



污染土壤
生物修复丛书

WURAN
TUOBU SHIJIANG
SHENGWU XIUFU CONGSHU

土壤微生物对石油烃的 吸附摄取与跨膜运输

TURANG WEISHENGWU DUI
SHIYOUTING DE XIFU SHEQU YU
KUAMO YUNSHU

王红旗 李艺 花菲 杨艳 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）

土壤微生物对石油烃的吸附摄取 与跨膜运输

王红旗 李 艺 花 菲 杨 艳 等著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤微生物对石油烃的吸附摄取与跨膜运输/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 978-7-5111-2127-1

I. ①土… II. ①王… III. ①土壤微生物—应用—石油工业—土壤污染—污染防治 IV. ①X74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 256363 号

出版人
责任编辑
责任校对
封面设计



王新程
殷玉婷
尹
金晶

藏书

lib. ahu.edu.cn

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 17.75
字 数 350 千字
定 价 56.00 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

本书的主要内容分为 8 章。第 1 章为绪论，主要介绍了土壤石油烃的污染现状，总体阐述了微生物对石油烃类污染物的吸附摄取方式及跨膜运输机制；第 2 章主要讲述生物表面活性剂的分泌在微生物对石油烃类污染物进行吸附摄取过程中所起到的作用，同时介绍了生物表面活性剂的提取与鉴定方法；第 3 章以假单胞菌 DG17 和红球菌 BAP-1 作为研究靶细胞，分析了它们对原油、正十八烷以及荧蒹的吸附摄取方式；第 4 章以假单胞菌 DG17 和红球菌 BAP-1 作为研究靶细胞，分析了它们对正十八烷和荧蒹的跨膜运输方式；第 5 章以蜡样芽孢杆菌 DQ01 和芽孢杆菌 DQ02 以及假单胞菌 DG17 和红球菌 BAP-1 作为研究靶细胞，在不同底物浓度、接菌量等条件下，研究了它们对正十六烷以及正十八烷和荧蒹的跨膜运输规律；第 6 章分析了微生物对石油烃类污染物的代谢方式，介绍了多环芳烃降解菌群的构建以及对正十六烷的酶促降解过程进行了研究；第 7 章分析了微生物对石油烃类污染物进行跨膜运输和生物降解的动力学过程；第 8 章研究了环境因素的变化对微生物运输和降解石油烃类污染物的影响；在附录中介绍了实验过程所用到的主要分析方法和分析手段。

本书深入研究和分析了土壤微生物对石油烃类污染物的吸附摄取、代谢及跨膜运输方式和机理，涵盖了环境科学、微生物学、分子生物学等相关领域的知识，是一本很好的工具书和参考书，可以作为相关领域专家、学者以及研究生的参考用书。

《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

《土壤微生物对石油烃的吸附摄取与及跨膜运输》是《石油烃污染土壤生物修复丛书》系列的第三册。本书从目前土壤石油烃污染的现状出发,以从石油烃污染土壤中分离出的微生物:假单胞菌 DG17、红球菌 BAP-1、蜡样芽孢杆菌 DQ01 以及芽孢杆菌 DQ02 作为研究靶细胞,深入研究和分析了这些微生物对石油烃类污染物的吸附摄取、代谢及跨膜运输方式和机理;同时研究了微生物所分泌的表面活性物质在吸附摄取过程中所起到的作用;另外,分析了环境因素的变化对微生物运输和降解石油烃类污染物的影响;并且分析了微生物对石油烃类污染物进行跨膜运输和生物降解的动力学过程。

本书深入研究和分析了土壤微生物对石油烃类污染物的吸附摄取、代谢及跨膜运输方式和机理,涵盖了环境科学、微生物学、分子生物学等相关领域的知识,是一本很好的工具书和参考书,可以作为相关领域专家、学者以及研究生的参考用书。

本书是集体努力的成果。参加编写的人员有:前言,王红旗;第1章,王红旗、李艺、花菲;第2章,王红旗、李艺、杨艳;第3章,李艺、王红旗、花菲、孙艳玲;第4章,王红旗、花菲、杨艳;第5章,花菲、陈彦君、李艺、杨艳;第6章,李艺、王红旗、李晓斌;第7章,李艺、陈彦君、花菲、张小啸;第8章,杨艳、李艺、花菲、齐永强;

附录，李艺、花菲、杨艳。王红旗、李艺负责全书的统稿。

本书在编写的过程中，参考了国内外专家、学者的相关成果，在此表示衷心的感谢！真诚希望读者对本书的不足之处提出修改意见。

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.....	2
1.2 多环芳烃的性质与危害.....	5
1.3 微生物对石油烃类污染物的吸附摄取方式.....	12
1.4 微生物对石油烃类污染物的运输机制.....	19
1.5 小结	30
第 2 章 生物表面活性剂在吸附摄取过程中的作用	31
2.1 生物表面活性剂的分类.....	33
2.2 生物表面活性剂的提取与鉴定.....	38
2.3 生物表面活性剂在微生物修复中的作用.....	46
2.4 小结	64
第 3 章 微生物对石油烃的吸附摄取方式分析	66
3.1 假单胞菌 DG17 对正十八烷的吸附摄取方式分析	66
3.2 假单胞菌 DG17 对原油的吸附摄取方式分析	73
3.3 红球菌 BAP-1 对荧蒹的吸附摄取方式分析.....	83
3.4 小结	92
第 4 章 微生物对石油烃的跨膜运输方式分析	97
4.1 蜡样芽孢杆菌 DQ01 和芽孢杆菌 DQ02 对正十六烷的跨膜 运输方式分析.....	98
4.2 假单胞菌 DG17 对正十八烷的跨膜运输方式分析	102
4.3 红球菌 BAP-1 对荧蒹的跨膜运输方式分析.....	109
4.4 小结	115

第 5 章 微生物对石油烃的跨膜运输规律研究.....	117
5.1 蜡样芽孢杆菌 DQ01 及芽孢杆菌 DQ02 对正十六烷的跨膜 运输规律分析.....	117
5.2 假单胞菌 DG17 对正十八烷的跨膜运输规律分析.....	122
5.3 红球菌 BAP-1 对荧蒹的跨膜运输规律分析.....	128
5.4 小结.....	131
第 6 章 微生物对石油烃污染物的代谢方式.....	133
6.1 微生物对多环芳烃的代谢方式.....	134
6.2 链烃类污染物的代谢机理.....	140
6.3 多环芳烃降解菌群的构建.....	144
6.4 正十六烷酶促降解性的研究.....	149
6.5 小结.....	161
第 7 章 微生物对石油污染物的生物降解及跨膜运输动力学.....	163
7.1 酶促反应方程.....	163
7.2 微生物对正十六烷摄取、运输和降解的动力学及机理研究.....	166
7.3 假单胞菌 DG17 对正十八烷的生物降解和跨膜运输动力学分析.....	178
7.4 红球菌 BAP-1 对荧蒹的生物降解和跨膜运输动力学分析.....	182
7.5 小结.....	192
第 8 章 影响微生物对石油烃类污染物跨膜运输以生物降解的因素.....	194
8.1 影响石油烃类污染物跨膜运输和生物降解的因素.....	195
8.2 包气带环境因素对假单胞菌 DG17 跨膜运输正十八烷的影响.....	198
8.3 包气带环境因素红球菌 BAP-1 跨膜运输荧蒹的影响.....	206
8.4 包气带环境因素对原油和正十八烷生物降解的影响.....	210
8.5 包气带环境因素对荧蒹生物降解的影响.....	221
8.6 小结.....	235
参考文献.....	237
附 录.....	259
附录 1 实验常用试剂的配制.....	259
附录 2 实验分析方法.....	262

第 1 章

绪 论

全世界大规模开采石油是从 20 世纪初开始的, 1900 年全世界消费量约 2 000 万 t, 100 年来这一数量已增长百余倍, 石油已成为人类最主要的能源之一。当今世界上石油的总产量, 每年约有 22 亿 t, 其中 17.5 亿 t 是由陆地油田生产的, 我国生产的原油也大部分出自陆上油田。在陆地上进行采油生产时, 有大量的生产设施分布于油田内, 如油井、集输站、转输站、联合站等。这些设施由于各种原因, 会把原油直接或间接地泄于油区地面上, 这些石油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。另外, 还有大量的石油加工环节进入环境, 也给生物和人类带来危害。仅对我国国有石油企业的污染物排放调查统计, 年产石油污染土壤近 10 万 t, 累计堆放量近 50 万 t。若考虑油田地区的相关地方企业排污量以及突发事故造成的污染和泄漏, 情况将更加严重。目前, 石油污染问题已成为世界各国普遍关注的问题。

包气带是岩土颗粒、空气和水三者共存的非饱和系统, 也是大气水、地表水与地下水发生水分交换的地带; 环境中所产生的大量有毒有害物质, 可以通过包气带进入地下水系统, 从而引起地下水资源的污染。近年来, 随着石油工业的迅速发展, 大量含油污水的排放使得大量石油类污染物进入包气带土层, PAHs 就是一类主要的石油污染物。PAHs 由于其自身的稳定性, 长期残留在包气带土层中, 随着地表水以及降水的冲刷, 不断通过包气带向地下水释放, 对地下水环境造成了严重的污染和破坏(张旭等, 2001)。正是由于包气带的特殊重要性以及多环芳烃的危害性, 多环芳烃污染包气带土层的高效修复理论与技术的研究成为国内外环境领域的研究热点(Trzesicka-Mlynarz 和 Ward, 1995)。包气带的特殊结构决定了包气带土层含有丰富的微生物, 其含量一般为 $(10^7 \sim 10^9) / \text{g}$ 土; 同时, 这些微生物群落本身均具有良好的烃类物质生物降解能力(李广贺等, 2000)。

石油污染土壤环境中的微生物对不同的石油烃组分, 如烷烃、单环芳烃和多环芳烃等具有生物降解能力, 将这些有机物转化成无毒或毒性较低的代谢产物。

因此,国内外对包气带石油烃类污染物的研究,主要集中在不同包气带环境因素对石油烃降解的影响,高效烷烃及多环芳烃降解菌的筛选以及降解特性等,但对这些环境因素是如何影响微生物对石油烃物质的吸附摄取和运输,以及石油烃类有机物对微生物的生理效应及作用机理还没有完全掌握,对微生物降解石油烃类物质过程中的关键环节和限速步骤尚不清楚,对不同有机物的生物降解路径也有待进一步研究。为了科学指导包气带—石油烃—微生物整个系统的修复处理工程,有效提高微生物降解石油烃类物质的效率,需要充分研究微生物技术去除包气带环境中石油烃物质的微观机理和规律性。

1.1 土壤石油污染现状

石油是一种含有多种烃类及少量其他有机物的复杂混合物,石油组分包括正烷烃、支链烷烃、芳烃、脂环烃、硫化物、氮化物等。作为目前世界上最重要的可耗竭能源之一,同时也是许多化学工业产品如杀虫剂、塑料、化肥等的原料,石油具有非常重要的战略地位。目前,世界上石油开采主要分为陆地开采和海洋开采,其中陆地开采产量约占全球开采量的70%以上。我国已经发现的油气田大约500多个,同时已经开发了包括克拉玛依、大庆、胜利、华北、辽河、中原等一系列大的油田,大规模开采的同时也引发了诸多的环境污染问题。

1.1.1 土壤石油污染来源

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、葱、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。

1.1.1.1 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。

1.1.1.2 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。油类经常作为各种杀虫剂、防腐剂和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。

1.1.1.3 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体中，含油浓度可高达 $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。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。

1.1.1.4 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。

1.1.1.5 药剂施用

油类经常作为各种杀虫剂、防腐剂和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。

1.1.2 土壤石油污染现状与危害

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，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,近2000万 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500m范围内为V类地下水,在1500m监测点地下水中的含油量仍为IV类标准(李春荣,2009)。

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,故而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。

1.1.3 土壤石油污染微生物修复技术

石油烃类大量溢出,应尽可能予以回收,但有时回收困难,有残留并对环境造成污染。石油污染治理上采用生物修复是20世纪80年代后期才受到人们的重视,在最近几年有了很大的发展,发展原因在于它有很多优点,主要表现在:处理费用低;处理效果好,经过生物治理,污染物残留量可以达到很低水平;对环境影响小,生物治理最终产物为二氧化碳,水和脂肪酸;可以就地处理,避免了运输过程的二次污染,节约了处理费用(王红旗等,2006)。

生物修复技术被划分为原位生物修复(生物通气法、地耕处理等)和异位生物修复(堆肥法、生物反应器等)两种。所谓原位生物修复是指对受污染的土壤不作搬运或输送而在原位污染地进行的生物修复处理,其修复过程主要依赖于被污染地自身微生物的自然降解能力和人为创造的合适降解条件。异位生物修复是指将被污染土壤搬动或输送到他处进行的生物修复处理。但这里的搬动和输送是低限度的,而且更强调人为控制和创造更加优化的降解环境一般受污染土壤较浅,而易于挖掘,或污染地地球化学特性阻碍原位生物修复就采用异位修复。在处理

位置上,前者强调污染物存在的初始空间分布,后者则稍作迁移;处理过程中,后者则有更多的人为调控和优化处理。无论原位还是异位,微生物修复技术最根本的出发点是石油烃作为反应底物参与了微生物的生化反应,微生物通过代谢作用降解土壤中的污染物。

1.2 多环芳烃的性质与危害

1.2.1 多环芳烃的来源和性质

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指由两个或者两个以上苯环按照一定的规则排列所组成的化合物,通常只含有碳(C)原子和氢(H)原子,有时也含有氧(O)原子、氮(N)原子和硫(S)原子构成杂环芳烃(Gan等,2009)。环境中PAHs的来源包括自然源和人为源,其中,主要来源于人类在工农业生产、交通运输和日常生活中大量使用煤炭、石油、汽油、木材等燃料的不完全燃烧所产生。燃料的不完全燃烧、石油产品加工、汽车尾气排放等都会向环境介质中排放PAHs,并大量累计在土壤和沉积物中。PAHs存在于土壤中,对微生物生长有强抑制作用,PAHs因水溶性差及稳定的环状结构而不易被生物利用,它们对细胞的破坏作用抑制普通微生物的生长。

多环芳烃大都是些无色或者淡黄色的结晶体,个别呈现黑色,其熔点及沸点较高,具有低溶解度和低蒸气压。其性质随化合物苯环数目的不同而异。通常随苯环数目的增加,化合物的溶解度和蒸气压降低。多环芳烃大多不溶于水,辛醇-水分配系数比较高,且化学性质稳定,不易分解,因此PAHs易于从水中分配到生物体内、沉积层中,土壤就成为PAHs的主要载体。当进入土壤的PAHs超过它们的降解能力时,PAHs产生显著积累,存在持续污染源时,PAHs便会在土壤中大量积聚,当累积量超过土壤自身的承受能力和允许容量时,就会造成土壤污染。

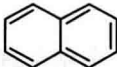
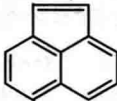
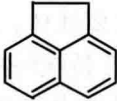
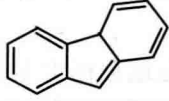
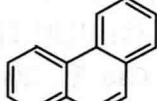
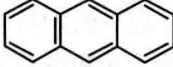
由于多环芳烃本身的高疏水性,它们可以稳定地存在于土壤、大气、水和沉积物中;多环芳烃的毒性随着它们分子量的增大而增大。多环芳烃对人体是有害的,可以通过吸入、摄食和皮肤接触等途径进入人体;长期暴露在多环芳烃污染的环境下,会引起呼吸系统疾病,严重的会致癌(Gao等,2006),PAHs化合物中有不少是致癌物质,但并非直接致癌物,必须经细胞微粒中的混合功能氧化酶激活后才具有致癌性,吸入吸附在微粒上的PAHs而导致的肺癌占总肺癌病变的85%以上。大量研究表明,苯并[a]芘具有强致癌性;菲和荧蒽对人类的皮肤和眼

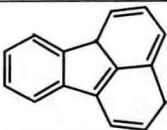
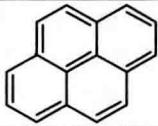
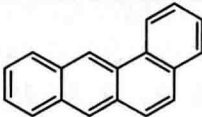
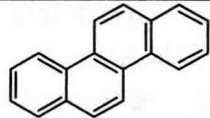
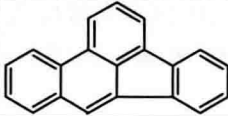
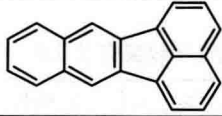
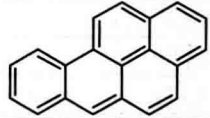
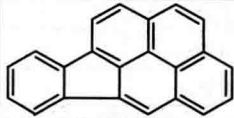
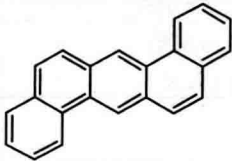
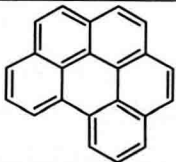
睛具有强刺激性，其他环境中的多环芳烃类物质对人类健康和生态环境同样具有很大的潜在危害。PAHs 在水中微溶，易溶于有机溶剂，属半挥发性难降解有机污染物，因而更易于在环境中累积到超过毒性效应浓度的水平。目前，世界范围内已知的多环芳烃有 100 多种，2008 年 8 月，美国国家环境保护局将 28 种多环芳烃列为“优先监测污染物”；我国也把 PAHs 列入环境优先检测的污染物黑名单中；德国安全技术认证中心（ZLS）经验交流办公室 AtAV 委员会 2007 年 1 月通过决议要求在 GS 标志认证中强制加入 PAHs 测试。

1.2.2 多环芳烃的危害

多环芳烃包括一系列潜在的环境污染物，这些污染物通常具有“三致”（致癌、致畸、致突变）效应，剧毒，是一类典型的持久性有机污染物（Persistent organic pollutants, POPs）（Fernando Bautista 等，2009；Hua 和 Wang，2012）。PAHs 在其生成、迁移、转化和降解过程中，通过呼吸道、皮肤、消化道进入人体，极大地威胁着人类的健康。

表 1-1 16 种 PAHs 的理化性质

名称	结构式	分子量	熔点/°C	沸点/°C	溶解度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	蒸气压/Pa
萘		128	81	218	3.17×10^4	10.4
苊烯		152	93	270	3.93×10^3	0.89
苊		154	96	279	1.93×10^3	0.29
芴		166	117	294	1 680~1 980	0.09
菲		178	101	340	1 200	1.6×10^{-2}
蒽		178	216	340	76	8×10^{-4}

名称	结构式	分子量	熔点/°C	沸点/°C	溶解度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	蒸气压/Pa
荧蒽		202	111	383	200~260	1.2×10^{-3}
芘		202	156	404	1.27	6.0×10^{-4}
苯并[a]蒽		228	162	435	10	2.8×10^{-5}
蒽		228	256	448	2.8	8.4×10^{-5}
苯并[b]荧蒽		252	168	481	1.2	6.7×10^{-5}
苯并[k]荧蒽		252	216	480	0.76	1.3×10^{-8}
苯并[a]芘		252	177	496	2.3	7.3×10^{-7}
茚并[1,2,3-c,d]芘		276	164	534	62	1.3×10^{-8}
二苯并[a,h]蒽		278	270	535	0.5	1.3×10^{-8}
苯并[g,h,i]花		276	278	542	2.6×10^{-4}	1.4×10^{-8}