

# 基于 iMScope QT 研究导电生物水凝胶对废水中抗生素的降解效果

iMScope-034

**摘要：**水凝胶是一种具有多维网络互穿结构的新型材料，具有优异的吸附或降解性能，近年来在污水治理领域展现出了广阔的应用前景。然而，水凝胶呈胶状且成分复杂，尚缺乏有效方法对水凝胶中吸附的化学成分进行提取和表征，以评价水凝胶的质量和废水处理的性能。本研究无需化合物提取，应用成像质谱显微镜 iMScope QT 直接对水凝胶切片进行检测，实现了对水凝胶样品中抗生素类物质的空间分布和含量变化的表征，为水凝胶类样品的品质管理、制备工艺优化和废水处理能力评价提供一种新的参考方法。

**关键词：**成像质谱显微镜 iMScope QT 导电生物水凝胶 污水治理 空间分布和含量变化

## 技术特点：

- ❖ 无需复杂前处理：无需对水凝胶中特定化合物进行溶解和提纯等复杂操作，可在完整水凝胶切片表面涂敷基质后直接上机检测。
- ❖ 定量分析：通过分析软件对目标化合物进行提取分析，获得感兴趣区域的信号强度均值；同时结合质谱成像图中不同像素点的明暗变化，直观地观察和比较目标化合物在不同组别中的含量变化。

水凝胶是一种具有多维网络结构的亲水性高分子材料，其制备方法多样，包括物理交联、化学交联等。水凝胶内部具有微孔结构和特殊化学成分，因此可以对特定物质进行吸附和处理。如导电生物水凝胶，含有导电活性炭并可以封装厌氧微生物，其结构特性和厌氧微生物对物质的降解特性，使之在抗生素等污水治理中具有广阔的应用前景。然而，由于水凝胶呈胶体状且成分较为复杂，难以对废水中的抗生素等目标物直接进行提取分析以评价水凝胶的质量和废水处理

的能力。

本研究应用成像质谱显微镜 iMScope QT 对导电生物水凝胶中抗生素类物质磺胺甲恶唑的含量变化和空间分布进行了表征，验证了导电生物水凝胶促进抗生素废水降解的效果。该方法无需对水凝胶中特定化合物进行溶解和提纯，对完整水凝胶切片直接进行检测，简便快速，为水凝胶等复杂基质样品的检测提供一种简单有效的表征方法。

## ■ 实验部分

### 1.1 仪器

成像质谱显微镜 iMScope QT

### 1.2 仪器参数

分析模式：	正离子模式	激光器：	355 nm YAG 激光器
像素间距：	40 μm*40 μm	激光照射直径：	10 μm
激光能量：	65 (范围 0-100)	激光照射次数：	200 shots
扫描频率：	5000 Hz	扫描范围：	m/z 100-500
检测器电压：	2.78 kV		

### 1.3 试剂与样品

辅助基质：CHCA (α- 氰基 -4- 羟基肉桂酸)。

标准品：磺胺甲恶唑 (Sulfamethoxazole, SMX)，分子式为 C<sub>10</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>S，精确分子量为 254.0594，结构式如图 1 所示。

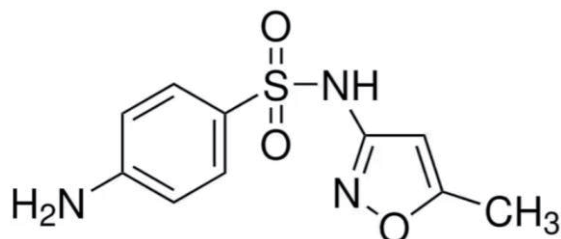


图1 磺胺甲恶唑 (SMX) 的结构式信息

样品：导电生物水凝胶。



图2 导电生物水凝胶示意图

#### 1.4 样品前处理

导电生物水凝胶制备和处理方法：制备含 2 种不同浓度 7.5 % 和 9 % 聚乙烯醇 (PVA) 的导电生物水凝胶。对照组：分别将含 2 种不同浓度 PVA 的水凝胶置于含磺胺甲恶唑 (SMX) 的废水中，7 日后回收。实验组：分别将含 2 种不同浓度 PVA 的水凝胶 (添加厌氧微生物) 置于含磺胺甲恶唑 (SMX) 的废水中，进行反应，25 日后回收。最终获得四种类型的水凝胶，如表 1。

表 1 四种类型的导电生物水凝胶

序号	水凝胶类型
1	含 9% PVA- 对照组
2	含 9% PVA- 实验组 (添加微生物)
3	含 7.5% PVA- 对照组
4	含 7.5% PVA- 实验组 (添加微生物)

切片制备：将导电生物水凝胶样品使用冷冻切片机 (徕卡 CM1950) 制备冷冻切片，切片厚度 15  $\mu\text{m}$ 。

基质涂敷：采用两步法涂敷基质，首先使用基质升华仪 iMLayer 进行基质升华，然后使用手动喷枪在载玻片上喷涂 300  $\mu\text{L}$  的 5 mg/mL 的基质溶液。自然晾干。

## ■ 结果与讨论

### 2.1 磺胺甲恶唑 (SMX) 标准品的检测结果

应用 iMScope QT 测试磺胺甲恶唑 (SMX) 标准品溶液在 CHCA、DHB、9-AA 等 3 种基质条件下的质谱信号强度。结果如图 3 所示，当使用 CHCA 基质时，在正离子模式下测试，SMX 质谱信号最佳，因此选用 CHCA 基质作为测试导电生物水凝胶样品的基质。

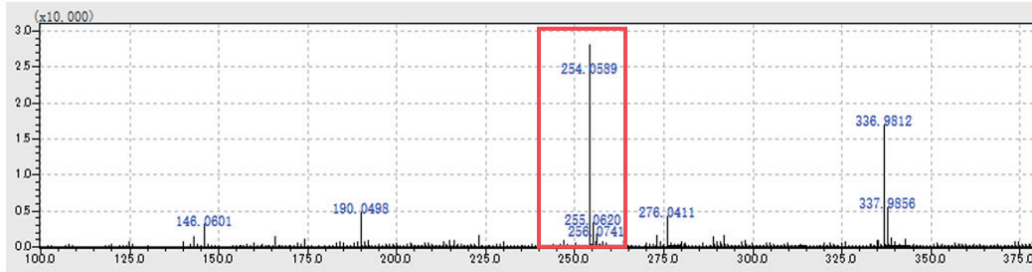


图3 磺胺甲恶唑 (SMX) 标准品测试结果 (CHCA 基质)

## 2.2 导电生物水凝胶中磺胺甲恶唑 (SMX) 的检测结果

应用 iMScope QT 在正离子模式下, 对四种类型的导电生物水凝胶切片样品进行质谱数据采集, 使用 IMAGEREVEAL MS 软件对磺胺甲恶唑 (SMX) 进行提取分析, 定量分析结果如表 2: 四种类型的水凝胶切片中均成功检出 SMX, 表明导电生物水凝胶对废水中的抗生素 (SMX) 具有吸附作用, 与预期相符。通过对比两个对照组信号强度 (含 9% PVA 为 3053, 含 7.5% PVA 为 1229), 表明对 SMX 的吸附能力: 含 9% PVA 水凝胶 > 含 7.5% PVA 水凝胶。

含 9% PVA 的水凝胶切片中 SMX 信号强度: 对照组为 3053, 实验组为 374, 下降约 8 倍; 含 7.5% PVA 的水凝胶切片中 SMX 信号强度: 对照组为 1229, 实验组为 498, 下降约 2.5 倍。结果表明在添加厌氧微生物进行反应之后, 废水中抗生素 (SMX) 得到有效降解, 与预期相符。通过倍率 (8 倍 > 2.5 倍) 对比, 表明对废水中 SMX 的降解能力: 含 9% PVA 的水凝胶 > 含 7.5% PVA 的水凝胶。

质谱成像结果如图 4-5 所示, 含两种不同浓度 PVA 的水凝胶中, SMX 质谱成像结果一致。SMX 在整体水凝胶中均有分布, 证实了水凝胶对废水中的 SMX 的吸附作用。通过对比对照组和实验组质谱成像图, 明显观察到 SMX 的信号强度: 对照组高于实验组, 表明在添加微生物后, 废水中 SMX 得到有效降解。

表 2 四种类型的导电生物水凝胶中 SMX 的信号强度

No.	Label	m/z	Adduct Ion	含 9% PVA 对照组 intensity	含 9% PVA 实验组 intensity	含 7.5% PVA 对照组 intensity	含 7.5% PVA 实验组 intensity
1	SMX	254.0594	M+H	3053	374	1229	498

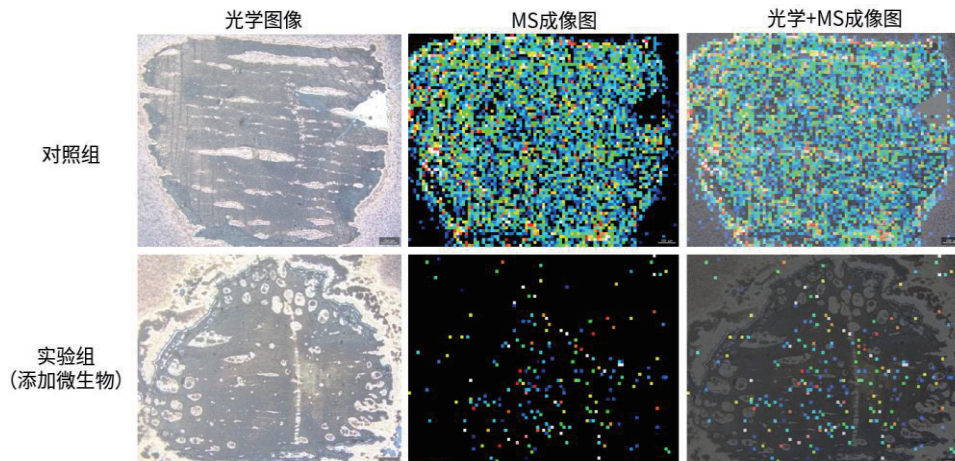


图 4 含 9% PVA 的导电生物水凝胶的质谱成像图

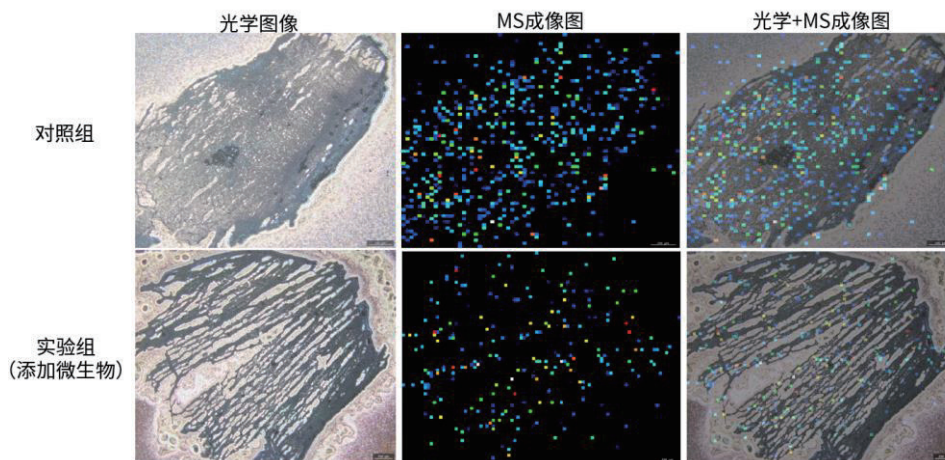


图5 含7.5% PVA的导电生物水凝胶的质谱成像图

## ■ 结论

本文应用岛津成像质谱显微镜 iMScope QT 分析在添加厌氧微生物反应前后, 抗生素类物质—磺胺甲恶唑 (SMX) 在导电生物水凝胶中的空间分布和含量变化。结果表明, 导电生物水凝胶对废水中的抗生素 (SMX) 具有吸附作用, 添加厌氧微生物进行反应之后, 废水中抗生素 (SMX) 得到有效降解, 验证了导电生物水凝胶促进 SMX 废水降解的能力。该方法无需对水凝胶中特定化合物进行溶解和提纯, 可直接对完整水凝胶切片进行检测, 简便快速, 为水凝胶类样品的制备工艺优化和废水处理性能评价提供新的参考, 为复杂基质样品的检测提供一种直接有效的表征方法。

❖ 本研究由中山大学土木工程学院和岛津合作完成, 研究成果已发表在《ACS ES&T Engineering》:  
Xinrui Lin, Zhipeng Xu, et al. Encapsulated Hydrogels Enhance Sulfamethoxazole Removal via Structure-Driven Microbial Metabolisms[J]. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.5c00342>

岛津应用云

