

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

Remediation technologies and applications
on organic pollutants contaminated soils

典型有机污染物 土壤联合修复技术及应用

蔡信德 仇荣亮 编著



化学工业出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

Remediation technologies and applications
on organic pollutants contaminated soils

典型有机污染物 土壤联合修复技术及应用

蔡信德 仇荣亮 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分为9章,主要介绍了绪论、土壤中典型有机污染物的污染特征与环境风险、石油烃污染土壤淋洗修复技术、三氯乙烯污染土壤高级氧化修复技术、多环芳烃污染土壤微生物修复技术,邻苯二甲酸酯污染土壤联合修复技术、石油烃污染场地土壤异位淋洗修复工程、多环芳烃污染土壤生物修复工程、邻苯二甲酸酯污染农田土壤联合修复工程等内容。

本书可供环境科学与工程、化学化工等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员阅读使用,也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型有机污染物土壤联合修复技术及应用/蔡信德,仇荣亮
编著. —北京:化学工业出版社,2016.5

ISBN 978-7-122-26654-5

I. ①典… II. ①蔡…②仇… III. ①有机污染物-污染土壤
修复-研究 IV. ①S156.99

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第062361号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:荣世芳

责任校对:宋 玮

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17 彩插3 字数397千字 2016年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:85.00元

版权所有 违者必究

《环保公益性行业科研专项经费项目系列》
丛书编著委员会

顾 问：吴晓青

组 长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念、新举措。在科学发展观的指导下，环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略；2012年，环境保护部召开第二次全国环保科技大会，出台了《关于加快完善环保科技标准体系的意见》，全面实施科技兴环保战略，建设满足环境优化经济发展需要、符合我国基本国情和世界环保事业发展趋势的环境科技创新体系、环保标准体系、环境技术管理体系、环保产业培育体系和科技支撑保障体系。几年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项实施顺利，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；现行国家标准达1300余项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，确立了技术指导、评估和示范为主要内容的管理框架。环境科技为全面完成环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急

性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 439 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”以来环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前言

土壤是人类赖以生存的物质基础，土壤和水、大气、生物等环境要素有着密切的联系。土壤环境是一个开放系统，是“汇”也是“源”。废（污）水灌溉、大气沉降、固体废弃物堆放和农资品不合理使用等可致土壤污染，而污染土壤也可造成环境空气、地表水、地下水和农产品的污染。近年来，由于人口基数大和工农业的高速发展，产品的生产、消费、遗弃过程加快，导致越来越大面积的土壤受到重金属及有机污染物的污染，不但造成了巨大的经济损失，也严重威胁到我国生态安全、人群健康和社会经济的可持续发展。因此，土壤环境保护已经成为我国环境管理中亟待解决的新问题。

据土壤污染状况调查公报，全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤环境问题突出。我国农业土壤已同时呈现重金属、微量持久性毒害污染物污染；工业场地土壤污染类型为多金属或多种有机物的复合型或金属与有机物共存的混合型，土壤污染形势严峻。我国政府高度重视土壤环境保护，最近连续颁布一系列文件加强对土壤污染的控制和管理，如《国务院办公厅关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》（国办发〔2013〕7号）、《国务院办公厅关于推进城区老工业区搬迁改造的指导意见》（国办发〔2014〕9号）、《关于加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作的通知》（环发〔2014〕66号）等。2016年5月出台的“土十条”将对我国土壤环境保护做出总体的部署。因此，土壤污染控制与修复将面临新的机遇与挑战。

在环保公益性行业科研专项（201109020）、全国土壤现状调查及污染防治项目（1440800011）、广州市污染防治新技术新工艺推广应用项目等的资助下，在中山大学、湖南农业大学、青岛农业大学、广州市环境保护研究院、高州市农业科学研究所等单位的协助下，环境保护部华南环境科学研究所土壤污染与修复团队精诚合作，相继开展了土壤中典型有机污染物石油烃、多环芳烃、三氯乙烯、邻苯二甲酸酯等的污染控制与修复研究，并取得了一些进展。本书是团队多年来在有机污染土壤修复技术研发方面的自主创新成果总结，既有污染物降解（去除）机理研究，又有技术工程应用效果的监测与评估，实现了试验研究与工程应用的有机结合。书中提出的原地异位化学淋洗技术、污染土壤和地下水原位高级氧化技术，实现土壤中石油烃、三氯乙烯的快速去除，可为场地有机污染土壤修复提供新思路；筛选的真菌宛氏拟青霉可为多环芳烃特别是高环多环芳烃污染土壤的生物联合修复提供种质资源，构建的静态堆微

好氧修复模式可有效降解土壤中的多环芳烃污染物。提出的真菌-植物联合修复技术是一种低成本、环境友好、能大面积应用的邻苯二甲酸酯污染农田土壤的生物修复技术。研究过程中采用的分子学方法、蛋白质组方法、真菌生长动态监测方法等，可为同类研究提供参考。

在项目研究过程中，环境保护部、广东省环保厅、广州市环保局、高州市农业局等单位给予了很多的支持和帮助，许振成、刘晓文、方晓航、陈志良、吴文成、宋清梅、陈泽涛、金中等在项目设计、修复模式构建和修复工程建设与监测过程中做出了贡献，研究生詹重贵、李诗殷、李慧、周井岗、宁小兵、王永强、李伯威、郭杨、吴嘉怡、韩蕊、杜文婷、杨子江、芮洋、李霞、罗冰等参与完成了部分工作，在此一并表示诚挚的谢意。

限于我们的知识范围和学术水平，书中肯定存在一些缺点和不足之外，殷切希望专家学者和读者惠以斧正，以丰富和发展土壤污染控制与修复的理论和方法。

编著者

2016年2月于广州

上篇 基础篇

	第 1 章 绪论	2
1.1	石油烃类	3
1.2	多环芳烃	4
1.3	邻苯二甲酸酯	5
1.4	三氯乙烯	7
	参考文献	8
	第 2 章 土壤中典型有机污染物的污染特征与环境风险研究	10
2.1	石油烃污染特征与环境风险研究	10
2.1.1	典型场地土壤石油烃污染特征	10
2.1.2	石油烃污染对土壤理化性质及生物的影响	11
2.1.3	石油烃污染土壤的环境风险	14
2.2	多环芳烃污染特征与环境风险研究	15
2.2.1	土壤多环芳烃污染特征与空间分布规律	15
2.2.2	土壤中多环芳烃污染的毒性评估	18
2.3	邻苯二甲酸酯污染特征与环境风险研究	19
2.3.1	土壤中邻苯二甲酸酯污染特征与空间分布规律	19
2.3.2	土壤-作物系统中邻苯二甲酸酯的迁移规律	27
2.3.3	土壤中邻苯二甲酸酯污染的健康风险评估	28
2.3.4	土壤中邻苯二甲酸酯污染的生态效应	33
	参考文献	35
	第 3 章 石油烃污染土壤淋洗修复技术研究	38
3.1	概述	38
3.2	淋洗剂筛选及降解机理研究	41
3.2.1	不同 pH 值溶液对污染土壤中石油烃解吸的作用	41
3.2.2	复配淋洗剂配方比选	41

3.2.3	污染土壤石油烃的解吸特性	42
3.2.4	石油烃污染土壤淋洗工艺优化	44
3.2.5	石油烃污染土壤的土柱淋洗试验	44
3.3	石油烃污染土壤淋洗废水的处理研究	45
3.3.1	淋洗废水处理工艺研究	46
3.3.2	进料流量和压力对膜通量的影响	49
3.3.3	组合工艺对石油烃废水的处理结果	50
3.3.4	尾水再生回用的可行性研究	50
3.4	石油烃污染土壤淋洗修复的生态风险	51
3.4.1	对土壤理化性质的影响	51
3.4.2	对土壤-作物系统的影响	51
	参考文献	57

第4章 三氯乙烯污染土壤高级氧化修复技术研究 59

4.1	概述	59
4.1.1	三氯乙烯在环境中的迁移	59
4.1.2	TCE 污染土壤与地下水的修复方法	61
4.1.3	土壤及地下水原位化学氧化修复方法	63
4.2	土壤对三氯乙烯的吸附规律研究	65
4.2.1	不同类型土壤对三氯乙烯的吸附特征	65
4.2.2	温度对土壤吸附 TCE 的影响	68
4.3	三氯乙烯在土壤中的迁移规律	70
4.3.1	土壤中 TCE 向空气中挥发特性	70
4.3.2	不同类型土壤中 TCE 的迁移规律	71
4.3.3	TCE 浓度对迁移的影响	72
4.4	三氯乙烯污染土壤的氧化修复技术研究	73
4.4.1	类芬顿氧化技术研究	73
4.4.2	高锰酸盐氧化技术研究	77
4.4.3	过硫酸钠氧化技术研究	82
4.5	水体中三氯乙烯的去除研究	88
4.5.1	高锰酸盐对水体中三氯乙烯的去除作用	88
4.5.2	过硫酸钠对水体中三氯乙烯的去除作用	89
4.6	三氯乙烯污染土壤和地下水的联合修复研究	89
	参考文献	95

第5章 多环芳烃污染土壤微生物修复技术研究 98

5.1	概述	98
5.1.1	土壤中 PAHs 的吸附与存在状态	98
5.1.2	多环芳烃污染土壤修复技术	99

5.1.3	降解多环芳烃的主要生物种类	100
5.1.4	PAHs 的微生物降解机理	101
5.2	特异真菌降解多环芳烃的特性研究	102
5.2.1	多环芳烃降解真菌的筛选	102
5.2.2	降解条件试验	105
5.3	复合菌群构建技术研究	106
5.3.1	铜绿假单胞菌最适培养基的选择	107
5.3.2	拮抗试验	108
5.4	真菌对土壤中多环芳烃的降解作用	109
5.4.1	降解菌对人工污染土壤中 HM PAHs 的降解	109
5.4.2	降解菌对场地污染土壤中 PAHs 的降解	113
	参考文献	116

第 6 章 邻苯二甲酸酯污染土壤联合修复技术研究 118

6.1	概述	118
6.1.1	邻苯二甲酸酯的环境行为	118
6.1.2	邻苯二甲酸酯污染土壤的生物修复	120
6.2	特异真菌筛选和降解机理研究	123
6.2.1	特异真菌筛选及降解条件优化	123
6.2.2	真菌酶对 PAEs 的降解作用研究	137
6.2.3	PAEs 降解真菌酶蛋白组学研究	142
6.2.4	真菌生长动态和补接种措施的效果研究	147
6.3	植物对邻苯二甲酸酯污染的响应研究	152
6.3.1	不同蔬菜品种对 PAEs 胁迫的响应	153
6.3.2	不同水稻品种对 PAEs 胁迫的响应	162
6.4	植物对 PAEs 的吸收作用研究	175
6.4.1	蔬菜类作物对 PAEs 的累积作用	175
6.4.2	葫芦科作物对 PAEs 的累积作用	177
6.4.3	冬瓜对不同类型土壤中 PAEs 的吸收作用	180
6.5	PAEs 污染土壤生物修复的化学强化措施研究	191
6.5.1	化学添加剂的筛选	191
6.5.2	表面活性剂对土壤中 PAEs 生物有效性作用	194
6.6	PAEs 污染土壤的真菌-植物联合修复模式构建研究	197
6.6.1	真菌与不同植物组合对修复效果的影响研究	197
6.6.2	PAEs 污染土壤修复植物的安全处置技术研究	203
6.7	地膜中 PAEs 替代的可行性研究	214
6.7.1	PAEs 替代品的种类	214
6.7.2	PAEs 替代品的生物降解作用	215
6.7.3	PAEs 替代品的生物毒性	217
6.7.4	替代地膜的物理性能	219

6.7.5 成本分析	223
参考文献	226

下篇 技术应用篇

第 7 章 石油烃污染场地土壤异位淋洗修复工程 232

7.1 场地污染概况	232
7.2 石油烃污染土壤的治理措施	232
7.2.1 污染场地污染源控制方法	232
7.2.2 修复技术筛选及常用技术	233
7.3 淋洗修复工程设计及建设	233
7.3.1 设计目标	233
7.3.2 处理方法及工艺	233
7.3.3 工程设计与建设	234
7.4 监测结果与分析	235
7.4.1 淋洗过程中土壤石油烃含量变化	235
7.4.2 淋洗过程土壤石油烃的迁移、分布	237
7.4.3 淋洗废水处理效果	237
7.4.4 地下水监测结果	237
7.5 石油烃污染土壤淋洗修复后的生态风险评价	238
7.5.1 淋洗修复前后土壤生物毒性的变化	238
7.5.2 淋洗对土壤基本理化性质的影响	238
7.5.3 修复后土壤处置	239
7.6 小结	239

第 8 章 多环芳烃污染土壤生物修复工程 240

8.1 场地污染概况	240
8.2 工程设计与建设	240
8.2.1 设计目标	240
8.2.2 处理工艺与方法	241
8.2.3 修复工程设计与建设	242
8.3 监测结果与分析	243
8.4 修复效果评估	246
8.5 小结	247

第 9 章 邻苯二甲酸酯污染农田土壤联合修复工程 248

9.1 区域概况	248
9.1.1 自然地理概况	248

9.1.2	场地污染特征	248
9.2	真菌有机肥的制备	249
9.2.1	主要原材料	249
9.2.2	生产工艺及说明	249
9.2.3	产品质量要求	250
9.3	工程设计与建设	250
9.3.1	工程目标	250
9.3.2	修复工艺	250
9.3.3	修复工程与效果	251
9.4	修复经济效益分析	254
9.4.1	修复成本	254
9.4.2	修复效益评估	254
9.5	小结	254

上篇

基础篇

· 第 1 章 ·

➤ 绪 论

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类环境的重要组成部分。土壤环境质量与水体环境质量、空气环境质量和农产品质量等紧密相联。由于受自然及人为等因素的影响，特别是人类生产生活过程中产生的有毒有害的废气、废水和废渣等通过各种途径进入土壤环境，导致土壤环境质量下降。土壤环境问题是全球性环境问题之一，是当代土壤科学和环境科学研究的热点。

我国土壤污染防治工作起步较晚，受政策、技术、资金、观念等的限制，土壤环境污染没有得到有效的控制与防治，土壤污染形势严峻。据全国土壤污染状况调查公报，全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤总的超标率为 16.1%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 11.2%、2.3%、1.5% 和 1.1%。污染类型以无机型为主，有机型次之，复合型污染比重较小，无机污染物超标点位数占全部超标点位数的 82.8%。从污染分布情况看，南方土壤污染重于北方；长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较为突出，西南、中南地区土壤重金属超标范围较大；镉、汞、砷、铅的含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。从调查结果看，土壤污染具有面积大、类型多样、区域性明显等特征。土壤污染不仅对食品安全构成了严重的威胁，对水体、大气以及整个生态环境也造成了严重的影响，它不仅直接制约社会经济的发展进程，而且严重地影响子孙后代的生存。

造成土壤污染的物质种类繁多，按污染物的性质，可分为无机元素污染物、有毒有机污染物、氮磷营养元素污染物、放射性元素污染物和病原微生物污染物等。受技术、经济等条件的限制，土壤环境质量标准（GB 15618—1995）中仅规定了 8 种无机污染物（重金属）和 2 种有机污染物的限值。目前拟颁布的《土壤环境质量标准（修订）》（GB 15618—2008）将土壤中污染物分为 5 类 76 项，分别是重金属与其他无机物 16 项、挥发性有机物 20 项、多环芳烃有机物 16 项、持久性有机污染物与农药 19 项、其他 5 项。修

订后的标准,在污染物种类和适用范围等方面均有提高,但仍未将氮磷营养元素污染物、放射性元素污染物和病原微生物污染物纳入标准体系中。同时也可以看到,在修订后的标准中有毒有机污染物的种类达60种,反映出这种类型污染物正受到广泛的关注。下面对土壤中石油烃类、多环芳烃类、邻苯二甲酸酯类、三氯乙烯等有机污染物的基本性质、污染现状与危害进行讨论。

1.1 石油烃类

随着国民经济的不断发展,石油的生产量和消费量逐年增加,据《全国油气资源动态评价2010》报道,2010年我国原油产量为 $2.03 \times 10^8 \text{t}$ 、而消费量达到 $3.8 \times 10^8 \text{t}$ 。在石油的开采、提炼、运输、贮存、使用和“三废”处理等过程,均可能导致严重的土壤污染。石油烃对土壤的主要污染途径如下。

① 开采过程原油对土壤的污染 我国已勘探开发的油气田和油气藏有400多个,生产的原油大部分(约占80%)出自陆上油田,在陆地上进行采油时,大量的生产设施如油井、集输站、转输站、联合站等由于各种原因,会使部分原油直接或间接地泄漏于油区地面,造成土壤污染,其污染方式与生产过程密切相关。全国土壤污染状况调查公报表明,在13个采油区的494个土壤调查点位中,超标点位占23.6%。采油区土壤石油烃的来源主要为落地原油、含油固体废物和含油废水。

② 贮运过程石油烃对土壤的污染 石油运输过程中发生事故性泄漏,如输油管线破裂、油轮沉没、油罐车侧翻等突发性石油泄漏,往往造成数量多、浓度高、危害大的局部污染。石油贮存过程中贮罐区跑、冒、滴、漏现象较普遍,已成为土壤石油烃污染的另一来源。据《凤凰周刊》报道,北京半数以上的加油站都存在石油渗漏问题。我国工业企业石油贮罐、加油站等数量大,贮罐渗漏,不但造成油料的直接损失,而且对贮罐周围土壤和地下水造成严重污染。

③ 污水农灌中石油烃对土壤的污染 工业企业生产过程产生的含油工艺废水,如钢铁企业的炼焦、轧钢工艺,金属表面处理及热处理加工工艺等,这些含油工艺废水经过处理达标后排放进入厂区周围地表水体,造成地表水体中石油烃含量增加。工业废渣(特别是含有石油烃污染物的工业废渣)中的污染物经淋滤后进入地表水体,造成地表水的污染。利用已被石油烃污染的工业废水和地表水进行农田灌溉,土壤石油烃含量增高,日积月累,进而导致土壤污染。

石油烃污染物进入土壤后,首先,对土壤环境造成影响与危害,如影响土壤通透性、土壤微生物多样性、植物生长等;其次,石油烃污染物进入土壤,通过植物吸收作用,在作物各部分残留,影响作物品质;再次,石油烃污染物中不易被土壤吸附的成分可以随降水渗透到地下,污染浅层地下水,影响到地下水质。污染土壤中的石油烃可通过呼吸、皮肤接触、经口摄入等方式进入人或动物体内,石油烃中的苯、甲苯、酚类等物质,如果经较长时间较大浓度接触,会引起恶心、头疼、眩晕等症状;石油烃中的多环芳烃类污染物会影响肝、肾等器官的正常功能,甚至引起癌变。国外研究发现,经常受到石油烃类污染的孩子患急性白血病的风险要高出平均水平的4倍,患急性非淋巴细胞白血病的概率是普通孩子的7倍。因此,石油烃污染土壤对生态环境、食品安全和人群健康均具有潜在的严重危害,需要高度关注。

1.2 多环芳烃

(1) 多环芳烃的基本理化性质

多环芳烃是指两个或两个以上的苯环以稠环或非稠环形式连接在一起形成的有机化合物，是土壤中常见的一类有机化合物。多环芳烃种类繁多，目前备受关注的是以下 16 种：萘、蒽、二氢蒽、芴、菲、蒎、荧蒎、芘、苯并 [a] 蒎、蒎、苯并 [b] 荧蒎、苯并 [k] 荧蒎、苯并 [a] 芘、茚并 [1,2,3-c,d] 芘、苯并 [a,h] 蒎、苯并 [g,h,i] 芘。它们的基本理化性质见表 1-1。

表 1-1 16 种多环芳烃的理化性质（李久海等，2003）

名称	苯环数	分子式	溶解度①/(mg/L)	lgK _{ow} ②	沸点/℃	致癌活性
萘	2	C ₁₀ H ₈	31.7	3.30	218	无
蒽	3	C ₁₂ H ₈	3.93	4.07	275	无
二氢蒽	3	C ₁₀ H ₁₀	1.19	3.92~5.07	279	无
芴	3	C ₁₃ H ₁₀	1.68	4.18	298	无
菲	3	C ₁₄ H ₁₀	1.00	4.45~4.57	340	无
蒎	3	C ₁₄ H ₁₀	0.045	4.45	341	无
荧蒎	4	C ₁₆ H ₁₀	0.26	5.2	384	争议
芘	4	C ₁₆ H ₁₀	0.13	4.88	404	无
苯并[a]蒎	4	C ₁₈ H ₁₂	0.0057	5.61	438	强
蒎	4	C ₁₈ H ₁₂	0.0018	5.61	448	弱
苯并[b]荧蒎	5	C ₂₀ H ₁₂	0.014	6.06	481	强
苯并[k]荧蒎	5	C ₂₀ H ₁₂	0.0043	6.06	481	强
苯并[a]芘	5	C ₂₀ H ₁₂	0.0038	6.04	500	特强
苯并[a,h]蒎	5	C ₂₂ H ₁₄	0.0005	6.84	升华	特强
苯并[g,h,i]芘	6	C ₂₂ H ₁₂	0.00026	7.04~7.10	542	争议
茚并[1,2,3-c,d]芘	6	C ₂₂ H ₁₂	0.00053	6.58	530	特强

① 指 25℃时水中的溶解度。
② K_{ow}为辛醇/水分配系数。

(2) 土壤中多环芳烃的来源与含量现状

土壤中多环芳烃的来源可分为自然源和人为源两种。自然源是指由自然界中森林、草原的天然火灾、火山爆发以及某些微生物产生或释放出的 PAHs 进入土壤环境。但土壤环境中的多环芳烃主要来自人类的生产和生活活动，按其进入土壤环境的方式可分为如下 3 种类型：

- a. 直接将含有多环芳烃化合物的石化产品、橡胶、塑胶、废油、含油废渣、废弃生活化学品等排放到土壤环境，造成土壤污染；
- b. 各种矿物燃料、木材以及其他烃类化合物的不完全燃烧烟气或在热解过程中形成的 PAHs 废气，经干、湿沉降进入土壤环境；
- c. 含多环芳烃的工业废水、渗滤液、道路地表径流作灌溉用水，多环芳烃直接进入土壤环境。