DOI:10.12138/j.issn.1671－9638.20262805

·综述·

人工关节置换术后假体周围感染多模态诊断策略的整合优化研究进展

翟建慧[1,2],张育民[1],王　涛[1],刘　瑞[1]
(1. 西安交通大学附属红会医院关节病医院髋关节病区,陕西 西安　710068; 2. 西安医学院,陕西 西安　710068)

[摘　要] 假体周围感染(PJI)是关节置换术后一种严重并发症,因临床表现缺乏特异性及生物膜形成,早期诊断仍面临挑战。本文系统综述 PJI 多模态诊断策略的整合与优化进展。病原体检测方面,优化取样方式、规范抗菌药物使用、改进标本处理技术(如超声震荡、二硫苏糖醇化学法)及优化培养条件,是提高病原体检出率的关键。生物标志物方面,常规炎症指标 C 反应蛋白(CRP)与红细胞沉降率(ESR)特异性有限;关节液白细胞介素-6 诊断价值较高,常需联合 D-二聚体检测;而 α-防御素及 D-二聚体在翻修术中的诊断准确性尚待进一步验证;降钙素原(PCT)与 D-乳酸的临床价值仍需更多研究支持。影像学方面,超声、X 线及 CT 成本较低但诊断效能有限;MRI 软组织分辨率高,但易受金属伪影影响;PET/CT 诊断性能优良,但费用高昂。分子生物学技术中,聚合酶链式反应(PCR)检测速度快,但灵敏度不足;宏基因组二代测序(mNGS)在复杂感染中具有明显优势,成本高仍是推广主要障碍。未来研究应聚焦于病原体检测流程标准化、新型生物标志物发现与多指标组合模型建立、影像技术改进、分子诊断成本控制,以及多学科整合诊断体系构建,从而推动 PJI 的早期精准诊断。

[关　键　词] 假体周围感染; 多模态诊断; 病原体检测; 生物标志物; 影像学; 宏基因组测序
[中图分类号] R687.4

Research advances in the integration and optimization of multimodal diagnostic strategies for periprosthetic joint infection following joint arthroplasty

ZHAI Jianhui[1,2], *ZHANG Yumin*[1], *WANG Tao*[1], *LIU Rui*[1] (1. *Department of Hip Joint Surgery, Joint Disease Hospital, Xi'an Honghui Hospital Affiliated to Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710068, *China*; 2. *Xi'an Medical University, Xi'an* 710068, *China*)

[**Abstract**] Periprosthetic joint infection (PJI) is a serious complication following joint arthroplasty, posing challenges to early diagnosis due to atypical clinical manifestations and biofilm formation. This paper systematically reviews advances in the integration and optimization of multimodal diagnostic strategies for PJI. In terms of pathogen detection, the key factors for improving pathogen detection rate include optimizing sampling methods, standardizing antimicrobial use, as well as enhancing specimen processing techniques (such as sonication and dithiothreitol treatment) and optimizing cultivation conditions. In terms of biomarkers, the specificity of conventional inflammatory markers such as C-reactive protein (CRP) and erythrocyte sedimentation rate (ESR) is limited, while interleukin-6 (IL-6) in synovial fluid demonstrates higher diagnostic value and often requires combined detection with D-dimer. The diagnostic accuracy of α-defensin and D-dimer in arthroplasty still needs further verification; The clinical value of procalcitonin (PCT) and D-lactate needs further research support. In terms of imaging, ultrasonography (US), X-ray and computed tomography (CT) have lower costs but their diagnostic efficacy is limited; MRI has high soft-tissue resolution, but is susceptible to metal artifacts; Positron emission tomography/CT(PET/CT) has excellent

[收稿日期] 2025－07－28
[基金项目] 陕西省创新人才推进计划(2023-CX-TD-73)
[作者简介] 翟建慧(1999－),男(汉族),甘肃省武威市人,硕士研究生在读,主要从事髋、膝关节假体周围感染相关研究。
[通信作者] 刘瑞　E-mail:1132031756@qq.com

diagnostic performance, but the cost is high. In terms of molecular biology techniques, polymerase chain reaction (PCR) enables rapid detection, but its sensitivity is insufficient; metagenomic next-generation sequencing (mNGS) shows significant advantages in complex infections, but high cost remains a barrier to widespread promotion. Future research should focus on standardizing processes for pathogen detection, exploring novel biomarkers, establishing multi-indicator combination models, improving imaging techniques, controlling costs of molecular diagnosis, and establishing a multidisciplinary integrated diagnostic system, so as to achieve early and accurate diagnosis of PJI.

[**Key words**] periprosthetic joint infection; multimodal diagnosis; pathogen detection; biomarkers; imaging; metagenomic sequencing

随着医学技术的不断发展,髋、膝关节置换术已成为最常见的骨科手术之一。该手术通过缓解疼痛和改善关节功能以提升患者生活质量[1]。然而,手术量增加也导致术后并发症发生率急剧上升。假体周围感染(periprosthetic joint infection, PJI)是人工关节置换术后一种严重并发症,不仅加重患者及其家庭经济负担,同时也对医疗系统造成沉重的资源压力。近期文献[2-3]报道,初次髋、膝关节置换术后 PJI 发生率为 0.7%～2.0%。PJI 诊断方法多样,患者临床表现及相关症状与体征是早期评估的重要内容。其临床表现因感染时间而异:急性感染多发生于术后数周至数月内,常表现为手术部位疼痛、红肿、皮温升高、肿胀及切口渗液等局部症状[4];慢性感染则因可能完全缺乏典型的感染征象,临床上常难以与无菌性松动相鉴别[5]。此时需依赖实验室炎症指标、关节液分析、影像学检查乃至术中组织病理学等方法进行鉴别。严重者可出现感染向关节外扩散,表现为寒战、高热等全身症状,甚至引发菌血症[6]。此外,病原体检测、生物标志物分析及分子生物学技术等亦可用于 PJI 诊断。然而,由于缺乏标准化临床与循证指南,PJI 诊断仍面临巨大挑战,通常需联合应用多种检测方法。本文系统总结 PJI 各类诊断方法,旨在为探索更精准的诊断策略、进一步提高 PJI 诊断准确性提供参考。

1 病原体检测

病原体培养是确诊 PJI 的重要依据,但其准确性易受多种因素影响,包括标本取样方式、标本类型与量、抗菌药物使用史、培养时间及培养基选择等,易出现假阴性结果[7-8]。因此,优化培养流程是提高病原体检出率的关键。

1.1 取样方式 培养技术的诊断效能高度依赖于规范取样操作。外周血培养虽为重要的辅助诊断工具,但确诊 PJI 通常需获取关节滑液或假体周围组织标本。取样应严格遵循无菌原则:避免针头穿过窦道或瘘管,使用单独无菌器械获取多份假体周围组织标本,以最大限度降低皮肤菌群污染及交叉污染风险[9]。关节滑液穿刺推荐超声引导。国外研究[10-11]显示,与透视引导相比,超声引导下穿刺获取行全髋关节置换术(THA)患者关节滑液的成功率更高,且获取的滑液量更大。然而,临床实践中常面临关节腔抽吸失败(无法抽出滑液)或穿刺针误伤血管导致血性标本问题,从而影响培养阳性率[12]。对于无法抽出滑液的患者,临床常用生理盐水灌洗后取样分析,但研究表明灌洗会显著降低关节滑液白细胞计数(WBC),可能干扰 PJI 诊断并延误治疗[13]。因此,探索并确立 PJI 诊断最佳取样方式仍是重要研究方向。

1.2 抗菌药物与标本量 研究[14-15]指出,取样前预防性使用抗菌药物会显著影响微生物培养结果及常用生物标志物准确性,进而干扰临床诊断。因此,建议取样前至少停用抗菌药物两周。标本量同样影响培养效能:标本过少可导致假阴性,而过多则浪费资源。研究[16-17]表明,术中组织培养是最常用诊断方法。美国感染病学会(IDSA)推荐至少采集 3 份(理想为 5～6 份)假体周围术中组织标本,分别进行需氧及厌氧培养,以获得理想结果。

1.3 标本类型与处理 可获取的标本(包括关节滑液、假体周围软组织及术中取出的假体部件的超声处理液)直接影响培养结果。Mozella 等[18]发现,假体周围软组织的培养阳性率高于假体部件表面生物膜的组织病理学检查。Gazendam 等[19]指出,慢性 PJI 中的微生物常存在于假体部件表面的生物膜内,这使得传统组织培养在分离病原体时面临挑战。为此,对取出的假体部件进行超声震荡处理后培养震荡液,已被证实能有效破坏生物膜并保持微生物活性,显著提升检测灵敏度。此外,化学溶解法[如

使用含盐溶液或强还原剂二硫苏糖醇(DTT)]可通过使生物膜失稳提高培养敏感性。DTT 通过还原生物膜蛋白的二硫键,在不损伤细菌情况下破坏其结构稳定性,具有较高的灵敏度和特异度[20]。然而,与超声震荡处理相比,DTT 检测病原体的敏感性较低。超声震荡处理可比 DTT 多检出约 30%的病原体[21]。此外,DTT 方法在试剂标准化、操作流程统一及成本控制方面仍面临挑战,目前主要限于科研应用,尚未在临床普及[22]。最新研究表明,特定消毒剂组合(如聚维酮碘联合过氧化氢序列)对破坏 PJI 生物膜结构效果显著,可能成为 PJI 术中化学清创的最佳选择[23]。

1.4　培养时间与培养基　培养时间对 PJI 诊断结果至关重要。国外研究[24-26]表明,为避免因某些病原体(如非结核分枝杆菌)潜伏期长而导致的假阴性,应适当延长培养时间。目前公认标准培养周期为 10～14 d,特殊病原体可延长至 21 d。培养基选择亦显著影响培养质量。有研究[27-28]对比三种培养方法(固体培养基、增菌肉汤及儿科培养瓶)发现,儿科培养瓶法检测时间短于固体培养基法,单独使用时灵敏度更高;此外,固体培养基法与儿科培养瓶法联合应用效果优于其与增菌肉汤法联用。

2　生物标志物检测

生物标志物检测[如 C 反应蛋白(CRP)、红细胞沉降率(ESR)、α-防御素、D-二聚体、白细胞介素-6(IL-6)、降钙素原(PCT)及 D-乳酸等]在 PJI 临床诊断中应用广泛[29-30]。该类方法的优势在于检测速度快且成本相对较低,但单独使用时灵敏度与特异度普遍不足。因此,联合应用多种生物标志物有望进一步提升诊断效能。

2.1　ESR 和 CRP　ESR 和 CRP 是最常用的非特异性血清炎症标志物。ESR 反映炎症状态下异常蛋白刺激红细胞聚集的程度。CRP 由肝脏产生,在炎症发生后 24～48 h 达峰值,约两周后恢复正常。然而,在类风湿性关节炎、系统性红斑狼疮、创伤及其他全身性疾病等非感染状态下,ESR 和 CRP 亦可升高。因此,临床医生不应仅凭 ESR 和 CRP 排除 PJI,若怀疑感染,需进行进一步检查以明确诊断[31-32]。

2.2　α-防御素与 D-乳酸　α-防御素作为滑膜生物标志物,是 PJI 诊断评分系统中的次要标准,但在二期翻修术前评估感染是否根除的价值尚不明确。Owens 等[33]认为,二期翻修前常规检测 α-防御素可能并非必要。D-乳酸在诊断细菌感染(尤其是脓毒性关节炎)方面具有显著特异性,关节滑液中 D-乳酸浓度的显著升高使其有望成为感染标志物。然而,关节滑液 D-乳酸浓度与细菌毒力的关系仍需深入研究[34]。

2.3　IL-6 与 D-二聚体　IL-6 在 PJI 检测中具有较高诊断价值。Li 等[35]研究发现,关节滑液 IL-6 对 THA 及全膝关节置换术(TKA)后 PJI 的诊断准确性显著优于血清 IL-6。王微等[36]指出,术后早期血清 IL-6 波动较大,在特定临界值(cutoff)下单独应用灵敏度较低,需与 D-二聚体等指标联合应用以提高诊断效率。D-二聚体是纤维蛋白降解产物,主要反映机体纤溶功能。其水平与炎症相关,在感染患者中可升高,已被推荐作为心内膜炎、肺炎等感染性疾病的辅助诊断指标。近年来,D-二聚体逐渐用于 PJI 诊断,但需注意其在血栓形成、恶性肿瘤、自身免疫性疾病、妊娠及心脑血管疾病等非感染状态下亦可升高。因此,研究[37-38]表明,D-二聚体在 PJI 诊断中的价值仍需进一步验证。此外,Pannu 等[39]指出,在翻修 THA 和 TKA 的背景下,D-二聚体用于区分 PJI 与无菌性松动病例的准确性较差。

2.4　PCT　PCT 是一种由神经内分泌细胞和甲状腺滤泡旁细胞产生的蛋白质。健康人血清 PCT 水平较低,严重细菌或真菌感染时显著升高,但多器官衰竭、大面积烧伤等无菌性炎症状态也可导致其升高。PCT 检测对识别全身性感染具有较高诊断准确性[40]。然而,PCT 在 PJI 诊断中的价值仍存在争议。Busch 等[41]指出,虽然有研究报道关节滑液 PCT 是一种具有高特异度和高灵敏度的可靠 PJI 诊断方法,但其团队研究结果显示 PCT 灵敏度较低,认为其并非鉴别假体无菌性松动与 PJI 的可靠生物标志物。因此,PCT 在 PJI 诊断中的确切价值仍需进一步研究确认。

3　影像学技术

影像学检查在骨科感染的诊断及并发症评估中具有重要价值,尤其对临床表现不典型的植入物相关感染,可提供关键支持证据,并指导侵入性诊断采样。相关技术包括超声(US)、X 线平片、计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MRI)及核医学技术[如骨闪烁显像、抗粒细胞抗体显像、白细胞闪烁显像及^{18}F-氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(^{18}F-FDG PET/CT)等功能成像方法]。

这些技术在疑难 PJI 诊断中各具独特价值，其中，^{18}F-FDG PET/CT 兼具功能成像与解剖定位优势，灵敏度和特异度较高，但受限于成本与辐射暴露问题，难以常规应用。此外，尽管该技术在 THA 术后相关疾病动态监测中展现出潜力，但图像解读常受血管、肌肉等非特异性摄取干扰，导致诊断特异性下降。因此，亟需开发特异性更强的放射性核素，以充分发挥^{18}F-FDG PET/CT 在 PJI 评估中的临床价值[42-44]。相比之下，US、X 线平片、CT 及 MRI 因成本相对较低，更易被患者接受。

3.1 US US 在评估关节积液、滑膜增生及引导穿刺时，具有实时成像、无辐射等优势。但因 US 波束无法穿透金属关节假体，其评估范围仅局限于假体关节周围软组织。此外，US 诊断 PJI 的灵敏度和特异度有限，在临床中多作为辅助手段使用[45]。

3.2 X 线平片 常规 X 线平片常用于人工关节植入术后评估及随访，可显示假体周围骨折、脱位、假体磨损相关的骨溶解或假体下沉等异常表现。PJI 的典型影像学征象包括：骨膜反应、骨水泥－骨或假体－骨界面透亮带、斑片状骨溶解、假体松动、假体周围骨吸收，以及经皮质窦道形成。然而，由于 X 线平片灵敏度和特异度较低，单凭该技术难以可靠鉴别 PJI 与无菌性松动[46]。

3.3 CT CT 在 PJI 诊断中具有重要价值，其主要优势在于能够有效检测假体周围骨溶解，并提供优异的软组织对比度，从而显著提升对关节周围软组织异常的识别能力。在 TKA 术后评估中，CT 较常规 X 线平片能更敏感显示关节炎症性改变、骨结构异常及骨缺损等。此外，CT 还可在术前准确预测假体尺寸，为术中软组织保护提供参考。在髋关节 PJI 的诊断中，CT 表现突出，对软组织脓肿、关节腔积液及瘘管的检测具有较高的灵敏度和特异度。然而，该技术存在一定局限性：金属植入物产生的伪影可能降低图像质量，且辐射暴露问题需特别关注[47]。

3.4 MRI MRI 的优势在于能够提供优异的软组织和骨骼对比成像。然而，金属植入物产生的磁化率伪影严重限制其在假体周围区域的应用。因此，有效减少金属伪影、提高成像质量及诊断准确性已成为该领域的重要研究方向[48-49]。US、X 线平片、CT 及 MRI 诊断 PJI 的优缺点比较见表 1。

表 1 US、X 线平片、CT、MRI 诊断 PJI 的优缺点比较

影像学检查	优势	局限性	适用场景
US	实时、无辐射，引导穿刺准确	诊断 PJI 特异性低，依赖操作者经验	关节积液评估，穿刺引导
X 线平片	成本低，可评估假体位置及骨性结构异常	灵敏度/特异度低，软组织分辨率差	初筛，术后随访
CT	解剖细节清晰，可评估骨溶解与假体－骨界面	辐射剂量较高，金属伪影影响	复杂骨结构评估，术前规划
MRI	软组织分辨率极高，无辐射	金属伪影干扰严重（常规序列），检查时间长	软组织感染，积液评估，需使用金属伪影抑制序列

4 分子生物学技术

分子生物学技术的进步为 PJI 的快速、精准诊断及病原体鉴定开辟了新途径。基因层面检测技术是主流，包括聚合酶链式反应（PCR）、二代测序（NGS）及核酸杂交技术（如荧光原位杂交与基因芯片）。后者虽在特定病原体快速检测中已有探索，但在 PJI 诊断中应用较少。此外，基于多组学技术，如转录组学、蛋白质组学与代谢组学等方法正被应用于病原体鉴定与宿主反应分析，展现出巨大发展潜力[50-51]。成本效益模型表明，NGS 用于 PJI 诊断可行性取决于预测试概率与检测性能（灵敏度与特异度）。当 NGS 预测试概率＞70.0%且检测性能＞94.1%时，具有成本效益，预测试概率与测试性能是核心决策因素。然而，NGS 在 PJI 诊断中效益最佳的适应证与目标人群，仍有待进一步研究予以界定[52]。

4.1 PCR PCR 可快速鉴定常见微生物。然而，以肌肉骨骼感染协会（MSIS）标准为金标准时，PCR 诊断 PJI 的准确性低于培养。尽管已开发出利用多种引物（如 16S rRNA）的多重 PCR 检测，但灵敏度仍不足，未显示出超越组织培养的显著优势[53-54]。

4.2 NGS 过去十年中，NGS 发展迅猛，已成为 PJI 诊断领域的潜在工具。随着高通量测序技术的进步，其在病原体鉴定方面的潜力日益突出，在多种传染病诊断中已展现出良好价值。近五年，越来越多证据支持 NGS 在 PJI 诊断中的潜在应用价值[55]。Tang 等[56]研究表明，NGS 是诊断 PJI（尤其适用于有抗菌药物使用史导致培养阴性的患者）的

有效工具，也是诊断多微生物 PJI 的潜在方法。然而，高昂费用限制了其在临床上的广泛应用。

4.3　多组学技术　多组学技术通过整合转录组学、蛋白质组学及免疫细胞分析，能够全面解析宿主－病原体相互作用，从而在鉴别 PJI 与无菌性松动方面展现出高精度潜力。此外，该技术还能鉴定潜在细菌病原体。然而，其对复杂实验室基础设施及分析流程的依赖，是目前限制其常规临床应用的主要原因[57]。

5　新兴诊断技术

随着医学技术的发展，PJI 的诊断领域涌现出诸多具有潜力的新兴技术。例如，基于机器学习的人工智能模型可整合多维度临床信息、影像学特征及高通量实验室数据，构建高精度预测模型，从而提升 PJI 诊断的准确性与早期识别能力，在复杂和不典型病例中表现尤为突出[58]。此外，即时检测技术（如便携式核酸分析仪与微流控芯片系统）正逐步实现床旁快速病原体鉴定与药敏谱分析，可显著缩短传统培养与分子检测的周转时间，为感染控制与靶向治疗争取关键窗口期[59]。尽管这些前沿方法在标准化、成本效益及临床验证方面仍面临挑战，尚未广泛应用于临床实践，但它们共同指向个性化、快速化与整合化的 PJI 诊断未来方向，有望在未来优化 PJI 诊疗路径并改善患者预后。

6　中国本土研究与实践指南进展

近年来，中国在 PJI 诊断领域取得显著本土化研究进展，并形成具有指导意义的临床共识。《中国人工关节感染诊断与治疗指南》的发布，为国内 PJI 诊断流程建立了权威框架。该指南特别强调多模态、多指标联合诊断的重要性，建议综合运用临床表现、血清学与关节液生物标志物（如 CRP、ESR、IL-6、α-防御素）、微生物培养及分子诊断技术，构建符合中国医疗实践特点的诊断路径。在病原体检测方面，国内多项研究优化并验证了超声震荡液培养的操作流程及诊断阈值。针对新兴的分子诊断技术（尤其是 NGS），国内学者开展了一系列临床效能评估研究。这些研究不仅证实 NGS 在鉴定培养阴性 PJI 及混合感染中的独特价值，还初步探讨其在中国医疗环境下的成本效益与适用场景，为该技术合理应用提供本土证据[60]。

7　小结与展望

PJI 的诊断是一项复杂的系统工程，单一诊断方法因其固有局限性难以满足临床精准决策需求。本文通过系统评述病原体检测、生物标志物、影像学及分子生物学等多元诊断策略，明确了各类方法的优势与适用范围。当前研究核心共识在于，必须突破传统单一指标诊断模式，转向多模态信息整合分析。未来发展关键路径包括推进诊断流程标准化、探索高价值生物标志物组合应用、突破影像技术瓶颈，并优化高精尖技术的成本效益，最终构建高效、精准且临床可操作的整合诊断体系，实质提升 PJI 诊疗水平。

针对当前困境，本文提出以下具体发展路径：（1）构建智能化分层诊断路径。基于机器学习模型整合患者基础病史、术前炎症指标等低维度数据，开发一套术前风险分层系统（如低、中、高风险）。为不同层级预设差异化诊断流程：低风险患者采用传统血清学筛查，而高风险患者则直接进入以关节液宏基因测序（mNGS）和 α-防御素检测为核心的快速通道，实现资源精准配置。（2）解决生物膜检测瓶颈。未来应积极探索新型化学清创剂（如聚维酮碘－过氧化氢序列）与超声震荡、DTT 化学法等技术的序贯组合，建立一套标准化的“生物膜破解流程”，并通过多中心研究验证其相较于单一方法的增效作用，从根本上提高病原体检出率。（3）推动低成本分子诊断技术。针对 mNGS 成本高昂的问题，技术突破点在于开发“靶向测序”技术，仅针对骨科感染常见病原体基因组关键区域进行深度测序而非全基因组测序，有望在保持高灵敏度的同时将成本降低一个数量级，增强临床推广价值。（4）建立本土化诊断标准与多学科平台。全面收集中国人群 PJI 诊断数据，通过大样本分析确立适合国情的生物标志物（如 IL-6、D-二聚体）诊断阈值。同时，在医院层面强制推行由骨科、感染科、微生物室及影像科组成的 PJI 多学科诊疗模式，将整合诊断从理念转化为制度，将前沿技术潜力转化为可推广的临床解决方案，切实提升对 PJI 的整体诊疗水平。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

[1]　Tabaja H, Abu Saleh OM, Osmon DR. Periprosthetic joint

infection: what's new? [J]. Infect Dis Clin North Am, 2024, 38(4): 731-756.

[2] 董文超, 咎强, 马建兵, 等. 宏基因组二代测序技术在假体周围感染中寻找病原菌的应用和价值[J]. 实用骨科杂志, 2022, 28(1): 30-35.
Dong WC, Zan Q, Ma JB, et al. Application and value of metagenomic sequencing technology in searching pathogenic bacteria in periprosthetic infection[J]. Journal of Practical Orthopaedics, 2022, 28(1): 30-35.

[3] Vrancianu CO, Serban B, Gheorghe-Barbu I, et al. The challenge of periprosthetic joint infection diagnosis: from current methods to emerging biomarkers[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(5): 4320.

[4] Nelson SB, Pinkney JA, Chen AF, et al. Periprosthetic joint infection: current clinical challenges[J]. Clin Infect Dis, 2023, 77(7): e34-e45.

[5] Kim SJ, Cho YJ. Current guideline for diagnosis of periprosthetic joint infection: a review article[J]. Hip Pelvis, 2021, 33(1): 11-17.

[6] Tokarski A, Courtney PM, Deirmengian C, et al. Systemic manifestation of periprosthetic joint infection is associated with increased in-hospital mortality[J]. Cureus, 2023, 15(3): e36572.

[7] Zhou HT, Yang YJ, Zhang YH, et al. Current status and perspectives of diagnosis and treatment of periprosthetic joint infection[J]. Infect Drug Resist, 2024, 17: 2417-2429.

[8] Lai YH, Xu H, Li XY, et al. Outcomes of culture-negative or -positive periprosthetic joint infections: a systematic review and meta-analysis[J]. Jt Dis Relat Surg, 2024, 35(1): 231-241.

[9] Higgins E, Suh GA, Tande AJ. Enhancing diagnostics in orthopedic infections[J]. J Clin Microbiol, 2022, 60(6): e0219621.

[10] Treu EA, Behrens NF, Blackburn BE, et al. A "dry tap" in prosthetic joint infection workup of total hip arthroplasty is not reassuring[J]. J Arthroplasty, 2024, 39(9S1): S220-S224.

[11] Mirzaei A, Shafiei SH, Sadeghi-Naini M, et al. Pre-aspiration outpatient ultrasound can accurately predict dry taps in prosthetic hips suspected of infection: a prospective study[J]. Front Surg, 2024, 11: 1410465.

[12] Christensen TH, Ong J, Lin DN, et al. How does a "dry tap" impact the accuracy of preoperative aspiration results in predicting chronic periprosthetic joint infection? [J]. J Arthroplasty, 2022, 37(5): 925-929.

[13] Heckmann ND, Nahhas CR, Yang J, et al. Saline lavage after a "dry tap"[J]. Bone Joint J, 2020, 102-B(6_Supple_A): 138-144.

[14] Goh GS, Parvizi J. Think twice before prescribing antibiotics for that swollen knee: the influence of antibiotics on the diagnosis of periprosthetic joint infection[J]. Antibiotics (Basel), 2021, 10(2): 114.

[15] Tsikopoulos K, Meroni G. Periprosthetic joint infection diagnosis: a narrative review[J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(10): 1485.

[16] Li C, Renz N, Trampuz A, et al. Twenty common errors in the diagnosis and treatment of periprosthetic joint infection[J]. Int Orthop, 2020, 44(1): 3-14.

[17] Luppi V, Regis D, Sandri A, et al. Diagnosis of periprosthetic hip infection: a clinical update[J]. Acta Biomed, 2023, 94(S2): e2023095.

[18] Mozella AP, Cobra HAAB, Minamoto STN, et al. Accuracy of serological markers, synovial fluid, microbiological culture, and histopathological examination for diagnosing periprosthetic knee infection[J]. Rev Bras Ortop (Sao Paulo), 2023, 58(6): e917-e923.

[19] Gazendam A, Wood TJ, Tushinski D, et al. Diagnosing periprosthetic joint infection: a scoping review[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2022, 15(3): 219-229.

[20] Sebastian S, Malhotra R, Sreenivas V, et al. The utility of dithiothreitol treatment of periprosthetic tissues and explanted implants in the diagnosis of prosthetic joint infection[J]. Indian J Med Microbiol, 2021, 39(2): 179-183.

[21] Márquez-Gómez M, Díaz-Navarro M, Visedo A, et al. Does a specific sequential combination of antiseptic solutions for chemical debridement in periprosthetic joint infection improve outcomes *vs*. solution alone? An *in vivo* study[J]. Antibiotics (Basel), 2024, 13(12): 1225.

[22] Márquez-Gómez M, Díaz-Navarro M, Visedo A, et al. An *in vitro* study to assess the best strategy for the chemical debridement of periprosthetic joint infection[J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(10): 1507.

[23] Chao CA, Khilnani TK, Jo S, et al. Not all antiseptic solutions are equivalent in removing biofilm: a comparison across different orthopaedic surfaces[J]. J Bone Joint Surg Am, 2025, 107(2): 127-133.

[24] Talsma DT, Ploegmakers JJW, Jutte PC, et al. Time to positivity of acute and chronic periprosthetic joint infection cultures[J]. Diagn Microbiol Infect Dis, 2021, 99(1): 115178.

[25] Morreel ERL, van Dessel HA, Geurts J, et al. Prolonged incubation time unwarranted for acute periprosthetic joint infections[J]. J Clin Microbiol, 2025, 63(2): e0114324.

[26] Maimaiti Z, Li Z, Xu C, et al. Non-tuberculosis *Mycobacterium* periprosthetic joint infections following total hip and knee arthroplasty: case series and review of the literature[J]. Orthop Surg, 2023, 15(6): 1488-1497.

[27] Birdsall J, Tambosis E, Siarakas S. Isolation of clinically significant microorganisms from prosthetic joint tissue using BacT/ALERT paediatric blood culture bottles compared with solid culture media and enrichment broth[J]. Pathology, 2021, 53(4): 515-519.

[28] Rieber H, Frontzek A, Heinrich S, et al. Microbiological diagnosis of polymicrobial periprosthetic joint infection

revealed superiority of investigated tissue samples compared to sonicate fluid generated from the implant surface[J]. Int J Infect Dis, 2021, 106: 302-307.

[29] Sigmund IK, Puchner SE, Windhager R. Serum inflammatory biomarkers in the diagnosis of periprosthetic joint infections [J]. Biomedicines, 2021, 9(9): 1128.

[30] Schindler M, Walter N, Maderbacher G, et al. Novel diagnostic markers for periprosthetic joint infection: a systematic review[J]. Front Cell Infect Microbiol, 2023, 13: 1210345.

[31] Yadav AK, Murhekar S, Cinar EN. Analysis of serum and synovial inflammatory markers in periprosthetic joint infections: a narrative review[J]. Cureus, 2024, 16(11): e72821.

[32] Yilmaz MK, Abbaszadeh A, Tarabichi S, et al. Diagnosis of periprosthetic joint infection: the utility of biomarkers in 2023 [J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(6): 1054.

[33] Owens JM, Dennis DA, Abila PM, et al. Alpha-defensin offers limited utility in work-up prior to reimplantation in chronic periprosthetic joint infection in total joint arthroplasty patients[J]. J Arthroplasty, 2022, 37(12): 2431-2436.

[34] 李智卓，时利军，孙伟. D-乳酸在关节假体周围感染诊断中的作用与研究进展[J]. 医学新知，2021，31(4)：294-298.
Li ZZ, Shi LJ, Sun W. The progress of research into the role of D-lactic acid in the diagnosis of periprosthetic joint infection [J]. New Medicine, 2021, 31(4): 294-298.

[35] Li J, Zhou Q, Deng BQ. Serum versus synovial fluid interleukin-6 for periprosthetic joint infection diagnosis: a systematic review and meta-analysis of 30 diagnostic test accuracy studies [J]. J Orthop Surg Res, 2022, 17(1): 564.

[36] 王微，李小微，井鸿雁. 血清 α-防御素、白细胞介素-6、D-二聚体水平在假体周围感染诊断中的价值对比[J]. 中国实验诊断学，2020，24(4)：607-609.
Wang W, Li XW, Jing HY. Comparative value of serum α-defensin, interleukin-6, and D-dimer levels in the diagnosis of periprosthetic joint infection[J]. Chinese Journal of Laboratory Diagnosis, 2020, 24(4): 607-609.

[37] Lu GX, Li T, Ye HQ, et al. D-dimer in the diagnosis of periprosthetic joint infection: a systematic review and meta-analysis[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 265.

[38] Cutter B, Lum ZC, Giordani M, et al. Utility of D-dimer in total joint arthroplasty[J]. World J Orthop, 2023, 14(3): 90-102.

[39] Pannu TS, Villa JM, Patel PD, et al. The utility of serum D-dimer for the diagnosis of periprosthetic joint infection in revision total hip and knee arthroplasty[J]. J Arthroplasty, 2020, 35(6): 1692-1695.

[40] Sun XB, Li YJ, Lv Y, et al. Diagnostic value of procalcitonin in patients with periprosthetic joint infection: a diagnostic meta-analysis[J]. Front Surg, 2024, 11: 1211325.

[41] Busch A, Jäger M, Engler H, et al. Is procalcitonin (PCT) a reliable biomarker for preoperative diagnosing of low grade periprosthetic joint infection? a prospective study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21(1): 257.

[42] Henkelmann J, Henkelmann R, Denecke T, et al. Simultaneous ^{18}F-FDG-PET/MRI for the detection of periprosthetic joint infections after knee or hip arthroplasty: a prospective feasibility study[J]. Int Orthop, 2022, 46(9): 1921-1928.

[43] Romanò CL, Petrosillo N, Argento G, et al. The role of imaging techniques to define a peri-prosthetic hip and knee joint infection: multidisciplinary consensus statements[J]. J Clin Med, 2020, 9(8): 2548.

[44] Wang YQ, Yuan LL, Du YQ, et al. Performance characteristics of 18F-fluorodeoxyglucose in non-infected hip replacement [J]. Front Med (Lausanne), 2023, 9: 1043812.

[45] Jardon M, Fritz J, Samim M. Imaging approach to prosthetic joint infection[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53(10): 2023-2037.

[46] Hofmann UK, Eleftherakis G, Migliorini F, et al. Diagnostic and prognostic relevance of plain radiographs for periprosthetic joint infections of the hip: a literature review[J]. Eur J Med Res, 2024, 29(1): 314.

[47] Hoveidaei A, Tavakoli Y, Ramezanpour MR, et al. Imaging in periprosthetic joint infection diagnosis: a comprehensive review[J]. Microorganisms, 2024, 13(1): 10.

[48] Inaoka T, Sugeta M, Nakatsuka T, et al. Evaluating hip periprosthetic joint infection with metal-artifact-reduction MR imaging[J]. Magn Reson Med Sci, 2025, 24(1): 20-34.

[49] Sacher SE, Koff MF, Tan ET, et al. The role of advanced metal artifact reduction MRI in the diagnosis of periprosthetic joint infection[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53(10): 1969-1978.

[50] Fisher CR, Patel R. Profiling the immune response to periprosthetic joint infection and non-infectious arthroplasty failure [J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(2): 296.

[51] Olearo F, Zein SE, Portillo ME, et al. Diagnostic accuracy of 16S rDNA PCR, multiplex PCR and metagenomic next-generation sequencing in periprosthetic joint infections: a systematic review and meta-analysis[J]. Clin Microbiol Infect, 2025, 31(7): 1115-1125.

[52] Torchia MT, Austin DC, Kunkel ST, et al. Next-generation sequencing *vs* culture-based methods for diagnosing periprosthetic joint infection after total knee arthroplasty: a cost-effectiveness analysis[J]. J Arthroplasty, 2019, 34(7): 1333-1341.

[53] Kildow BJ, Ryan SP, Danilkowicz R, et al. Commercially available polymerase chain reaction has minimal utility in the diagnosis of periprosthetic joint infection[J]. Orthopedics, 2020, 43(6): 333-338.

[54] Han HS, Ro DH, Chung J, et al. Nanopore 16S amplicon sequencing enables rapid detection of pathogen in knee periprosthetic joint infection[J]. Int J Med Microbiol, 2022, 312(8): 151570.

[55] Su SL, Wang RD, Zhou RB, et al. Higher diagnostic value of next-generation sequencing versus culture in periprosthetic joint infection: a systematic review and meta-analysis[J].

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2024, 32(9): 2277 - 2289.

[56] Tang YC, Zhao DC, Wang SH, et al. Diagnostic value of next-generation sequencing in periprosthetic joint infection: a systematic review[J]. Orthop Surg, 2022, 14(2): 190 - 198.

[57] Magruder ML, Heckmann ND, Lieberman JR, et al. Novel technologies in periprosthetic joint infection: emerging diagnostics[J]. J Arthroplasty, 2026, 41(2): 551 - 559.

[58] Baxter JSH, Eagleson R. Exploring the values underlying machine learning research in medical image analysis[J]. Med Image Anal, 2025, 102: 103494.

[59] Plebani M, Nichols JH, Luppa PB, et al. Point-of-care testing: state-of-the art and perspectives[J]. Clin Chem Lab Med, 2025, 63(1): 35 - 51.

[60] 中华医学会骨科学分会关节外科学组,《中国 PJI 诊断和治疗指南》编写委员会. 中国人工关节感染诊断与治疗指南[J]. 中华外科杂志, 2021, 59(6): 430 - 442.
Workgroup on the Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Prosthetic Joint Infection, Joint Surgery Committee of the Chinese Orthopaedic Association. Guidelines for the diagnosis and treatment of prosthetic joint infection [J]. Chinese Journal of Surgery, 2021, 59(6): 430 - 442.

(本文编辑:陈玉华)

本文引用格式:翟建慧,张育民,王涛,等. 人工关节置换术后假体周围感染多模态诊断策略的整合优化研究进展[J]. 中国感染控制杂志,2026,25(5):785 - 792. DOI:10.12138/j.issn.1671 - 9638.20262805.

Cite this article as: ZHAI Jianhui, ZHANG Yumin, WANG Tao, et al. Research advances in the integration and optimization of multimodal diagnostic strategies for periprosthetic joint infection following joint arthroplasty[J]. Chin J Infect Control, 2026, 25(5): 785 - 792. DOI: 10.12138/j.issn.1671 - 9638.20262805.