

Marinobacter 对芳香类污染物的降解及分子机制研究

党淑娴 王重阳*

河南大学迈阿密学院，河南开封，475004；

摘要：芳香类污染物是目前环境中较常见的污染物，其包括的多环芳烃等物质均有致癌致畸致突变的特性，对我国生态环境安全和人体健康带来了巨大的威胁。Marinobacter 是一类广泛分布于海洋环境中的嗜盐细菌，在极端条件下有着良好的生存能力，具有降解芳香类污染物的潜力，故被认为是在极端条件下降解芳香类污染物的重要微生物。本文汇总了近年来有关 Marinobacter 对芳香类污染物的降解报道，着重对 Marinobacter 的降解功能，降解途径和功能基因进行了综述，以期为 Marinobacter 单独降解芳香类污染物提供理论和技术支撑。

关键词：Marinobacter；芳香类污染物；生物降解；分子机制

DOI: 10.69979/3041-0673.25.07.088

引言

芳香类污染物是自然界和工业活动中常见的污染物，主要包括单环芳烃、多环芳烃及偶氮染料等。芳香类污染物主要来源于工业生产过程、化学肥料的使用、汽车尾气排放和垃圾焚烧等过程^[1]，芳香族化合物具有的苯环结构所形成的大π键让芳香类污染物在环境中具有较高的稳定性和生物难降解性^[2]。近年来，随着石油化工和工业生产的快速发展，大量芳香类污染物被排放到环境中，这些污染物的累积会威胁生态系统的稳定性，对人类的健康构成潜在危害。因此，治理环境中芳香类污染物，从而降低对生态环境的影响和人类健康的危害，引起了广泛关注。

1 芳香类污染物的主要类型及污染分布

1.1 苯系物

苯系物（英文全称，BTEX）是苯及衍生物的总称，在石油产品中含量较高，且挥发性和毒性更强，如常见的苯、乙苯、二甲苯等^[3]。苯系物普遍存在于石油及由石油炼制的产品中，苯系物的污染会对人体产生不可逆的影响，并会对受体环境的生态健康造成严重威胁^[4]。

1.2 多环芳烃

多环芳烃（PAHs）是指分子中含有 2 个或 2 个以上苯环结构的持久性有机污染物，包括萘、菲、苯并芘等。多环芳烃主要来源于石油相关的工业排放，如石油精炼、汽车尾气等。经调查，PAHs 广泛分布于耕地、工业废弃地、工业园等地^[5]。邓等^[6]认为通过对微生物种群的选择，可以显著提高对多环芳烃的降解速率和降解效率。

1.3 偶氮染料

偶氮染料是一类分子中包括一到多个偶氮键（—N=N—），同时连接有相应苯环及衍生物结构的染料。同时，在其连接的苯系结构上一般又含有氨基、氯基、羟基等官能团。偶氮染料结构和基团数量对降解有很大影响，典型偶氮染料的分子机构如图 1 所示。由于偶氮染料废水排放时温度和盐分均很高，普通的脱色菌及菌群无法在实际条件下发挥脱色作用。因此，极端菌的筛选及研究将为偶氮染料废水的生物治理提供更为优质的生物材料。典型的芳香类污染物如图 1 所示。

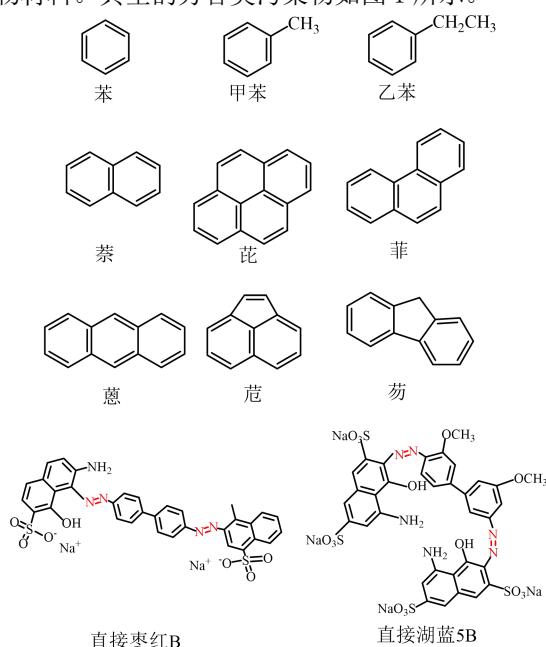


图 1 典型的芳香类污染物

2 Marinobacter 菌属特点

Marinobacter 属细菌属于细菌界-变形菌门-γ-

变形菌纲^[7]。Marinobacter 属于革兰氏阴性的杆状菌，广泛分布于海洋环境，具有较强的盐度耐受性^[8]。目前对芳香类污染物的降解方法主要采用微生物降解法，因为其具有设备简单、操作容易且少二次污染等优点^[9]，被认为是处理有机污染物的最有效手段。Marinobacter 属细菌被发现具有强大的降解芳香族化合物的能力，因而成为了研究的热点菌属。

3 Marinobacter 降解菌

3.1 芳香族化合物的降解

Marinobacter 菌属成员被发现具有在一定盐度下降解苯、甲苯、对二甲苯等芳香族化合物的能力。Li 等人的研究证明，与 Marinobacter sp. TBZ126 相似度高达 99% 的 Marinobacter 可以在 5 天内完成对 120 mg/L 的甲苯的降解。此外，毛等人^[11]在盐碱化油污土壤中富集的嗜盐菌群的过程中，其发现 Marinobacter 为优势菌属，在 5% 盐度、pH=6.5~9.5 的范围内、温度在 20~45℃ 下可对苯及其混合底物的芳香族化合物高效降解。

3.2 多环芳烃的降解

目前，Marinobacter 属细菌对多环芳烃的降解研究较为成熟，其因参与好氧多环芳烃（PAHs）转化而闻名。王^[12]分离出来的 Marinobacter sp. N4 实现对多环芳烃的部分降解，为多环芳烃的微生物降解提供了最佳的培养策略。此外，研究发现分离到的石油烃降解菌新种 Marinobacter sp. PY97S 可以降解从萘到苯并芘在内的 11 种 PAHs，10 天对菲的降解率为 99%^[8,13]。这些研究

表明了 Marinobacter 属细菌在 PAHs 污染治理中具有重要的应用价值。

3.3 偶氮染料的降解

研究者发现 Marinobacter sp. B3 是一种有较好脱氮能力的反硝化菌，在好氧和厌氧条件下均能进行反硝化脱氮^[14]。汪等^[15]发现 Marinobacter sp. W8 高效的反硝化能力，这说明 Marinobacter 在处理含氮污染物，如偶氮染料废水中可能含有的氮化合物方面，可能具有应用潜力。此外，Dang 等^[16]的研究发现，一个以 Marinobacter 为主要菌属的菌群可在复合极端条件下对偶氮染料进行高效脱色，并通过宏基因组成功注释出 Marinobacter 中含有的偶氮染料还原酶，漆酶等与偶氮染料脱色和降解相关的功能基因，表明 Marinobacter 具有在复合极端条件下降解偶氮染料的潜力。

4 Marinobacter 关键功能基因

PAHs 起始双加氧酶（RHD）、邻苯二酚 1,2-双加氧酶（C120）、邻苯二酚 2,3-双加氧酶（C230）等被证明是芳香类污染物降解过程中的关键功能酶。王等人^[12]研究发现，Marinobacter sp. N4 可以降解菲，并成功注释其基因组中的起始双加氧酶编码基因，表明其可以通过 C230 途径完成对菲的降解。这表明 Marinobacter 可以将芳香类污染物转化为易降解的中间产物。此外，Marinobacter 在降解过程中通过其特有的偶氮还原酶、漆酶等来实现对偶氮双键的断裂。目前，嗜盐菌包括 Marinobacter 的降解菌对芳香类污染物的降解基因簇如图 2 所示。

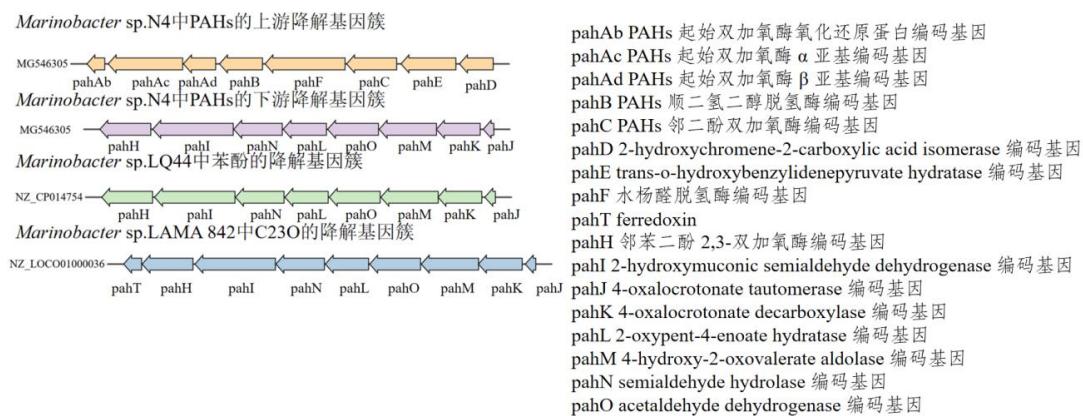


图 2 降解基因簇排列顺序

5 主要降解途径

李梦玲^[17]研究了以 Marinobacter 为主的菌群 NH-1，

发现能通过 C120 途径进行邻位开环，实现了对苯酚的矿化过程。Dang 等人^[16]利用含 Marinobacter 的菌群 HL 对直接湖蓝 5B 进行降解，分析降解途径发现通过 C12

0、C230、P340途径可以对偶氮染料实现矿化。菲在好氧条件下对菲的降解途径及其中间产物如图3所示。这些研究均表明 *Marinobacter* 主要通过 C120 途径来对芳香类污染物进行降解。

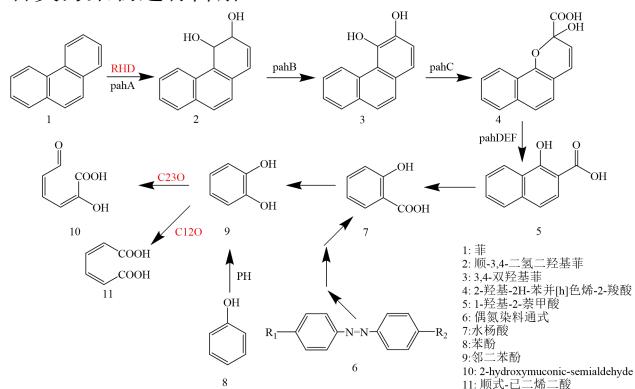


图3 菲的降解途径

6 预期与展望

芳香类污染物的生物降解技术因其操作简单、成本低廉且环境友好，已成为污染治理领域的重要策略，而利用微生物资源降解芳香类污染物更是当前国内外研究的热点。*Marinobacter* 作为一类广泛分布于海洋及高盐环境中的烃类降解菌，因其对环境适应能力强，对芳香类污染物的降解展现出显著的潜力。*Marinobacter* 所含有的关键功能基因如：单加氧酶、双加氧酶等基因是降解芳香类污染物的关键，其包括的嗜盐菌的降解基因簇也大致相同。目前，*Marinobacter* 对芳香类污染物的降解研究报道较少，因此对其降解机理的认知仍需提高，从而为进一步深入分析 *Marinobacter* 降解芳香类污染物的途径奠定基础。此外，丰富 *Marinobacter* 对芳香类污染物降解的分子机制研究，能够为极端环境下修复芳香类污染物污染提供优质的生物资源，从而达到高效降解有毒有害污染物的目标。

参考文献

- [1] 包国峰 2020. 非均相电-Fenton 法处理芳香类有机污染物研究 [M].
- [2] 吴朵而, 陈龙, 马香娟, 等. 2023. 基于电活性微生物的芳香烃类污染物转化机制研究进展 [J]. 微生物学报, 63: 30-44.
- [3] 王浩, 王月. 土壤中苯系物挥发行为影响因素研究 [J]. 环境保护科学: 1-13.
- [4] 张永婷, 孙正勇, 张家宇, 等. 2024. 安顺市酒店(宾馆)室内空气苯系物来源及监测结果分析 [J]. 科技创新与应用, 14: 63-67.
- [5] 范韦华, 王重阳 2022. 耐盐/嗜盐菌对 PAHs 的降解及分子机制研究综述 [J]. 环境科技, 35: 61-65+71.
- [6] 邓爽, 王超, 沈江川, 等. 2024. 微生物降解多环芳烃的研究进展 [J]. 山东化工, 53: 87-90+93.
- [7] 毛心慰 2008. BTEX 嗜盐降解细菌的多样性及降解特性的初步研究 [M].
- [8] 李倩, 崔志松, 赵爱芬, 等. 2011. 一株石油烃降解菌新种 *Marinobacter* sp. PY97S 的鉴定 [J]. 微生物学报, 51: 648-655.
- [9] 郭冀峰, 程凯, 李靖, 等. 2023. 多氯联苯污染土壤的微生物降解技术研究进展 [J]. 安全与环境学报, 23: 33 37-3346.
- [10] Li H, Zhang Q, Wang X L, et al. 2012. Biodegradation of benzene homologues in contaminated sediment of the East China Sea [J]. Bioresource Technology, 124: 129-136.
- [11] 毛心慰, 王慧, 赵百锁 2009. BTEX 降解嗜盐菌群的多样性及其降解特性 [J]. 环境科学学报, 29: 709-715.
- [12] 王重阳 2018. 嗜盐微生物对典型多环芳烃的降解及其分子机制的研究 [M].
- [13] 崔志松, 郑立, 杨佰娟, 等. 2010. 两种海洋专性解烃菌降解石油的协同效应 [J]. 微生物学报, 50: 350-35 9.
- [14] 滕峪, 汪鲁, 王占英, 等. 2024. 一株嗜碱兼性好氧反硝化菌 *Marinobacter* sp. B3 的分离鉴定及脱氮性能研究 [J]. 海洋与湖沼, 55: 419-430.
- [15] 汪恩旭, 曾一帆, 李振轮, 等. 兼性好氧反硝化嗜盐菌海杆菌属 W-8 的脱氮性能及其机制 [J]. 微生物学报: 1-13.
- [16] Dang S, Fan W, Meng F, et al. 2024. Decolorization and detoxification of direct blue 5B by a *Marinobacter*-dominated halo-thermoalkalophilic consortium [J]. Chemosphere, 363: 142957.
- [17] 李梦玲 2023. 耐盐苯酚降解菌群的筛选及其降解机理研究 [M].

作者简介：党淑娴（2005—），女，汉族，河南南阳人，河南大学本科，主要研究方向为环境微生物修复技术。

基金项目：河南省高等学校大学生创新训练计划项目（202410475078）；河南大学教学改革研究与实践项目（HDXJJG2023-058）