·综　述·

实验室智能化技术与智能化生物安全实验室研究进展

郝天腾[1,2]，周俊廷[1,2]，徐新喜[2]，衣颖[2]，程智[2]，谢新武[2]，周卫斌[1]

1. 天津科技大学电子信息与自动化学院，天津 300457；
2. 军事科学院系统工程研究院，天津 300161
通信作者：谢新武，E-mail：xinwuxie@163.com；周卫斌，E-mail：zhouweibin@tust.edu.cn

【摘　要】生物安全实验室是现代生物科学研究的重要基础设施，是开展病原微生物相关实验的核心载体，更是国家生物安全体系的关键环节。但当前生物安全实验室普遍面临人工操作任务繁重、人员直接接触高危病原导致生物安全风险较高的问题，推进其智能化无人化运行已成为亟待解决的关键需求。本文系统检索并综述了 2018 年 1 月 1 日至 2025 年 9 月 1 日实验室智能化技术与智能化生物安全实验室的研究成果，重点聚焦与生物安全实验室应用密切相关的智能化技术及设备，深入分析实验室智能化从单一操作自动化到自动化实验流水线系统、再到功能可配置的自动化生化实验室系统的演进路径，以及数字化运维管理领域的进展。研究旨在为生物安全实验室突破人工操作局限、实现智能化无人化转型提供实践参考，助力减少实验人为误差、提升实验精准度与安全性，推动生物安全实验室向高效、安全的智能化方向发展。
【关键词】无人化；智能化；生物安全实验室

Research progress in laboratory intelligence technology and biosafety laboratory: a review

HAO Tianteng[1,2], ZHOU Junting[1,2], XU Xinxi[2], YI Ying[2], CHENG Zhi[2], XIE Xinwu[2], ZHOU Weibin[1]
(*1. College of Electronic Information and Automation*, *Tianjin University of Science and Technology*, *Tianjin* 300457, *China*; *2. Institute of Systems Engineering*, *Academy of Military Sciences*, *Tianjin* 300161, *China*)
Corresponding authors: XIE Xinwu, E-mail: xinwuxie@163.com; ZHOU Weibin, E-mail: zhouweibin@tust.edu.cn

【Abstract】 Biosafety laboratories are essential infrastructure for modern biological research, serving as the core platform for pathogen-related experiments and a critical component of the national biosafety system. However, current biosafety laboratories generally face challenges such as heavy manual operational tasks and high biosafety risks due to direct exposure of personnel to hazardous pathogens. Advancing intelligent unmanned operation has thus become an urgent priority. This paper systematically reviews the research findings on laboratory intelligent technologies and intelligent biological safety laboratories from January 1, 2018 to September 1, 2025, with a focus on intelligent technologies and equipment closely related to biosafety laboratory applications. It delves into the evolution of laboratory intelligence—from single-operation automation to automated experimental pipeline systems and further to function-configurable automated biochemistry laboratory systems—along with advancements in digital operation and maintenance management. The review aims to offer practical references for biosafety laboratories to overcome manual operational limitations and evolve into intelligent unmanned ones, helping reduce human-induced experimental errors to enhance experimental accuracy and safety, and promote the development of biosafety laboratories toward efficient, secure, and intelligent directions.
【Keywords】 unmanned; intelligent; biosafety laboratory

实验室的智能化技术主要是指通过先进的信息技术、自动化设备和人工智能手段，提高实验室的效率、准确性和安全性。随着机械自动化、新型传感器、信息技术、机器人以及人工智能等技术的蓬勃发展，实验室的无人化智能化技术已经取得了较大进展和应用[1–3]，生物安全实验室作为开展病原微生物相关研究的重要基础设施，是生物安全体系的重要组成部分。以往研究显示，生物安全实验室病原微生物实验思路与方案的创新设计依靠重复若干基础性的实验操作得以验证，劳动密集性高[4–5]，实验室人员操作未知、高危病原微生物样本面临较高生物安全风险[6]。另外，生物实验人工操作标准化难度高，操作差异和误差易引起实验结果偏差且原因难以追溯[7]，因此，将一些重复性、高风险、程序化的工作交给智能化系统和设备，将大大提高实验效率和准确率。在现代科学研究和公共卫生领域，生物安全实验室扮演着至关重要的角色。人工智能技术的引入，实验室不仅能提高工作效率，还能显著提升数据处理和实验过程中的安全性。因此，本研

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1146407
第一作者：郝天腾(2001—)，硕士在读，研究方向：生物安全实验室智能化技术。
收稿日期：2024-11-12　**修回日期**：2025-10-27　**录用日期**：2025-12-09
利益冲突：不存在　**伦理审查**：免除审查　**出版授权**：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

究通过检索 2018 年 1 月 1 日至 2025 年 9 月 1 日发表的文献，系统综述实验室智能化技术在生物安全实验室中的应用现状、效果及未来发展方向。

1 资料与方法

1.1 文献检索策略 本研究检索 2018 年 1 月 1 日至 2025 年 9 月 1 日中国知网（CNKI）、Elsevier ScienceDirect 和 Web of Science 数据库相关文献，同时收集国内外公开资料。中文检索词包括“人工智能”“自动化基础设备”“智能化消毒设备”“智能化生物安全实验室系统”等及其组合；英文检索词包括“Artificial intelligence”“automated basic equipment”“intelligent disinfection devices”“intelligent biosafety laboratory systems”等及其组合。

1.2 纳入与排除标准 纳入标准：（1）发表时间为 2018 年 1 月 1 日至 2025 年 9 月 1 日；（2）中文或英文发表的文献；（3）研究内容涉及实验室智能化技术，包括但不限于机械自动化、信息技术、机器人技术、人工智能等；（4）技术应用于生物安全实验室或明确可应用于生物安全实验室场景，如病原微生物实验、高等级生物防护实验等；（5）文献类型为原始研究论文、技术报告、应用案例研究或系统设计研究。排除标准：（1）仅描述传统实验室设备或技术，未涉及智能化、自动化内容的文献；（2）研究对象为普通化学实验室、物理实验室等，且技术特点与生物安全实验室应用场景不符；（3）文献仅简单提及智能化概念，但未阐述具体技术设计、实施方案或应用效果；（4）文献类型为 meta 分析、读者来信、会议摘要、新闻报道、个案报告、评论性文章等；（5）重复发表的文献（保留最新或最完整版本）；（6）无法获取全文或关键信息缺失的文献。

1.3 数据提取和质量评价 对纳入的文献资料进行系统性数据提取，内容包括：第一作者、发表年份、研究国家/地区、技术类型、应用场景、技术特征、实验室等级、性能指标、生物安全防护措施、技术优势与局限性以及主要结论等。由 2 名研究生独立进行数据信息的筛选和提取，当意见不统一时邀请指导教师共同讨论解决。

本研究采用结构化评价框架对纳入文献进行质量评价。评价维度包括 6 个核心要素：（1）技术方案完整性，即是否详细描述技术原理、系统架构及关键参数；（2）验证方法规范性，即是否采用标准化测试方法、设置对照实验并进行统计分析；（3）性能指标明确性，即是否提供准确率、响应时间、检出限等定量化性能数据；（4）生物安全适配性，即是否明确说明生物安全等级（biosafety level）要求、防护措施及标准操作规程；（5）应用场景具体性，即是否清晰界定技术适用范围、操作环境及目标用户；（6）局限性讨论充分性，即是否客观分析技术局限、改进方向及潜在风险。采用 3 分制评分法（0 分=未涉及，1 分=基本满足，2 分=部分满足，3 分=完全满足），由参与数据提取的 2 名研究生同步对每项要素进行评分，评分不一致时通过讨论达成共识或与指导教师进行讨论并裁定。根据总分进行质量分级：≥15 分为高质量，10～14 分为中等质量，6～9 分为低质量，<6 分则予以排除。所有评分过程均采用标准化评价表格记录，以保证评价的客观性、一致性和可重复性。

2 结 果

2.1 文献基本情况（图 1） 本次研究初检相关文献 268 篇（其中中文文献 114 篇、英文文献 154 篇），经查重、题目排除及摘要阅读后筛选出 90 篇，再通过全文仔细阅读排除 43 篇不符合要求的文献，最终纳入 47 篇文献（中文 15 篇、英文 32 篇）；这些文献涉及中国、美国、德国、韩国等国家/地区，技术应用涵盖自动化基础设备、智能机器人系统、机器学习算法等类别，研究场景包括 BSL-2 至 BSL-4 等级生物安全实验室及生命科学、临床检验等实验室，且文献质量评分显示，22 篇为高质量、16 篇为中等质量、9 篇为低质量。

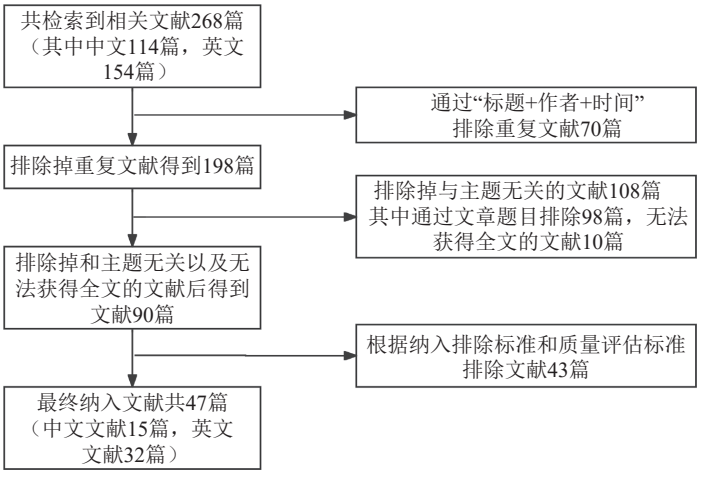


图 1 文献筛选流程图

Fig. 1 Article screening process

2.2 人工智能技术推动生物安全实验室智能化发展　人工智能技术是解决生物安全实验室核心痛点的关键，其在机器学习、智能机器人、大数据技术等领域的应用正从多维度改变实验室运行模式。

2.2.1 机器学习赋能生物安全实验室技术革新与精准分析　机器学习作为人工智能核心技术，能从数据中自动发现模式并预测，且无需显式编程即可依数据出结果[8]；其在生物安全实验室应用渐广，因生物系统复杂[9]，该技术还可改进并构建新生物技术过程[10]。Ganetzky R D 等[11] 提出了一种应用机器学习的方法来自动解释完整的血浆氨基酸图谱。与新生儿筛查中分析的氨基酸不同，完整的氨基酸图谱至少测量 22 种氨基酸，可用于诊断 50 多种疾病。这种方法的提出极大地减少了人工成本并且大大提高了准确率。美国伊利诺伊大学 Zahrt A F 等人[12] 以手性磷酸催化的亚胺–硫醇反应为例，通过对 800 余种催化剂构象建模并结合机器学习，建立了可高精度预测手性选择性的框架，为催化剂理性设计提供了新思路。机器学习在生物安全实验室中的应用正日益增多，尤其是在生物医学、基因组学、药物研发、疾病预测等领域。

2.2.2 智能机器人赋能生物安全实验室自动化操作与风险防控　机器人技术是人工智能在机器领域的应用，主要涉及使机器人能够执行各种任务和活动的技术和方法。这包括机器人控制、感知、定位和导航等方面的研究。智能机器人是人工智能技术和传统工业机器人技术融合发展的结果，韩国三星先进技术研究所 Ha T 等[13] 开发了结合 AI 与机器人技术的自主合成系统，通过 AI 规划路线并根据实验反馈迭代优化。系统成功合成 3 种化合物且转化率超越文献值，基于批量反应器设计便于标准实验室应用。韩国首尔大学 Hamm J 等[14] 设计了一个由机器人手臂、辅助工具和软件组成的模块化平台，该平台促进了化学和生物学中关键实验的完全自动化或远程执行。机器人与标准实验室设备无缝对接，通过在线程序远程实时操作。集成视觉系统的机械臂摄像头确保精确定位，提高精度。生物安全实验室处理危险病原体需要严格控制，机器人技术能显著提高实验室的安全性、效率和准确性。

2.2.3 大数据技术赋能生物安全实验室高效分析与安全监控　大数据技术指的是从各种数据中迅速获取有价值信息的能力，并对这些信息进行整理和计算。这种能力使得 AI 能够不断地进化，从而真正地成为人们所期待的人工智能。德国明斯特大学有机化学研究所及多尺度理论与计算中心 Segler M H S 等[15] 提出使用蒙特卡罗树搜索（MCTS）来有效地发现逆合成路线。MCTS 与指导搜索的扩展政策网络和“范围内”过滤网络相结合，以预先选择最有希望的逆向合成步骤。该方法与传统的基于提取规则和手工编码的启发式搜索方法相比，解决的分子数几乎是传统方法的 2 倍，速度是传统方法的 30 倍。大数据技术正成为生物安全实验室提升效率、提高数据分析精度、保障安全的重要工具，尤其高等级生物安全实验室（如 BSL-3、BSL-4）研究危险病原体，需严密监控管理实验环境、操作及数据，大数据技术可提供更强支持。

人工智能正改变生物安全实验室工作方式，提升效率与安全性：依托自动化设备、实时监控及数据分析，实验室可更快更准开展实验，强化风险预警应对；AI 进步下，机器人能替代人工完成复杂操作，机器学习与大数据分析还将优化实验数据分析及流程[16]。

2.3 智能化系统赋能生物安全实验室的高效运行　生物安全实验室智能化系统集成多技术以提升实验室管理、安全与效率，当前已形成多类智能系统及专用智能消毒设备，为全面智能化奠定基础。

2.3.1 单项实验操作自动化与自动化实验流水线系统　智能化的基础是自动化，为了实现更好的实验效果，人类开发了各种自动化的实验设备替代人工操作，如磁力搅拌器、涡旋振荡器等，提供了稳定和高可重复性的操作。在实验室具体操作自动化的需求牵引下，自动化设备所应用的精准定位、力反馈等技术已日趋成熟[17–18]，病原微生物实验操作的各个环节都逐步实现了自动化。

瑞士 Accroma 实验室样品前处理机器人[19] 可集成各种模块，用户可自定义样品前处理工作流程，提高样品前处理的准确性和效率。Opentrons Robot OT-2 移液机器人[20] 可自动化液体处理，用于细胞检测、生化分析、药物研发等。这类具备特定功能（如样品前处理、核酸提取、移液配液）的实验室自动化设备发展快，虽提效但难支撑完整流程。美国贝克曼库尔特公司研发的 Power Process 自动化检验流水线，涵盖实验室分析前后处理和样本检测所有流程[21]。不过该类系统主要针对临床检验项目，流程相对固化，属于设备自动化范畴，但无法满足生物安全实验室多样化样本种类、创新性实验方法的需要。

在复杂实验自动化系统的研究上，中国厦门大学 Wang J 等人[22] 设计并提出了一种高度集成的自动化生物排种平台（Auto-Panning）。基于数字微流体（DMF）[23]，生物淘洗过程集成在一个芯

片上，具有高度可重复性的自动化的液体操作，Auto-Panning 成为自动化的可编程分子筛选平台，将促进新型配体的发现和应用。德国卡尔斯鲁厄理工学院 Gómez J E U 等人[24] 设计了一种自动纳升液滴选择和收集装置，是一种用于自动收集和转移液滴微阵列（Droplet Microarray, DMA）中纳升样品的机器人系统，通过自动化选择和收集纳升量级的液体样本，可以增加 DNA 模板分子数目以改善聚合酶链式反应（PCR）的结果。德国德累斯顿工业大学 Fuchs Y F 等人[25] 编译、建立和验证了一个独特的机器人系统和一个自动化过程，包括分离外周血单核细胞（PBMC）的所有步骤，可以保持 PBMC 的质量和数量，以及在一致性、效率和准确率等方面提供优势。随着国内外自动化实验操作设备的出现以及应用减轻了人工成本并且极大地避免了人为误差的出现，大大提高了实验的精确度，不过当前各种类型自动化设备普遍存在兼容性差、操作复杂性高和数据管理难度大等问题[26]。

2.3.2 实验室智能化消毒系统取得快速发展 消毒的主要目标是在达到微生物杀灭标准的前提下，尽可能降低对环境和人体健康的影响，实现高效绿色消毒，避免过度消毒。生物安全实验室在更换实验微生物、停止运行或维护时需进行消毒，以杀灭室内空气及物表微生物，避免交叉污染，阻断病原体感染传播。

Yao Z[27] 设计了一种自主移动组合消毒系统。针对目前消毒机器人普遍存在的二次环境污染、消毒死角、消毒效率低等缺点，建立了连续和定点模式的消毒过程模型，定量计算了有效消毒范围、速度和持续时间。实验结果表明，该组合消毒机器人比单独的紫外线灯消毒效率至少提高 25%，比单独的过氧化氢气溶胶消毒效率也有明显提高。Calle L A[28] 研发了一款自主移动机器人，配备 UV-C 辐射与气溶胶消毒的混合消毒系统，可检测人员及电子设备是否存在，以此启停消毒系统，既保障全域消毒，又避免人员暴露于 UV-C 射线、电子设备接触液体。Xu P 等[29] 研究了一种消毒机器人三维空间消毒策略，该机器人在计算机模拟和现实中都能有效地完成消毒任务。Hu D 等[30] 提出了一种集成了多层次和多尺度特征的深度学习网络，对需要消毒的污染表面上的物质进行分类，计算污染表面的感染风险，选择合适的消毒方式和参数，成功实施了自适应机器人消毒。传统生物安全实验室消毒技术依赖大量人工，且消毒剂分布不均。虽然汽化过氧化氢、干雾过氧化氢和二氧化氯等智能化消毒技术及机器人技术取得了进展，但现有智能消毒装备针对实验室内部应用开发较少，无法满足高等级实验室的终末消毒需求，且存在参数控制不精确、易发生过度消毒等问题[31−32]。

2.3.3 功能可配置的智能自动化生化实验室系统 生化实验步骤繁、设计操作需按需组合，且因生化物质多样，药物筛选等实验需大量重复操作，人财物消耗大；随着 AI、机器人及信息技术发展，智能自动化生化实验室系统日渐成熟[33−34]，有望提供省时省力、低成本的解决方案。

上海曼森公司自动化生物实验室[35]，以复合机器人搭配机械臂、视觉、夹爪、传感器等末端机构，结合样本处理自动化模块、核酸提取仪等设备，可实现样本与试剂的快速取放移载及病毒检测，能有效避免细菌微生物感染，并提升实验效率与精确度。美国绿宝石医疗公司（Emerald Therapeutics）研发的绿宝石云实验室（Emerald Cloud Lab）[36]，是一种高度自动化的集中式研究实验室，支持高级 API 创建实验协议[37]，实现远程控制实验仪器设备并在云实验室完成无人化实验。美国伊利诺伊大学研发的 IBioFAB 自动化实验室[38] 是世界首个合成生物学自动化中心，采用模块化、柔性化、自动化技术，可自动进行 DNA 克隆、组装、异源表达及产物检测。应用于基因回路设计、人工基因合成、细胞工厂构建、酶分子进化、蛋白合成、化合物筛选、生物材料创制等实验[39]。德国柏林工业大学设计了 KIWI-biolab 智能生物实验室[40]，结合了生物技术、机器学习、过程技术和机器人技术等，采用人工智能和机器学习技术进行自动化微生物数据分析[41]。

智能化实验室系统应用于生物安全实验室可大幅提升效率，但是，目前该类系统还未考虑高等级生物防护下的操作、消毒与物品传递，难以满足其生物安全风险控制要求。

2.3.4 数字化和智能化的实验室运维管理系统 随着智能生化实验室系统和自动化设备的发展，生物安全实验室的智能化、无人化进程加速，但监控管理仍需大量人力财力。基于 3D 建模、物联网和云计算的数字化运维管理系统可统一管理数据和仪器，远程设定实验步骤并监督过程，大幅提升实验室效率[42]。

深圳华大智造科技股份有限公司“智慧”实验室管理平台[43]，具备环境、设备、应用的数据化全域感知能力，实现生产和实验流程中全方位、全领域的数字化管理，最终达到全息追溯，全流程的数据存储、全面的数据分析和数据使用。王琳锋[44] 设计了一种基于物联感知—网络传输—数据分析的三层架构，构建集成 BIM（building information modeling）[45] 控制运维和实验业务仿真的智能化

管理系统，实现高等级生物安全实验室的智能研判决策和动态响应管理。Thermo Fisher Scientific 公司设计的 LIMS 系统[46]具有卓越的可扩展性和适应性，支持各种实验室类型，从生命科学到环境监测。该系统包括强大的样本跟踪、数据管理和报告生成功能，适用于复杂的实验室流程。

数字化实验室运维管理系统推动实验室智能化迈向新高度，显著提升其安全性、效率与管理水平，为无人化智能化提供有力支撑，但当前系统大多仅按预设程序连接自动化设备、服从人工指令，尚不具备自学习与自迭代能力[47]。

智能化生物安全实验室系统集成先进技术，可提升安全性与自动化水平，优化实验流程并提高精度效率；随着物联网、大数据、人工智能发展，其将进一步推动实验室管理操作现代化，以更高安全保障和运行效率支撑科研技术进步。

3 总结与展望

近年来，实验室智能化技术推动了生物安全实验室的发展，体现在自动化设备、智能化系统、运维管理、智能消毒和人工智能分析等方面。自动化设备提升了实验效率和精度，但传统设备仍面临高成本和资源消耗问题，智能系统有望提供更高效、低成本的解决方案。尽管智能消毒技术进步，但仍存在控制粗放和过度消毒问题。数字化运维系统提升监控精度、简化数据管理，优化设备维护。人工智能为实验室智能化和无人化提供更多可能。

数据可用性声明　本研究未产生新的数据。

参考文献

[1] 姜杉杉. 生物合成实验自动化系统中机器人的运动控制研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2019.

[2] 王春平. 物联网技术在智能医疗监护与康复辅助设备中的应用探索 [C]//第三十八届中国 (天津) 2024'IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集. 天津: 天津市电子学会, 2024: 185-188.

[3] 唐雯, 孙志斌, 胡丹艳, 等. 基于数字智能化技术的医学实验室管理研究 [J]. 中国卫生标准管理, 2024, 15(17): 9-12.

[4] 于晓静, 康玉明, 章培军, 等. 高等医学院校病原微生物实验室安全管理现状与探讨 [J]. 中国教育技术装备, 2024(19): 76-78,82.

[5] 张广川, 程君生, 郭桐同, 等. 高等级生物安全实验室中布鲁氏菌操作风险与防范 [J]. 中国兽医卫生, 2024, 1(2): 39-46.

[6] 徐艺玫, 赵江山, 冯心又, 等. 新疆实验室生物安全现状及统筹发展分析 [J]. 疾病预防控制通报, 2025, 40(4): 98-102.

[7] Choy K W. Changes in clinical laboratory operations and biosafety measures to mitigate biohazard risks during the COVID-19 pandemic[J]. The Lancet Microbe, 2020, 1(7): e273-e274.

[8] Zhou Z X, Tian D M, Yang Y G, et al. Machine learning assisted biosensing technology: an emerging powerful tool for improving the intelligence of food safety detection[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100679.

[9] Rabbani N, Kim G Y E, Suarez C J, et al. Applications of machine learning in routine laboratory medicine: current state and future directions[J]. Clinical Biochemistry, 2022, 103: 1-7.

[10] 崔严奇, 杨鲸蓉, 倪琳, 等. 基于机器学习算法构建浸润性肺腺癌预后预测模型 [J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2025, 32(1): 80-86

[11] Ganetzky R D, Master S R. Machine learning for the biochemical genetics laboratory[J]. Clinical Chemistry, 2020, 66(9): 1134-1135.

[12] Zahrt A F, Henle J J, Rose B T, et al. Prediction of higher-selectivity catalysts by computer-driven workflow and machine learning[J]. Science, 2019, 363(6424): eaau5631.

[13] Ha T, Lee D, Kwon Y, et al. AI-driven robotic chemist for autonomous synthesis of organic molecules[J]. Science Advances, 2023, 9(44): eadj0461.

[14] Hamm J, Lim S, Park J, et al. A modular robotic platform for biological research: cell culture automation and remote experimentation[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 6(5): 2300566.

[15] Segler M H S, Preuss M, Waller M P. Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI[J]. Nature, 2018, 555 (7698): 604-610.

[16] Saha R, Chauhan A, Rastogi Verma S. Machine learning: an advancement in biochemical engineering[J]. Biotechnology Letters, 2024, 46(4): 497-519.

[17] Lee D H, Kim H, Sung B H, et al. Biofoundries: bridging automation and biomanufacturing in synthetic biology[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2023, 28(6): 892-904.

[18] Yang C J, Xie Y, Liu S, et al. Force modeling, identification, and feedback control of robot-assisted needle insertion: a survey of the literature[J]. Sensors, 2018, 18(2): 561.

[19] Salojärvi P. Automated solutions in chemical quality control[D]. Helsinki: Aalto University, 2024.

[20] Khan S U , Mller V K , Frandsen R J N , et al. Real-time AI-driven quality control for laboratory automation: a novel computer vision solution for the opentrons OT-2 liquid handling robot[J]. Applied Intelligence, 2025, 55(7). DOI:10.1007/s10489-025-06334-3

[21] 王玮. 贝克曼库尔特 Power Processor 实验室自动化流水线的应用 [J]. 口岸卫生控制, 2019, 24(3): 5-7.

[22] Wang J X, Guo J J, Zhao K F, et al. Auto-Panning: a highly integrated and automated biopanning platform for peptide screening[J]. Lab on a Chip, 2021, 21(14): 2702-2710.

[23] Zhai J, Yi S H, Jia Y W, et al. Cell-based drug screening on microfluidics[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, 117: 231-241.

[24] Gómez J E U, El Faraj R E K, Braun M, et al. ANDeS: an automated nanoliter droplet selection and collection device[J]. SLAS Technology, 2024, 29(1): 100118.

[25] Fuchs Y F, Brunner J, Weigelt M, et al. Next generation biobanking: employing a robotic system for automated mononuclear cell isolation[J]. Biopreservation and Biobanking, 2023, 21(1): 106-110.

[26] Torres-Acosta M A, Lye G J, Dikicioglu D. Automated liquid-handling operations for robust, resilient, and efficient bio-based laboratory practices[J]. Biochemical Engineering Journal, 2022, 188: 108713.

[27] Yao Z F, Ma N, Chen Y D. An autonomous mobile combination

disinfection system[J]. Sensors, 2023, 24(1): 53.

[28] Calle L A, Castel J, Amaya M E, et al. Development of an autonomous differential mobile robot for disinfection with a hybrid disinfection system[C]//Proceedings of 2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). Honolulu: IEEE, 2023: 741-746.

[29] Xu P J, Chen X Y, Tang Q R. Design and coverage path planning of a disinfection robot[J]. Actuators, 2023, 12(5): 182.

[30] Hu D, Li S. Recognizing object surface materials to adapt robotic disinfection in infrastructure facilities[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(12): 1521-1546.

[31] 张佳甲, 李莉, 陈也佳, 等. 高等级生物安全实验室消毒灭菌关键技术与设备 [J]. 产品可靠性报告, 2023(2): 80-82.

[32] 魏秋华, 韩杰, 韦刚, 等. 高等级生物安全实验室三种关键消毒灭菌设备相关性能评价 [J]. 中国消毒学杂志, 2019, 36(11): 801-803, 807.

[33] Carobene A, Cabitza F, Bernardini S, et al. Where is laboratory medicine headed in the next decade? Partnership model for efficient integration and adoption of artificial intelligence into medical laboratories[J]. Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, 2023, 61(7): 1359-1359.

[34] Naugler C, Church D L. Automation and artificial intelligence in the clinical laboratory[J]. Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences, 2019, 56(2): 98-110.

[35] Adam D. The automated lab of tomorrow[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(17): e2406320121.

[36] Arnold C. Cloud labs: where robots do the research[J]. Nature, 2022, 606(7914): 612-613.

[37] 任官荣, 高见, 胡驷驹. 基于动态行为链和会话变异的 API 访问控制漏洞自动化检测方法 [J/OL]. 计算机应用研究, 1-9 [2025-09-10]. https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2025.04.0162.

[38] HamediRad M, Chao R, Weisberg S, et al. Towards a fully automated algorithm driven platform for biosystems design[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5150.

[39] Bunch D R, Durant T J S, Rudolf J W. Artificial intelligence applications in clinical chemistry[J]. Clinics in Laboratory Medicine, 2023, 43(1): 47-69.

[40] Kaspersetz L, Waldburger S, Schermeyer M T, et al. Automated bioprocess feedback operation in a high-throughput facility *via* the integration of a mobile robotic lab assistant[J]. Frontiers in Chemical Engineering, 2022, 4: 812140.

[41] Kennedy M S , K A , K P , et al. Artificial intelligence and machine learning-driven design of self-healing biomedical composites[J]. Expert review of medical devices, 2025, 22(8): 787-805.

[42] 郑劲松. 基于物联网云平台大数据技术的实验室安全管理 [J]. 现代管理, 2022, 12(5): 6.

[43] 刘启强, 陈相. 华大智造: 以创新智造引领生命科技 [J]. 广东科技, 2022, 31(2): 30-33,

[44] 王琳锋. 一种新型高等级生物安全实验室智能化管理系统 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(8): 133-135,

[45] 高文俊. 工程全过程数字化管理与 BIM 融合的创新实践研究 [J]. 中华建设, 2025(9): 51-53.

[46] Fraile J. Biobank-tailored LIMS to track precious samples and manage data: thermo fisher scientific describes how to select a LIMS that will apply laboratory 4.0 principles and “future proof” biobank operations[J]. Genetic Engineering and Biotechnology News, 2022, 42(10): 60-62.

[47] D’hooge J, Fraser A G. Learning about machine learning to create a self-driving echocardiographic laboratory: technical considerations[J]. Circulation, 2018, 138(16): 1636-1638.