



污染土壤
生物修复丛书

WUWUHUANJING
WULUWUHUANJING

石油烃污染土壤的 微生物修复技术及应用

SHIYOUTING WURAN TURANG DE
WEISHENGWU XIUFU JISHU JI
YINGYONG

王红旗 花菲 杨艳 李艺 等著

中国环境出版社

《石油烃污染土壤生物修复丛书》系列

国家自然科学基金资助项目（项目编号：40472129，40772149，41072177，41372232）

国家高技术研究发展计划（“863”计划）资助项目（项目编号：2007AA06Z308）

石油烃污染土壤的微生物修复技术及应用

王红旗 花菲 杨艳 李艺 等著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

石油烃污染土壤的微生物修复技术及应用/王红旗等著. —北京: 中国环境出版社, 2015.9

(污染土壤生物修复丛书)

ISBN 978-7-5111-2214-8

I. ①石… II. ①王… III. ①石油污染—污染土壤—生物处理 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 010459 号



出版人 王新程
责任编辑 殷玉婷 沈建
责任校对 尹芳
封面设计 金喆

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67187041 (学术著作图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 9 月第 1 版
印 次 2015 年 9 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 22
字 数 400 千字
定 价 69.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

内容简介

《石油烃污染土壤的微生物修复技术及应用》为北京师范大学王红旗教授编写系列专著《石油烃污染土壤生物修复丛书》之一。全书共分为9章。第1章主要介绍了国外石油烃污染的来源、污染特征以及石油烃污染土壤修复技术。第2章主要介绍了石油烃类物质的微生物降解机制。第3章介绍了石油烃降解菌的筛选方法包括原油和柴油为不同底物时高效降解菌的筛选和鉴定。第4章主要介绍了柴油污染土壤的微生物降解机制。第5章介绍了石油烃类污染物降解菌的分类鉴定方法以及土壤中石油烃降解菌的多样性分析方法。第6章主要介绍了常温和低温条件下多环芳烃降解菌的筛选方法。第7章介绍了本课题组发明的耐低温微生物固定化方法及对石油烃类污染物降解效果的评价。第8章主要介绍了石油污染土壤的微生物降解促进机制。第9章主要介绍了石油烃污染土壤作物-耐低温菌协同修复过程中根际区微生态环境的变化。附录介绍了研究石油烃降解菌筛选、石油烃生物降解、微生物固定化以及微生物修复石油烃污染土壤等方面的实验方法。

本书可供环境保护、资源管理、生物技术领域的科研人员参考，也可为大专院校环境科学与工程专业的教师和学生使用。

《石油烃污染土壤生物修复丛书》出版说明

20 世纪初，全世界开始大规模地开采石油。随着经济与社会的发展，石油已成为人类最主要的能源之一，当今世界的石油总产量，每年约有 22 亿 t，其中 17.5 亿 t 是由陆地油田生产的。石油开采以及石油产品的生产与使用，皆会引起污染，给生态与环境带来危害。目前，石油污染已经成为世界各国普遍关注的问题。

我国作为石油生产大国，所生产的原油大部分出自陆上油田。在陆地上进行石油生产时，大量生产设施分布于油田内，这些设施由于各种原因，会把原油直接或者间接泄于油区地面上，这些石油烃类物质进入土壤环境后，会发生一系列的物理、化学和生化作用，不可避免地对环境造成污染。

目前，针对土壤的石油烃污染，国内外学者开展了大量的研究，我国也在该研究领域取得了大量的进展。为了更全面、更系统地展示相关研究成果，全面介绍石油烃污染土壤的生物修复技术及相关机理，北京师范大学水科学研究院策划出版《石油烃污染土壤生物修复丛书》。

丛书包括《石油烃污染土壤的微生物修复技术及应用》《污染土壤植物-微生物联合修复技术及应用》和《土壤微生物对石油烃的吸附摄取与跨膜运输》三部专著。从石油烃污染土壤生物修复的基础理论方面以及实际应用方面出发，结合相关的研究成果，力求展示本研究领域最

新的研究进展及发展动态。丛书涵盖环境科学、微生物学、地球科学等多个学科领域的优秀国家级科研项目的成果，对石油烃污染土壤的生物修复的技术、方法、机理及实际工程应用进行了全面的阐述，具有重要的理论和实践意义。

我们相信，丛书的出版，会对广大研究者洞悉石油烃污染土壤的生物修复技术和机理、了解该领域的发展方向及发展趋势发挥积极作用，对应用生物技术净化土壤石油烃类污染物的研究和发展产生巨大的推动作用。

王红旗

2014年10月

前 言

石油勘探与开发过程中的钻井、井下作业和采油等环节以及井喷、泄漏等偶然事故都会带来土壤的污染。据资料,各油田每作业一次遗留于井场的落地油约为几十到几百千克,单井落地原油污染面积可达 $0.5\sim 2.1\text{ m}^2$,落地泥浆污染面积大约 20 m^2 ,一次井喷造成的原油覆盖面积达 $3\ 000\sim 4\ 000\text{ m}^2$ 。尤其是石油开采过程产生的落地原油,已成为土壤重要的污染源。对于目前国内土壤污染的具体情况,并没有明确的官方数据。20世纪80年代以来,世界上许多国家特别是发达国家均制定并开展了污染土壤治理与修复计划,因此也形成了一个新兴的土壤修复行业。而我国的土壤治理与修复工作才刚刚起步。2012年3月出台的《“十二五”规划纲要》将节能环保列为七大战略性新兴产业之首。其中,土壤修复是在环保产业的重点发展之列并明确提出要强化土壤污染防治监督管理。

目前,国际上环境生物修复技术的核心是微生物技术,即利用土著微生物直接降解污染物或向处理系统投加外源降解微生物(或降解菌、降解酶和降解遗传信息等),优化微生物的群落结构,提高降解活性,加速污染环境中污染物的降解反应。它是生物修复处理石油污染的重要方法。与物理、化学修复污染土壤技术相比,它具有成本低,不破坏土壤环境,无二次污染,处理效果好,操作简单等特点,是一种高效、经济和生态可承受的清洁技术。早在20世纪70年代,为了解决输油管线和储油罐发生故障漏油和溢油时土壤被石油污染的问题,美国埃索研究和工程公司就已经开始寻找清洁的生物解决方法,并且其实验室研究找到一种有效的细菌播种法,开了生物修复石油污染土壤先河。80年代以来,污染土壤的生物修复技术越来越引起人们的关注,生物修复技术也取得了很大进步,正在逐渐成熟。但是在我国,相对于物理化学修复技术,微生物修复技术多处于实验室研究阶段,还未大规模应用于污染场地修复中。本书希望能引导学生在学习石油烃污染土壤微生物修复技术的基础理论的同时,从实验设计开始到实验结果分析,逐步掌握石油烃污染土壤微生物修复技术的基本原理和方法。

参加本书编写的人员有:前言,王红旗;第1章,王红旗、花菲、李艺、

赵一村; 第2章, 花菲、王红旗、李艺、杨艳; 第3章, 王红旗、花菲、齐永强、赵一村、李艺、张小啸、陈延君; 第4章, 花菲、陆泗进、王红旗、李艺、熊樱、郝旭光、李晓斌; 第5章, 熊樱、王红旗、郝旭光、李晓斌、花菲、李艺、杨艳; 第6章, 杨艳、李晓斌、郝旭光、王红旗、花菲、李艺、熊樱; 第7章, 王璇、王红旗、李艺、花菲、杨艳; 第8章, 李艺、花菲、王红旗、陈延君、杨艳、郝旭光; 第9章, 王红旗、熊樱、花菲、王璇、王倩、杨艳; 附录, 花菲、王红旗、李艺、杨艳、熊樱、郝旭光、李晓斌、王璇、王倩。王红旗、花菲负责全书的统稿。

如前所述, 本书内容包含了作者以及课题组学生近年来的研究成果, 这些研究工作先后得到了国家自然科学基金“包气带微生物对多环芳烃的吸附摄取、运输与跨膜分配研究”(41072177), 国家自然科学基金“包气带微生物对多环芳烃的跨膜运输及膜蛋白传输方式的研究”(41372232), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“低温环境石油烃污染土壤的作物-微生物协同修复技术研究”(2007AA06Z308), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)重大项目“滨海湿地地区石油采场及周边污染土壤修复技术与示范”(2013AA06A205), 中国博士后科学基金“北方滨海湿地油污土壤的植物-微生物协同修复技术研究”的支持, 在此表示衷心的感谢。

本书可供环境保护、资源管理、生物技术领域的科研人员参考, 也可为大专院校环境科学与工程专业的教师和学生使用。各校在参考使用本教材时可根据自身的条件进行实验或示范。

国内外在石油烃污染土壤的微生物修复技术领域的研究和发展非常迅速, 因此本书中仍有不少问题的研究不够深入。此外, 由于编者水平有限, 且所涉及内容广泛, 参考资料众多, 本书难免存在缺点和疏漏, 恳请使用本书的师生、读者或专家同行给予批评指正, 以求不断完善和提高。

王红旗

2015年6月

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 土壤石油污染现状及危害.....	1
1.2 土壤石油污染的来源.....	3
1.3 污染土壤微生物修复概述.....	6
1.4 石油烃污染土壤微生物修复研究进展.....	11
第 2 章 污染土壤的微生物降解理论.....	16
2.1 降解石油的微生物.....	16
2.2 不同石油烃组分的生物降解路径.....	18
2.3 土壤中石油污染物微生物降解及其降解去向.....	22
第 3 章 高效石油降解菌的筛选.....	28
3.1 土壤环境中石油降解的生态因素.....	28
3.2 实例：柴油降解菌株的筛选分离.....	31
3.3 实例：高效石油烃降解菌 <i>Bacillus</i> sp. DG24 的筛选.....	39
第 4 章 土壤微生物降解柴油的强化技术研究.....	51
4.1 高效柴油降解菌群构建.....	52
4.2 菌群对土壤中柴油的降解研究.....	61
4.3 表面活性剂增强菌株降解柴油的研究.....	64
4.4 小结.....	78

第 5 章 石油烃降解菌的分类鉴定及多样性分析.....	79
5.1 石油污染土壤微生物多样性的分子生态学.....	79
5.2 可降解石油烃类污染物的微生物研究.....	81
5.3 案例：不同温度条件下石油降解功能菌的鉴定及组成特征.....	82
第 6 章 高分子量多环芳烃微生物修复.....	99
6.1 多环芳烃污染土壤的微生物修复技术.....	99
6.2 高分子量 PAHs 降解菌的筛选与分离.....	103
6.3 多环芳烃降解菌的分子生态学研究.....	108
6.4 案例：高分子量 PAHs 降解菌的降解性能研究及菌群构建.....	113
6.5 案例：高分子量 PAHs 适宜降解土壤环境条件分析.....	116
第 7 章 石油烃污染土壤的固定化微生物修复技术.....	128
7.1 固定化微生物技术及其在石油污染土壤修复中的应用.....	128
7.2 石油污染土壤微生物固定化技术.....	132
7.3 微生物固定化载体配比优化设计.....	135
7.4 石油污染土壤微生物固定化过程参数优化.....	151
7.5 案例：含碳酸钙的石油污染土壤修复用固定化微球的制法及应用.....	159
7.6 小结.....	175
第 8 章 石油污染土壤的微生物降解促进机制.....	178
8.1 石油烃污染土壤微生物修复的影响因素.....	178
8.2 营养物质的添加及量的配比.....	180
8.3 表面活性剂对生物降解的强化作用.....	180
8.4 添加电子受体促进生物降解.....	181
8.5 共代谢.....	182
8.6 种植植物对微生物降解的促进作用.....	183
8.7 高效石油降解菌群的构建.....	190
8.8 高效微生物制剂及其辅助制剂的研究.....	191
8.9 案例：正十六烷酶促降解性的研究.....	193

第 9 章 石油污染土壤耐低温菌根际微生态变化研究.....	200
9.1 微生物根际修复实验设计.....	200
9.2 根际外源菌修复体系中石油烃的降解规律研究.....	203
9.3 根际微生态调节过程中土壤酶活性的变化规律.....	212
9.4 根际微生态调节过程中微生物功能多样性的变化.....	224
9.5 根际微生态调节过程中微生物遗传多样性的变化.....	236
9.6 小结.....	276
参考文献.....	278
附 录.....	302
附录 1 实验常用培养基配制方法.....	302
附录 2 石油烃降解及降解产物分析方法.....	305
附录 3 柴油降解菌的筛选和鉴定.....	310
附录 4 石油烃降解菌的鉴定及组成特征分析.....	318
附录 5 耐低温石油烃降解菌的降解性能分析.....	322
附录 6 高效 PAHs 降解菌的筛选所用标准液.....	324
附录 7 固定化微生物石油烃基本性能检验实验设计.....	327
附录 8 正十六烷酶促降解性研究方法.....	329
附录 9 土壤相关指标的分析方法.....	330

第 1 章

绪 论

1.1 土壤石油污染现状及危害

近 20 年来,工农业的迅速发展使人们对石油等原材料和石油产品的需求量迅速增加。然而,社会经济的发展也导致石油污染区域的逐步扩大。在石油的运输、炼制加工和使用过程中,由于事故、不正常操作及检修等原因,导致石油的溢出和排放(戴竹青和申开莲,2000)。例如,储油库、加油站中成品油在储存、装卸、向车辆加油、运输、零售过程中的泄漏以及油罐和输油管线渗漏;石油化工厂、炼油厂油槽的漏油事件以及在生产装置检修中的漏油;石油化工、炼油厂、汽车修理行业所排放的废油;污水灌溉;在石油炼制加工过程中排放的含油固体废弃物的不合理堆置以及含油废水的大量排放;油罐车在加油站卸油时会产生大量的油气挥发物等。

特别是近 10 年来,随着国家对经营油品市场的放开,我国加油站的数量高速增长,仅在北京就有加油站 1 000 多个(赵章元,2004),见图 1-1。一些加油站存在偷工减料、使用粗制滥造的油罐以及防腐质量差等问题。如一些加油站在施工时偷工减料,只用 4 mm 板制作地下油罐;有的防腐处理达不到标准或只刷防锈漆,这些都留下渗(泄)漏隐患。而且大部分加油站的地下贮油罐为“直埋式”,油罐周围未做任何防渗(泄)漏基础设施。许多加油站关门停业后其地下油罐一般没有运走而继续留在地下,随着时间的推移,由于金属材料的锈蚀这些地下油罐出现不同程度的渗(泄)漏。这些都会致使大量的汽油、柴油直接流进或渗入地下造成污染。近年来,在北京曾发生过几起严重的加油站漏油事故。例如,1995 年在安家楼加油站发生的漏油事故造成了附近自来水厂停止运行几个月;2004 年在北京东六环加油站发生的一起柴油泄漏事故造成了 107 m 的路面和附近排水沟被柴油污染。

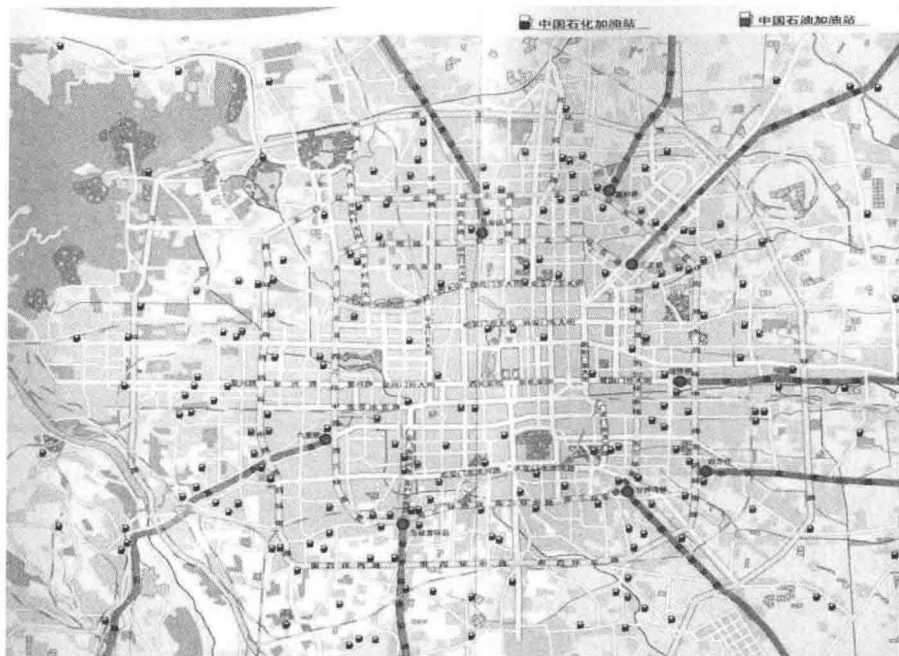


图 1-1 北京市主要加油站分布

还有一些研究表明，除了海洋污染，近海岸石油污染，油田及加油站附近土壤受到石油污染外，在寒冷的北极地区的土壤也受到了石油污染。这是由于在南极大陆和北极林线带以北地区，人类活动需要石油等能源来进行供暖、仪器的操作，飞机和船舶的运行。此外，由于石油泄漏以及过去的废物清理工程，极地土壤受石油污染情况开始发生，尤其是在南极科学站附近地区、军事基地和北极石油开采地区（Alslabie 等，2004；Whyte 等，1999）。

排入土壤中的柴油，会破坏土壤结构，被土壤粒子吸附，堵塞土壤的孔隙，影响土壤的通透性；对植物的危害主要是损害植物的根部，阻碍根的呼吸与吸收，最终导致植物死亡；柴油也会通过呼吸、皮肤接触、饮食摄入等方式进入人体，影响肝、肾、心血管系统等，造成人体损伤（戴竹青和申开莲，2000）。如何尽快修复土壤中柴油污染物亟待解决，也日益引起人们的关注和重视。

我国大部分油田区和石油化工区土壤均受到了石油及其炼化、裂解产物的污染。华北油田附近的很多农田由于原油污染而无法耕种，且每年都要支付大量资金作为对农民的赔偿。大庆油田在 20 多年的开采过程中造成大面积土壤和水体的

石油污染。对油田区石油污染状况的调查表明,大庆油田石油开发区污染土壤面积超过 75%,农业开发区污染面积超过 20% (陈嫣等, 2005)。据统计,我国现有的 1 亿 hm^2 耕地中,有近 2 000 万 hm^2 受到不同程度的污染,每年由于土壤污染造成的粮食减产约 250 万 t。另外,对大庆油田贴不贴泡及其周围潜水水质的测定结果表明,由于有机污染物分解缓慢,造成地下水体污染问题显著。水体在上游 500 m 范围内为 V 类地下水,在 1 500 m 监测点地下水中的含油量仍为 IV 类标准 (贾建丽, 2005)。

石油进入土壤后所产生的危害主要体现在几个方面:① 石油的密度小、黏着力强且乳化能力低,故石油在土壤中容易与土粒粘连,影响土壤的通透性,降低土壤质量。② 积聚在土壤中的石油烃,大部分是高分子组分,会附着在植物的根表面,形成黏膜,阻碍根系的呼吸与吸收,引起根系腐烂,影响农作物的根系生长,也会引起土壤微生物群落、微生物区系的变化。③ 石油中富含的反应基能与无机氮、磷结合并限制硝化作用和脱磷酸作用,从而使土壤有效磷、氮的含量减少,影响作物的营养吸收。④ 石油中所含的多环芳烃等化学物质具有致癌、致畸、致突变等作用,它们能通过食物链在动植物体内逐级富集,进入人体后,能溶解细胞膜和干扰酶系统,引起肝、肾等内脏病变,危及人类健康。⑤ 石油烃中不易被土壤吸附的部分能渗入地下并污染地下水,造成水源污染,构成对人类生存环境多个层面上的不良胁迫。

1.2 土壤石油污染的来源

石油是一种含有多种烃类(正烷烃、支链烷烃、芳烃、脂环烃)及少量其他有机物(硫化物、氮化物、环烷酸类等)的复杂混合物。石油含有多种有害物质,其中苯系物 BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)和多环芳烃 PAHs(菲、蒽、芘等)具有显著的“三致”(致癌、致突变、致畸)效应。石油组分中,属于环境优先控制和美国协议法令规定的污染物多于 30 种。土壤石油污染源分布广泛,类型繁多,主要包括以下几个方面。

1.2.1 溢油和泄漏

石油及其产品在开采、运输和使用过程中溢油和泄漏现象时有发生,当这些现象发生在陆地上时,大量油类便直接进入土壤,给土壤带来严重的污染。一般

开采时落地原油污染物平面上主要以放射状分布在以油井为中心的一定范围内，据单井调查显示：油井附近浓度最大，离井越远浓度越小，60~70 m 以外石油污染就很小了，而纵向上石油对土壤的初步污染则多集中于地表下 20 cm 左右的表层。由于石油的黏度大，黏滞性强，在短时间内形成小范围的高浓度污染。污染形态往往是石油浓度大大超过土壤颗粒的吸附量，过多的石油就存在于土壤空隙中。

1.2.2 含油固体废弃物的堆放

这类物质主要包括含油岩屑、含油泥浆等。这些废弃物往往堆积在厂矿区周围。它们的特点是在进入地表土壤环境前就已经被固体物质所吸附或夹带。进入土壤环境后，它们污染土壤的方式是含油固体物质与土壤颗粒的掺混，使土壤中石油类含量比非堆矿渣区高出数倍。

1.2.3 含油废水的污染

含油废水中的原油以乳化的形态分散在水中，含油浓度可高达 7 000 mg/L。高浓度的含油废水排至井场地面后，迅速下渗。下渗过程中，极细的分散油粒不断以扩散、沉淀、截留等方式与土壤颗粒接触，由于石油类物质的疏水性，这些接触的发生往往造成土壤颗粒对油粒的吸附。在水动力作用下，这种污染深度一般较大。如果当地浅层地下水位较高，污染土层深度达到了浅层地下水位时，还会造成地下水的石油类污染。

1.2.4 大气污染

石油冶炼、石油化工厂的生产过程中，都有部分石油中可挥发的成分进入大气，这些成分可与大气中颗粒物结合成降尘进入土壤。此外，各种使用汽油、柴油的车辆在行进中排出的废气中也含有大量未燃烧的石油成分，这些成分也会以沉降物的形式进入土壤。因此，公路两侧土壤中往往含有较多的石油污染物。

1.2.5 药剂施用

油类经常作为各种杀虫剂、防腐剂 and 除草剂的溶剂或乳化剂，当使用这些农药时，油类就同时进入土壤，增加了土壤中的石油类含量。

1.2.6 石油烃组分的特征

汽油和柴油是石油制品中应用最广的两种，其主要成分为饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质。柴油中芳香烃含量较大且毒性最大，尤其是多环芳烃（PAHs）的毒性更大，柴油中的芳香烃主要是甲苯、萘、1-乙基萘、2,5-二乙基萘、菲、蒽和芘。汽油中的芳香烃主要是甲苯和萘（Adam 等，2002）。柴油中芳香烃的含量比汽油中大，并且汽油的挥发性比柴油强。原油是由各种不同的碳氢化合物所组成的复杂混合物，含有 3 类主要烃：烷烃、环烷烃和芳香烃；石油产品包括汽油、煤油、柴油、润滑油等及各类油的分解产物。石油污染物中芳香烃类物质对人及动物的毒性较大，尤其是多环和三环为代表的芳烃。多环芳烃类物质可通过呼吸、皮肤接触、饮食摄入方式进入人或动物体内，影响肝、肾等器官的正常功能，甚至引起癌变。石油中的苯、甲苯、酚类等物质，如果经较长时间较高浓度接触，会引起恶心、头疼、眩晕等症状。石油污染物对植物的危害，低分子烃比高分子烃强，主要是因为它能渗透到植物的组织内部，破坏正常的生理机能。高分子烃可能因分子较大而穿透能力差，但高分子烃易在植物表面形成一层薄膜，阻塞植物气孔，影响植物的蒸腾和呼吸作用。在很多已作过石油研究的土壤上，表明不同作物受油害的影响是不同的。水稻耐油污的能力较小麦好。地衣、苔藓类植物对石油污染物的影响极为敏感，因此，它们常用作石油污染物的指示作物（高吉喜和熊严军，1994；高拯民，1986）。

1.2.7 石油污染物对土壤理化性质的影响

排入土壤中的柴油，会破坏土壤结构，被土壤粒子吸附，堵塞土壤的孔隙，影响土壤的通透性；对植物的危害是损害植物的根部，阻碍根的呼吸与吸收，最终导致植物死亡；柴油也会通过呼吸、皮肤接触、饮食摄入等方式进入人体，影响肝、肾、心血管系统等，造成人体损伤（任磊和黄廷林，2000）。如何尽快修复土壤中柴油污染物亟待解决，也日益引起人们的关注和重视。

20 世纪 70 年代以来，国内外一些学者对石油中化合物（特别是环芳香族化合物）进行了大量研究。Weber 等（1992）研究了疏水性有机物在自然沉积物和悬浮物吸附的热力学和动力学模型。Grathwohl 和 Kleinedam（1995）以及 Grathwohl 和 Reinhard（1993）通过研究含水介质中多环芳香族化合物的释放规律，建立起平衡和非平衡模型，并指出有机污染含水介质的恢复是一个非常缓慢的过程，常

常需几年或几十年。Larsen 等（1992）等通过土柱试验测定 3 种含水介质中 12 种石油化合物的突破曲线，进而确定了它们的阻滞系数。

高拯民（1986）分别采用黏土、高岭土、煤灰、膨润土、活性炭处理含油污水进行吸附试验，试验结果表明，除油能力是：活性炭>高岭土>棕壤。何耀武等（1995）研究多环芳香烃类化合物在土壤上的吸附，结果表明，荧蒽和菲在土壤上的吸附量与土壤有机质含量之间是显著相关。赵文谦和黄勤生（1997）研究了不同水动力条件下泥沙对乳化油的吸附，并建立了吸附的数学模式，证明泥沙对乳化油的吸附速度很快，可以不考虑其动力过程而直接分析吸附量的变化规律，平衡吸附量和水流条件无关，从而可以把室内试验直接推广到一般的水动力条件。李崇明和赵文谦（1997）以煤油、柴油和机油为例，研究了泥沙对乳化油的吸附和解吸规律，并进一步分析了泥沙粒径和含盐量对吸附作用的影响。郑西来等（1998）测定了含水介质对溶解油的吸附等温线、阻滞系数，并应用于地下系统石油污染的分析、评价和预测。试验结果表明，低浓度的石油污染物在含水介质中的吸附符合直线型朗格缪尔方程，是一种理想的物理吸附。王洪涛等（2000）对石油污染物在土壤中运移的数值模拟进行了初探，分析了石油污染在土壤中运移的规律，并建立了非饱和带污染物迁移地下水运动模型。

1.3 污染土壤微生物修复概述

石油污染土壤的微生物修复是指利用污染土壤中自然存在的土著降解菌或接种高效的外源降解菌（以下简称外源菌），在适宜环境条件下，促进或强化微生物代谢功能，从而达到降低有毒污染物活性或将其降解成无毒物质的生物修复技术（滕应等，2008）。与物理化学或植物修复技术相比，微生物修复技术具有：① 经过修复的土壤环境的物理、化学和生物学性质基本保持不变，甚至会优于原有土壤的性质；② 最大限度地降低污染物的浓度；③ 处理形式多样，可就地处理；④ 环境影响小；⑤ 修复成本费用低；⑥ 应用限制较小等优点。

存在于土壤环境中的天然微生物种群对石油烃的降解作用是石油烃和其他烃类污染物从土壤环境中消除的基本途径之一（Balba 等，1998）。微生物利用生物自我调控机制以及对污染物的综合净化功能处理土壤中的石油烃类污染物，使它们在生物的新陈代谢过程中得到较为彻底的转化和降解，而且最终产物是 CO_2 和水，不会产生二次污染，是应用前景最为乐观的土壤石油污染物处理方法（黄廷