

石油污染土壤微生物修复效率主要影响因素

郝浩勇 何东健 (广东贝源检测技术股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 本文综合国内外研究现状, 对石油污染土壤的生物修复技术进行了概述。微生物修复效率重要影响因素有微生物类型、石油组分、温度、pH、盐分等, 通过优选菌种、调节关键环境因素可以提高石油污染土壤微生物修复效率。

关键词: 石油污染土壤; 微生物类型; 关键因素

现代工业的迅猛发展使得土壤的石油污染问题日渐显露。在开采、加工、输送和使用过程中, 石油均可能发生渗漏污染事故, 对土壤造成不同程度污染, 遗留巨大环境威胁。石油组分中的烷烃、烯烃、苯、甲苯、二甲苯等具有致癌、致基因突变、致畸作用^[1], 自上世纪90年代以来, 石油污染土壤治理修复已成为全球关注的热点问题。利用微生物的新陈代谢作用破坏石油烃类化合物的分子结构使其无毒无害化是微生物修复石油污染土壤的重要机理。相对于物理、化学等常规土壤修复方法, 微生物修复石油污染土壤具有其独特优势, 主要体现在微生物修复方法的低成本、高安全性以及无二次污染。微生物修复技术虽然是传统修复技术的环境友好替代技术, 但在实际污染场地的应用中往往收效甚微, 甚至与实验室得出的结论出现大相径庭的结果, 这主要是由于微生物自身生理代谢的复杂性使得其在污染场地中的应用中难以被操控; 此外, 环境因素也是重要的影响因素, 是微生物生长繁殖的先决条件。

1 石油烃污染土壤微生物修复研究现状

微生物修复技术在国外起步较国内早, 20世纪80年代, 石油污染土壤的微生物修复技术就已在石油烃污染场地内得到应用。1989年, 阿拉斯加 Exxon Valdez 溢油污染事故发生后, 美国环保局首次利用微生物修复技术进行修复, 并取得了显著成效^[2]。

20世纪以来, 微生物修复技术发展迅速。目前, 根据对石油污染物组分、污染场地特性、污染程度、环境状况等关键要素的研究, 逐渐形成了以优选培育适宜于场地的优势菌种为主, 调节微生物环境要素为辅以达到高效消除石油污染的微生物修复技术。目前, 对于污染土壤的微生物修复方式, 国内外主要有3种, 分别是原位处理、异地处理和生物反应器。应用于污染土壤的微生物根据其来源可分为土著微生物、外来微生物以及基因工程菌。近年来, 微生物修复技术不断在各类型场地中得到应用, 例如: 地下储油罐渗漏造成的污染地, 油田及其周边场地, 废弃油品处置地等。但以目前的微生物修复技术水平, 还远远达不到完全去除土壤中石油污染物的目的, 通常还需要与物理化学方法进行联用。

2 影响土壤微生物修复效率的主要因素

2.1 微生物

在受石油烃类污染的土壤中, 细菌相对于真菌具有

数量上的优势, 但类群上真菌种类更多。真菌和细菌降解石油烃类化合物所产生的中间产物不同。细菌往往将石油烃类化合物降解为顺式二醇, 而真菌则将石油烃类化合物降解为反式二醇。

从石油污染物特别是其中烃类化合物中分离获取的具有降解能力的土著微生物几乎都存在解脂酶活性, 而解脂酶活性正是微生物降解石油烃的关键特性。通过对具有该特性的微生物进行选择培养能够得到优势降解菌, 应用到石油污染土壤中可大大提高微生物降解石油烃类化合物的效率, 从而达到良好的修复效果。

生物修复工程应用中, 多采用土著微生物作为修复菌种, 少数也会应用外源微生物或基因工程菌。主要原因是土著微生物对于原污染场地具有更好的生物适应性, 筛选后投入原污染土壤既经济又快捷, 但土著微生物往往表现出生长速度缓慢、代谢活性低的劣势。基因工程菌虽然适应期短、可重复接种, 同时代谢活性也较强, 但在原场地的环境适应能力上的表现明显不如原污染土壤中产生的土著微生物。

2.2 石油组分

石油是由饱和烃、芳香烃、胶质和沥青质组成的复杂混合物, 含不同组分的石油烃通过微生物修复的难易程度不同。研究表明饱和烃最易被生物降解, 特别是饱和正构烷烃; 胶质和沥青质被认为是最难进行生物降解的石油组分, 石油组分中的沥青质多被认为不可生物降解。相对而言, 芳香烃的生物降解性居中, 但往往最受人们关注, 主要是芳香烃中涉及的多环芳烃毒性较强且具有生物累积性, 潜在巨大环境风险。

2.3 污染物浓度

污染物浓度对微生物降解效率有一定制约作用。含有高浓度污染物的土壤会对微生物产生毒性作用, 从而抑制微生物的代谢作用, 使得修复效率大大降低; 而在低浓度污染的土壤中, 即使其他环境条件均达到微生物生长的理想状态, 微生物也很难对该类污染物进行降解。很多情况下, 由于污染物浓度过低, 仅靠微生物自身的代谢活动很难将污染物降低到人体健康风险水平以下。因此, 低浓度污染物的生物降解目前仍是微生物修复面临的难题。

2.4 营养

在石油污染土壤中, 往往含有生物可利用的有机碳,

而氮、磷元素相对比较缺乏。这是因为石油组分中就含有大量有机碳，而氮、磷等有利于微生物生长的营养成分含量很少。土壤中氮和磷含量过低会减缓细菌的生长速度，使得修复效率大大降低。Arias 等人通过研究发现石油污染土壤中利用微生物进行修复最适配的碳氮、碳磷比分别为 10:1、10:0.3^[3]。

2.5 温度

温度是重要环境要素，不同温度下石油中烃类化合物具有不同的物理状态，温度的变化使微生物与之发生不同的相互作用，从而对修复效率产生影响。

温度对微生物降解速率的影响表现在两个方面，一是温度会改变石油烃类化合物的物理状态，当温度过低时，部分烃类组分表现为固体状态，该状态下的石油烃类化合物难以被生物降解。二是温度会影响石油降解菌中酶的活性，只有在适宜温度内微生物修复才能在酶的催化作用下更高效的进行。对于好氧菌来说降解石油烃的有利温度范围是 15~30℃。

2.6 pH

大多数石油降解菌喜中型 pH 环境，pH 值在 7.0 左右是最利于微生物生长的环境要素。需要注意的是，微生物在降解污染作用同时也伴随着酸性物质的生成，在环境中具有累积效应，从而导致 pH 持续下降。因此在利用微生物修复酸性污染土壤修复时，往往需要添加一些 pH 缓冲剂以保持微生物较高的代谢活性。

2.7 氧

石油降解菌属于好氧细菌，而土壤中氧气是有限的，含量多少则与污染土壤本身的物性、富水程度及埋深有关。目前在利用微生物进行原位修复时，用于增加土壤供氧的常用方式主要为生物通气法，是一种通过设置注射井以及抽提井向土壤中注射空气的方法。通过生物通风可以提高土壤中氧含量同时也能将石油中部分挥发性组分抽出，达到降低污染物浓度的目的，往往被用于修复地下水上部、受挥发性有机物污染的透气层土壤。在对土壤进行曝气的过程中，加入一定氨气作为氮源，更有利于提高微生物活性，提高修复效率。

对于寒冷地区的污染土壤微生物修复，由于低温使得微生物活性降低，同时石油扩散性及挥发性也会降低，修复效率会大打折扣。在进行该类地区的微生物原位修复土壤时，多采用热通风技术，目前常用的手段有热空气注射、蒸汽注射以及电加热。热空气注射对于微生物较为温和，但效率不高；蒸汽注射可快速提高环境温度，但由于带入的热量过高，容易杀灭微生物，对修复过程产生不利影响；电加热是指通过正负电极产生的高频电流对土壤进行加热处理，该方法可对土壤进行均匀加热，是一种良好的修复强化技术。

2.8 盐分

盐分对微生物多聚物（如蛋白质）、微生物活性、微生物种类都有影响。较高盐度的土壤会对某些重要的生物反应产生不利影响，同时会降低石油降解菌的代谢强

度；高盐度条件下非耐盐微生物种群显著下降。目前应用的石油降解菌大多不具有高耐盐性，高盐环境会降低其生物活性，导致修复效率的下降。

2.9 土壤

土壤是环境要素的载体同时也是微生物的活动的重要空间，土壤的物性及化学性质会直接影响微生物的代谢能力。其中，土壤的粘性系数是一个重要的影响因素。粘性强的土壤对石油的吸附能力强，由于粘性土壤孔隙度小、透气性差、富水性低的特点，会对营养物质补给以及氧气的扩散产生负面影响，导致微生物难以生长发育，无法对石油污染土壤进行有效修复。适合进行微生物修复的土壤多为含粉粒或沙粒较多的沙壤土或粉壤土，该类型土壤具有较好的通透性，能够及时提供生物代谢所需要的各种养分，并能够满足石油烃类化合物与石油降解菌充分接触条件。

2.10 表面活性剂

由于土壤胶体对油的吸附性不强，同时石油组分中的烃类化合物的憎水性使之很难溶解到土壤有机质中，因此微生物不能与之产生充分接触，对微生物降解效果产生了负面影响。在表面活性剂的作用下石油不断被乳化和，使得石油烃在水相中不断被分化，提高了石油烃类化合物的在微生物降解过程中的可利用性，进而提高修复效率。表面活性剂可分为生物表面活性剂和化学表面活性剂，两者都可以达到提高修复效率的目的，但前者不会产生二次污染。此外，表面活性剂的种类、浓度也会对微生物修复效率产生影响。

3 结语

微生物修复技术在石油污染场地的应用已走出实验室并展现出良好的发展态势，但由于该技术修复周期长，修复后土壤难以达到环境健康要求等诸多问题，使得其适用范围还存在很大的局限，这与土壤污染场地的特殊性以及微生物修复技术的复杂性息息相关。

从目前微生物修复技术研究成果来看优选培育适宜石油污染场地的微生物提高修复效率仍是一门经久不衰的课题，此外，微生物修复效率还与微生物适应性机理、污染场地的特性以及各种环境条件存在较大关联。从客观角度来看，生物修复技术仍是一项复杂的课题，需要不断深入探讨。

参考文献：

- [1] Propst T L, Lochmiller R L, Qualls C W, et al. In situ (mesocosm) assessment of immunotoxicity risks to small mammals inhabiting petrochemical waste sites[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(5): 1049-1067.
- [2] 吉云秀, 丁永生, 丁德文. 滨海湿地的生物修复[J]. *大连海事大学学报*, 2005, 31(003): 47-52.
- [3] Alas, R M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective[J]. *Microbiological Review*, 1981, 45: 181-209.