第 52 卷 第 7 期：3448-3457 高电压技术 Vol.52, No.7: 3448-3457
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20260118

面向传染病防治的等离子体技术综述

张紫竹[1]，张基珅[1]，贺　峰[2]，白建云[2]，田起钰[2]，王子丰[1]，郭　莉[1]，
邹远妩[3]，刘　鑫[3]，仵倩红[4]，刘定新[1]，郑见宝[5]，马　涛[3]，宋立强[6]
（1. 西安交通大学等离子体生物医学研究中心，西安 710049；2. 榆林市第三医院，榆林 719000；3. 陕西省结核病防治院，西安 710100；4. 陕西省第二人民医院，西安 710005；5. 西安交通大学第一附属医院普通外科，西安 710061；6. 空军军医大学西京医院呼吸与危重症医学科，西安 710032）

摘　要：传染病严重威胁着生命健康，对人类社会稳定和经济发展构成了持续性挑战。现有的传染病预防与治疗方法在有效性、广谱性或安全性方面均存在一定局限，因而研究新的防治方法一直是人类孜孜不倦的追求。等离子体技术通过高电压放电产生种类丰富的活性粒子，能高效、广谱地灭活病原微生物，且在一定的参数条件下对人体安全，在传染病防治中展现出独特优势。该文从高电压工程的应用视角出发，综述了等离子体技术在环境病原微生物消杀和传染病治疗中的研究进展，并从机理分析、效能提升及临床应用这 3 个层面展望了该技术的未来发展方向，以期为等离子体技术用于传染病防治的研究与应用提供参考。

关键词：等离子体；传染病防治；病原微生物消杀；低温等离子体；活性粒子

Review of Plasma Technology for Infectious Disease Prevention and Treatment

ZHANG Zizhu[1], ZHANG Jishen[1], HE Feng[2], BAI Jianyun[2], TIAN Qiyu[2], WANG Zifeng[1], GUO Li[1], ZOU Yuanwu[3], LIU Xin[3], WU Qianhong[4], LIU Dingxin[1], ZHENG Jianbao[5], MA Tao[3], SONG Liqiang[6]
(1. Center for Plasma Biomedicine, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Yulin Third Hospital, Yulin 719000, China; 3. Shaanxi Provincial Hospital of Tuberculosis Prevention and Treatment, Xi'an 710100, China; 4. Shaanxi Second Provincial People's Hospital, Xi'an 710005, China; 5. Department of General Surgery, The First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 6. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Infectious diseases pose a severe threat to life and health, presenting ongoing challenges to social stability and economic development worldwide. Current methods for preventing and treating infectious diseases exhibit certain limitations in terms of efficacy, broad-spectrum applicability, or safety, driving persistent efforts toward novel approaches. Plasma technology, which generates a diverse range of reactive species via high-voltage discharge, can effectively and broadly inactivate pathogenic microorganisms while remaining safe for humans under appropriate operational parameters, demonstrating unique advantages in infectious disease control. From the application perspective of high-voltage engineering, we systematically elucidate the research progress of plasma technology in the inactivation of environmental pathogenic microorganisms and the treatment of infectious diseases. Moreover, we explore the future development directions of the technology from following three aspects: mechanistic analysis, efficacy enhancement, and clinical applications, aiming to provide insights for further research and practical application of plasma technology in infectious disease prevention and treatment.

Key words: plasma; infectious disease prevention and treatment; pathogen disinfection; low-temperature plasma; reactive species

0　引言

传染病，如新型冠状病毒感染(COVID-19)[1]、肺结核、传染性皮肤病(如足癣)等人类传染病[2]以及非洲猪瘟、高致病性禽流感等重大动物疫病[3]，不仅严重威胁着人类与动物的健康，也对社会稳定和经济发展构成了持续性挑战[4]。在传染病防治体系中，预防与治疗是 2 大核心环节，其技术手段各有侧重。预防侧重于在感染发生前防止病原体入侵人体并阻断病原体的传播，要求技术手段具备高效、

广谱、实时响应等特性。治疗则着眼于感染后的病原体清除与临床症状的缓解，须满足作用精准、生物安全性高、不易产生耐药性等临床要求。

目前，常见的传染病预防方法主要包括疫苗接种和环境消杀。疫苗接种旨在激发人体特异性免疫，以阻止病原体入侵；环境消杀则通过化学与物理手段阻断病原体传播，如使用含氯消毒剂、过氧乙酸等化学方法，或采用紫外线照射、高温灭菌等物理方法[5-6]。然而，现有预防手段存在诸多局限，如疫苗的研发周期长，且对病原体变异的应对往往存在滞后性[7]；化学消毒剂可能产生有害残留、腐蚀物品并引发环境污染[8]；紫外线则存在穿透力弱、存在照射盲区等问题[9]；高温灭菌虽效果可靠，但难以适用于不耐热器械或冷链环境，场景适用性受限[10]。

在传染病治疗方面，目前主要依赖抗生素、抗病毒药物等化学药物进行干预，并在必要时辅以外科手术等物理方式，其核心目标是清除患者体内的病原体、控制感染并促进机体康复。但现有治疗方法同样面临着严峻的挑战[11]，其中药物耐药性问题日益突出，同时，许多药物也存在副作用较大的问题[12]。综上，无论是预防还是治疗环节，现有技术均存在不足。因此，开发更为高效、安全、广谱的新型传染病防治技术迫在眉睫。

等离子体是物质除固态、液态、气态之外的第四态，其成分包括电子、离子、激发态中性粒子以及活性氧和活性氮粒子(RONS)等[13]。其中，等离子体产生的 RONS(如 O_3、H_2O_2、O_2^-、ONOOH、NO、NO_3^- 等)在灭活病原微生物的过程中起到了核心作用，其能诱导病原微生物的细胞膜、蛋白质及遗传物质发生氧化损伤，从而达到高效、广谱的灭活效果[14]；与此同时，放电过程中产生的高能电子、强电场等物理因素也会与之协同，共同增强消杀效果[15]。等离子体技术的应用形式灵活多样，既可将等离子体本身直接作用于器械表面以实现快速消杀，或作用于人体创面进行抗感染治疗，也可通过间接处理的方式实现复杂空间的大范围深度处理或人体腔道内的感染控制[16-17]。近几年来兴起的等离子体活化介质技术也可以看作是一种间接处理方式，它是指采用等离子体活化处理气体、液体、胶体等介质材料，将 RONS 加载并存储到这些材料中，进而利用气体的弥散性、液体的流动性与渗透性以及胶体的缓释特性，将活性粒子输送到等离子体直接放电难以覆盖的区域，从而突破直接处理在均匀性、安全性等方面的一些限制[18]。相较于传统的防治手段，等离子体技术展现出显著优势：在预防层面，等离子体不仅可以实现广谱、高效、无死角的消杀，还具备作用安全且无有害残留的优势，有效克服了紫外线存在照射盲区、化学消毒剂有残留的缺陷；在治疗层面，等离子体的剂量可控、不易诱导耐药性、对宿主组织损伤小，克服了抗生素耐药性与副作用大的难题[19]。此外，等离子体技术的作用温度可以接近室温，因此对医疗器械、精密设备等物品无热损伤风险，同时还能宽温域运行，适用于不同的应用场景[20]。因此，等离子体作为一种新兴的传染病防治技术，展现出了应对当前传染病防治挑战的巨大应用潜力与发展前景。

尽管如此，将等离子体技术实际应用于传染病防治仍面临着诸多挑战。在机制层面，其与病原微生物及宿主组织相互作用的复杂机理尚未被完全阐释；在技术层面，仍须进一步提升装置的效能、稳定性与场景适应性；在应用层面，针对不同应用场景的设备标准以及使用剂量仍待明确。这些挑战制约着等离子体传染病防治技术的标准化与规模化应用。因此，从基础理论、技术创新与工程转化等多个层面实现突破，是推动等离子体传染病防治技术发展的关键。为此，本文首先介绍了等离子体技术在室内环境病原微生物消杀、冷链环境病原微生物消杀以及医疗器械表面病原微生物消杀等传染病预防中的应用，继而探讨了等离子体技术在呼吸道感染、结核相关疾病、皮肤感染等传染病治疗中的研究进展，最后列举了等离子体技术当前面临的科学问题与技术瓶颈，并对该技术的未来发展方向进行了展望。

1　等离子体技术用于传染病预防

环境中的病原微生物，如附着于气溶胶、物体表面或潜藏于冷链食品中的细菌与病毒，是导致传染病传播的主要原因。传统消杀方法在效率、安全性及场景适用性上面临着诸多挑战，而等离子体技术为阻断病原体在环境中的传播链提供了可行方案。本章将从等离子体技术用于室内环境病原微生物消杀、冷链环境病原微生物消杀以及医疗器械表面病原微生物消杀这 3 个方面，系统阐述等离子体技术在传染病预防中的应用现状。

1.1　等离子体技术用于室内环境病原微生物消杀

室内环境，尤其是医院、学校、商场等人员密

集场所以及养殖场等动物聚集环境，是病原微生物通过空气、气溶胶以及物体表面传播的高风险区域，极易引发交叉感染[21-22]。目前，该场景下的主流消杀技术存在明显不足：紫外线照射存在死角，且无法人机共存；化学消毒剂则可能产生有害残留，并腐蚀物品。

等离子体空气消毒的核心机制在于其放电过程中产生的高能电子、RONS 及强电场等多因子协同作用[23]，能够有效破坏微生物的细胞结构、蛋白质及核酸，从而实现快速灭活[24]。目前，已有大量研究报道了该技术在空气病原体控制方面的有效性，例如，阵列式电晕放电或介质阻挡放电装置可集成于通风系统，在风道内形成等离子体场，对通过的空气进行持续消杀[25]；多款等离子体空气消毒机对空气中自然菌的消亡率为 90%以上[26-27]，且能有效灭活多种病毒，包括新冠病毒[28]。国内多家科研机构与企业，如中科大[29]、清华大学[30]等相关团队及苏州贝昂智能科技股份有限公司、山东神光航天科技有限公司等企业，也在该方向开展了系统研发与产品推广，推动了等离子体空气消毒技术的实际应用。

在此背景下，笔者课题组基于“线-板”式电晕放电结构，研发了系列化等离子体空气消毒设备，适用于冰箱、鞋柜、衣柜和小型会议室等场景消杀，如图 1 所示。第三方检测报告如表 1 所示，其表明该设备对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌、志贺氏菌、李斯特菌等多种常见细菌的杀灭率超过 99.999%，对白色念珠菌等真菌的杀灭率超过 99.999%，对黄曲霉杀灭率达 99.54%，对脊髓灰质炎病毒和甲型流感病毒 H1N1 的杀灭率分别超过 99.99%和 99.99%，展现出优异的广谱消杀性能。

除了空气消杀，对物体表面尤其是对结构复杂的物表进行有效消毒同样是阻断病原体传播的关键环节。等离子体活化水因其良好的流动性与渗透性，在物表消杀领域展现出了独特优势，有效解决了因物体表面结构复杂而导致的消杀死角问题。该技术通过雾化喷洒、冲洗等方式，使等离子体活化水充分覆盖不规则的物体表面、缝隙及凹陷处，实现了更为均匀、彻底的消杀效果。等离子体活化水用于物表消杀的机制在于其中富含的 H_2O_2、NO_2^-、NO_3^- 等长寿命 RONS 能够在物体表面持续累积并达到有效作用浓度，通过对附着微生物的细胞膜、蛋白质及遗传物质造成累积性的氧化损伤，从而实现高效灭活。与传统化学消毒剂不同，等离子体活化水中的活性粒子在作用后会迅速衰减并分解为水、氧气等环境友好的无害物质，因此在发挥高效杀菌作用的同时，也具备了绿色无残留和对人体无明显刺激反应的潜在优势。例如，笔者课题组不仅发现将等离子体活化水雾化后喷洒于物体表面，其富含的



(a) 便携款等离子体空气消毒设备



(b) 桌面款等离子体空气消毒设备　　(c) 壁挂款等离子体空气消毒设备

图 1　等离子体空气消毒设备

Fig.1　Plasma air disinfection equipment

表 1　等离子体空气消毒设备部分第三方检测结果

Table 1　Partial third-party test results of plasma air disinfection equipment

病原微生物分类	测试病原微生物	杀灭率/%
细菌	金黄色葡萄球菌	>99.999
	大肠杆菌	>99.999
	沙门氏菌	>99.999
	志贺氏菌	>99.999
	李斯特菌	>99.999
真菌	白色念珠菌	>99.999
	黄曲霉	99.54
病毒	脊髓灰质炎病毒	99.99
	甲型流感病毒 H1N1	99.99

RONS 能有效灭活物体表面附着的细菌、真菌和噬菌体等多种微生物，还进一步验证了其在实际应用中无有害残留，且动物实验中未观察到刺激性反应[31]。

1.2　等离子体技术用于冷链环境病原微生物消杀

冷链环境为细菌、病毒等病原微生物提供了特殊的低温庇护所。低温会使病原微生物进入休眠状态，这不仅使其存活周期显著延长，还增强了其对多种消杀因子的耐受性，最终导致冷链成为传染病跨区域传播的重要途径[32]。特别是在新冠疫情期间，多次疫情反弹被证实与受污染的冷链物品相关[33]。然而，传统消杀技术在冷链环境下面临严峻挑战：高温消杀技术无法应用；紫外线穿透力弱，无法深入冰层且存在消杀死角；化学试剂在冷链温度下易凝结，难以使用且存在有害残留。因此，开发一种能够适应低温、穿透冰层、无有害残留的新型高效消杀技术，已成为保障冷链物流生物安全的迫切需求。而等离子体技术凭借其独特的理化特性，正契合了上述需求。根据等离子体是否与被处理对象接触，其应用形式可以分为直接处理和间接处理 2 种。

研究表明，等离子体直接处理能够有效消杀冷链食品以及包装表面的病原微生物。例如，忠南大学 Lee 等采用等离子体射流处理煮熟鸡胸肉和火腿切片表面的李斯特菌，处理后的样品在 10 ℃的环境里储存了 7 d 仍无存活菌检出[34]。莱布尼茨农业工程研究所 Baier 等采用射流处理玉米沙拉新鲜叶片表面的大肠杆菌，处理后叶片在 4 ℃的环境里冷藏了 72 h 后光化学效率仍未发生显著变化，在避免对绿叶组织产生不利影响的同时还能有效灭活微生物[35]。此外，针对冷冻冰层中的微生物，清华大学郭云涛等采用表面介质阻挡放电直接处理–20 ℃下约 1 mm 冰层中的大肠杆菌，发现处理 5 min 后菌落数降低了约 1.2 个对数级，验证了直接放电对冰层微生物的消杀潜力[36]。针对覆冰消毒难题，中国科学院电工研究所邵涛等采用 DBD 远紫外光源在–20 ℃下透过 50 mm 冰层照射，30 mJ/cm^2 剂量对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌杀灭率均大于 99.9%，对 H1N1、EV71 和 PV-I 病毒灭活对数值均达 4.0，为冷链消杀提供了数据支持[37]。

近年来，以等离子体活化气技术为代表的间接处理同样在冷链消杀中展现出广阔的应用前景。这是由于等离子体活化气可以借助气体的弥散性，渗透至复杂冷链空间的各个角落及堆叠货物的缝隙中，实现大面积、无死角的消杀效果。因此，尽管与直接处理相比，等离子体活化气中只包含长寿命活性粒子，生物活性相对较弱，但其在果蔬采后保鲜、生鲜食品保鲜、冷链空间消杀等领域的应用效果显著，展现出了巨大的应用潜力[38-40]。空气放电可以经济、高效地制备等离子体活化气，但其对放电条件极为敏感，根据放电产物可分为臭氧模式、氮氧化物模式和过渡模式[41]。其中，臭氧模式空气放电产生以臭氧为主的活性氧粒子，但臭氧在低温冰层中的溶解度较低、渗透性较差，限制了其在冷链深部消杀中的应用效果[42]。氮氧化物模式空气放电产生以二氧化氮为主的活性氮粒子，其渗透性虽有所改善，但消杀能力远不如过渡模式空气放电产生的高价态活性氮粒子(如 NO_3、N_2O_5)。然而，过渡模式空气放电难以稳定控制，这是该技术迈向实际应用遇到的关键瓶颈。

针对这一瓶颈问题，笔者课题组开发了基于空气放电模式协同的等离子体活化气技术，据此开发的冷链消杀系统如图 2 所示。该技术通过协同使用臭氧模式空气放电与氮氧化物模式空气放电，实现了稳定、高效地产生 N_2O_5 等加载性好、消杀能力强的高价态活性氮粒子[43]。当这些气相活性氮粒子作用于冰层时，N_2O_5 可水解生成 HNO_3 并进一步产生 ONOOH 等强氧化性物质，与其他在冰层中加载性好的 RONS，如 H_2O_2 一起通过气-冰传质渗透至冰层深处，并通过对病原微生物细胞壁/膜、DNA 及蛋白质等关键生物大分子造成氧化损伤，从而实现高效消杀。研究初步表明，模式协同等离子体活化气在大于 1 m^3 的密闭冰柜内可对 10 mm 厚冰层中的金黄色葡萄球菌实现深度消杀[44]，杀灭率超过 6 个数量级，且空间均匀性良好，其性能远超传统

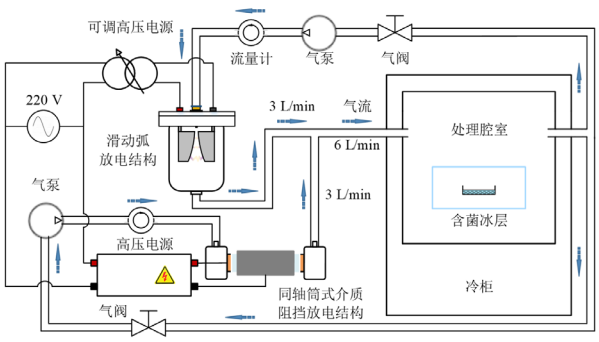


图 2　等离子体冷链消杀系统

Fig.2　Plasma cold-chain disinfection system

臭氧杀菌。第三方权威检测也表明，该技术在–20 ℃下对 4 mm 厚冰层中的金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和冠状病毒的杀灭率均大于 99.999%，如表 2 所示，这为冷链物流安全提供了一种潜在的技术选择[45]。

表 2 等离子体冷链消杀装置部分第三方检测结果

Table 2 Partial third-party test results of plasma cold-chain disinfection equipment

病原微生物分类	测试病原微生物	杀灭率/%
细菌	金黄色葡萄球菌	>99.999 9
	大肠杆菌	>99.999 9
病毒	冠状病毒 229E	>99.999 9

1.3 等离子体技术用于医疗器械用品消杀

医疗器械灭菌是预防医源性感染的关键环节，其杀灭率标准须达到 6 个对数级(99.999 9%)。对热敏或结构复杂的器械，传统高温高压或环氧乙烷熏蒸法存在损伤器械、残留毒性及处理周期长等局限。目前，基于低气压环境的低温等离子体灭菌技术已成为主流解决方案。该技术自 1997 年美国强生公司的 STERRAD 100S 低温等离子体灭菌器通过 FDA 认证以来，已在全球医院消毒供应中心广泛应用。此类设备通常在低气压环境中运行，利用脉冲电晕放电或介质阻挡放电激发过氧化氢蒸气产生等离子体，可在 50~60 ℃下实现对器械表面及复杂内腔的有效灭菌，具有无死角、无有害残留的应用优势[46]。目前，国内多家企业已成功实现对该类灭菌设备的仿制与产业化推广。

然而，低气压灭菌技术依赖真空系统，导致设备成本高、单次处理批量有限且周期较长。为此，国内外研究正积极转向大气压条件下等离子体灭菌技术的应用。相关研究主要分为 2 类。一是开发大气压等离子体直接消杀技术。例如，西安交通大学张冠军等采用等离子体射流装置对血压计袖带、医用弯盘及外科镊子表面自然菌进行直接处理，结果显示其在短时间内即可显著降低菌落数，达到国家消毒合格标准[47]。华中科技大学卢新培等研制出一种可在根管内直接放电产生等离子体的等离子体针装置，利用此装置几分钟内即可有效灭活引起根管治疗失败的主要致病菌——粪肠球菌[48]。欧道明大学 Bhatt 等利用 Ar 等离子体处理被耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和大肠埃希菌污染的内窥镜通道，9 min 后 3 种细菌数量显著下降，且未引起通道形态异常[49]。此外，中国科学院电工研究所邵涛等采用重复单极纳秒脉冲激励的介质阻挡放电，在液体电极结构中实现了大气压空气中均匀、弥散的等离子体放电，电流可达数十安培级，且放电模式稳定，为高效、均匀的医疗器械表面处理提供了技术支撑[50]。这类大气压等离子体直接消杀设备，凭借其便携、可定点操作的特点，能实现对不可拆卸的大型设备或 ICU、手术室等环境中器械表面的快速定点处理，提升感染控制效率[51]。二是利用等离子体活化水进行消杀，可采用喷洒、浸泡等更灵活的方式处理器械。例如，罗马尼亚 Grigore T. Popa 医药大学 Bălan 等采用等离子体活化水浸泡十二指肠镜涂层聚合物样品 30 min 后，样品表面细菌数明显减少，且样品形态与元素构成均未发生变化[52]。这些大气压等离子体技术为内窥镜等热敏感、精密器械的消毒处理提供了一种有前景的替代方案。

2 等离子体技术用于传染病治疗

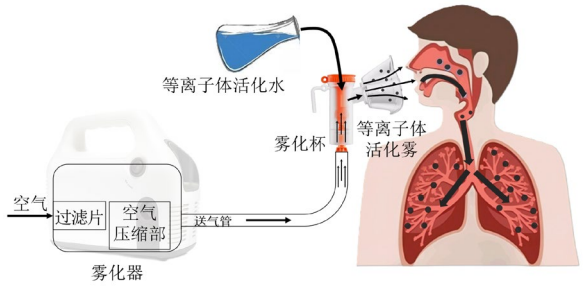
根据世界卫生组织(WHO)统计，每年因 COVID-19 感染、肺结核等各类呼吸道感染导致的死亡人数超过 1 000 万例；足癣等皮肤感染虽不致死，但也显著降低了患者的生活质量。这些传染病严重威胁着人类健康，给社会医疗系统造成了巨大压力。传统治疗方法如抗生素、抗病毒药物在耐药性、副作用等方面存在局限性，亟须发展新型、高效、安全的治疗手段。等离子体作为一种新兴的生物医学手段，凭借其高效、广谱、不易产生耐药性、对宿主组织损伤小等优势，在传染病治疗领域展现出广阔的应用前景。本章将从呼吸道感染雾化治疗、结核相关疾病治疗、传染性皮肤病治疗这 3 个方面，系统介绍等离子体在传染病治疗中的应用。

2.1 等离子体雾化治疗呼吸道感染

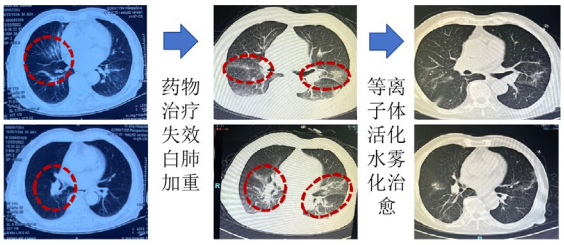
呼吸道感染是最常见的传染病类型之一，包括流感、新冠病毒感染等，具有发病急、传播快、影响大等特点，其中，部分感染还可能引发肺炎等严重并发症，可造成社会经济的重大损失，甚至导致重症与死亡，对公共卫生构成严重威胁[53]。传统治疗主要依赖抗病毒药物与抗生素，但其耐药性和副作用等问题日益突出。等离子体活化水雾化吸入是一种新兴的抗感染手段。它通过将等离子体活化水转化为可吸入的气溶胶，直接靶向作用于呼吸道病灶，从而实现局部、高效的抗感染与免疫调节，为控制感染提供了新思路。

笔者课题组前期通过等离子体活化水含漱治

疗的临床研究，首次证实了该技术在口咽部局部应用的安全性，并验证了其对上呼吸道病毒的灭活效果[54]，为后续将同一技术拓展至更深部位的治疗提供了重要依据。在此基础上，课题组进一步开发了雾化吸入治疗方式，将等离子体活化水通过雾化吸入方式递送至病灶深处，与含漱治疗仅作用于口咽部相比，雾化吸入可直接深入治疗肺部的感染部位，具有更精准、更深层的优势，其示意图如图 3(a)所示。该设备同样采用空气放电模式协同的等离子体技术，通过将模式协同等离子体活化气通入生理盐水中反应 10 min，制成富含 ONOOH、H_2O_2、NO_3^- 等多种 RONS 的等离子体活化水，其具备强效抗病毒、抗炎、免疫调节作用。



(a) 等离子体活化水雾化治疗人体呼吸道感染的示意图



(b) 等离子体活化水雾化治疗新冠肺炎患者的效果

图 3　等离子体活化水雾化治疗示意图及其治疗效果

Fig.3　Schematic diagram of plasma-activated water nebulization therapy and its therapeutic effects

在一项针对口服抗病毒药物失败后肺炎仍在进展的中度 COVID-19 患者的随机对照试验中，笔者课题组发现等离子体活化水雾化组在治疗 5 d 后，胸部 CT 改善率高达 81.8%，远高于生理盐水对照组的 33.3%(组间比较的 P=0.036 小于统计学显著性界值 0.05，表明差异具有统计学意义)[55]。同时，等离子体活化水雾化组患者的咳嗽症状在 10 d 内的累积消失率也显著优于对照组(P=0.029，差异同样具有统计学意义)，治疗效果如图 3(b)所示。在整个治疗过程中，未发现任何与等离子体活化水雾化吸入相关的不良反应，血液学及肝肾功能指标均保持稳定。其治疗机制在于等离子体活化水雾化后携带的短寿命 RONS 如·OH、$^1O_2$、ONOOH 等具有瞬时强氧化性，不仅能有效破坏病毒结构，还能调节肺部免疫炎症反应，从而协同发挥抗病毒与抗炎作用[56]。

2.2　等离子体冲洗治疗结核相关疾病

结核病主要是由结核分枝杆菌引起的慢性传染病，是当今危害人民群众健康的重大传染病[57]。国内外关于等离子体对分枝杆菌(包括结核分枝杆菌)灭菌效果的研究较少，德国科特布斯医学微生物学研究所 Bär 等用低温等离子体灭菌法对结核分枝杆菌污染的支气管镜进行灭菌，发现所有样品经等离子体灭菌后，经培养和核酸扩增技术均为阴性结果，相较于其他灭菌法可以避免假阳性结果[58]。格赖夫斯瓦尔德大学 Daeschlein 等应用等离子体射流和介质阻挡放电对 8 种分枝杆菌的灭菌效果进行测试，发现这 2 种等离子体源的处理对所有分枝杆菌都有很好的抗菌杀灭效果[59]。忠南大学 Lee 等发现等离子体射流可使非致病性耻垢分枝杆菌和致病性结核分枝杆菌 H37Rv 失活，且等离子体射流的杀菌效果与细胞内 OH 和 H_2O_2 的毒性有关[60]。虽然等离子体射流放电和介质阻挡放电均具有一定的杀灭分枝杆菌的作用，但作用范围较小，仅适用于平层表面杀菌，不能进行深部腔隙杀菌，如：气管内、局部脓腔内等，且应用中有触电等安全风险。基于以上研究，笔者课题组进一步探究了等离子体活化水对结核分枝杆菌的作用效果，分别设立生理盐水组、盐酸组(pH=2)以及等离子体活化生理盐水组这 3 个处理组，用以探究等离子体活化水对敏感及耐药结核分枝杆菌生长的影响。结果表明：等离子体活化水对结核分枝杆菌具有显著的灭活效果，与生理盐水和盐酸处理相比，等离子体活化生理盐水处理抑制了结核分枝杆菌的生长；同时，药敏实验提示等离子体活化生理盐水能够抑制耐药结核分枝杆菌的生长，尤其是对异烟肼、链霉素耐药菌效果显著[61]。在此基础上，笔者课题组还将等离子体活化生理盐水用于颈淋巴结核脓腔冲洗研究，依托陕西省结核病防治院(陕西省第五人民医院)开展临床试验，均取得良好的治疗效果。

2.3　等离子体治疗传染性皮肤病

皮肤是人体最常发生感染的部位之一，真菌性疾病如足癣、甲癣以及病毒性感染如疣，均属于全球范围内高发的传染性皮肤病。据统计，皮肤疾病在全球范围内影响着 30%~70%的个体，在某些高风

险人群中比例更高[62]。传统治疗方法主要依赖局部抗生素和抗真菌药物。然而，由于药物难以穿透致密的角质层或甲板，导致病原体清除不彻底、疗程延长、复发率居高不下，并容易引发微生物耐药性[63]。例如，传统药物治疗甲真菌病(俗称灰指甲)的周期长，且系统用药存在肝毒性风险[64]。此外，长期使用某些抗真菌药物还可能引起皮肤刺激或过敏反应，进一步限制了其临床应用的发展。

在此背景下，等离子体技术为传染性皮肤病的治疗提供了一种创新方案。针对真菌感染，研究表明等离子体不仅能直接灭活皮肤癣菌孢子[65]，还能抑制其麦角固醇的生物合成并增加角质酶活性，从而从根本上抑制真菌生长[66]。在实验研究方面，华中科技大学熊紫兰等人以牛蹄切片模拟人指甲，系统评估了氦等离子体射流、表面微放电和浮动电极介质阻挡放电透过指甲屏障对红色毛癣菌的杀灭效果[67]。结果表明，3 种装置均能有效杀灭位于模型指甲背面的微生物，其中浮动电极介质阻挡放电效果最为显著，在 5 min 处理内即可对细菌实现约 99.99%的杀灭，对真菌的杀灭效果也明显优于另外 2 种装置。在临床疗效方面，研究显示，将等离子体治疗与甲板削除与再生术或抗真菌药物治疗相结合时，甲真菌病的临床治愈率可超过 70%，真菌学治愈率更是高达 85.7%[68]。针对病毒感染，初步的案例研究也报告了等离子体对于由人类乳头瘤病毒(HPV)引起的寻常疣、甲周疣和掌跖疣具有显著的清除效果[69-70]。等离子体的优势在于其不易诱导微生物耐药性，且能够穿透甲板等传统药物难以渗透的屏障[71]。此外，等离子体治疗过程中器械与患处无物理接触，这从根本上降低了交叉感染的风险，并具有良好的安全性，治疗过程中患者无灼烧感或不适。

在等离子体技术临床转化的探索中，等离子体活化气因其可以就地取材、多能一体的优势，展现出了巨大的应用潜力。笔者课题组开发的等离子体活化气治疗样机在足癣临床治疗研究中取得了良好的疗效，样机如图 4(a)所示。其治疗机制在于等离子体活化气中的长寿命 RONS 如 O_3、NO、N_2O_5 等，能直接攻击并破坏真菌等微生物的细胞膜、细胞壁结构，同时对其细胞内的蛋白质、DNA 等生命大分子造成不可逆的氧化损伤，从而实现高效、广谱的消杀效果。临床试验结果表明，等离子体活化气联合抗真菌乳膏可显著促进鳞屑消退，治疗结果如图 4(b)所示。所有接受等离子体活化气治疗的患者在疗程结束后真菌镜检均转为阴性，且足部皮损面积大幅减小，治疗过程中无灼烧感或不适，安全性良好。该样机目前已拓展用于糖尿病足等复杂感染的临床治疗研究，具有良好的应用前景。



(a) 等离子体活化气治疗样机　　(b) 等离子体活化气联合抗真菌乳膏足癣

图 4　等离子体活化气治疗样机及其足癣治疗效果

Fig.4　A plasma-activated gas therapy prototype and its therapeutic efficacy against tinea pedis

3　结论与展望

本文综述了面向传染病防治的等离子体技术研究进展，重点阐述了其用于室内环境病原微生物消杀、冷链环境病原微生物消杀、医疗器械表面病原微生物消杀等传染病预防研究进展以及呼吸道感染雾化治疗、结核相关疾病治疗、传染性皮肤病治疗等传染病治疗研究进展。相比于传统技术，等离子体技术具备广谱高效杀菌、毒副作用小、环境适用性强等应用优势，为传染病防治提供了新的技术

途径。

尽管如此，等离子体技术在传染病防治领域从实验室研究走向规模化应用，仍面临作用机理未完全阐明、技术效能不稳定、相关标准缺失等挑战，研究工作需要从以下方向重点推进。

1）深化机理研究：等离子体与病原微生物及宿主组织相互作用的复杂机制尚未阐明，这是技术优化的核心瓶颈。未来须综合运用光谱分析、分子生物学实验、细胞与动物实验以及计算模拟等多学科方法，揭示 RONS 在气体、液体、生物胶体等不同活化介质中的生成与转化规律及其与生物组织相互作用的机制，明确关键活性粒子的作用靶点，理清其对病原微生物灭活及宿主免疫调控的生物学通路，为技术精准优化提供理论支撑。

2）升级设备效能：设备效能是等离子体技术实现高效消杀与精准治疗的关键所在，为满足不同场景需求，未来在环境与物表消杀方面，须根据不同的应用场景精准调控 RONS 的生成：在有人环境需要重点抑制臭氧等副产物的产生，以实现人机共存；在无人环境或物体表面消毒时需要重点提升 RONS 的产率、环境稳定性及空间分布均匀性，以实现高效、无死角的广谱灭活；在体内感染治疗方面，则应着力突破 RONS 的靶向递送、精准剂量调控及生物安全性等瓶颈，确保其在复杂生物环境下的有效性与安全性。为此，须推动等离子体源、电源及辅助系统的设计与革新，发展智能化、可调控的装备平台，为实现高效、安全的精准防治提供坚实的技术基础。

3）推动标准化与临床应用：为加速推动等离子体技术从实验室研究走向规模化应用，亟须构建覆盖不同应用场景的差异化标准体系。须明确设备的性能参数与活性粒子的浓度标准，规范不同场景下的操作流程及安全评价指标。在此基础上，进一步通过大量、规范的临床试验积累科学实证依据，为医疗器械注册认证提供支撑，并据此制定临床应用指南，明确等离子体技术的临床适用范围与优化方案。此外，还应积极探索等离子体技术与抗感染药物、纳米载体等技术的融合模式，为临床治疗提供更多优化方案，推动该技术规范融入传染病的防治体系中。

随着等离子体技术作用机理的明确、智能化装备的升级及多场景标准化与临床转化的完善，该技术有望实现从基础研究到规模化应用的跨越，为传染病的预防与治疗提供高效、安全的方案，为传染病“防治康管”全链条体系提供关键的技术支撑。

参考文献　References

[1] SANYAL S. Crossroads in virology: current challenges and future perspectives in the age of emerging viruses[J]. Disease Models & Mechanisms, 2023, 16(10): dmm050476.

[2] World Health Organization. Global report on infection prevention and control[R]. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.

[3] FLORES E F, WEIBLEN R, CARGNELUTTI J F, et al. Emerging animal viruses: real threats or simple bystanders?[J]. Pesquisa Veterinária Brasileira, 2013, 33(10): 1161-1173.

[4] COVID-19 Mental Disorders Collaborators. Global prevalence and burden of depressive and anxiety disorders in 204 countries and territories in 2020 due to the COVID-19 pandemic[J]. The Lancet, 2021, 398(10312): 1700-1712.

[5] RUTALA W A, WEBER D J. Disinfection and sterilization: an overview[J]. American Journal of Infection Control, 2013, 41(5): S2-S5.

[6] BHARTI B, LI H L, REN Z Y, et al. Recent advances in sterilization and disinfection technology: a review[J]. Chemosphere, 2022, 308: 136404.

[7] KRAMMER F. SARS-CoV-2 vaccines in development[J]. Nature, 2020, 586(7830): 516-527.

[8] CHEN Z L, GUO J S, JIANG Y X, et al. High concentration and high dose of disinfectants and antibiotics used during the COVID-19 pandemic threaten human health[J]. Environmental Sciences Europe, 2021, 33(1): 11.

[9] ALBERTINI R, COLUCCI M E, COLUCCIA A, et al. An overview on the use of ultraviolet radiation to disinfect air and surfaces[J]. Acta Biomed, 2023, 94(Supplement 3): e2023165.

[10] RUTALA W A, WEBER D J. Disinfection, sterilization, and antisepsis: an overview[J]. American Journal of Infection Control, 2019, 47(Supplement): A3-A9.

[11] FRIEDMAN N D, TEMKIN E, CARMELI Y. The negative impact of antibiotic resistance[J]. Clinical Microbiology and Infection, 2016, 22(5): 416-422.

[12] Antimicrobial Resistance Collaborators. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis[J]. The Lancet, 2022, 399(10325): 629-655.

[13] 李和平，于达仁，孙文廷，等. 大气压放电等离子体研究进展综述[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3697-3727.
LI Heping, YU Daren, SUN Wenting, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3697-3727.

[14] LAROUSSI M. Plasma medicine: a brief introduction[J]. Plasma, 2018, 1(1): 47-60.

[15] 卢新培，罗婧怡，聂兰兰，等. 等离子体医学研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3555-3579.
LU Xinpei, LUO Jingyi, NIE Lanlan, et al. Progresses in plasma medicine research[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3555-3579.

[16] KEIDAR M, SHASHURIN A, VOLOTSKOVA O, et al. Cold atmospheric plasma in cancer therapy[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(5): 057101.

[17] 刘定新，张基珅，王子丰，等. 等离子体活化介质技术及其生物医学应用[J]. 电工技术学报，2024，39(12)：3855-3868.
LIU Dingxin, ZHANG Jishen, WANG Zifeng, et al. Plasma-activated media technology and its biomedical applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3855-3868.

[18] 刘定新，荣命哲，张基珅，等. 等离子体活化介质技术及其生物医

学应用[M]. 北京：科学出版社，2025.
LIU Dingxin, RONG Mingzhe, ZHANG Jishen, et al. Plasma-activated media technology and its biomedical applications[M]. Beijing, China: Science Press, 2025.

[19] FRIDMAN G, FRIEDMAN G, GUTSOL A, et al. Applied plasma medicine[J]. Plasma Processes and Polymers, 2008, 5(6): 503-533.

[20] WELTMANN K D, VON WOEDTKE T. Plasma medicine-current state of research and medical application[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017, 59(1): 014031.

[21] 焦阳，吉硕，于欣，等. 低温等离子体灭活细菌气溶胶的效能及机制[J]. 中国环境科学，2024，44(7)：3615-3624.
JIAO Yang, JI Shuo, YU Xin, et al. Efficacy and mechanism of inactivation of bacterial aerosols by non-thermal plasma[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 3615-3624.

[22] ASSADI I, GUESMI A, BAALOUDJ O, et al. Review on inactivation of airborne viruses using non-thermal plasma technologies: from MS2 to coronavirus[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(4): 4880-4892.

[23] SCHMIDT M, JÕGI I, HOŁUB M, et al. Non-thermal plasma based decomposition of volatile organic compounds in industrial exhaust gases[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(12): 3745-3754.

[24] CHEN Z T, BAI F, JONAS S J, et al. Cold atmospheric plasma for addressing the COVID-19 pandemic[J]. Plasma Processes and Polymers, 2022, 19(9): 2200012.

[25] 朱海巍，兰存涛，刘大伟. 基于人工智能优化的等离子体空气净化系统[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2998-3009.
ZHU Haiwei, LAN Cuntao, LIU Dawei. AI optimization based plasma air purification system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2998-3009.

[26] 李晔，谢中艺，蔡冉，等. 等离子体空气消毒机对幼儿园室内空气动静态消毒效果研究[J]. 中国消毒学杂志，2024，41(4)：259-260，263.
LI Ye, XIE Zhongyi, CAI Ran, et al. Disinfection effect of plasma air disinfection machine on dynamic and static indoor air in a kindergarten[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2024, 41(4): 259-260, 263.

[27] 窦立广，江福能，李星，等. 一种复合式空气消毒机的消毒效果研究[J]. 中国消毒学杂志，2025，42(3)：175-177，181.
DOU Liguang, JIANG Funeng, LI Xing, et al. Study on the disinfection effect of a composite air disinfection machine[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2025, 42(3): 175-177, 181.

[28] 陈松，翟宇佳，陈怡，等. 低温等离子对模拟舰艇密闭舱室中呼吸道病毒的消杀效果[J]. 海军军医大学学报，2023，44(12)：1481-1484.
CHEN Song, ZHAI Yujia, CHEN Yi, et al. Disinfection effect of low-temperature plasma on respiratory viruses in simulated warship airtight cabins[J]. Academic Journal of Naval Medical University, 2023, 44(12): 1481-1484.

[29] HE Y Y, DING C B, JIN T, et al. Sensitivity of two drug-resistant bacteria to low-temperature air plasma in catheter-associated urinary tract infections under different environments[J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22(6): 065502.

[30] 郭云涛，张东荷雨，张丽阳，等. 新型冠状病毒等病原体空气消毒技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2021，61(12)：1438-1451.
GUO Yuntao, ZHANG Dongheyu, ZHANG Liyang, et al. Air disinfection for SARS-CoV-2 and other pathogens: a review[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2021, 61(12): 1438-1451.

[31] GUO L, ZHAO P Y, JIA Y K, et al. Inactivation of airborne pathogenic microorganisms by plasma-activated nebulized mist[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 459: 132072.

[32] MAZZOLENI S, TURCHETTI G, AMBROSINO N. The COVID-19 outbreak: from “black swan” to global challenges and opportunities[J]. Pulmonology, 2020, 26(3): 117-118.

[33] PANG X H, REN L L, WU S S, et al. Cold-chain food contamination as the possible origin of COVID-19 resurgence in Beijing[J]. National Science Review, 2020, 7(12): 1861-1864.

[34] LEE H J, JUNG H, CHOE W, et al. Inactivation of Listeria monocytogenes on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets[J]. Food Microbiology, 2011, 28(8): 1468-1471.

[35] BAIER M, GÖRGEN M, EHLBECK J, et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma: screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22: 147-157.

[36] GUO Y T, LIU P P, ZHANG L Y, et al. Disinfection of *Escherichia coli* in ice by surface dielectric barrier discharge plasma[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(9): 090601.

[37] 张雪，刘柳，沙斯烁，等. 一种介质阻挡放电远紫外光源在冰层透射消毒中的作用规律[J]. 中国消毒学杂志，2025，42(9)：641-644，648.
ZHANG Xue, LIU Liu, SHA Sishuo, et al. Disinfection pattern of dielectric barrier discharge (DBD) deep ultraviolet light source in ice transmission disinfection[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2025, 42(9): 641-644, 648.

[38] LI P R, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Experimental investigation of bacterial inactivation of beef using indirect cold plasma in cold chain and at room temperature[J]. Foods, 2024, 13(17): 2846.

[39] 艾春梅，谢小本，廖新浴，等. 等离子体活化冰对东方对虾保鲜及品质的影响[J]. 食品与机械，2019，35(3)：130-136.
AI Chunmei, XIE Xiaoben, LIAO Xinyu, et al. Effect of plasma-activated water (PAW) ice on the quality of shrimps (*Penaeus orientalis*) during storage[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 130-136.

[40] 焦浈，朱育攀，许航博，等. 等离子体活化水冰对纯培养及三文鱼片表面单增李斯特菌杀菌效果研究[J]. 郑州大学学报(理学版)，2019，51(3)：97-103.
JIAO Zhen, ZHU Yupan, XU Hangbo, et al. Plasma-activated water ice inactivation of listeria monocytogenes in pure culture and salmon strips[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2019, 51(3): 97-103.

[41] BANSEMER R, SCHMIDT-BLEKER A, VAN RIENEN U, et al. Investigation and control of the O_3 - to NO - transition in a novel sub-atmospheric pressure dielectric barrier discharge[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2017, 26(6): 065005.

[42] ZHANG H, CHEN M, HUANG L L, et al. Using cold atmospheric plasma treated-air for COVID-19 disinfection in cold-chain environment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(40): 40LT01.

[43] ZHANG Z Z, ZHANG J S, LI M K, et al. Hydrogen peroxide enhances the therapeutic efficacy of plasma-activated gas for infected wound treatment[J]. Plasma Processes and Polymers, 2026, 23(1): e70117.

[44] CHEN M, LIU D X, WANG Z F, et al. Sterilization effect and mechanism exploration of a mode-combination method on *Staphylococcus aureus* in thick ice layers in a large sealed freezer[J]. Plasma Processes and Polymers, 2024, 21(5): 2300221.

[45] 陈旻，张靖垚，张基珅，等. 等离子体冷链消杀技术研究进展[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2872-2882.
CHEN Min, ZHANG Jingyao, ZHANG Jishen, et al. Research progress of plasma cold-chain disinfection and sterilization technology[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2872-2882.

[46] 郝悦，许桂敏，石兴民，等. 低温等离子体消毒灭菌技术的应用研究进展[J]. 中国消毒学杂志，2024，41(1)：51-56.
HAO Yue, XU Guimin, SHI Xingmin, et al. Progress in the application of low-temperature plasma disinfection and sterilization technology[J].

Chinese Journal of Disinfection, 2024, 41(1): 51-56.

[47] 石兴民，张冠军，许桂敏，等. 等离子体射流对医疗器械的消毒效果研究[J]. 高电压技术，2009，35(3)：632-635.
SHI Xingmin, ZHANG Guanjun, XU Guimin, et al. Inactivating microorganism on medical instrument using plasma jet[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 632-635.

[48] LU X P, CAO Y G, YANG P, et al. An *RC* plasma device for sterilization of root canal of teeth[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(5): 668-673.

[49] BHATT S, MEHTA P, CHEN C, et al. Efficacy of low-temperature plasma-activated gas disinfection against biofilm on contaminated GI endoscope channels[J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2019, 89(1): 105-114.

[50] SHAO T, YU Y, ZHANG C, et al. Excitation of atmospheric pressure uniform dielectric barrier discharge using repetitive unipolar nanosecond-pulse generator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1830-1837.

[51] 邵涛，窦立广，张帅，等. 等离子体在环境病原微生物消杀中的应用[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2830-2849.
SHAO Tao, DOU Liguang, ZHANG Shuai, et al. Applications of plasma technology for microbial inactivation and environmental disinfection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2830-2849.

[52] BĂLAN G G, ROȘCA I, URSU E L, et al. Plasma-activated water: a new and effective alternative for duodenoscope reprocessing[J]. Infection and Drug Resistance, 2018, 11: 727-733.

[53] 孙妍兰，李伟，吴晶，等. 西宁市某哨点医院住院严重急性呼吸道感染患者疾病经济负担研究[J]. 中国病毒病杂志，2025，15(5)：488-492.
SUN Yanlan, LI Wei, WU Jing, et al. Economic burden of severe acute respiratory infection cases in a sentinel hospital in Xining city[J]. Chinese Journal of Viral Diseases, 2025, 15(5): 488-492.

[54] GUO X Y, LV X, WU Y F, et al. Safety and efficacy of plasma-activated water on prolonged viral shedding of COVID-19 patients: a randomized controlled trial[J]. Plasma Processes and Polymers, 2024, 21(4): 2300195.

[55] ZHAO H, MENG W T, LÜ X, et al. Nebulized inhalation of plasma-activated water in the treatment of progressive moderate COVID-19 patients with antiviral treatment failure: a randomized controlled pilot trial[J]. BMC Infectious Diseases, 2024, 24(1): 960.

[56] GUO L, YAO Z Q, YANG L, et al. Plasma-activated water: an alternative disinfectant for S protein inactivation to prevent SARS-CoV-2 infection[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421(2): 127742.

[57] 郑见宝，仵倩红，马涛，等. 胃肠道结核的诊治进展[J]. 结核与肺部疾病杂志，2023，4(1)：72-77.
ZHENG Jianbao, WU Qianhong, MA Tao, et al. Progress in diagnosis and treatment of gastrointestinal tuberculosis[J]. Journal of Tuberculosis and Lung Disease, 2023, 4(1): 72-77.

[58] BÄR W, MÁRQUEZ DE BÄR G, NAUMANN A, et al. Contamination of bronchoscopes with Mycobacterium tuberculosis and successful sterilization by low-temperature hydrogen peroxide plasma sterilization[J]. American Journal of Infection Control, 2001, 29(5): 306-311.

[59] DAESCHLEIN G, NAPP M, MAJUMDAR A, et al. In vitro killing of mycobacteria by low temperature atmospheric pressure plasma and dielectric barrier discharge plasma for treatment of tuberculosis[J]. Clinical Plasma Medicine, 2017, 5/6: 1-7.

[60] LEE C, SUBHADRA B, CHOI H G, et al. Inactivation of mycobacteria by radicals from non-thermal plasma jet[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2019, 29(9): 1401-1411.

[61] ZHENG J B, DONG Z P, JIN X Z, et al. In vitro antibacterial effect study of plasma-activated saline on *Mycobacterium tuberculosis*[J]. Infection and Drug Resistance, 2024, 17: 2315-2328.

[62] HAY R J, JOHNS N E, WILLIAMS H C, et al. The global burden of skin disease in 2010: an analysis of the prevalence and impact of skin conditions[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2014, 134(6): 1527-1534.

[63] KHALAF A T, ABDALLA A N, REN K X, et al. Cold atmospheric plasma (CAP): a revolutionary approach in dermatology and skincare[J]. European Journal of Medical Research, 2024, 29(1): 487.

[64] LIPNER S R, FRIEDMAN G, SCHER R K. Pilot study to evaluate a plasma device for the treatment of onychomycosis[J]. Clinical and Experimental Dermatology, 2017, 42(3): 295-298.

[65] SCHOLTZ V, SOUŠKOVÁ H, HUBKA V, et al. Inactivation of human pathogenic dermatophytes by non-thermal plasma[J]. Journal of Microbiological Methods, 2015, 119: 53-58.

[66] SHAPOURZADEH A, RAHIMI-VERKI N, ATYABI S M, et al. Inhibitory effects of cold atmospheric plasma on the growth, ergosterol biosynthesis, and keratinase activity in *Trichophyton rubrum*[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2016, 608: 27-33.

[67] XIONG Z L, ROE J, GRAMMER T C, et al. Plasma treatment of onychomycosis[J]. Plasma Processes and Polymers, 2016, 13(6): 588-597.

[68] LUX J, DOBIÁŠ R, KUKLOVÁ I, et al. Inactivation of dermatophytes causing onychomycosis and its therapy using non-thermal plasma[J]. Journal of Fungi, 2020, 6(4): 214.

[69] FRIEDMAN P C, MILLER V, FRIDMAN G, et al. Use of cold atmospheric pressure plasma to treat warts: a potential therapeutic option[J]. Clinical and Experimental Dermatology, 2019, 44(4): 459-461.

[70] FRIEDMAN P C, FRIDMAN G, FRIDMAN A. Using cold plasma to treat warts in children: a case series[J]. Pediatric Dermatology, 2020, 37(4): 706-709.

[71] BULSON J M, LIVERIS D, DERKATCH I, et al. Non-thermal atmospheric plasma treatment of onychomycosis in an in vitro human nail model[J]. Mycoses, 2020, 63(2): 225-232.



张紫竹
2000—，女，博士生
主要从事等离子体活化气创伤治疗的研究
E-mail: Zizhu_Lucky@stu.xjtu.edu.cn

ZHANG Zizhu
Ph.D. candidate



刘定新(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事放电等离子体理论与技术、等离子体生物医学技术、电器设备故障诊断技术的研究
E-mail: liudingxin@mail.xjtu.edu.cn

LIU Dingxin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2026-01-26　修回日期　2026-05-19　　编辑　曾文君