

# 石油污染土壤的生物修复研究进展<sup>①</sup>

刘五星<sup>1,2,3</sup>, 骆永明<sup>1,2,3\*</sup>, 滕应<sup>1,2</sup>, 李振高<sup>1,2</sup>, 吴龙华<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对于石油污染土壤的修复, 其生物修复具有环境友好、费用较低等特点, 是最具应用前景的土壤修复技术。本文较全面地介绍了石油污染土壤生物修复的影响因素、石油污染土壤的生物修复技术, 并对该领域今后的研究重点进行了展望。

**关键词:** 石油污染; 土壤; 生物修复; 影响因素

**中图分类号:** X131.3

生物修复 (Bioremediation), 也有称生物整治、生物恢复、生态修复或生态恢复, 是指利用处理系统中的生物, 主要是微生物的代谢活动来减少污染现场污染物的浓度或使其无害化的过程。由于生物修复是通过投加或刺激土壤中的生物来降解污染物, 并不破坏植物生长所需的土壤环境。其最终产物是 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等物质, 因此具有环境友好、不产生二次污染的特点<sup>[1]</sup>。另外, 相对于传统污染土壤修复技术, 生物修复技术是最经济的一种, 其费用约为热处理费用的 1/3 ~ 1/4。尽管生物修复技术具有上述优点, 但是在石油污染土壤修复上也具有其局限性, 主要表现在: ①石油类污染物的异质性。由于石油的产地不同, 油层不同, 其原油组成成分及各成分之间的比例都有很大差别, 甚至同一油层内不同原油中的性质也有很大差别。因此, 某石油污染土壤生物修复的成功经验不一定在另外的场地中适用。②土壤中石油类污染物浓度过高时, 可能会对环境中的降解菌具有毒害作用。此外, 油含量太低不足以维持一定数量的微生物生长时, 生物修复也起不到效果。③生物修复效果受各种环境因素的影响较大, 因为微生物的活性受到土壤类型、土壤深度以及土壤理化性质如温度、pH、水分、氧气、氧化还原电位等因素的影响。④污染土壤的生物修复通常需要较长的时间<sup>[2]</sup>。石油污染土壤的生物修复的具体操作方法可分为两种。其一是环境条件的修饰, 如营养物质的利用、通气、加入表面活性剂

等; 其二是接种合适的微生物以降解污染物, 用于生物修复的微生物包括土著微生物、外来微生物等。如果在污染区域内的土著微生物种类和数量不能有效地降解石油类污染物, 就必须人为接种各种可降解污染物的微生物。这些微生物可以从天然样品中筛选的, 也可以是通过基因工程改造的。为了全面了解石油污染土壤生物修复研究现状, 从而指导现阶段的研究工作, 本文对影响石油污染土壤生物修复的因素、石油污染土壤生物修复技术简作介绍, 并对该领域的研究进行展望。

## 1 石油污染土壤生物修复的影响因素

### 1.1 石油烃种类和组成

由于石油的产地不同、油层不同, 其原油组成成分及各成分之间的比例都有很大差别, 甚至同一油层内不同原油中的性质也有很大差别。不同的原油性质势必会导致其可生物降解性的不同。作者曾通过研究“菌群 14”对不同来源的 4 种原油 (江汉、胜利、西江、南阳原油) 的降解试验, 发现所有样品中饱和烃较芳香烃更易降解, 菌群对原油的降解率与原油的 API<sup>0</sup> 成正相关,  $Y = 1.8303X - 22.059$ ,  $R^2 = 0.794$ ; 与其粘度成负相关  $Y = -0.2042X + 39.629$ ,  $R^2 = 0.8853$ , X 为原油的粘度, Y 为原油的降解率 (未发表)。此外, 微生物对同一油品中不同种类的石油烃的降解效率也不一样。一般而言, 各类石油烃被微生物降解的相对能力为: 饱和烃 > 芳

①基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40432005)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)、国家科技攻关计划课题 (2003BA808A18-1-2) 和中国科学院知识创新项目 (CXTD-Z2005-4) 共同资助。

\* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 刘五星 (1975—), 男, 湖北监利人, 博士研究生, 主要从事环境微生物方面的研究。Email: liuwuxin@issas.ac.cn

香烃>胶质和沥青。在饱和烃部分中,直链烷烃最容易被降解;在芳香烃部分中,2环和3环化合物较容易被降解,而含有5环或5环以上的芳香烃难于被微生物所降解;胶质和沥青则极难被微生物所降解。Chaîneau等<sup>[3]</sup>对石油烃污染的土壤进行了修复,270天后发现其中75%的原油被降解,正构烷烃和支链烷烃在16天内几乎全部降解,22%的环烷烃未被降解,芳香烃有71%被同化,占原油总重量10%的沥青质完全保留了下来。

## 1.2 石油降解菌

土壤中微生物种类极其丰富,但是在没有遭受石油污染的生态环境中,石油降解菌仅占微生物总数的0.1%以下。而在石油污染的生态环境中几乎可以达到100%;泄油后几天便可见石油降解菌数量升高几个数量级;至于长期接受石油污染的地区,不仅具有石油降解能力的细菌数量高,且其降解强度亦高于无污染区。在没有受到石油污染的海洋污泥中,每克湿重仅有石油降解菌100~1000个,而海岸油井周围污泥中则可达 $1 \times 10^9/\text{g}$ 湿泥<sup>[4]</sup>。到目前为止,研究者从自然环境中已查知能降解石油中各种烃类的微生物共约100余属、200多个种。土壤中最常见的石油降解细菌群为:假单胞菌属(*Pseudomonas*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、产碱杆菌属(*Alcaligenes*)、微球菌属(*Micrococcus*)、棒状杆菌属(*Corynebacterium*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、红球菌属(*Rhodococcus*)、无色杆菌属(*Achromobacter*)、诺卡氏菌属(*Nocardia*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、分支杆菌属(*Mycobacterium*)以及真菌如木霉属(*Trichoderma*)、青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)、毛霉属(*Mucor*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、红酵母(*Rhodotorula*)、假丝酵母(*Candida*)、掷孢酵母(*Sporobolomyces*)、被孢霉属(*Mortierella*)<sup>[5-8]</sup>。此外,藻类也是降解石油污染物质的微生物群落之一,如颤藻属(*Oceillatoria*)、鞘藻属(*Microcoleus*)、鱼腥藻属(*Anabaena*)、念珠藻属(*Nostoc*)等<sup>[9]</sup>。不过目前在石油污染土壤生物修复上研究最多的还是细菌。这是因为细菌具有以下特点:①易培养;②易于通过分子生物学技术改造;③能够代谢氯代有机物;④能够矿化烃类物质并把它们作为C源、能源。尽管真菌也能够降解一些芳香类物质,但是它们通常需要一些共代谢底物<sup>[10]</sup>。自然界中存在众多的石油降解微生物,但由于石油是由成千上万种烃类及非烃类组成的

复合体,没有任何一种微生物能够降解石油的所有组分。因此在石油污染的修复上通常利用具有能够降解石油不同组分的多种细菌组合制成修复剂。这种具有协同降解作用的微生物群成为共生菌群(*consortia*)。针对石油组分的复杂性,美国通用电气公司Chakrabarty等人<sup>[11]</sup>在20世纪70年代首先构建成功了含有多种降解功能的细菌菌株。他们使用不同的质粒来构建能分解石油中的一系列烃的菌株,该菌株被称为“超级细菌”(Superbug),主要是因为它的代谢能力远远高于其他菌株。这种新的重组菌株在原油中比含有单一质粒或两种质粒的菌株能够更好地生长并且能够同时降解石油的多种组分。

## 1.3 营养物质和环境因素

Graham等<sup>[12]</sup>的研究表明,降解石油细菌细胞的化学组成可以用 $\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}_1$ 表示,微生物降解过程的最佳可生物利用的 $n(\text{C}):n(\text{N}):n(\text{P})=100:15:1$ 。与其他污染物相比,石油烃类污染土壤后带入大量C源,造成土壤中C、N、P比例严重失调。有研究表明适当加入N和磷酸盐能明显促进污染土壤中石油的生物降解作用。为了达到较好的修复效果,在向石油污染土壤添加N、P的营养物时,必须首先确定营养盐的形式、浓度以及适当的比例。虽然理论上可以估算出N、P的需要量,但在实际操作中由于土壤中石油类污染物降解速度太慢,且不同环境中N、P的可利用性变化很大,计算值只是一种估计,与实际值会有很大偏差。例如,同样都是石油类污染物的生物修复,不同研究者得到的适宜的C:N:P分别是888:60:1和70:50:1,相差有一个数量级<sup>[13]</sup>。另外,环境温度、水分、pH等因素也影响土壤中石油的降解。一般来说,在一定温度范围内微生物降解石油烃的速度与温度呈正相关。通常在0~40℃,范围内温度每升高10℃,微生物体内的酶反应速度为原来速度的1~2倍<sup>[14]</sup>。不过,低温有时也能促进石油的降解。例如,某些低分子烃类(C<9)对微生物有毒,在低温时其挥发性受限,溶解度较小,从而使其毒性降低便于微生物生长和降解<sup>[4]</sup>。此外,温度除能够改变微生物的活性外,还能改变土壤中水分的供应、石油烃的物理状态以及土壤的氧化还原电势,从而影响降解速度。

## 1.4 电子受体

石油污染土壤中烃降解菌的活性除受到N、P等营养元素限制外,石油氧化所需的电子受体的种类和浓度也影响石油的降解速度<sup>[15]</sup>。自然条件下,

对于石油烃类化合物的降解, 在有氧环境中,  $O_2$  是仅有的或优先的电子受体, 在厌氧条件下, 硝酸盐、硫酸盐、3 价铁离子以及有机物分解的中间产物也可以作为电子受体。土壤中  $O$  的浓度有明显的层次分布, 一般从表面到深层依次分布的是好氧层、缺氧层和厌氧层。对于表层受石油污染的土壤, 通过土壤翻耕等方法可以保证  $O$  的供应量。对于深层土壤的污染, 在修复工程上通常采用通气法。具体措施是向不饱和层打通气井, 将压缩空气或纯氧注入土壤, 也可以向土壤中加入适量的产氧剂, 例如  $H_2O_2$ ,  $CaO_2$  等。对于石油污染土壤, 利用加入电子受体等生物修复技术的应用, 在实验室和现场的修复过程中都取得了成功<sup>[16-17]</sup>。最著名的修复实例是 20 世纪 80 年代初纽约长岛汽油站发生汽油泄漏后所进行的修复。当时约有 106 t 汽油进入附近土壤和地下水中, 后来回收了未被土壤吸附的汽油约 82 t, 但仍有相当多的汽油残留在土壤中。1985 年 4 月开始在该地进行生物修复处理, 采用  $H_2O_2$  作为供氧体, 在 21 个月中有效地去除了土壤中吸附的汽油, 估计通过生物作用去除的汽油约为 17.6 t, 占总去除量的 72%。经过生物修复处理后, 土壤中的汽油含量已低于检测限<sup>[18]</sup>。

### 1.5 表面活性剂

在石油污染土壤中的生物修复过程中, 石油中的主要成分烃类化合物的憎水性是微生物进行代谢、降解存在的主要问题。表面活性剂可以促进石油的乳化, 使之在水相中分散, 从而增加两相之间的界面面积。对于生长在烃等不溶性基质中的微生物, 其生长速度受水-石油之间界面面积的影响。当界面面积有限时, 微生物的数量按照算术级生长。只有当水-石油界面增大时, 微生物的数量才能有很大的增加。在进行有机物污染土壤生物修复时, 表面活性剂的选择要满足以下几个条件<sup>[13]</sup>: ①能够提高污染物的生物可利用性; ②对微生物和其他生物无毒害作用; ③易生物降解; ④不会造成土壤物理性质变化, 如板结等。

表面活性剂对石油污染土壤修复的影响, 国内外进行了大量的研究。张天胜等<sup>[19]</sup>的研究表明, 表面活性剂的加入可使水-石油界面面积增加, 从而使界面上生长的石油降解菌增加, 提高石油污染物的降解效果。张锡辉<sup>[20]</sup>采用非离子型的 TritonX-100 (Union Carbide Co) 表面活性剂研究了表面活性剂对土壤结合态稠环芳烃的生物降解的影响。结果表明, 稠环芳烃与土壤结合是妨碍其生物降解的主要

因素。表面活性剂能够显著提高结合态的稠环芳烃被降解的比例。加入表面活性剂后在 30 天时间内, 土壤中的稠环芳烃可被降解至一稳定水平。Oberbremer<sup>[21]</sup>等在一个含“模拟”油类的土壤微观体系中加入生物表面活性剂发现, 油类降解 90% 以上所需的总体时间大大缩短, 因此可以认为生物降解作用得到了加强。在场地研究方面, 1996 年, Oklahoma 大学和美国环境保护署 Kerr 实验室对犹他州某受风化燃油污染的场地通过泵入 4.3% 的表面活性剂进行了修复, 使污染物含量降低了 90%<sup>[22]</sup>。另外, 刘五星等<sup>[23]</sup>从石油污染的土壤样品中经过富集培养, 分离得到一株具有乳化和分解石油能力的醋酸钙不动杆菌。该菌具有较强的乳化柴油的能力, 且其培养液的表面张力显著低于纯水的表面张力, 具有良好的表面活性, 可以增强石油的水溶性。说明开发利用生物表面活性剂在生物修复石油污染土壤中具有较大的应用前景。

## 2 石油污染土壤生物修复技术

石油污染土壤的生物修复技术有很多种, 一般来讲可以分为两类, 即原位修复技术 (In situ bioremediation) 和异位修复技术 (Ex situ bioremediation)。在实际操作中可根据场地特征、污染物浓度、经费预算以及实验室预试验结果等因素选择合适的修复技术。

### 2.1 原位生物修复技术

原位处理方法是受污染土壤在原地处理, 处理期间土壤基本不需移动。由于这项技术不需要挖掘污染土壤, 因此是一种比较经济的修复手段。另外也可以避免引起灰尘及挥发性石油烃污染空气。通常原位修复技术包括生物通风、生物强化、生物刺激等。

**2.1.1 生物通风 (Bioventing)** 在受石油污染地区, 土壤中的污染物降解会降低土壤中的氧气浓度, 增加  $CO_2$  浓度, 进而抑制污染物进一步生物降解。因此, 为了提高土壤中的微生物降解效率, 可通过在污染场地打竖井并安装鼓风机和抽真空机向污染区域供给空气或氧气。这项技术通常用在轻质石油类污染的土壤。因为较其他石油组分, 轻质石油更易被降解。图 1 是一个典型的生物通风修复系统<sup>[24]</sup>。在通气的同时也可以同时向污染区添加 N、P 等营养物质来刺激内源性细菌的生长和代谢。尽管生物通风是一种高效的生物技术, 但是在地下水位低于 3 m 的地区不适宜使用。这是因为在对通风

井抽真空的过程中会引起地下水涌，从而影响空气进入污染区域<sup>[25]</sup>。

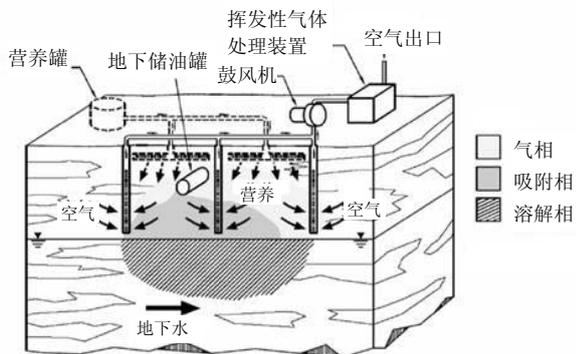


图 1 生物通风修复系统  
Fig.1 Bioventing system

2.1.2 生物强化技术 (Bioaugmentation) 通过投加具有石油降解能力的微生物到污染土壤中，从而加快土壤中污染物的降解。

2.1.3 生物刺激 (Biostimulation) 向石油污染的土壤中投加烃降解菌生长所需的 N、P 等营养元素以及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等电子受体，刺激微生物的生长来达到增加微生物生物量，从而加速降解石油污染物的目的。

## 2.2 异位生物修复技术

异位生物修复是将石油污染的土壤移到别的地点或生物反应器内再进行修复。异位修复通常具有可以节省修复时间、修复效果易控制等优点。但投资成本较大。异位生物修复包括：土地耕作法、预制床法、堆制处理法、生物反应器和厌氧生物处理法。

2.2.1 土地耕作法 (Land farming) 对石油污染的土壤进行翻耕，耕层深度为 30m 左右，同时向土壤中添加肥料、表面活性剂等物质并定期灌溉，从而尽可能地为微生物降解石油提供一个良好的环境，使其有充足的营养、水分和通气条件 (图 2)<sup>[24]</sup>。

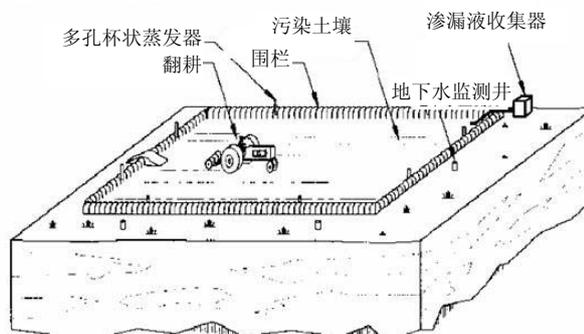


图 2 典型土地耕作法修复系统  
Fig. 2 Typical land farming operation system

其优点是简单、经济，缺点是挥发性石油烃会污染空气，并且受气候条件的影响较大。

2.2.2 生物堆法 (Biopile) 生物堆法是将挖出的石油污染土壤与改良剂混合后，堆置于设置有渗出水收集系统与通气系统的处理区内，并控制土壤水分、温度、营养盐、含氧量与 pH 值，以促进生物降解。生物堆法与土地耕作法相类似，都是通过增加通气来加快污染物的降解速度 (图 3)<sup>[24]</sup>。与土地耕作法采用翻耕不同的是，该法通过在土堆中布置通气管道并通过压缩机输入空气来为降解菌提供足够的空气。

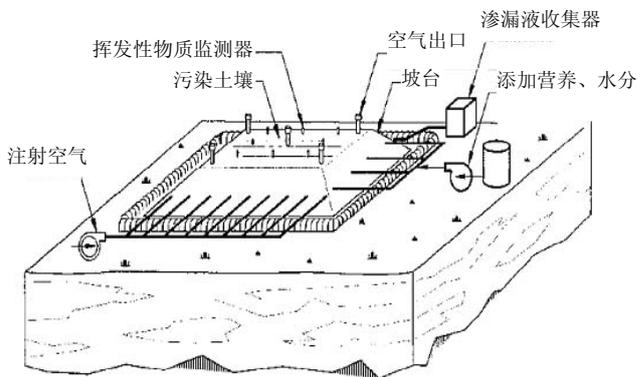


图 3 典型生物堆法修复系统  
Fig. 3 Typical biopile operation system

2.2.3 堆肥法 (Composting) 是一种和土地耕作法相似的生物修复过程。总体上可分为 4 种堆制方法，即堤形堆肥法、静态堆肥法、封闭堆肥法和容器堆肥法。堆肥法与土地耕作法的不同之处在于加入了土壤调理剂以提供促进微生物生长和石油生物降解的营养元素，使天然微生物降解石油烃类，从而达到生物修复的目的。这个过程对去除高浓度石油类污染物是最有效的。加入的物质或调理剂可以是干草、刈割草、树叶、木屑、麦秆、锯屑或肥料。加入土壤调理剂的目的是为了提高土壤的渗透性、增加氧的传输、改善土壤质地以及为快速建立一个大的微生物种群提供能源。在堆肥过程中微生物既消耗土壤调理剂又消耗石油产品。Gupta 等<sup>[26]</sup>对汽油污染土壤堆肥处理的研究表明，动物粪草 (Poultry litter) 中存在大量能降解石油烃的微生物，它既能提供无机、有机营养物质，又能起到接种的作用。石油污染土壤湿度、营养和土壤修复剂的正确混合及湿度和营养的平衡是建立满足能源需求和最优化生物降解效率的关键。叶小梅<sup>[27]</sup>研究了添加不同调理剂及不同量的调理剂对污泥中石油生物降

解的影响。试验结果表明：添加调理剂可以显著地提高石油生物降解速率；几种调理剂之间比较，以木屑最好，蛭石次之，稻草再次之。添加 6% 的调理剂，在室温下培养 120 天，污泥中石油残留量减少最多。

#### 2.2.4 预制床法 (Prepared bed bioremediation)

在现场处理石油污染土壤的过程中，土地耕作法处理的最大缺陷是污染物可能从处理区迁移。预制床的设计可以使污染物的迁移量减至最小，因为它具有滤液收集和控制排放系统。预制床的底面为渗透性低的物质，如高密度的聚乙烯或黏土。将污染土壤转移到预制床上，通过施肥、灌溉、调节 pH，有时还加入微生物和表面活性剂，使其最适合污染物的降解。与同一区域的原位处理技术相比，预制床处理对 3 环和 3 环以上的多环芳烃的降解率明显提高。

**2.2.5 泥浆法 (Slurry-phase bioremediation)** 泥浆法也称生物反应器法，是将污染土壤置于一专门的反应器中处理的方法。生物反应器处理的过程为：将挖出的石油污染土壤移到反应器内，加入 3~9 倍的水混合，使其呈泥浆状，同时加入适量的营养盐、表面活性剂，并鼓入空气、剧烈搅拌使微生物与污染物充分接触和增加氧气浓度。为了提高降解速率，常在反应器先前处理的土壤中分离出已被驯化的微生物，并将其加入到准备处理的土壤中。含油土壤经处理后，液体部分可排入处置井（坑、池）或另作他用（如回用），固体部分可施用于农田。生物反应器法也可用于石油工业废弃物的预处理，以减少烃类含量，然后进行其他处理。处理后的土壤与水分分离后，经脱水处理再运回原地。处理后的出水视水质情况，直接排放或送入污水处理厂继续处理。反应装置不仅包括各种可以拖动的小型反应器，也可以是经过防渗处理的池塘。由于以水相为主要处理介质，可使土壤与微生物及其他添加物如营养盐、表面活性剂等彻底混合，且避免了复杂而不利的自然环境变化，各种环境条件如 pH、温度、氧化还原电位、氧气的量、营养物浓度、盐度等便于控制在最佳状态。因此，烃类物质的生物降解速度较之其他生物处理过程更快。

### 3 石油污染土壤生物修复展望

石油污染土壤生物修复是利用土壤中的土著微生物或外加石油降解菌降解土壤中的石油类污染物。与传统污染土壤修复技术相比，生物修复石油污染土壤技术是最经济的一种手段，且其最终产物

是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等物质，因此该技术还具有环境友好、不产生二次污染的特点。但作为一种新型技术在大范围推广使用时还面临相当多的问题。例如：石油类污染物水溶性差、石油污染土壤田间持水率低等因素影响微生物降解效率；污染物种类与环境因素对修复效率的影响；生物修复周期较长；往往不能彻底降解土壤中的污染物等。因此，利用生物修复石油污染土壤还要在如下方面开展研究：

(1) 筛选具有产生表面活性剂能力的石油降解菌，通过环境条件的优化增强该菌在土壤中的活性和产表面活性剂的能力，从而增强污染土壤中石油的生物可利用性。

(2) 研究外加石油降解菌同土著微生物的竞争机制和引进微生物的退化原因，探讨引进微生物同土著微生物稳定共存的环境条件。

(3) 通过基因工程的手段培育高效降解菌属，以加速污染物的转化；深入研究石油污染土壤的植物与微生物协同修复原理，特别是植物根际对石油污染土壤微生物以及修复作用的影响。

(4) 针对石油污染土壤的实际情况，选用合适的调理剂改善土壤的理化性质，特别是在修复含油量较高的油泥时，考虑生物修复技术与物理化学处理方法相结合的集成技术体系。

(5) 建立有关石油污染土壤生物修复技术应用的统一评价程序和标准。

总之，这些问题的解决需要结合植物学、微生物学、生态学、环境化学、遗传学、土壤学和基因工程技术等多学科的知识，着重做好以下工作：高效微生物菌株的筛选、构建以及环境条件的优化；物化处理与生物修复相结合，促进石油污染土壤生物修复研究和技术应用。

#### 参考文献：

- [1] Kosaric N. Biosurfactants for soil bioremediation. *Food Technol. Biotechnol.*, 2001, 39(4): 295-304
- [2] Banat IM. Characterization of biosurfactants and their use in pollution removal — State of the Art. *Acta Biotechnologica*, 1995, 15 (3): 251-267
- [3] Chaineau CH, Morel JL, Oudot J. Bioremediation and biodegradation: biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29 (2): 569-578
- [4] 王家玲. 环境微生物学. 北京: 高等教育出版社, 2003: 179-180

- [5] Atlas RM. Microbial degradation of petroleum hydrofungi: An environmental perspective. *Microbiol. Rev.*, 1981, 45: 180-209
- [6] Atlas RM. *Petroleum Microbiology*. New York: MacMillan Publishing Company, 1984: 435-473
- [7] Marshall KC. *Advances in Microbial Ecology*. New York: Plenum Press, 1992: 287-338
- [8] Sarkhoh NA, Ghannoum MA, Ibrahim AS. Crude oil and hydrocarbon degrading strains of *Rhodococcus*: *Rhodococcus* strains isolated from soil and marine environments in Kuwait. *Environ. Pollut.*, 1990, 65: 1-18
- [9] 夏北成. 污染环境生物降解. 北京: 化学工业出版社, 2002: 187
- [10] Bouwer EJ, Zehnder AJ. Bioremediation of organic compounds—putting microbial metabolism to work. *Trends in biotechnology*, 1993, 11 (8): 360-367
- [11] Chakrabarty AM. Microorganisms having multiple compatible degradative energy-generating plasmids and preparation thereof: US, 4259444. 1981-03-31
- [12] Graham DW, Smith VH, Law KP. Effects of nitrogen and phosphorous supply on hexadecane biodegradation in soil systems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999: 111 (1/4): 1-18
- [13] 任南琪, 马放. 污染控制微生物学原理与应用. 北京: 化学工业出版社, 2003: 235
- [14] 沈同, 王镜岩. 生物化学(上册). 北京: 高等教育出版社, 1990: 255
- [15] Ding KQ, Luo YM, Sun TH, Li PJ. Bioremediation of soil contaminated with petroleum using forced-aeration composting. *Pedosphere*, 2002, 12 (2): 145-150
- [16] 丁克强, 骆永明, 孙铁珩, 李培军. 通气对石油污染土壤生物修复的影响. *土壤*, 2001, 33 (4): 185-188
- [17] Ururahy AFP, Marins MDM, Vital RL, Gabardo IT, Pereira Jr. N. Effect of aeration on biodegradation of petroleum waste. *Rev. Microbiol.*, 1998, 29 (4): 254-258
- [18] 张从, 夏立江. 污染土壤生物修复技术. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 274
- [19] 张天胜. 生物表面活性剂及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2005: 268-280
- [20] 张锡辉. 土壤结合态稠环芳烃的生物降解. *农业环境保护*, 2001, 20 (1): 15-18
- [21] Oberbremer A, Muller-Hurtig R, Wagner F. Effect of the addition of microbial surfactants on hydrocarbon degradation in soil population in a stirred reactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1990, 32 (4): 485-489
- [22] Jawitz JW, Annable MD, Rao PSC. Field implementation of a Winsor Type I surfactant/alcohol mixture for in situ solubilization of a complex NAPL as a single-phase microemulsion. *Environ.Sci.Technol.*, 1998, 32 (4): 523-530
- [23] 刘五星, 骆永明, 滕应, 李振高, 吴龙华. 石油污染土壤的生态风险评价和生物修复 I. 一株具有乳化能力的石油降解菌分离与鉴定. *土壤学报*, 2006, 43(3): 461-466
- [24] Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). In-Situ biological treatment: Remediation technologies screening matrix and reference guide. 4th Ver. [2004-04-07] [www.frtr.gov/matrix2/section4/4\\_1.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html)
- [25] USEPA. Region 6, Record of decision: TEX TIN corporation superfund site operable unit, no.3-residential property. La Marque, Galveston County, Texas, 2000
- [26] Gupta G, Tao J. Bioremediation of gasoline contaminated soil using poultry litter. *J. Environ. Health.*, 1996 (9): 2395-2407
- [27] 叶小梅. 调理剂对污泥中石油降解速率的影响. *环境导报*, 1999(2): 21-22

## Advances in Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil

LIU Wu-xing<sup>1,2,3</sup>, LUO Yong-ming<sup>1,2,3</sup>, TENG Ying<sup>1,2</sup>, LI Zhen-gao<sup>1,2</sup>, WU Long-hua<sup>1,2</sup>,

(1 *Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *State Key Laboratory of soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;*

3 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Bioremediation of petroleum contaminated soil is an environmentally sound and economical way though it has some limitations. This paper reviews factors influencing bioremediation efficiency and application of bioremediation technologies to petroleum contaminated soil. Accordingly bioremediation research and development in the future prospects.

**Key words:** Petroleum contamination, Soil, Bioremediation, Influencing factor