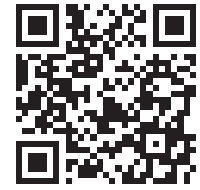


DOI: 10.61189/411494rrzwam

· 论著 ·

呼吸物联网驱动的哮喘精准监测与闭环管理

陈智鸿¹, 遆柳青¹, 王悦虹², 白春学^{3,4*}

1. 上海交通大学医学院附属新华医院呼吸与危重症医学科, 上海交通大学医学院呼吸病研究所, 上海 200092
2. 浙江大学医学院附属第一医院呼吸与危重症医学科, 杭州 310003
3. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海市呼吸病研究所, 上海 200032
4. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

[摘要] 哮喘管理正从门诊间断评估为主要的传统模式, 转向以连续监测、动态预警、分层干预和结局追踪为核心的精准管理模式。呼吸物联网以智能吸入器、家庭肺功能检测、脉搏血氧仪、可穿戴设备、环境传感器、移动终端和云平台为主要载体, 可将“病房、门诊、社区与家庭”形成完整的服务网络。白春学团队关于元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT(白氏医学GPT)的研究, 为“多源感知-智能分析-数字人交互-质量控制-闭环执行”路径提供了具有中国语境特色的理论与技术框架。本文围绕呼吸物联网在哮喘病房监测、慢病管理及医院-社区-家庭协同中的应用, 系统综述其在哮喘精准监测与闭环管理中的研究进展、现实困境与未来路径, 以期对呼吸专科连续照护体系建设提供参考。

[关键词] 哮喘; 呼吸物联网; 精准监测; 闭环管理; 智能吸入器; 数字医学

[中图分类号] R 256.12 **[文献标志码]** A

Respiratory internet of things-driven precision monitoring and closed-loop management: asthma care from ward to home

Chen Zhihong¹, Ti Liuqing¹, Wang Yuehong², Bai Chunxue^{3,4*}

1. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Xinhua Hospital, Institute of Respiratory Diseases, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China
2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, The First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310003, Zhejiang, China
3. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China
4. Shanghai Respiratory Internet of Things Medical Engineering Technology Research Center, Shanghai 200032, China

[Abstract] Asthma management is shifting from the traditional model based predominantly on intermittent outpatient assessments toward a precision management model centered on continuous monitoring, dynamic early warning, stratified intervention, and outcome tracking. The Respiratory Internet of Things (Respiratory IoT), leveraging intelligent inhalers, home pulmonary function testing, pulse oximeter, wearable devices, environmental sensors, mobile terminals, and cloud platforms as its primary components, creates an integrated service network connecting hospital wards, outpatient clinics, community settings, and home environments. Research conducted by Professor Bai Chunxue's team on metaverse medicine, new-quality productivity in medicine, and BAIMGPT (Bai's Medical GPT) provides a theoretical and technical framework with distinct Chinese contextual characteristics, supporting the workflow of "multi-source sensing, intelligent analysis, digital human interaction, quality control, and closed-loop execution." This paper systematically reviews the application of the Respiratory IoT in inpatient asthma monitoring, chronic disease management, and hospital-community-home collaboration, summarizing research progress, practical challenges, and future directions for precision monitoring and closed-loop management in asthma, with the aim of informing the development of a continuous and integrated care system for respiratory diseases.

[Key Words] asthma; respiratory internet of things; precision monitoring; closed-loop management; smart inhalers; digital medicine

[收稿日期] 2026-04-10

[接受日期] 2026-05-27

[基金项目] 国家自然科学基金(82270026). Supported by National Natural Science Foundation of China (82270026).

[作者简介] 陈智鸿, 博士, 主任医师; E-mail: chen-zhihong@xinhua.com.cn

* 通信作者 (Corresponding author). 白春学, 博士, 主任医师、教授; E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

哮喘是常见的慢性气道疾病,其临床症状、治疗反应和预后具有显著异质性^[1-2]。传统管理模式主要依赖于门诊间断评估与患者回忆,虽已建立较成熟的分级治疗框架,但在真实世界中仍普遍存在吸入技术错误、长期依从性不足、过敏原持续暴露、院外病情波动识别滞后,以及病房-门诊-家庭管理断裂等问题^[1-3]。GINA 2025提出,哮喘管理应在每次就诊时同时评估当前控制和未来风险,并核查吸入技术、依从性、合并症^[1];GINA在“难治性与重度哮喘”文件中进一步强调,在判断“难治”或“重度”前,必须先系统排查诊断不当,治疗依从性差^[4]。上述要求提示,现代哮喘管理已不能仅依赖低频、间断和门诊中心化的信息采集,而需要更连续、更接近真实世界场景的监测体系^[3-4]。

呼吸物联网的发展为这一转变提供了技术基础^[5-6]。近年来,智能吸入器、家庭肺功能检测、脉搏血氧仪、可穿戴设备、环境监测、移动端症状记录、远程教育和数字行动计划等工具不断进入慢性呼吸病管理中^[5-10]。ATS 2025官方研究^[6]声明指出,家庭监测不应仅被理解为设备部署,而应从检测性能、疾病管理价值、成本、患者体验、临床体验、研究用途和公平可及性等多个维度进行综合评价,并提出居家监测综合评估体系如“PANACEA框架”等。这意味着,真正有价值的物联网管理不在于“装上设备”,而在于能否将多源数据转化为风险识别、行动计划触发和医疗协同响应等行动^[3,6]。

当前哮喘物联网管理的主体证据主要集中于智能吸入器和远程慢病管理^[7-18]。基于此,本文围绕呼吸物联网在病房监测、慢病管理及“医院-社区-家庭协同”中的应用展开综述,并结合白春学团队提出的元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT(白氏医学GPT)理念,探讨更符合中国场景的连续闭环管理路径^[19-23]。

1 呼吸物联网驱动哮喘精准监测的理论基础

哮喘之所以适合纳入呼吸物联网框架,首先在于其病情波动往往发生在医院之外或家庭。日间或夜间症状变化、诱因暴露、漏用药物和SABA使用过多等,均可能先于急性加重而出现,但这些信息在传统随访中往往依赖患者回忆,难以及时、准确地捕捉。GINA 2025强调,哮喘评估除症状外,还应同步关注未来急性加重风险、肺功能和治疗依从性,这与呼吸物联网“连续感知-动态识别-及时反馈”的能力高度一致^[3,6]。

其次,哮喘监测目标正由单纯“症状控制”转向

“症状控制与未来风险控制并重”。当前管理重点已不再局限于患者是否“这周咳不咳、喘不喘”,而更应强调未来急性加重风险、肺功能下降趋势、吸入技术错误、依从性不足和气道炎症是否持续存在等问题^[1,4]。对重度或难治性哮喘而言,这种风险导向的连续评估尤为关键^[4],因为许多看似“治疗失败”的病例,本质上可能源于持续的过敏原暴露、依从性差或可治疗特质未被识别等。

再者,现有研究^[10]提示,数字监测不应停留于“单一指标在线化”,而应逐步走向“数字表型”构建。关于哮喘加重相关数字标志物的系统综述显示,SABA使用、心率、咳嗽等信号具有预警潜力^[5],而单一肺功能参数并不足以稳定预测所有患者的急性恶化^[5];2025年有关“数字化绘制哮喘病程”的研究进一步提出,应从诊断、控制到缓解全过程构建纵向数字画像^[10]。由此可见,未来更合理的路径是将症状、行为、生理、环境和医疗信息有机整合起来,识别个体偏离基线的动态模式^[10]。基于此,哮喘呼吸物联网可概括为四层监测结构(表1)。

表1 哮喘呼吸物联网监测平台构建策略和技术路线

策略	技术路线
症状层	关注ACT、夜间醒来、活动受限和救援药使用 ^[1,10] ;
行为层	关注漏服、延迟用药、吸入频率和吸入技术 ^[1,8-9] ;
生理层	关注PEF、家庭肺功能、SpO ₂ 、心率和睡眠 ^[5-6] ;
环境层	关注花粉、空气污染、温湿度及室内过敏原暴露 ^[10] 。

多层信息融合后,可进一步划分为不同的数字表型,如依从性差主导型、环境触发主导型、夜间恶化型、高炎症负荷型和高风险重症型等,为分层干预提供数据支撑^[4-6,10]。

2 病房场景中的呼吸物联网

呼吸物联网并非只服务于家庭场景,在病房中同样具有重要价值^[3,6]。对因哮喘急性加重住院或需要强化治疗的患者而言,住院期间既是病情波动最明显的阶段,也是进行风险重新评估、强化教育和制定院后管理方案的关键窗口^[1,4]。病房物联网应用的核心不在“远程”,而在于高频、标准化和可追溯^[3,6]。连续生命体征监测有助于识别氧合下降、呼吸频率升高和夜间症状波动^[3,6];电子化用药记录与智能吸入监测则可揭示治疗的依从性,为出院后依从性风险评估奠定基础^[8-9]。

从流程上看,病房场景中的物联网至少承担3项任务:(1)早期识别病情恢复不佳或再次恶化风

险,辅助判断是否需升级治疗、延长观察或优化出院时机^[3,6]; (2)系统纠正吸入技术与用药执行问题,避免患者带着“症状暂时缓解但管理基础仍不牢靠”的情况出院^[1,4]; (3)将住院期间形成的数据转化为出院后的个体化行动计划,包括复诊时间、家庭监测项目、异常阈值和就医触发条件^[1,6]。GINA反复强调行动计划、吸入技术培训和规律复诊的重要性^[1],病房正是将这些要求转化为结构化交付内容的最佳场景^[1,3]。

因此,病房监测的价值不应仅以住院期间数据采集的数量来衡量,而应观察其是否真正形成了“出院即接续”的管理链条^[3,6]。未来更理想的做法,是将SpO₂、呼吸频率、症状趋势、雾化或吸入执行、PEF/肺功能变化和炎症指标接入同一平台,在电子病历中自动生成风险摘要,并与护理教育、门诊预约和社区随访任务联动^[6]。这样,住院管理才不再是一次孤立事件,而成为后续门诊和家庭闭环的起点^[3,6]。

3 物联网在哮喘管理中的核心应用

3.1 智能吸入器 在当前哮喘物联网管理模块中,智能吸入器是证据最成熟、最接近临床落地的入口^[24]。2025年系统综述与荟萃分析^[8]显示,反馈型数字吸入器可能改善哮喘控制,并可能在未来急性加重高风险患者中降低严重急性加重的发生。该研究采用GRADE方法评估证据质量,提示“改善控制”这一结论的证据确定性高于“减少严重急性加重”。这意味着,数字吸入器现阶段最明确的价值仍在于促进日常管理质量,而非改变哮喘治疗结局的“硬终点”^[12]。

2025年ACCEPTANCE集群随机试验进一步显示,在基层医疗环境中,数字吸入器可改善用药依从性,并在12个月内维持更好的哮喘控制^[9]。这一结果提示,数字吸入器并非只能在高度选择的研究场景下发挥作用,而有望嵌入真实世界的慢病管理流程^[9]。更早期随机研究同样证明,带提醒和反馈功能的电子监测装置可改善吸入性糖皮质激素依从性,并优化部分临床结局。综合现有证据^[12-18]可见,智能吸入器在“提醒-记录-反馈-再教育”的闭环中具有较高可操作性,也是连接患者端与医疗端最现实的数字入口。

3.2 远程监测 它已构成哮喘数字化慢病管理的另一核心方向。近年系统综述^[7,11]表明,远程治疗监测(remote treatment monitoring, RTM)与远程患者监测(remote patients monitoring, RPM)总体可改善

依从性、减少缓解剂使用并改善部分控制指标,但对急诊、住院和严重急性加重等硬终点的影响证据仍不充分。这并不意味着远程监测“无效”,而是提示其临床获益与人群选择、干预强度、随访时间和组织模式密切相关。换言之,当前更值得回答的问题不是“远程监测是否有用”,而是“哪类患者最需要、哪类指标最有效、哪种流程最能转化为最终获益”^[10-11]。

3.3 数字化行动计划 该计划应被视为家庭闭环管理的枢纽,而非附属模块。GINA 2025明确指出,行动计划可以采用手写、打印、数字化或图像化形式,其本质是将症状变化、药物调整、何时就医和何时急诊预先结构化^[1]。对于物联网平台而言,监测数据只有进入“行动计划引擎”,才能真正转化为干预^[6]。因此,未来成熟的哮喘数字化产品,不应只是若干设备和App的简单堆叠,而应是“智能吸入器+症状/PEF监测+环境提醒+数字行动计划”的一体化管理单元^[7-10]。

4 医院-社区-家庭协同的闭环管理组织模式

呼吸物联网的真正优势,并不在于把家庭数据上传到云端,而在于帮助建立医院-社区-家庭协同的管理共同体^[25]。传统哮喘管理的突出短板在于,专科负责定方案,基层缺少持续数据支持,家庭则缺乏明确的升级路径与实时反馈^[1-3]。物联网技术使症状、用药、肺功能、氧合及环境暴露等信息可以在不同照护场景间连续流动^[6],从而为闭环管理提供了现实基础。

从实施路径看,可将哮喘闭环管理概括为“1个数据底座、3类参与主体、4级响应机制”。1个数据底座,是指院内电子病历、呼吸专病平台、社区端和家庭端的互联互通;3类参与主体,包括专科医生、基层/社区团队及患者与照护者;4级响应机制,则包括自动提醒、专病护士或管理师干预、门诊加急复评和急诊/住院转运。如此,平台不再只是信息展示界面,而成为异常识别、任务分发和转诊触发的执行系统^[3,6]。

家庭病房为这一协同模式提供了进一步拓展方向。对哮喘而言,可分为2个层次。(1)狭义概念:门诊-社区-家庭慢病闭环,重点在依从性、复诊、教育与急性加重预警^[1,7-9]; (2)广义概念:病房-社区-家庭连续照护,适用于急性加重恢复期或合并复杂共病的患者。当前前者更成熟,后者则代表未来方向^[25]。

在中国,社区与基层的价值不应被理解为单纯

“执行末端”,而应被视为闭环管理中的关键点^[3,6,25]。通过统一风险分层、统一随访模板、统一异常阈值和统一转诊触发条件,专科标准可被下沉为基层可执行流程^[1,3,6]。未来评价医院-社区-家庭协同成效时,也应引入控制率、规范复诊率、失访率、急诊率、再入院率和行动计划执行率等连续质量指标^[1,6,25],而不应仅停留在项目建设层面的“有无平台”^[3,6]。

5 物联网与元宇宙和GPT是哮喘闭环管理的智能中枢

如果说呼吸物联网主要解决“数据从哪里来”的问题,那么医学GPT与数字人技术更可能解决“数据如何被理解、转化和执行”的问题。白春学团队在元宇宙医学专家共识中提出,医学元宇宙的重要底座之一即为医疗物联网,随后又在关于医学新质生产力和医学GPT的系列文章中,强调互联网、大数据、人工智能和物联网融合对于现代医疗能力升级的意义,并提出医学GPT应实现从数据处理到知识精选、从简单咨询到专家分身、从盲目信任到质控把关的能力跃迁。这为呼吸物联网与智能交

互系统的融合提供了具有中国场景特色的理论基础^[19-23]。

将上述理念嵌入哮喘管理,BAIMGPT不宜仅被定位为患者端问答工具,而更应被理解为临床工作流程中枢^[22-23]。其在患者端可承担病情解释、吸入指导、用药提醒、行动计划教育和异常症状初筛;在医生端可自动汇总智能吸入器、家庭肺功能、SpO₂、环境暴露和既往急性加重史,为特定病人形成结构化风险摘要;在管理端则可跟踪随访完成率、异常响应时效、失访风险和闭环完成度,从而提升项目的可评价性与可复制性。

数字人和元宇宙技术在哮喘场景中的价值,也应避免停留在概念层面,而应落到可执行任务上。例如,可将其用于标准化吸入器教学、急性加重预警演练以及医院-社区-家庭多方沟通的可视化健康教育。其共同优势在于,可将抽象医学知识转化为更易理解、可反复训练和可实时反馈的交互过程,从而增强患者理解、治疗执行和照护协同^[22-23]。从平台架构看,未来“哮喘物联网管理平台”可按六层构建(表2)。

表2 哮喘物联网管理平台的构建策略和技术路线

策略	物联网赋能
采集层	负责吸入器、家庭肺功能、SpO ₂ 、可穿戴设备与环境数据接入
治理层	负责标准化、时间对齐、去噪和隐私保护
算法层	负责数字表型识别、风险分层和预警生成
编排层	负责消息推送、随访任务分发和升级转诊
应用层	面向患者、医生、社区与管理者
安全层	负责权限控制、模型审核、算法质控和责任追踪

该架构既承接了白春学团队关于元宇宙医学和医学GPT的思路^[19-23],也与ATS关于家庭监测需要从性能、管理、体验和公平性多维评价的观点相呼应^[6]。

6 小结

呼吸物联网正在推动哮喘管理由门诊中心化、回顾性和低频评估模式,转向以连续感知、动态识别、行动计划触发和多方协同响应为特征的精准管理新范式^[6]。现阶段,智能吸入器、远程慢病监测和数字化行动计划构成了哮喘物联网应用最成熟、最具落地基础的核心模块^[7-10,12-18]。

从未来趋势看,呼吸物联网的关键竞争力不在单一设备或单一算法,而在于能否将“多源监测—

数字表型—分层预警—人机协同—结局评价”整合为可复制、可评价、可持续的医疗服务模式^[6,10]。白春学团队提出的元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT(白氏医学GPT)理念,为我国构建更具可解释性、交互性和质量控制能力的哮喘闭环管理平台提供了重要启示^[19-23]。未来研究应进一步聚焦高风险患者分层、硬终点验证、组织流程重构、支付与监管机制以及基层公平可及性,以推动呼吸物联网从“可连接”真正走向“可实施、可评价、可推广”。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 陈智鸿:研究设计、论文初稿撰写;遑柳青:文献调研、图表制作;王悦虹:论文修改;白春学:提出研究思

路、最终审阅定稿。

参考文献

- [1] Heis M, Assabbagh O, Alda'As A, et al. Adherence to the latest GINA guidelines among family physicians and internists in Jordan: a cross-sectional study [J]. *Medicine*, 2025, 104(43): e45379.
- [2] Bocian I Y, Chin A R, Rodriguez A, et al. Asthma management in the digital age [J]. *Front Allergy*, 2024, 5: 1451768.
- [3] Dunn J, Coravos A, Fanarjian M, et al. Remote digital health technologies for improving the care of people with respiratory disorders [J]. *Lancet Digit Health*, 2024, 6(4): e291-e298.
- [4] Rawat S S. Global Initiative for Asthma (GINA) 2025: a revolutionary document for management of asthma in children [J]. *Journal of Pediatric Pulmonology*, 2025, 4(2): 29-30.
- [5] Cokorudy B, Harrison J, Chan A H Y. Digital markers of asthma exacerbations: a systematic review [J]. *ERJ Open Res*, 2024, 10(6): 00014-02024.
- [6] Khor Y H, Poberezhets V, Buhr R G, et al. Assessment of home-based monitoring in adults with chronic lung disease: an official American thoracic society research statement [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2025, 211(2): 174-193.
- [7] Mosnaim G, Carrasquel M, Ewing T, et al. Remote monitoring in asthma: a systematic review [J]. *Eur Respir Rev*, 2025, 34(175): 240143.
- [8] Ologundudu L, Rayner D G, Oppenheimer J, et al. Patient-facing digital inhalers for asthma: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2025, 13(7): 1824-1835.
- [9] van de Hei S J, van den Berg L N, Poot C C, et al. Long-term effectiveness of a digital inhaler on medication adherence and clinical outcomes in adult asthma patients in primary care: the cluster randomized controlled ACCEPTANCE trial [J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2025, 13(7): 1693-1704.
- [10] Chan A H Y, Drummond D, Ramakrishnan S, et al. Digitally mapping the asthma journey—from diagnosis to remission [J]. *EClinicalMedicine*, 2025, 83: 103204.
- [11] Fadaizadeh L, Velayati F, Sanaat M. Telemonitoring in patients with asthma: a systematic review [J]. *J Asthma*, 2024, 61(2): 92-104.
- [12] van de Hei S J, Kim C H, Honkoop P J, et al. Long-term cost-effectiveness of digital inhaler adherence technologies in difficult-to-treat asthma [J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2023, 11(10): 3064-3073. e15.
- [13] Rumi G, Canonica G W, Foster J M, et al. Digital coaching using smart inhaler technology to improve asthma management in patients with asthma in Italy: community-based study [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2022, 10(11): e25879.
- [14] Sulaiman I, Greene G, MacHale E, et al. A randomised clinical trial of feedback on inhaler adherence and technique in patients with severe uncontrolled asthma [J]. *Eur Respir J*, 2018, 51(1): 1701126.
- [15] Hale E M, Greene G, Mulvey C, et al. Use of digital measurement of medication adherence and lung function to guide the management of uncontrolled asthma (INCA Sun): a multicentre, single-blinded, randomised clinical trial [J]. *Lancet Respir Med*, 2023, 11(7): 591-601.
- [16] Chan A H, Stewart A W, Harrison J, et al. The effect of an electronic monitoring device with audiovisual reminder function on adherence to inhaled corticosteroids and school attendance in children with asthma: a randomised controlled trial [J]. *Lancet Respir Med*, 2015, 3(3): 210-219.
- [17] Morton R W, Elphick H E, Rigby A S, et al. STAAR: a randomised controlled trial of electronic adherence monitoring with reminder alarms and feedback to improve clinical outcomes for children with asthma [J]. *Thorax*, 2017, 72(4): 347-354.
- [18] Moore A, Preece A, Sharma R, et al. A randomised controlled trial of the effect of a connected inhaler system on medication adherence in uncontrolled asthmatic patients [J]. *Eur Respir J*, 2021, 57(6): 2003103.
- [19] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1-9.
- [20] 白春学. 元宇宙医学之我见 [J]. *中国医药导刊*, 2023, 25(1): 1-6.
- [21] 白春学. 医学新质生产力之我见 [J/OL]. *元宇宙医学*, 2024 [2026-05-19]. <https://www.zentimepublishing.com/home/journal/info/aid/625/sid/69/code/MM.html>.
- [22] 白春学. 医学GPT研发应用之吾见 [J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(1): 6-14.
- [23] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT白皮书 [J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(2): 55-64.
- [24] Fowler S J, Sinha I, Doyle M, et al. Asthma: diagnosis, monitoring, and chronic asthma management: summary of guidance from BTS/NICE/SIGN [J]. *BMJ*, 2025, 390: r1162.
- [25] Ko S Q, Kee A. Hospital-at-home for respiratory diseases—opportunities and challenges [J]. *Respirology*, 2025, 30(12): 1124-1126.

引用本文

陈智鸿, 遆柳青, 王悦虹, 等. 呼吸物联网驱动的哮喘精准监测与闭环管理 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(2): 91-95.

Chen Z H, Ti L Q, Wang Y H, et al. Respiratory internet of things-driven precision monitoring and closed-loop management: asthma care from ward to home [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 91-95.