进展综述

多环芳烃污染土壤修复技术的研究进展

王山榕1，翟亚男2，王永剑1，徐佰青1，单广波1

**（1.** 中国石化 大连石油化工研究院，辽宁 大连 **116045；**

**2.** 中国冶金地质总局 地球物理勘查院，河北 保定 **071051）**

摘要 ］ 多环芳烃是一种强疏水性有机污染物。土壤是多环芳烃积累富集的主要场所。多环芳烃污染会对生态环 境与人体健康造成严重影响。针对多环芳烃污染土壤的修复问题，本文介绍了溶剂萃取、化学氧化、热处理、 生物修复和联合修复技术的研究进展，总结了每种修复技术自身的特点、优势和局限性。指出，绿色可持续的 生物修复技术以及多种土壤修复技术的整合是该领域未来的研究方向。

［关键词］ 多环芳烃；土壤；溶剂萃取；热处理；生物修复；化学修复

［中图分类号］ X53 ［文献标志码］ A

［文章编号］ 1006-1878（2021）03-0247-08 ［DOI］ 10.3969/j.issn.1006-1878.2021.03.001

Research progresses on remediation of polycyclic aromatic  
hydrocarbons contaminated soil

WANG Shanrong1，ZHAI Yanan2，WANG Yongjian1，XU Baiqing1，SHAN Guangbo1（1. Sinopec Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals，Dalian 116045，China；  
2. Geophysical Exploration Academy，China Metallurgical Geology Bureau，Baoding 071051，China）

**Abstract**：Polycyclic aromatic hydrocarbons（PAHs）are highly hydrophobic organic pollutants. Soil is the main place where PAHs accumulate and enrich. PAHs pollution will seriously affect the ecological environment and human health. Aiming at the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil，in this paper，the research progress of solvent extraction，chemical oxidation，heat treatment，bioremediation and combined remediation technologies are introduced，and the characteristics，advantages and limitations of each remediation technology are summarized. It is pointed out that the green and sustainable bioremediation technology and the integration of various soil remediation technologies are the directions for future research in this field.

**Key words**：polycyclic aromatic hydrocarbons（PAHs） ； soil；solvent extraction；thermal treatment；bioremediation； chemical remediation

多环芳烃（PAHs）是疏水性有机化合物，由 至少两个不同排列方式的稠化苯环组成［1］。迄今 为止， 已发现**200**余种多环芳烃， 美国环境保护局 （EPA） 将其中的**16**种列为优先污染物［2］。由于多 环芳烃的挥发性， 该类污染物可能远离其原始来源 并在各种环境基质中积累。土壤是多环芳烃积累富 集的主要场所， 事实上， 全球**90**%的环境多环芳烃 累积存在于土壤中［3］。由于多环芳烃对受体的危 害、暴露程度和潜在毒性， 开展多环芳烃污染场地 的修复技术研究具有重要意义［4-7］。

近年来， 各国研究人员一直致力于将多环芳 烃从污染土壤中去除或降解至其本底水平。这导 致了若干物理、化学和生物等相关修复技术的爆 发， 在一定程度上可以解决多环芳烃污染土壤的 问题［8-9］。然而， 无论采用何种修复技术， 由于土

收稿日期］2020 - 09 - 25；［ 修订日期］2021 - 03 - 05。 作者简介］王山榕（1989—），男，辽宁省盖州市人，博士，工 程师，电话 0411-39699173，电邮 wangshanrong.fshy@sinopec.com。

［基金项目］国家重点研发计划项目（2018YFC1803300）。 壤的异质性等原因，多环芳烃污染场地的修复仍然 存在各种问题。例如，由于场地土壤类型和一些其 他相关因素，修复速率可能不同，有时还会产生比 原来的母体多环芳烃更具毒性的化合物。尽管如 此，作为一种预防措施，包括荷兰、丹麦和加拿 大在内的多个国家已经制定了多环芳烃污染的土 壤修复指南。

有鉴于此，本文综述了多环芳烃污染土壤修 复领域主要修复技术的研究进展，以期能为该领域 的技术发展提供理论依据和支撑。

1. 溶剂萃取技术

溶剂萃取技术是通过水、有机溶剂、表面活性 剂、络合剂等的溶剂作用，从固体基质中解吸多环 芳烃，然后将其从固体中洗脱到萃取液中［10-12］。 无毒、可生物降解的萃取剂，如环糊精和植物油 等［13-14］，以及超临界或亚临界流体，也被应用于 该技术中［15］。

由于多环芳烃的低水溶性，表面活性剂被用 作萃取剂以提高淋洗土壤的效率［16］o AHN等帀〕 研究了 **4**种不同的非离子表面活性剂Tween**40**、 Tween**80**、Brij **30**和Brij **35**在含菲土壤中的淋洗性 能。 结果表明，当表面活性剂质量浓度为**2** g/L 时，Brij**30**对菲的去除率最高，达到**84**.**1**%。这是 由于Brij**30**对菲具有较高的增溶能力，同时对土 壤的吸附能力较低。 其他非离子表面活性剂， 如 T-Maz**80**、T-Maz**20**、CA**620**和Terrasuf**80**,以及阴 离子表面活性剂，如Dowfax**8390**、十二烷基苯磺 酸钠、十二烷基硫酸钠和Steol**330**,也被证明对菲 的去除是有效的［15］o ZHOU等［18〕提出用相对效率 系数来评价表面活性剂对多环芳烃污染土壤相对于 水的解吸效率， 由于表面活性剂对土壤的吸附作 用， 只有当相对效率系数大于**1**且添加的表面活性 剂浓度大于相应的临界增强解吸浓度时， 表面活性 剂才会增强土壤中多环芳烃的解吸作用。 表面活性 剂对多环芳烃的解吸效果与土壤成分、 表面活性剂 结构和多环芳烃性质密切相关。

环糊精被认为是一种无毒、 可生物降解的 有机物， 作为表面活性剂的替代物， 可用于去除 污染土壤中的多环芳烃［19〕。VIGLIANT 1等［20〕考 察了B-环糊精(BCD)、羟丙基-环糊精(HPCD) 和甲基-环糊精(MCD)作为多环芳烃萃取剂的 效果。三者中，MCD的去除效率最高，其次是 HPCD，最后是BCD。多环芳烃的萃取量随环糊精 浓度的增加而线性增加。然而，温度在**5**~**35**七范 围内随着环糊精浓度增加， 多环芳烃的萃取量没有 明显提升。

植物油作为一种环境友好的溶剂， 是疏水性 多环芳烃的强吸附物质， 其游离脂肪酸对多环芳烃 的溶解度与表面活性剂相似［21］。GONG等［22〕评估 了葵花籽油对污染土壤中多环芳烃的去除效果， 利用**150** mL葵花籽油和**150** g污染土壤在轨道振动 筛上进行的初步提取实验表明， 大部分的多环芳 烃(**81**%~**100**%) 被去除。 进一步研究土壤含水量对 葵花籽油提取多环芳烃的影响时发现， 土壤含水 量越低，多环芳烃的去除率越高。PANNU等［23〕利 用花生油振荡提取多环芳烃， 当土壤与油的质量 比为**(4** : **1**)~(**39** : 1)时，对蔥的萃取率可达**90**% 以上。 温度升高可提高土壤中**10**种多环芳烃的萃取 率，从**20**七时的**51**.**5**%提高到**60**七时的**81**.**4**%。土 壤中剩余的植物油有助于提高剩余污染物的生物利 用度， 并成为微生物生长的基质， 从而促进污染物 的生物降解。

由于超临界流体与亚临界流体具有良好的流 动、 传质和溶解性能， 因此也被应用于土壤多环芳 烃污染的溶剂萃取技术中［24-25］。 由于需要高温和 (或) 高压条件， 其应用尚不广泛。

目前， 溶剂萃取技术常应用于土壤淋洗与抽 提工艺， 通过注入井在污染场地表面将萃取剂注入 至污染区， 将土壤中的污染物转移至萃取剂中， 然 后由下游的抽提井将萃取液提取出来进行进一步处 理。 土壤的原位淋洗示意图如图**1**所示。

溶剂萃取技术具有效果好、 长效性、 易操作 等特点， 但对于含水量较高的土壤， 土壤与溶剂不 能充分接触， 从而需要增加前处理的费用；同时， 使用的溶剂在处理后的土壤中有一定的残留， 可能 会存在溶剂二次污染等问题， 因此有必要对使用的 溶剂进行生态毒性考察。

1. 化学氧化技术

化学氧化技术是采用向污染土壤注入氧化剂 的方式， 通过氧化作用使土层中的污染物转化为 无毒或毒性相对较小的物质， 从而达到修复的目 的［26］。 常见的氧化剂包括高锰酸盐、 过氧化氢、 过硫酸盐、 臭氧等［27-30］。 氧化剂的氧化还原电位 如图**2**所示。

图1 土壤的原位淋洗示意图

。2 MnO4- O3

| 1.23V | 1.51 V | 2.07V

| 1.33V | 1.77V | 2.10V

5O产 H2O2 S2O82-

3.00 V

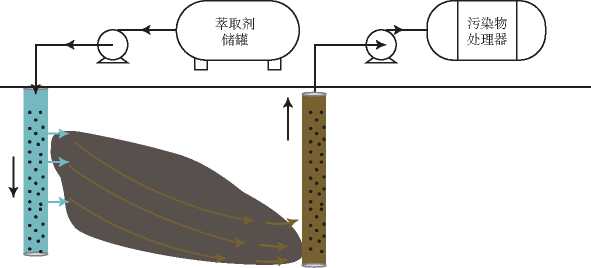


图2 氧化剂的氧化还原电位

FLOTRON等［31］利用芬顿试剂研究了土壤中 荧蔥、苯并［刃荧蔥和苯并［刃芘的氧化降解，结 果显示，苯并［刃芘几乎完全降解，荧蔥显著降 解,而苯并［*b*］荧蔥在过量的过氧化氢浓度下降解 率仍极低。 在氧化过程中产生了若干副产物， 其中 有些副产物可能具有很高的毒性。 改性芬顿试剂可 作为更强的氧化剂来处理土壤中更顽固的多环芳 烃。除羟基自由基(-OH)夕卜，通过添加螯合剂和/ 或高过氧化物浓度的化学物质可形成其他高活性自 由基［32-33］。

臭氧(O3)通过分解成• OH可以引发间接氧化 反应。 在多环芳烃的臭氧氧化过程中， 多环芳烃通 过直接反应或自由基反应而降解［34］。 O'MAHONY 等［35］利用放电产生的臭氧修复几种含菲土壤。 分 析表明，在**20** mg/m3臭氧处理**6** h后，所有土壤中的 菲浓度降低了**50**%以上。 与黏土相比， 砂土由于其 较大的孔隙空间， 能为气态臭氧通过土壤基质提供 更好的传输效率， 可使菲达到**85**%的去除率。 水含 量的增加对臭氧处理有不利影响， 因为当水占据孔 隙空间时， 土壤中的多环芳烃变得不易与臭氧接触 氧化。MASTEN等［36］也将臭氧作为多环芳烃氧化 剂进行了土壤修复实验， 对菲和芘的去除率分别为 **95**%和**91**%，而对產的去除率仅为**50**%，因为其疏 水性更强。VAN BAVEL等［37］对芬顿试剂和臭氧处 理老化的多环芳烃污染土壤进行了比较， 据报道， 芬顿试剂降解多环芳烃的效率(**40**%~**86**%) 明显高 于臭氧(**10**%~**70**%) 。

FERRARESE等［38］分别利用H2。2、改性芬顿 试剂、活化过硫酸钠、KMnOq、KMnO4和H?O2 的组合以及活化过硫酸钠和H 2O2的组合作为处理 多环芳烃污染土壤的氧化剂， 并对处理效果进行 了比较。实验结果表明，改性芬顿试剂、比。2和 KMnO4的多环芳烃去除率均达到**95**%以上。但对 最佳氧化剂剂量的要求很高，处理**30** g污染土壤样 品需要约**100** mmol的氧化剂，因为吸附在土壤和 (或) 有机质上多环芳烃的矿化需要非常活跃的氧 化条件， 特别是具有较高的有机质含量的土壤。

化学氧化技术在国夕已形成较完善的技术体 系， 应用广泛。 该技术能够使污染物快速降解， 一 般在数周或者数月可以显著降低污染物浓度。 但 是， 氧化剂可能会与土壤中存在的腐殖酸、 还原性 金属等物质反应， 消耗大量氧化剂， 从而导致费用 较高；另夕 ， 氧化剂不易达到渗透率较低的土层， 对渗透率较低土壤的修复效果较差。

1. 热处理技术

热处理技术是利用热量对污染土壤中的多环 芳烃进行破坏或使其挥发［1039］。在**900**~**1 200**七的 高温下， 焚烧可以有效清除土壤的多环芳烃［6］。

**1986**年， 美国环境保护署对位于路易斯安那州的 一个杂酚油严重污染场地进行修复［40］。利用可运 输的焚化炉焚烧**140** kg受污染固体（土壤、沉积物 和固体废物）， 并在**40**个月内清除了**90**%的多环芳 烃。然而， 该技术需要烟气控制装置并且需要消 耗更多的能源， 这也被认为是采用焚烧技术的主 要缺点［41］。

热解吸是一种物理分离过程， 利用热量使有 机污染物从土壤中挥发， 通过载气或真空系统将挥 发出的有机污染物扫入气体处理系统进行二次燃烧 或场外处理。焦文涛等［42］基于实验室模拟电阻加 热和热传导加热小试装置， 研究了土壤电阻加热对 土壤中苯并［刃芘去除率的影响。结果显示，在对 污染土壤进行热修复时， 无须将土壤温度加热到污 染物沸点， 但须根据污染土壤的修复目标优化补水 量和持温时间等关键参数。RENOLDI等［43］利用长 **68** cm、内径**3** cm的水平管式炉，在实验室规模的 间接加热热脱附装置中处理污染土壤。 在最高温度 **450**七处理后，土壤中萘、芴和苊等低分子量化合 物的残留率分别为**0**.**2**%和**1**.**0**%。HARMON等［44〕使 用占地面积为**48** cm2、深度为**30** cm的热增强土壤 蒸汽提取（SVE）反应器修复约**70** kg污染土壤。反 应器运行**35** d，加热元件的温度为**650**〜**700** ^，并 在**10** d内将土壤中的多环芳烃总含量降至**100** mg/kg 以下。

热处理技术处理的污染物范围广、 效率高、 对土质要求低， 处理周期为几周到几年。 国外已广 泛应用于工程实践， **1982**〜**2004**年约有**70**个美国超 级基金项目采用该技术， 国内已有少量工程应用。 采用热处理修复技术时， 需要对产生的尾气进行无 害化处理， 且该技术的能耗和费用较高， 但能在短 期内实现修复目标。 未来将从提高能源利用效率、 使用清洁可再生能源、 采取高效废气处置方法等方 面使该技术朝着绿色化的方向发展。

1. 生物修复技术

生物修复技术是利用有氧呼吸或无氧呼吸的 微生物， 通过好氧生物降解或厌氧生物降解将有机 物或无机物分解为营养物质， 从而实现废物的自然 循环利用。 生物修复多环芳烃污染土壤是一种安 全、 经济、 环保的技术。 多环芳烃污染土壤的生物 修复主要包括原位处理（土地耕作、 生物刺激、 生 物强化等）和异位处理（生物反应器处理）［45］。 环 境条件在生物修复中起着重要作用， 因为微生物对 周围环境变量如pH、湿度、盐度、温度和压力高 度敏感。 图**3**显示了对生物修复具有重要意义的速 率限制因素。



图3 生物修复的速率限制因素

土地耕作法采用传统农业方法， 如耕作、 膨 化（为生物降解提供曝气和促进土壤均匀性）、 灌 溉（提供水分） 和施肥（提供营养以增加多环芳烃 降解菌的数量）。HANSEN等［46〕在一个被约**13 000** mg/kg多环芳烃污染的木材处理场地中进行了中试 规模的研究， 认为在没有时间压力的情况下， 传统 的土地耕作方法是修复多环芳烃污染场地的一种 有效的低成本处理技术。 该技术在刺激本地微生 物方面具有独特的优势， 但其降解效率受到限制 因素的影响， 如本地多环芳烃降解菌种较少， 难 以处理深层污染土壤， 污染物降解能力差， 生物 利用度低等［47］。

在缺乏养分的修复地点， 生物刺激是加快修 复进程的有效方法。DE SOUZA POHREN等［48〕进 行了实验室和场地规模的含煤焦油土壤的修复研 究， 发现向土壤中添加养分并不能显著增强煤焦油 多环芳烃的生物降解， 但添加生物柴油和无机营养 物质后，经过**55** d的处理，多环芳烃组分得到了增 强降解。 生物柴油处理增加多环芳烃的可生化性， 这归因于煤焦油的溶解和分散增加了多环芳烃的生 物利用度， 从而被本地生物降解。

当土壤中本地多环芳烃降解菌种含量较低 时， 生物强化（即添加在实验室培养的污染物降解 物种） 是最好的选择之一。 好氧生物修复的研究较 为广泛， 因为大多数实验室培养的多环芳烃降解菌 种是好氧革兰氏阳性或阴性细菌和真菌。LI等［49］ 研究发现， 从老化的石油污染土壤中分离出的细 菌、 真菌以及细菌-真菌复合体的微生物群落能将 多环芳烃降解至较低的水平（降解率**45**%〜**56**%）， 且**2**〜**3**环比**4**环以上的多环芳烃降解更为迅速， 并 提出需要进行预处理（如化学预氧化） 以提高场地 土壤中多环芳烃的生物利用度和去除效率。 真菌 菌丝具有较高的比表面积， 可以最大限度地与不 溶性底物接触， 故对多环芳烃的降解程度高于其 他两种微生物群落。

目前， 国内外已建立了大量的污水处理生物 反应器装置。 为了将这一概念应用于多环芳烃污 染土壤的修复， 科研人员进行了相关研究工作。 MAY等［50］尝试将白腐真菌黄孢原毛平革菌在一个 反应器系统中进行培养， 该反应器最初包含**3 500** mL的限氮培养基和体积分数**0**.**1**%的Tween**8 0**表面活 性剂， 用于从一个天然气处理厂收集的高度污染土 壤中去除多环芳烃。在**39**七温度下进行了**36** d的观 察， 发现白腐真菌能够通过聚合过程将土壤中多环 芳烃的总浓度降低**45**%， 从而使大多数多环芳烃主 要转化为醌类。PINELLI等［51］选择了两种好氧生物 反应器， 一种是浆态的， 一种是半固态的， 分别采 用叶片搅拌和旋转容器。 结果显示， 浆态体系下多 环芳烃去除率较高（**40**%〜**89**%） ， 时间较快（**2**〜**14** d）。 与半固态体系相相比， 浆态体系中本地需氧 菌的活性、 氧气的传质速率和体系均质性更高。 污 染物的微生物降解性、 微生物对污染物的作用机理 以及降解菌的筛选是提高生物反应器修复处理效果 的关键。

1. 联合修复技术

虽然上述物理、 化学和生物处理已证明对多 环芳烃的去除有效， 但将它们应用于修复场地土壤 仍有限制， 包括修复老化土壤（尤其是含高环多环 芳烃土壤） 的有效性降低， 转化产物的积累， 修复 时间延长和成本增加。 为了解决这些限制， 常将不 同方法进行组合。

LEE等［52〕在生物反应器好氧生物降解之前， 使用溶剂（丙酮和乙醇） 来增加煤焦油污染土壤中 多环芳烃化合物的生物利用度。 在通风条件下， 土 壤先与两种溶剂混合**24** h， 然后转移至反应器中， 在**21**七的温度下进行生物降解。土壤经溶剂预处 理后多环芳烃的降解率较高，**17** d内可降解约**90**% 的多环芳烃， 而未经预处理的土壤达到同样修复 效果的时间为**35** d。 蒸发后残留的溶剂可被用作 微生物生长基质， 微生物菌落增加可促进多环芳 烃的降解。

DERUD I等［53］在生物处理后利用臭氧进行化 学氧化， 以增强多环芳烃的降解， 缩短土壤修复的 时间。 研究发现， 这种生物处理和化学处理相结合 的方法可以有效去除工业场地老化土壤中的多环芳 烃， 低环多环芳烃的去除率超过**90**%。 高分子量的 **4**环和**5**环化合物在额外的**13** h氧化周期后也被大量 除去。

化学氧化后利用生物修复方法进行处理也被 证明是有效的。KULIK等［54〕在好氧生物降解之 前， 利用芬顿试剂或臭氧处理人工掺入杂酚油的砂 和泥炭。 结果表明， 化学氧化预处理提高了多环芳 烃的生物降解性。 芬顿试剂处理后生物修复对杂酚 油污染砂中多环芳烃的去除效果较好， 而臭氧氧化 对杂酚油污染泥炭的去除效果较好。NAM等［55］的 研究也表明， 综合利用生物降解技术和改性芬顿 氧化技术， **2**环和**3**环多环芳烃的降解率可达**98**%以 上， **4**环和**5**环多环芳烃的降解率达到**70**%〜**85**%。

HAAPEA等［56〕考察了利用溶剂萃取、臭氧氧 化和生物处理相结合的方法修复老化多环芳烃污 染土壤的可行性。 该研究的主要目标是找出一种 方法， 使污染土壤的多环芳烃含量从初始值（**1 200** mg/kg） 降至芬兰对总多环芳烃的指导水平（**200** mg/ kg） 以下。 利用单一修复技术无法达到这一目标水 平， 但通过几种研究方法的组合， 多环芳烃减少了 **90**%。 在土壤清洗、 臭氧氧化和生物修复的综合处 理中， 臭氧消耗量比未经预清洗时大幅降低。

由于土壤类型、 污染物种类和污染程度的不 同， 单项修复技术往往不足以较好地治理污染场 地。 多种修复技术联合， 可以充分发挥各自优势， 消除缺陷。 将不同的修复技术进行联合使用， 将是 土壤修复技术发展的重要方向。

1. 其他修复技术

近些年来， 电动修复、 酶介导生物修复和多 过程植物修复已被应用于多环芳烃污染土壤的处 理中， 并在实验室规模和场地规模开展了一些研 究［57-58］。 电动修复技术在国内外污染场地中暂无 大规模应用。 分析美国环保属《超级基金修复报 告》可知， 截至目前， 超级基金场地修复项目近 **4 000**项技术应用中， 仅在**1998**年提及过一次电动 修复。 我国科研院所近年来对电动修复的研究也已 取得了阶段性突破， 但工程应用尚未见报道。 酶介 导的生物修复技术对于污染物类型具有较强的针对 性， 但是该技术操作复杂， 成本较高， 同时该技术 仍处于起步阶段。 植物修复的优点是投资和运行费 用少， 土壤可以得到改良；缺点是处于植物根部深

层的污染物得不到去除， 同时修复缺乏针对性， 可 能无法达到污染源位置， 而旦污染物的毒性可能影 响到植物的生长， 修复过程也比较缓慢。

这些新兴修复技术目前尚且处于实验室研究 阶段， 工程案例少， 未来与已建立的物理、 化学 和生物修复技术结合使用， 可能会获得更好的修 复效果。

7 结语

目前， 针对多环芳烃污染土壤已开发了多种 修复技术， 并且其中一些已进行了场地规模应用。 与实验室规模不同， 场地规模的修复受现场条件限 制， 如污染物特性， 土壤的孔隙率、 渗透性、 含水 量，微生物菌落以及土壤pH等。每种修复技术都 有其自身的特点、 优势和局限性， 任何单一的修复 方法都难以满足污染土壤修复的需要。 因此， 多种 土壤修复技术的整合是未来研究的方向。 此夕 ， 考 虑到成本与民众可接受度等因素， 绿色可持续的生 物修复技术将是未来土壤修复研究的热点。 因此， 利用群落指纹图谱和环境基因组学技术， 研究不同 时空尺度下污染场地微生物群落的结构和功能及其 对不同刺激的响应， 可以为污染场地微生物群落的 研究提供指导。 从科学角度讲， 使污染的土壤彻底 恢复原状是不切实际的， 因此， 有必要应用从风险 管控角度考虑的绿色修复方法修复长期受多环芳烃 污染的土壤。

参 考 文 献

1. CONNEY A H. Induction of microsomal enzymes by foreign chemicals and carcinogenesis by polycyclic aro­matic hydrocarbons：G. H. A. clowes memorial lecture [J]. Cancer Res，1982，42（12） ： 4875 - 4917.
2. YAN J，WANG L，FU P P，et al. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list[J]. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen，2004，557（1） ： 99 - 108.
3. WILD S R，JONES K C. Polynuclear aromatic hydro­carbons in the United Kingdom environment：a prelimi­nary source inventory and budget[J]. Environ Pollut， 1995，88（1） ： 91 - 108.
4. KUPPUSAMY S，THAVAMANI P，VENKATESWAR- LU K，et al. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons（PAHs） contaminated soils： technological constraints，emerging trends and future directions[J]. Chemosphere，2017，168：944 - 968.
5. 朱媛媛，田靖，魏恩琪，等. 天津市土壤多环芳烃 污染特征、源解析和生态风险评价[J].环境化学， 2014，33（2） ： 248 - 255.
6. 刘增俊，滕应，黄标，等. 长江三角洲典型地区农 田土壤多环芳烃分布特征与源解析[J]. 土壤学报， 2010， 47（6）： 1110 - 1117.
7. GAN S，LAU E V，NG H K. Remediation of soils con­taminated with polycyclic aromatic hydrocarbons（PAHs） [J]. J Hazard Mater， 2009， 172（2/3）： 532 - 549.
8. 卢晓霞，李秀利，马杰，等. 焦化厂多环芳烃污染土 壤的强化微生物修复研究[J].环境科学，2011, 32 （3）： 864 - 869.
9. 刘魏魏，尹睿，林先贵，等. 生物表面活性剂强化微 生物修复多环芳烃污染土壤的初探[J]. 土壤学报， 2010，47（6）：1118 - 1125.

[10]刘志阳.多环芳烃污染土壤修复技术研究进展[J]. 污染防治技术，2015，28（3）：19 - 21.

1. 杜永亮. 高浓度石油污染土壤溶剂萃取过程的研究 [D]. 天津：天津大学，2012.
2. 叶宇威，赵楠，栾辉，等. 有机溶剂浸取石油污染 土壤中的多环芳烃[J].化工环保，2019, 39（5）：

545 - 551.

1. 陈逸斌，吴明红，杨洁，等. 表面活性剂与柠檬酸 联合洗涤高黏性土壤中的重金属[J].化工环保， 2019，39（5） : 532 - 537.
2. 叶茂，杨兴伦，魏海江，等. 持久性有机污染场地 土壤淋洗法修复研究进展[J]. 土壤学报，2012, 49 （4）： 803 - 814.

[15]冯超，王瑜，孔令镕，等.超临界CO2萃取修复污染 土壤的发展与展望[J].现代化工，2020, 40（5）: 23 - 27，31.

1. 高士祥，高松亭，韩朔睽，等. 表面活性剂清洗法 在污染土壤修复中的应用[J].环境科学，2000, 21

（I） ： 84 - 86.

1. AHN C K，KIM Y M，WOO S H，et al. Soil wash­ing using various nonionic surfactants and their recov­ery by selective adsorption with activated carbon[J]. J Hazard Mater，2008，154（1/3）： 153 - 160.
2. ZHOU W J，ZHU L Z. Efficiency of surfactant-enhanced desorption for contaminated soils depending on the component characteristics of soil-surfactant-PAHs system

[J] . Environ Pollut，2007，147（1）： 66 - 73.

[19]孙明明，滕应，骆永明，等.甲基卩环糊精对污染场 地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究[J].环

境科学，2013，34（6） ： 2428 - 2435.

1. VIGLIANTI C，HANNA K，DE BRAUER C，et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged-contaminated soil using cyclodextrins：experi- mental study[J]. Environ Pollut，2006，140（3） ： 427 - 435.
2. 孙翼飞，巩宗强，苏振成，等. 应用表面活性剂-生 物柴油微乳液去除污染土壤中多环芳烃[J].环境工 程学报，2012，6（6） ： 2023 - 2028.
3. GONG Z Q，ALEF K，WILKE B M，et al. Dissolu­tion and removal of PAHs from a contaminated soil using sunflower oil[J]. Chemosphere，2005，58（3）： 291 - 298.
4. PANNU J K，SINGH A，WARD O P. Vegetable oil as a contaminated soil remediation amendment：applica- tion of peanut oil for extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil[J]. Process Biochem. 2004， 39（10） ： 1211 - 1216.
5. 黄卫红，赵柳青，赵天珍，等. 土壤中不同极性污 染物的亚临界水选择性萃取[J].分析化学，2006, 34（8） ： 1187 - 1189.

[25]欧阳勋，陈家玮，张小岗.超临界CO2流体萃取土壤 中污染物的应用研究进展[J].地质通报，2010, 29 （11）：1655 - 1661.

26] 赵丹，廖晓勇，阎秀兰，等. 不同化学氧化剂对焦 化污染场地多环芳烃的修复效果[J].环境科学， 2011，32（3）：857 - 863.

[27] MORA V C，MADUENO L，PELUFFO M，et al.

Remediation of phenanthrene-contaminated soil by simultaneous persulfate chemical oxidation and bio­degradation processes[J]. Environ Sci Pollut Res， 2014，21：7548 - 7556.

1. RYBNIKOVA V，SINGHAL N，HANNA K. Reme­diation of an aged PCP-contaminated soil by chemical oxidation under flow-through conditions[J]. Chem Eng J，2017，314：202 - 211.
2. CHEN F，LUO Z B，LIU G J，et al. Remediation of electronic waste polluted soil using a combination of persulfate oxidation and chemical washing[J]. J Environ Manage，2017，204（1）：170 - 178.
3. 龙海波，高焕方，李聪，等. 铁活化过硫酸盐修复 石油烃污染土壤的研究进展[J].化工环保，2019， 39（3） ： 241 - 246.
4. FLOTRON V，DELTEIL C，PADELLEC Y，et al.

Removal of sorbed polycyclic aromatic hydrocarbons from soil，sludge and sediment samples using the Fen­ton's reagent process[J]. Chemosphere，2005，59 （10）： 1427 - 1437.

[32]潘玉兰.Fenton试剂氧化降解水和土壤中多环芳烃 [D]. 南京：南京农业大学，2014.

1. WATTS R J，HALLER D R，JONES A P，et al. A foundation for the risk-based treatment of gasoline-con­taminated soils using modified Fenton's reactions[J]. J Hazard Mater ， 2000 ， 76（1） ： 73 - 89.
2. 牛秋雅，曾光明，牛一乐，等. 臭氧预氧化-堆肥 去除污染土壤中菲实验研究[J].环境科学学报， 2009，29（11）：2352 - 2358.
3. O*'* MAHONY M M，DOBSON A D W，BARNES J D，et al. The use of ozone in the remediation of poly­cyclic aromatic hydrocarbon contaminated soil[J]. Chemosphere，2006，63（2）： 307 - 314.
4. MASTEN S J，DAVIES S H R. Efficacy of in-situ for the remediation of PAH contaminated soils[J]. J Con- tam Hydrol，1997，28（4）：327 - 335.
5. VAN BAVEL B. Comparison of Fenton's reagent and ozone oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aged contaminated soils（7 pp）[J]. J Soils Sedi- ments，2006，6：208 - 214.
6. FERRARESE E，ANDREOTTOLA G，OPREA I A. Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation[J]. J Hazard Mater ， 2008 ， 1 52（1） ： 128 - 139.
7. CHEN Y，ZHAO R Z，XUE J，et al. Generation and distribution of PAHs in the process of medical waste incineration[J]. Waste Manage，2013，33（5）： 1165 - 1173.
8. ACHARYA P，IVES P. Incineration at Bayou Boun- fouca remediation project[J]. Waste Manage，1994， 14（1） ： 13 - 26.

[41]陈星，宋昕，吕正勇，等.PAHs污染土壤的热修复 可行性[J].环境工程学报，2018, 12（10）： 2833 - 2844.

1. 焦文涛，韩自玉，吕正勇，等. 土壤电阻加热技术 原位修复有机污染土壤的关键问题与展望[J].环境 工程学报，2019，13（9）： 2027 - 2036.
2. RENOLDI F，LIETTI L， SAPONARO S，et al. Thermal desorption of a PAH-contaminated soil：a case study[M]//TIEZZI E，BREBBIA CA，USO J L. Advances in Ecological Sciences：19. Southampton： WIT Press，2003：1123 - 1132.
3. HARMON T C，BURKS G A，AYCAGUER A C，et al. Thermally enhanced vapor extraction for removing PAHs from lampblack-contaminated soil[J]. J Environ Eng，2001，127(11)： 986 - 993.
4. 张雷，赵奇，武伟男，等. 石油污染土壤生物修复技 术现状与展望[J].现代化工,2018, 38(1)： 18 -22.
5. HANSEN L D，NESTLER C，RINGELBERG D，et al. Extended bioremediation of PAH/PCP contaminated soils from the POPILE wood treatment facility[J]. Chemosphere，2004，54(10)： 1481 - 1493.
6. WANG S Y，KUO Y C，HONG A，et al. Bioreme­diation of diesel and lubricant oil-contaminated soils using enhanced landfarming system[J]. Chemosphere， 2016，164：558 - 567.
7. DE SOUZA POHREN R，DE OLIVEIRA LEITE D A N，DE FRANCESCHI DE ANGELIS D，et al. Perfor­mance of simulated bioremediation in real samples of soils contaminated with PAHs[J]. Water，Air，Soil Pollut， 2016，227：330.
8. LI X J，LIN X，LI P J，et al. Biodegradation of the low concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by microbial consortium during incubation[J]. J Hazard Mater， 2009， 172(2/3)： 601 - 605.

[50] MAY R, SCHRODER P, SANDERMANN H. Ex-Situ process for treating PAH-contaminated soil with *Pha- nerochaete chrysosporium*[J]. Environ Sci Technol， 1997，31(9)： 2626 - 2633.

1. PINELLI D，FAVA F， NOCENTINI M，et al. Biore­mediation of a polycyclic aromatic hydrocarbon-con­taminated soil by using different aerobic batch bioreac­tor systems[J]. J Soil Contam，1997，6(3)： 243 - 256.
2. LEE P H，ONG S K，GOLCHIN J，et al. Use of sol­vents to enhance PAH biodegradation of coal tar-con­taminated soils[J]. Water Res，2001，35(16)： 3941 - 3949.
3. DERUDI M，VENTURINI G，LOMBARDI G，et al. Biodegradation combined with ozone for the remedia­tion of contaminated soils[J]. Eur J Soil Biol，2007， 43(5/6)： 297 - 303.
4. KULIK N，GOI A，TRAPIDO M，et al. Degrada­tion of polycyclic aromatic hydrocarbons by combined chemical pre-oxidation and bioremediation in creosote contaminated soil[J]. J Environ Manage，2006，78 (4)： 382 - 391.
5. NAM K，RODRIGUEZ W，KUKOR J J. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by biodegradation combined with a modified Fenton reac- tion[J]. Chemosphere ， 2001 ， 45 ( 1 ) ： 11 - 20.
6. HAAPEA P，TUHKANEN T. Integrated treatment of PAH contaminated soil by soil washing，ozonation and biological treatment[J]. J Hazard Mater，2006，136 (2)： 244 - 250.
7. 胡芳雨，孟凡波，张闻，等. 黑麦草根系分泌物氨 基酸组分对PAHs胁迫的响应[J].农业环境科学学 报，2020，39(9)： 1937 - 1945.
8. 徐宏婷，仓龙，宋岳. 电动-氧化修复条件对土壤中 多环芳烃和重金属去除的影响探索[J].环境污染与 防治，2019，41(1)： 10 - 15，22.

(编辑魏京华)

扫码了解更多相关信息