体状态等多重因素影响,难以与CFU/ml或靶标基因表达量直接对应。为克服上述局限,

WHO在《全球结核病报告2018》中推荐分子细菌载量检测(MBLA)作为疗效评估方法之一<sup>[16]</sup>,通过量化靶标基因表达水平,较准确反映活性MTB数量,规避培养耗时及污染风险<sup>[17]</sup>。目前,尚缺乏可广泛应用于结核病患者传染性评估的成熟技术手段。在居家治疗逐步推广的背景下,构建可量化的传染性评估指标体系,对于精准制定防护策略、有效控制传播风险具有重要意义。

2. 基于免疫层析技术或酶联免疫吸附技术的检测:基于免疫层析(ICA)和ELISA技术的MTB抗原检测已广泛应用于体外检测肺结核患者痰液、支气管洗液、肺泡灌洗液及培养物中的MTB分泌蛋白,具有较高的敏感性与特异性。且有研究结果显示,胶体金法的MPT64结核抗原检测试剂的最低检出限在1×10<sup>5</sup>CFU/ml浓度水平<sup>[18-19]</sup>。相比之下,血液MTB IgG抗体检测(胶体金法)虽具筛查作用,但因受机体状态与操作条件影响,其敏感性和特异性相对较低。此外,交叉引物恒温扩增(CPA)结合胶体金或ICA试纸条的技术,适用于资源有限的基层环境<sup>[20]</sup>。胶体金法因其快速、便捷的特点,具备POCT潜力,然而,其最低检出限和灵敏度仍需提升,以更好满足居家患者样本中MTB抗原检测的实际技术需求。

(三)居家治疗样本采集与运输

在肺结核患者居家治疗期间,定期对其痰液和血液样本进行检测,对于评估预后疗效、监测呼吸及肝肾功能,以及评估传染性至关重要。根据我国《结核病防治管理办法》,基层医疗卫生机构在结核



病防治工作中承担重要职责,包括对肺结核患者居家治疗期间的督导管理,以及转诊和追踪肺结核或疑似患者等工作。这意味着,基层医疗机构的医护人员应积极参与居家治疗患者的样本采集和运输工作。在实际操作中,基层医疗机构的医护人员应定期上门为患者采集痰液和血液样本。采集过程中,需严格遵循无菌操作规程,确保样本的质量和安。随后,按照相关规定,将样本安全、及时地运输至专业实验室进行检测分析。此外,基层医疗机构应加强与上级定点医疗机构和疾病预防控制中心的沟通与协作。

#### 四、居家治疗感染控制的适宜技术需求

在结核病患者居家治疗模式下,科学有效的感染控制措施不仅能够降低传播风险,还能确保患者在居家治疗期间的整体健康状况和治疗效果。2019 年发表的《活动性肺结核患者居家治疗感染控制的意见和建议》提出了专家意见,从行为方式、居所设置与通风、日常消毒等方面为活动性肺结核患者的居家治疗提供了具体的感染控制建议<sup>[21]</sup>。

##### (一)行为方式

在传染期内,尽可能固定 1 名家庭成员照顾居家治疗的肺结核患者,并佩戴医用防护口罩。患者应尽量单独居住,居室保持通风良好,避免儿童与老年人密切接触。咳嗽时应遵守咳嗽礼仪,用纸巾遮掩口鼻或衣袖内侧阻挡,并妥善处理污染物,及时洗手和清洁衣物。患者在家庭活动区域内应佩戴医用外科口罩,接触者可根据风险选择佩戴 N95 口罩,佩戴前需正确调整鼻夹确保密闭性。口罩使用后需妥善保存或更换,医用口罩每日使用不超过 8 h。家庭护理人员在接触患者或其分泌物后需按“七步洗手法”清洁双手,使用肥皂或洗手液,并确保用流动水冲洗。

##### (二)居所设置与通风

在抗结核药问世之前,清新空气是结核病疗养的核心,患者被建议前往空气清新、阳光充足的地区以增强抵抗力,因此 1854 年德国医师布雷曼在阿尔卑斯山的戈尔贝斯多夫建立了世界首个疗养院<sup>[22]</sup>。基于这一历史背景,患者居所应防止交叉感染,并选择日照充足、通风良好的下风向房间。若自然通风条件不足,可使用机械通风如排气扇,确保气流从清洁区流向污染区并排出室外。有条件时可安装高效空气消毒净化仪器进一步优化室内空气质量。此类仪器通常结合高效空气过滤(HEPA)、紫外线消毒(UV-C)及负离子发生技术,

能够有效去除空气中的颗粒物、病原体和有害气体,同时通过温湿度传感器监测并优化居家环境。部分设备还配备了智能控制系统,可根据空气质量自动调节工作模式,并与智能家居平台联动,提供实时数据和报警功能<sup>[23]</sup>。对于肺结核患者的居家治疗,这些技术需求的结合不仅可以显著降低空气中 MTB 的传播风险,还能维持适宜的温湿度环境,为患者的呼吸功能提供支持,进一步提高药物治疗的效果和患者的舒适度。

##### (三)日常消毒

在肺结核患者居家治疗期间,医疗垃圾的规范化处理对于防止疾病传播和保护环境至关重要。患者产生的垃圾(如口罩、纸巾及痰液等),应先进行物理或化学消毒,随后密封后丢入带盖的垃圾桶,使用双层垃圾袋并封好袋口,以防止感染性废物对环境的污染。物理消毒方法如煮沸或高压蒸汽消毒,适用于餐具、衣物、被褥等耐高温物品;化学消毒法主要通过使用乙醇、含氯或含溴的消毒液进行处理,适合痰液、家具、地面及日常接触表面的消毒。对于不可耐高温的物品,如书籍、软垫等,可通过阳光暴晒或紫外线消毒来降低病原体的存活率。适用于家庭使用的消毒技术和产品成为传染性肺结核患者居家治疗的必然需求。

我国结核感染控制起步较晚,规范化居家治疗尚未普及,患者和家庭对感染控制的意识和行为习惯不足。此外,现有规范未全面覆盖传染性肺结核患者的管理,家庭感染控制缺乏具体的操作指南,导致实践困难。面对这些问题,亟需加大政策支持和研究力度,完善家庭感染控制措施,推动实施并提高公众意识,从而有效降低结核病的传播和发病率。

五、居家治疗管理技术支持的提升方向与发  
在上述居家治疗管理模式的基础上,除了患者筛选、用药管理、不良反应监测和感染控制等核心环节外,未来还需在多方面进一步完善技术支持体系。特别是在数字化健康营养管理、多组学的疗效评价和家庭密切接触者的预防干预及其适宜技术等方面,仍存在较大提升空间。

##### (一)数字化健康营养管理工具

活动性结核病患者在治疗期间保持良好的营养健康和饮食习惯对康复至关重要。在研究中发现,均衡饮食能够显著增强结核病患者们的免疫系统,并加快康复过程<sup>[24]</sup>。随着数字健康技术的发展,利用智能化设备来监控和指导患者的饮食情况已成为一种新趋势。通过手机应用或其他设备,患



者可以上传食物照片或描述饮食内容的文字,系统则通过图像分析和人工智能技术来评估饮食质量并提供个性化的建议。这种技术的应用不仅使患者能够及时了解自己的饮食和健康状况,还能生成每周饮食菜单,帮助他们更好地遵循营养建议<sup>[25]</sup>。与此同时,患者需定期(如每周1次)在固定时间(如早晨空腹时)测量体重,并通过智能设备上传至系统,方便医师动态监测体重变化趋势。若体重持续下降,系统会结合饮食记录分析,主动提醒患者,并向医师发出预警,为后续干预提供依据。

尽管这些技术在慢性病和感染性疾病的管理中已经有了较为广泛的应用,但在结核病管理中的应用仍处于逐步发展阶段。通过这样的技术应用,不仅能够提升患者的饮食质量,还能有效预防结核病的复发,并有助于降低疾病传播的风险。

## (二) 围绕居家治疗的疗效评价需求

科学、及时的疗效评价是确保患者居家治疗效果和优化治疗的重要组成部分,不仅可以动态评估患者的治疗进展,还能在治疗过程中对潜在药物不良反应和耐药风险进行预警,从而降低治疗失败和耐药传播的风险。传统的疗效评价依赖于症状评估、影像学评估和病原学评估等。但在居家治疗的环境下,这些传统评价技术的应用受到了一定程度的限制。

近年来,通过整合多组学数据(包括基因组、转录组、蛋白质组和代谢组)以及多维度临床数据,研究者识别出了一系列与患者传染性、疗效评价、疾病转归及耐药风险预警相关的生物标志物<sup>[26-27]</sup>。这些标志物涵盖了病原和宿主互作的关键分子,它们能够补充传统依赖细菌学指标(如痰培养转阴时间)的方法,从而提供更为灵敏和特异的早期评估手段。此外,特定的单核苷酸多态性(SNP)和表观遗传标记在治疗失败患者中展现出显著差异,为个性化治疗和精准医学提供了依据<sup>[28]</sup>。未来研究将进一步聚焦多元数据的整合分析与生物标志物验证,通过构建多维风险预测模型,为患者治疗效果的最优化提供更可靠的决策支持。

## (三) 家庭密切接触者的预防干预及其适宜技术

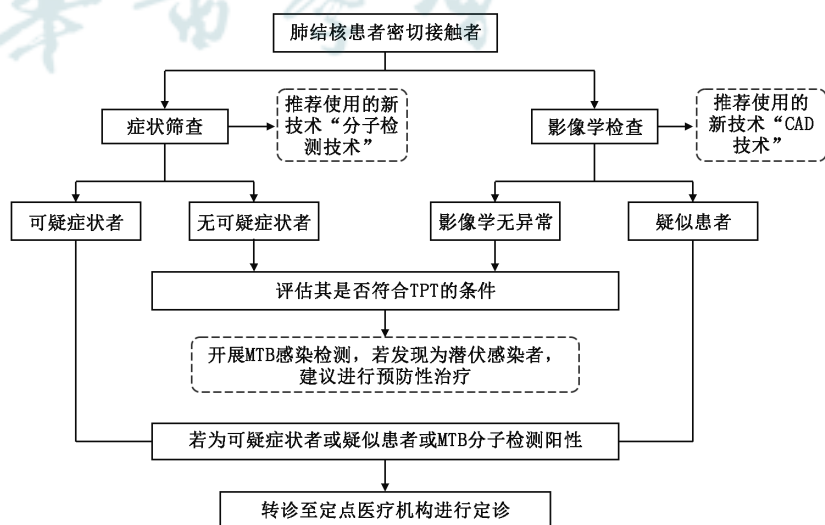
根据《中国结核病预防控制工作技术规范(2020版)》,病原学阳性肺结核患者的密切接触者是指在

患者确诊前3个月至开始抗结核治疗后14 d内与其有直接接触的人员,包括家庭内密切接触者(如家庭成员)和家庭外密切接触者(如同事、同学等)。对家庭密切接触者开展规范的筛查不仅能够及时发现近期感染发病的患者,还能够在排除活动性结核病的基础上发现潜伏感染者并给予及时的预防性治疗以降低近期感染发病的风险<sup>[29]</sup>。

根据中国防痨协会团体标准 T/CHATA 003-2020《学校肺结核患者密切接触者筛查及处置规范》,密切接触者活动性结核病的筛查技术主要包括可疑症状筛查和胸部影像学检查(图1)。随着新技术的发展和可及,计算机辅助读片技术(CAD)、病原体分子检测和感染检测技术及其组合为密切接触者的筛查提供了更加多元的技术选择。

1. 计算机辅助读片技术用于筛查:胸部影像学检查是肺结核筛查和初步诊断的主要技术手段之一,与症状筛查相比具有较高的灵敏度和特异度,成为目前优先推荐的肺结核筛查技术<sup>[30]</sup>。然而,人工解读胸片的异质性较大以及基层医疗卫生机构的影像学专业水平有限等,限制了影像学筛查的水平。随着人工智能技术的迅速发展,基于深度学习的CAD技术为肺结核筛查提供了新手段。WHO在2021年的《肺结核筛查指南和建议》中提出,筛查工作中可以使用CAD替代人工阅片对于15岁及以上人群的胸片进行解读<sup>[31]</sup>。

2. 病原体分子检测用于筛查:近年来,MTB 核酸荧光定量PCR检测系统不断优化,在提升操作方便性和降低检测成本方面都有了很大进展。美国Cepheid公司推出的GeneXpert MTB/RIF Ultra系统



注:CAD为计算机辅助读片技术;TPT为结核病预防性治疗;MTB为结核分枝杆菌

图1 肺结核患者密切接触者筛查流程图



具备高度自动化和快速检测优势,可在 2 h 内完成 MTB DNA 及利福平耐药的检测,且使用一次性试剂卡盒实现全流程自动操作<sup>[32-33]</sup>。为了探索其在筛查场景中的应用,国内外都在探索采用混检方式降低其检测成本<sup>[34]</sup>。国内鲲鹏基因研发的 MTB 及耐药基因检测试剂盒,结合 iFIND 全自动核酸检测仪,同样实现了“样本进、结果出”的高通量检测流程,配备 6 色荧光通道以保障灵敏度与特异性。鲲鹏基因则聚焦微流控芯片技术<sup>[35-37]</sup>,集成微电极、微泵等元件整合了离心、裂解与核酸提取步骤,有助于降低成本、提升便携性。可见,病原体分子检测技术的优化为基层医疗机构开展居家治疗患者样本检测提供了更高效的解决方案。

3. 结核感染检测技术用于筛查:肺结核患者的密切接触者筛查工作中在主动发现活动性结核患者的基础上开展 MTB 感染检测,有助于将筛查对象进一步的细分,对于疑似患者给予早诊早治和规范治疗,对于潜伏感染者给予预防性治疗。MTB 感染的检测方法包括结核菌素皮肤试验(TST)、 $\gamma$ -干扰素释放试验(IGRAs)等<sup>[38-39]</sup>。其中,TST是通过皮内注射纯蛋白衍生物(PPD),在 48~72 h 后测量注射部位的硬结直径来判断结果。TST 操作简便且成本较低,但是其质量控制存在难度且特异性可能受到卡介苗接种史和非 MTB 感染的影响。IGRAs 通过检测全血或分离自全血的单核细胞在 MTB 特异性抗原(如 ESAT-6 和 CFP-10)刺激下产生的  $\gamma$ -干扰素,判断受试者是否感染 MTB。由于 IGRAs 不受卡介苗接种影响,其特异性较高,但对实验条件要求和成本也相对较高。

传染性肺结核患者的居家治疗需要多维度技术和政策的支持以实现科学管理和有效防控。未来,通过技术集成、政策支持及多方合作,有望建立覆盖检测、管理、教育与环境监控的全面化治疗体系,以显著提升肺结核患者居家治疗的可行性和可及性,为建立因地制宜的患者分级管理体系提供坚实保障,也为全球公共卫生提供结核病高负担国家和地区可借鉴的技术与经验。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- [1] World Health Organization. Global tuberculosis report 2024[M]. Geneva: World Health Organization, 2024.
- [2] 何方,张弘,梁瑞英,等.北京市朝阳区涂阳肺结核患者住院隔离治疗的影响因素研究[J].中国防痨杂志,2015,37(4):

- 383-388. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6621.2015.04.011.
- [3] WHO consolidated guidelines on tuberculosis: module 1: prevention-infection prevention and control[M]. Geneva: World Health Organization; 2022.
- [4] 王春玲,周丽敏,甘强强,等.远程医疗在传染病管理中的应用进展[J].临床医药实践,2024,33(1):56-60. DOI: 10.16047/j.cnki.cn14-1300/r.2024.01.015.
- [5] Karumbi J, Garner P. Directly observed therapy for treating tuberculosis[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2015, 2015(5): CD003343. DOI: 10.1002/14651858.CD003343.pub4.
- [6] Kara GC, Yalcin BM. Comparison of in-person vs. video directly observed therapy (VDOT) on stigma levels in tuberculosis patients[J]. J Am Board Fam Med, 2022: jabfm. 2022. AP.210514 [pii]. DOI: 10.3122/jabfm. 2022. AP.210514.
- [7] 王文宗,王扬扬,陈南霖,等.一种面向独居老人的智能药盒设计[J].科技与创新,2024,(19):49-51. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyxc.2024.19.012.
- [8] Wei X, Hicks JP, Zhang Z, et al. Effectiveness of a comprehensive package based on electronic medication monitors at improving treatment outcomes among tuberculosis patients in Tibet: a multicentre randomised controlled trial[J]. Lancet, 2024, 403(10430): 913-923. DOI: 10.1016/S0140-6736(23)02270-5.
- [9] 于敏,于芳芳.多维度健康教育指导在肺结核患者中的应用效果[J].临床医学研究与实践,2023,8(3):176-178. DOI: 10.19347/j.cnki.2096-1413.202303052.
- [10] 李珍,常立阳,王玲华.肺结核患者健康教育在临床实践中的实施现状与思考[J].中国防痨杂志,2021,43(11): 1132-1138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6621.2021.11.006.
- [11] Al-Kahtani MS, Khan F, Taekeun W. Application of internet of things and sensors in healthcare[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(15):5738. DOI: 10.3390/s22155738.
- [12] Zhu Y, Meng X, Chen Y, et al. Self-served and fully automated biochemical detection of finger-prick blood at home using a portable microfluidic analyzer[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2019, 303: 127235. DOI: 10.1016/j.snb.2019.127235.
- [13] Sang J, Cheng J, Hu H, et al. Portable dual-channel blood enzyme analyzer for point-of-care liver function detection [J]. Analyst, 2023, 148(23): 6020-6027. DOI: 10.1039/d3an01432k.
- [14] Shanmugapriya E, Kavitha R. Efficient and secure privacy analysis for medical big data using TDES and MKSVM with access control in cloud[J]. J Med Syst, 2019, 43(8): 265. DOI: 10.1007/s10916-019-1374-6.
- [15] Ko H, Tripathi NK, Mozumder C, et al. Real-time remote patient monitoring and alarming system for noncommunicable lifestyle diseases[J]. Int J Telemed Appl, 2023, 2023:9965226. DOI: 10.1155/2023/9965226.
- [16] World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2018[M]. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [17] Ntinginya NE, Bakuli A, Mapamba D, et al. Tuberculosis molecular bacterial load assay reveals early delayed bacterial killing in patients with relapse[J]. Clin Infect Dis, 2023, 76(3):e990-e994. DOI: 10.1093/cid/ciac445.
- [18] Cao XJ, Li YP, Wang JY, et al. MPT64 assays for the rapid detection of Mycobacterium tuberculosis[J]. BMC Infect Dis, 2021, 21(1):336. DOI: 10.1186/s12879-021-06022-w.
- [19] Wu X, Wang Y, Weng T, et al. Preparation of



- immunochromatographic strips for rapid detection of early secreted protein ESAT-6 and culture filtrate protein CFP-10 from *Mycobacterium tuberculosis*[J]. *Medicine* (Baltimore), 2017, 96(51): e9350. DOI: 10.1097/MD.00000000000009350.
- [20] Nazari-Vanani R, Tondro GH, Dehdari Vais R, et al. Lateral flow genochromatographic strip for naked-eye detection of mycobacterium tuberculosis PCR products with gold nanoparticles as a reporter[J]. *J Biomed Phys Eng*, 2020, 10(3):307-318. DOI: 10.31661/jbpe.v0i0.1912-1018.
- [21] 姜晓颖, 姜世闻, 高孟秋, 等. 活动性肺结核患者居家治疗感染控制的意见和建议[J]. *中国防痨杂志*, 2019, 41(9): 920-925. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6621.2019.09.003.
- [22] Murray JF, Schraufnagel DE, Hopewell PC. Treatment of tuberculosis. a historical perspective[J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2015, 12(12): 1749-1759. DOI: 10.1513/AnnalsATS.201509-632PS.
- [23] 吴浩. 基于物联网的智能医用空气净化系统的研究[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2022.
- [24] 许萌, 张巧, 郝慧杰. 动态护理模式下强化饮食管理在结核病患者预后康复中的效果[J]. *国际护理学杂志*, 2024, 43(5): 819-822. DOI: 10.3760/cma.j.cn221370-20230609-00193.
- [25] Bond A, Mccay K, Lal S. Artificial intelligence & clinical nutrition: what the future might have in store[J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 57:542-549. DOI: 10.1016/j.clnesp.2023.07.082.
- [26] Scriba TJ, Fiore-Gartland A, Penn-Nicholson A, et al. Biomarker-guided tuberculosis preventive therapy (CORTIS): a randomised controlled trial[J]. *Lancet Infect Dis*, 2021, 21(3):354-365. DOI: 10.1016/S1473-3099(20)30914-2.
- [27] Nogueira B, Krishnan S, Barreto-Duarte B, et al. Diagnostic biomarkers for active tuberculosis: progress and challenges[J]. *EMBO Mol Med*, 2022, 14(12):e14088. DOI: 10.15252/emmm.202114088.
- [28] Thomas SS, Abhinand K, Menon AM, et al. Epigenetic mechanisms induced by mycobacterium tuberculosis to promote its survival in the host[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(21):11801. DOI: 10.3390/ijms252111801.
- [29] 上海市防痨协会, 中国防痨协会青年理事会, 中国防痨杂志编辑委员会. 学校结核病疫情流行病学调查和现场处置专家共识[J]. *中华预防医学杂志*, 2019, 41(1):5. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2019.03.003.
- [30] Nalunjogi J, Mugabe F, Najjingo I, et al. Accuracy and incremental yield of the chest X-ray in screening for tuberculosis in uganda: a cross-sectional study[J]. *Tuberc Res Treat*, 2021, 2021:6622809. DOI: 10.1155/2021/6622809.
- [31] WHO consolidated guidelines on tuberculosis: module 2: screening-systematic screening for tuberculosis disease [M]. Geneva:World Health Organization, 2021.
- [32] Cao Y, Parmar H, Simmons AM, et al. Automatic identification of individual rpoB gene mutations responsible for rifampin resistance in mycobacterium tuberculosis by use of melting temperature signatures generated by the Xpert MTB/RIF ultra assay[J]. *J Clin Microbiol*, 2019, 58(1): e907-e919. DOI: 10.1128/JCM.00907-19.
- [33] 陈晶, 丘文, 苏冰, 等. GeneXpert MTB/RIF 系统对结核病诊断价值的回顾性分析[J]. *检验医学与临床*, 2021, (21): 3101-3104, 3108. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9455.2021.21.008.
- [34] Iem V, Bimba JS, Santos VS, et al. Pooling sputum testing to diagnose tuberculosis using xpert MTB/RIF and xpert ultra: a cost-effectiveness analysis[J]. *BMC Infect Dis*, 2023, 23(1):341. DOI: 10.1186/s12879-023-08330-9.
- [35] Oblath EA, Henley WH, Alarie JP, et al. A microfluidic chip integrating DNA extraction and real-time PCR for the detection of bacteria in saliva[J]. *Lab Chip*, 2013, 13(7): 1325-1332. DOI: 10.1039/c3lc40961a.
- [36] Li Z, Xu X, Wang D, et al. Recent advancements in nucleic acid detection with microfluidic chip for molecular diagnostics[J]. *Trends Analyt Chem*, 2023, 158: 116871. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116871.
- [37] Nguyen HV, Nguyen VD, Nguyen HQ, et al. Nucleic acid diagnostics on the total integrated lab-on-a-disc for point-of-care testing[J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, 141: 111466. DOI: 10.1016/j.bios.2019.111466.
- [38] 中华医学会结核病学分会. 《中华结核和呼吸杂志》编辑委员会.  $\gamma$ -干扰素释放试验在中国应用的建议[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2014, 10. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-0939.2014.10.011.
- [39] Person AK, Pettit AC, Sterling TR. Diagnosis and treatment of latent tuberculosis infection: an update[J]. *Curr Respir Care Rep*, 2013, 2(4):199-207. DOI: 10.1007/s13665-013-0064-y.

