

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.12.046

光辅助抗菌应用于种植体周围炎治疗的研究进展

汪佳雯¹, 徐旭²

(1. 浙江中医药大学口腔医学院, 浙江 杭州 310000;

2. 衢州市人民医院口腔科, 浙江 衢州 324000)

[摘要] 种植牙修复已成为近年来修复牙列缺损或缺失最为普遍的方式, 然而, 种植体周围炎作为种植修复的常见并发症, 具有较高的发生率和治疗难度, 严重影响种植治疗的成功率。本研究通过系统回顾相关文献, 针对光辅助抗菌在种植体周围炎治疗方面的应用进行了深入探讨, 评估各种新兴光辅助抗菌技术的抗菌效率、安全性及其在种植体周围炎治疗中的潜在应用, 旨在探索新型、高效的抗菌策略, 为种植体周围炎的治疗提供新的思路, 从而提高种植治疗的成功率和患者的生活质量。

[关键词] 种植体周围炎; 光热抗菌; 光动力抗菌; 抗菌蓝光

[中图分类号] R783

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2025) 12-0183-04

Research Progress on Photo-assisted Antibacterial Therapy in the Treatment of Peri-implantitis

WANG Jiawen¹, XU Xu²

(1.School of Stomatology, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

2.Department of Stomatology, People's Hospital of Quzhou, Quzhou 324000, Zhejiang, China)

[Abstract] Dental implant restoration has become the most common method to repair dentition defect or missing teeth in recent years. However, as a common complication of implant restoration, peri-implantitis has a high incidence and treatment difficulty, which seriously affects the success rate of implant treatment. Through systematically reviewing relevant literature, this study conducts an in-depth discussion on the application of photo-assisted antibacterial therapy in the treatment of peri-implantitis, evaluating the antibacterial efficiency, safety and potential application of various emerging photo-assisted antibacterial technologies in the treatment of peri-implantitis. It aims to explore new and efficient antibacterial strategies, provide new ideas for the treatment of peri-implantitis, thereby improving the success rate of implant treatment and patients' quality of life.

[Key words] Peri-implantitis; Photothermal antibacterial; Antimicrobial photodynamic therapy; Antibacterial blue light

种植体周围炎 (peri-implantitis) 是指发生于种植体周围软硬组织的炎症性损害, 作为种植修复的常见并发症之一, 同时也是导致种植失败的关键因素, 具有较高患病率和较大治疗难度。种植体周围炎的致病因素众多, 其中, 种植体表面菌斑的积聚, 能触发宿主的炎症反应, 同时妨碍骨细胞在种植体表面的再附着过程, 是种植体周围炎发生的始动因素。因此, 有效控制菌斑生物

膜的形成, 在种植体周围炎的预防与治疗中至关重要^[1]。种植体周围炎的治疗方法总体上可分为非手术疗法与手术疗法两大类。在种植体周围炎的早期阶段, 非手术疗法特别是机械清创术, 作为基础治疗手段得到优先考虑^[2], 同时, 一些辅助性的抗菌治疗手段, 如药物抗菌与光辅助抗菌技术, 也已在临床实践中得到应用^[3]。然而, 对于种植体周围骨组织吸收超过2 mm的中晚期病例,

基金项目: 浙江省医药卫生局科技计划项目 (编号: 2018KY878)

第一作者: 汪佳雯 (2000. 5-), 女, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事口腔种植学方向研究

通讯作者: 徐旭 (1983. 9-), 男, 江西南昌人, 硕士, 主任医师, 主要从事口腔种植学方向研究

手术疗法成为必要选择,并且结合非手术疗法能够取得更佳的治疗效果^[4]。近年来,光辅助抗菌因其高效的广谱抗菌性、良好的生物相容性及无耐药性在抗菌领域备受关注^[5]。本文将聚焦于光辅助抗菌技术在种植体周围炎治疗领域的相关研究,通过系统回顾相关文献,评估各种新兴光辅助抗菌技术的抗菌效率、安全性及其在种植体周围炎治疗中的潜在应用,为种植体周围炎的治疗探索新的思路。

1 光动力抗菌

光动力抗菌疗法(antimicrobial photodynamic therapy, aPDT)是利用特定波长的光激发光敏剂,并通过其光化学反应催化生成一系列等活性氧(reactive oxygen species, ROS)基团^[6],这些产物能够破坏细菌蛋白质结构及生物膜功能、造成细菌DNA损伤、促进脂质过氧化,从而诱导细菌死亡^[7]。

目前,已有部分学者的研究证实了aPDT在种植体周围炎治疗方面的应用潜力。周琳怡等^[8]通过采集患者aPDT治疗前后的龈沟液,并对比其中4种炎症因子治疗前后的含量变化,结果表明aPDT治疗能够抑制龈沟液中炎症因子的表达,初步证实辅助aPDT能够调节宿主免疫反应能力,从而发挥抗感染作用。在此基础上,Alqutub MN^[9]进行了为期6个月的随机对照临床试验,将95例患者分为单纯机械清创、辅助激光治疗及辅助aPDT治疗3组,通过对术后菌斑指数、探诊深度、出血指数及牙槽骨丧失等临床指标的比较,发现辅助aPDT较单纯机械清创能更明显地改善术后短期内种植体周围炎临床指标,进一步证实了辅助aPDT应用于种植体周围炎治疗的可行性。然而,并非所有研究都得出了一致的结论。Pourabbas R等^[10]进行了为期3个月的随机对照临床试验,结果表明以805 nm激光及吡咯菁绿进行aPDT辅助治疗的实验组与单纯机械清创的对照组在种植体周围炎临床及生物学参数上未产生组间差异,提示辅助aPDT治疗较单纯机械清创并未带来额外的治疗效果。

aPDT作为一种新兴的辅助治疗手段,以其创伤性小、耐药性低及可操作性强等优势,在种植体周围炎的治疗中展现出巨大潜力。然而,关于其具体操作方法、光敏剂及光源的选择尚未形成统一标准。尽管已证实aPDT可在短期内改善种植

体周疾病的各项临床指标,但仍需更多研究以深入探索并验证其在种植体周围疾病治疗中的长期效果及应用价值。

2 光热抗菌

光热抗菌(photothermal antibacterial, PTA)是通过近红外光(near-infrared radiation, NIR)照射特定光热剂,光热剂吸收特定波段的光并转化为热能,从而引发局部温度的迅速升高,造成细菌细胞内蛋白渗漏或蛋白质结构破坏,最终达到抗菌目的^[11]。该技术不仅能够穿透皮肤和黏膜的屏障,实现对种植体表面的全方位照射,还有助于减少耐药菌的产生,具有操作简便、高度可控及无创等优点^[12],近年来在科研领域受到了广泛的关注。

目前,临床上治疗种植体周围炎主要采用抗生素辅助机械清创的治疗方法,该方法不仅面临细菌耐药性的问题,且无法促进受损软硬组织的恢复,而光热抗菌辅助机械清创在该方面具有显著优势。Xu B等^[13]通过体外实验发现,二氧化钛纳米管阵列(TiNTs)在近红外光激发下,能够引发巨噬细胞、内皮祖细胞及成骨细胞良好的表型改变,从而实现抗炎、抑制异常血管形成、促进成骨分化,初步证实该阵列在近红外光激发下不仅能有效清除感染,还展现出促进组织愈合的潜力。Sánchez-Martos R等^[14]开展了一项随机对照临床试验,系统评估了810 nm半导体激光联合机械清创与传统机械清创的治疗效果,研究通过分析两组患者的菌斑指数、探诊出血情况、探诊深度及种植体周围黏膜退缩程度等临床指标,证实激光辅助治疗能显著缓解种植体周围组织的炎症反应,从而验证了该技术在种植体周围炎治疗中的辅助应用价值。此外,将光热剂直接注射到种植体周感染部位,以实现更精准的抗菌治疗是光热辅助治疗种植体周围感染的另一策略。Shen L等^[15]研发了一种新型CS-GA/TAMP复合水凝胶材料,该材料通过负载单宁酸微型颗粒(tannic acid miniaturized particles, TAMP)实现了多功能特性整合,研究表明该复合水凝胶不仅具备显著的抗菌和抗氧化性能,还因TAMP的加入而获得了光热转化能力。实验过程中,研究人员将该材料注入种植体周围袋后施以近红外光照射,体外抗菌测试证实其对口腔常见致病菌(包括牙龈卟啉单胞菌和具核梭杆菌)均

表现出良好的抑制效果。

然而，光热辅助抗菌的实际应用仍面临诸多挑战，光热抗菌需要长时间或大功率照射才能使材料表面温度迅速升高，在实现有效抗菌的同时也可能对周围正常的组织产生损伤^[16]。即使将光热剂制备为凝胶型使其能够精确注射至感染部位，但光热剂的有效量化检测手段的缺乏，使其在临床应用中很难精确控制照射剂量或时间从而完全避免对组织的热损伤^[17]。尽管已有研究证实正常组织对高温的耐受程度大于细菌，且前期实验也证实了在不损伤正常组织的前提下，提升材料的抗菌能力的可行性，但光热抗菌通过提高局部温度形成的抗菌效果，往往与其他抗菌机制（如氧化损伤、细胞膜稳定性破坏、生物分子结合等）相协同。因此，更多研究将光热剂与其他抗菌方法联合使用，通过共同构建复合型抗菌体系，为光辅助抗菌领域的发展提供了新的方向。

3 光热与光动力协同抗菌

由于光热辅助抗菌及光动力辅助抗菌各有其优势及不足，目前，光辅助抗菌的研究更多聚焦于光热与光动力协同抗菌，即在确保人体可耐受的温度范围内提升种植体温度，并与适量活性氧物质（ROS）协同作用以杀灭细菌^[18]。Yuan Z等^[19]在钛植入体表面成功制备了吡啶菁绿（ICG）、介孔聚多巴胺纳米颗粒（MPDA）及功能性精氨酸-甘氨酸-天冬氨酸（RGD）多肽的复合涂层，该Ti-MI/RGD植入物在近红外光的照射下，MPDA产生的高温与ICG光动力效应生成的ROS协同作用，能够有效清除表面的金黄色葡萄球菌的生物膜，且在成骨和骨整合方面仍然表现出很好的性能，初步证实了光热与光动力协同抗菌的在种植体周围炎治疗方面的应用潜力。该课题组还通过的钛植入体表面制备由功能性二硫化钼（MoS₂）/聚多巴胺（PDA）-RGD形成的MoS₂/PDA-RGD复合涂层^[20]，使得植入体能够在近红外光照射下能够实现局部高温并产生ROS，抗菌实验表明其能有效清除被金黄色葡萄球菌污染的植入材料表面，且通过成骨活性实验结果证实该涂层修饰的钛植入体在体内不仅不会对正常组织产生损害，还能够加速新骨的生成，进一步验证了其应用于种植体周围炎治疗的可行性。

综上所述，光热与光动力的协同抗菌机制展现出了显著的优势。光热效应产生的高温能够加速ROS进入细菌，对其造成致命伤害，从而在更短的时间内实现高效灭菌，光动力效应的协同亦可有效规避单纯光热抗菌造成的局部温度过高造成的周围组织损伤，二者的协同应用为光辅助抗菌领域的发展引领了新的方向。然而，当前该领域的研究成果缺乏有效临床研究证实其辅助治疗种植体周围炎的临床疗效，仍需进一步研究与探索。

4 抗菌蓝光

抗菌蓝光（antimicrobial blue light, aBL）疗法主要利用400~470 nm波长的可见光，其在无需外源性光敏剂的条件下对于多种病原菌具有潜在的抗菌能力，是近年来的一种新兴的抗菌疗法，具有热损伤小、不需要外源性光敏剂、生物安全性更好等优点^[21]。Zhang L等^[22]设计了一种内置无线供电蓝光氧化锆植入物，通过体外抗菌实验证实其对牙龈卟啉单胞菌具有良好的抗菌性能，同时未观察到蓝光照射对氧化锆材料及周围组织造成明显的机械损伤，初步验证了蓝光对正常细胞的生物安全性，表明无线供电蓝光种植体辅助治疗种植体周围感染具有初步可行性，为种植体周围感染的无创治疗提供了一种新的途径。但是，无线供电蓝光的光源体积，照射频率及强度均有待进一步优化，该植入物在大型动物（如小猎犬、山羊或迷你猪）颌骨上的性能需要进一步探索。

5 总结与展望

光辅助抗菌技术作为一种新兴的方法，在种植体周围炎预防和治疗中展现出广阔的应用前景。光辅助抗菌技术可以显著提高种植体的抗菌性能和生物相容性，从而预防种植体周围炎的发生，亦可通过多种机制发挥外源性或内源性光敏剂的抗菌作用，为种植体周围炎的治疗提供了新的选择。

然而，光辅助抗菌技术在应用中仍面临一些挑战，需要进一步研究和优化。未来研究可以关注以下几个方面：一是开发新型光敏剂和光源，以提高光辅助抗菌技术的效率和稳定性；二是深入研究光辅助抗菌技术与其他表面改性方法的结合应用机制，以进一步提高种植体周围炎的预防效果；三是开展大规模、多中心的临床试验，以

验证光辅助抗菌技术在种植体周围炎预防与治疗中的有效性和安全性。随着技术的不断进步和研究的深入,光辅助抗菌技术在种植体周围炎预防及治疗中的应用前景将更加广阔。

【参考文献】

- [1]文言,王宇蓝.菌斑生物膜与种植体周围炎相关研究进展[J].口腔疾病防治,2024,32(9):730-736.
- [2]戴世爱,孟焕新,冯向辉,等.欧洲牙周病学会种植体周病防治S3级临床指南解读[J].中华口腔医学杂志,2023,58(12):1235-1242.
- [3]王昊喆,李磊.种植体周围炎治疗中软组织封闭的再建立[J].口腔医学研究,2024,40(11):945-949.
- [4]Wilensky A,Shapira L,Limones A,et al.The efficacy of implant surface decontamination using chemicals during surgical treatment of peri-implantitis: A systematic review and meta-analysis[J].J Clin Periodontol,2023,50 Suppl 26:336-358.
- [5]柴茂洲.钛种植体表面光响应抗菌涂层的构建及生物学性能[D].太原:太原理工大学,2023.
- [6]曲昌兴,刘钧.基于纳米材料的抗菌光动力治疗在口腔感染性疾病中的应用进展[J].腔疾病防治,2024,32(11):879-885.
- [7]Wang XQ,Wang W,Peng M,et al.Free radicals for cancer theranostics[J].Biomaterials,2021,266:120474.
- [8]周琳怡,张楚南,顾迎新,等.光动力疗法对种植体周炎症因子含量的影响[J].上海口腔医学,2019,28(1):63-66.
- [9]Alqutub MN.Peri-implant parameters and cytokine profile among Peri-implant disease patients treated with Er Cr YSGG laser and PDT[J].Photodiagnosis Photodyn Ther,2022,37:102641.
- [10]Pourabbas R,Khorramdel A,Sadighi M,et al.Effect of photodynamic therapy as an adjunctive to mechanical debridement on the nonsurgical treatment of peri-implant mucositis:A randomized controlled clinical trial[J].Dent Res J (Isfahan),2023,20:1.
- [11]Li D,Tan X,Zheng L,et al.A Dual-Antioxidative Coating on Transmucosal Component of Implant to Repair Connective Tissue Barrier for Treatment of Peri-Implantitis[J].Adv Healthc Mater,2023,12(30):e2301733.
- [12]Chen Y,Gao Y,Chen Y,et al.Nanomaterials-based photothermal therapy and its potentials in antibacterial treatment[J].J Control Release,2020,328:251-262.
- [13]Xu B,Li Z,Ye Q,et al.Mild photothermal effect of titania nanotubes array as a promising solution for peri-implantitis[J].Materials Design,2022,217:110641.
- [14]Sánchez-Martos R,Samman A,Bouazza-Juanes K,et al.Clinical effect of diode laser on peri-implant tissues during non-surgical peri-implant mucositis therapy: Randomized controlled clinical study[J].J Clin Exp Dent,2020,12(1):e13-e21.
- [15]Shen L,Hu J,Yuan Y,et al.Photothermal-promoted multi-functional gallic acid grafted chitosan hydrogel containing tannic acid miniaturized particles for peri-implantitis[J].Int J Biol Macromol,2023,253(Pt 6):127366.
- [16]Bao LH,Liu ZH.Near-infrared absorption photothermal conversion polyurethane film for energy storage[J].Journal of Polymer Research,2021,28:1-10.
- [17]Xiao L,Feng M,Chen C,et al.Microenvironment-regulating drug delivery nanoparticles for treating and preventing typical biofilm-induced oral diseases[J].Adv Mater,2023:e2304982.
- [18]Shen J,Liu J,Fan X,et al.Unveiling the antibacterial strategies and mechanisms of MoS₂:a comprehensive analysis and future directions[J].Biomater Sci,2024,12(3):596-620.
- [19]Yuan Z,Tao B,He Y,et al.Remote eradication of biofilm on titanium implant via near-infrared light triggered photothermal/photodynamic therapy strategy[J].Biomaterials,2019,223:119479.
- [20]Yuan Z,Tao B,He Y,et al.Biocompatible MoS₂/PDA-RGD coating on titanium implant with antibacterial property via intrinsic ROS-independent oxidative stress and NIR irradiation[J].Biomaterials,2019,217:119290.
- [21]Lu M,Wang S,Wang T,et al.Bacteria-specific phototoxic reactions triggered by blue light and phytochemical carvacrol[J].Sci Transl Med,2021,13(575):eaba3571.
- [22]Zhang L,Li Y,Yuan L,et al.Advanced and Readily-Available Wireless-Powered Blue-Light-Implant for Non-Invasive Peri-Implant Disinfection[J].Adv Sci (Weinh),2023,10(14):e2203472.

收稿日期: 2025-4-18 编辑: 张孟丽