

石油污染土壤修复技术研究进展

李 丽¹, 董万涛², 张 兴¹, 李韵文¹

(1. 中铁科学研究院有限公司成都分公司, 成都 610031; 2. 兰州理工大学, 兰州 730000)

摘要: 研究高效、环保、低成本的石油污染土壤修复技术对石油开发场地修复具有重要的现实意义。从工艺和原理两个方面介绍和总结了焚烧法、洗涤法、气相抽提法、化学氧化法、微生物和植物法修复的研究现状及发展趋势。对上述工艺进行比较, 总结出各类工艺的优缺点及使用范围。由于污染场地的地质结构、气候条件和污染程度等情况复杂, 仅靠单一工艺很难达到预期目标, 有必要对已有技术进行完善并开发组合土壤修复技术及设备, 满足实际工程的需求。

关键词: 石油污染土壤; 物理修复; 化学修复; 生物修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1001-3644(2020)04-0200-06

Research Progress on Remediation of Oil-contaminated Soil

LI Li¹, DONG Wan-tao², ZHANG Xing¹, LI Yun-wen¹

(1. Chengdu Branch of China Railway Academy Co. Ltd, Chengdu 610031, China;

2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The study of high efficiency, environmental friendly and low cost remediation technology for petroleum contaminated soil has important practical application significance for remediation of petroleum development site. This paper introduced and summarized the research status and development trend of incineration, washing, gas extraction, chemical oxidation, microbial and plant remediation from two aspects of technology and principle. The advantages and disadvantages of the above processes were compared and their range of application was summarized. Due to the complicated geological structure, climatic conditions and pollution degree of the contaminated site, it is difficult to achieve the expected target only by a single process, so it is necessary to improve the existing technology and develop combined soil remediation technology and equipment to meet the needs of the actual project.

Keywords: Petroleum-contaminated soil; physical repair; chemical remediation; bioremediation

引 言

近年来随着工业生产力的提高, 排放到自然环境中污染物的量也在逐年增加。土地和水被污水、垃圾和工业产生的化学废物所污染。例如在石油的开采、储藏、运输及加工等环节存在各种形式的泄漏, 造成土壤、地下水和周边环境的污染, 间接的对人类和动植物造成危害, 土壤污染已经成为中国迫在眉睫需要解决的问题。由于中国的快速发展、

企业的搬迁, 遗留了大量的污染场地, 其中部分污染土地如需要再开发或复耕, 若未处理使用会为人口稠密区域带来环境和健康风险。

近几年土壤的显性污染和隐性污染事件频发, 研究学者在异位和原位修复技术方面也在不断探索。本文结合国内外土壤修复的最新研究成果, 综合讨论了不同修复技术的优缺点, 以期对我国土壤修复实验和现场应用提供基础参考。

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 中铁科学研究院有限公司重点项目(中铁科研院(科研)字2018-KJ003-Z003-XB)。

作者简介: 李 丽(1982-), 女, 山西大同人, 2009年毕业于兰州交通大学环境工程专业, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地下水及土壤污染修复技术研究及应用。

通讯作者: 董万涛, d316284531@163.com。

1 污染土壤的修复方法

20 世纪 80 年代以来, 土壤污染成为世界各国普遍关注的环境问题, 许多学者开展了对土壤污染修复的研究。目前已经开发了各种技术来解决土壤污染治理的问题。这些方法可分为三大类: 物理法、化学法和生物法。根据土壤修复地点的不同, 可分为原位修复和异位修复两种类型。以下整理了各方法使用范围及特点。

1.1 物理法

1.1.1 焚烧法

利用焚烧炉在 900 ~ 1 200℃ 之间可以有效的去除土壤中的石油类、多环芳烃等污染物。现场修复包括开挖和焚烧, 通过焚烧土壤中的石油类、多环芳烃等污染物去除率高达 99% 以上^[1]。在焚烧过程中产生的尾气需要建设尾气处理装置, 处理达标的尾气排放到环境中也是对环境的二次污染, 同时还需要消耗更多的能源, 处理成本高, 成为焚烧炉技术的主要缺点^[2]。

1.1.2 洗涤法

溶剂萃取和土壤清洗是一种土壤修复的清洁技术, 用于处理高浓度 TPH 污染的土壤, 由于这些污染物具有高疏水性、低生物利用率和缓慢的解吸作用, 其去除效果不如预期^[3]。在溶剂萃取和土壤清洗解吸的基础上可以得到洗脱后的提取液, 然后对提取液进行处理。Conte 等^[4]提出天然表面活性剂, 腐殖酸作为高 TPH 污染土壤的较好洗选剂, 其清洗效果优于水和表面活性剂十二烷基硫酸钠等。近年来, 作为生物柴油主要组成部分的脂肪酸甲酯在去除 TPH 方面表现出了比甲醇和大豆油和其他清洗剂更好的效果。多环芳烃浓度为 997mg/kg 的污染土壤, 多环芳烃的去除比例在 46% ~ 59% 之间^[3]。目前异位淋洗修复设备还有很大的发展空间, 发展高效、便捷的淋洗设备具有重要的实际意义^[5]。

1.1.3 气相抽提法

气相抽提技术 (SVE) 是一种土壤真空抽提或土壤通风的技术, 是去除土壤中挥发性有机物的一种原位修复技术, 其工艺原理是将新鲜空气通过管道注入土壤污染区域, 由空气解吸并携带土壤中的挥发性有机物, 通过抽气并流回到地面上收集并处理的过程^[6]。刘沙沙等^[7]在广东省某柴油污染场地进行了气相抽提技术修复工程, 3 个后, 土壤中

TPH 的去除率为 64.88%。气相抽提技术在土壤中 VOCs 含量较高时, 适宜采用气相抽提, 土壤中 VOCs 含量较低时, 可采用生物通风。该技术适用于受挥发性有机污染物污染的不饱和区砂质土壤^[8]。

1.2 化学氧化法

向石油污染土壤中添加各种氧化剂被称作化学氧化法, 目前常用的氧化剂有 KMnO_4 、 CaO_2 、 H_2O_2 、 O_3 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、Fenton 等试剂, 利用化学氧化剂与污染物发生氧化反应, 达到去除污染物的效果。高级氧化工艺的概念于 1987 年首次提出, 其目的是将废水中的有机污染物氧化成简单、无害的无机分子^[9]。该技术已被广泛应用于原位地下水和土壤修复中。由于高氧化电位羟基自由基受到青睐, 然而, 羟基自由基的半衰期很短, 可以在几秒钟内完成, 这限制了其在地下水和土壤原位修复方面的应用。因此, 在过去的十年中, 硫酸根自由基氧化法受到了关注。硫酸根的半衰期可以长达数小时, 比羟基自由基的半衰期长得多, 因为硫酸根自由基比羟基自由基对电子转移反应的选择性更强^[10]。自由基氧化还原电位见表 1^[11]。

表 1 几种自由基的氧化还原电位

Tab. 1 Redox potentials of several free radicals (V)

自由基	氧化还原电位
$\text{SO}_4^{\cdot -} + e^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$	2.5 ~ 3.1
$\cdot\text{OH} + e^- \rightarrow \text{OH}^-$	1.8
$\cdot\text{OH} + \text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	2.7
$\text{HO}_2 \cdot + 3\text{H}^+ + 3e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	1.65
$\text{HO}_2 \cdot + \text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	1.44
$\text{SO}_5^{\cdot -} + e^- \rightarrow \text{SO}_5^{2-}$	1.1

氧化反应主要通过间歇实验进行, 批量实验的氧化条件非常多样化。例如, 通常一次性加入氧化溶液, 但也可以按顺序加入。在研究文献中也发现氧化剂和污染物之间的接触时间范围也很大, 从 30min 到 170d 不等。接触时间较短时可以使用 Fenton 试剂和 O_3 等短效氧化剂, 而较长接触时间可以使用 KMnO_4 、 CaO_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 等长效氧化剂。臭氧氧化过程中的接触时间往往小于 6h; 氢过氧化物氧化通常为 1d; 过硫酸盐和高锰酸盐氧化通常为 1 ~ 7d^[12~14]。现对不同氧化剂在不同的条件下不同浓度污染物的去除效果进行对比, 见表 2。

表 2 不同氧化剂在不同条件下对污染物的去除效果

Tab. 2 The removal effect of different oxidants on pollutants under different conditions

参考文献	氧化剂及活化剂用量	反应周期 (d)	土壤质量 (g)	污染物浓度	去除率 (%)
吴昊等 ^[15]	Na ₂ S ₂ O ₈ : 2mmol/g; Na ₂ S ₂ O ₈ /CaO ₂ /Fe ²⁺ /柠檬酸 = 5/2/1/1	7	10	15000mg/kg; TPH	82.1
Killian et al. ^[16]	Na ₂ S ₂ O ₈ : 2mol/L, 150mL; Fe ²⁺ : 0.04mol/L, 150mL; 柠檬酸: 1mol/L, 50mL	19	75	6400mg/kg; PAHs	92.2
Lundstedt et al. ^[17]	H ₂ O ₂ : 15%, 1mL; Fe ²⁺ : 5mmol/L, 1mL; 乙醇: 1mL/g;	1	1	1608mg/kg; PAHs	40
Silva et al. ^[18]	H ₂ O ₂ : 68mmol; Fe ²⁺ : 0.34mmol; 蒸馏水: 10mL;	4h	5	113.1mg/kg; PAHs	95.6
虞敏达等 ^[19]	KMnO ₄ : 0.4mol/L, 15mL; 蒸馏水: 100mL;	5h	10	57.5mg/kg; CBs	95.96
徐正国等 ^[20]	KMnO ₄ : 8g; 蒸馏水: 100mL;	2	20	408.42mg/kg; PAHs	苯并芘: 45.28 其余 PAHs: 70~90
Ouriache et al. ^[21]	H ₂ O ₂ : 4.5mol; Fe ²⁺ : 0.3mol; 乙二胺四乙酸: 0.3mol;	2	1000	30510mg/kg; TPH	72.2

注: TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) 总石油烃; PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 多环芳烃; CBs (Chlorobenzenes) 氯苯类化合物。

利用化学氧化法处理石油类污染土壤,已在实验室、中试和大规模研究中得到验证。相比传统的物理修复和生物修复方法,这一方法代表了一种非常实用的解决方案。应用化学氧化法处理污染土壤时,一个主要问题是确定氧化剂的最佳投加量。尽管已有大量的文献使用不同的参数来确定投加量,但是通过比较现有的研究成果来预测最佳投加量是一项难度高、工作量大、针对性强的过程。在实际工程中石油类污染土壤是具有高度的异质性,土壤特性(有机和矿物组分的性质)和污染物特性(污染物浓度、组成、分布和老化程度)的差异性,均为预测量投加量带来挑战。

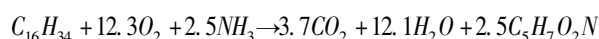
目前,国内外在化学氧化法处理污染土壤这一领域取得了较大的进展,但大规模应用仍面临挑战。对于高级氧化处理,主要的挑战是氧化剂必须有效的降解高度污染的老化土壤。以及氧化副产物的处理。因此,污染物质在氧化过程中产生的有害性物质是未来研究的重要课题。今后的研究不仅应致力于氧化修复技术的效能研究,而且还应致力于氧化修复后对土壤理化性质的影响,这对处理后场地再利用地是非常重要的。

1.3 生物法

1.3.1 微生物修复技术

微生物修复是利用生物过程降解环境中的有害化学物质。在微生物修复过程中,微生物将污染物降解或转化为毒性较小或无害的形式,如二氧化碳

和水^[22]。微生物修复定义为“微生物在处理有害物质过程中的应用”,生物修复的最终目的是使有机污染物矿化,微生物矿化正十六烷的化学反应方程式如下^[23]。在过去的30年里,微生物修复技术得到了广泛的应用^[24],能够在适宜气候条件下微生物修复石油类污染土壤是一种常用的解决方案^[25]。但是,现在越来越多的人认为,在寒冷的气候条件下,利用微生物修复石油类污染土壤也是可行的^[26]。在石油类污染土壤的治理中,微生物修复被认为是安全,环保和经济的。石油类污染土壤的生物降解方面已经得到了很好的评价。生物修复包括土地耕作、微生物修复、植物修复和异位生物反应器处理。



微生物修复之所以引起人们的兴趣,是因为能将大多数碳氢化合物转化为无害的副产品,消除对人类健康和生态环境的影响。然而,生物修复的应用也有局限性,微生物修复需要比物理方法和化学方法更长的时间。微生物在土壤中主要存在于土壤孔隙水溶液中。水是微生物活动所必需的。它是微生物细胞的主要组成部分,确保营养物质和能量运输到细胞。水还会影响土壤中氧含量、可溶性物质的性质和数量以及土壤的pH值^[27]。土壤最佳含水率范围是从50%到80%^[26]。在自然环境中,微生物可以在土壤pH值为在4到9之间生存,但pH接近中性时最适合生物修复^[22]。土壤中的营养物

质,主要是磷和氮,可以限制生物降解。其他营养物质(如钙、镁、钾)也是必需的,通常这些营养物质在环境中的存在是足够的。已经有许多研究表明,添加营养物质会促进生物降解,但推荐的使用比例差别很大^[28-29]。微生物的新陈代谢与温度成正比。在0℃以下,生物降解作用可以忽略不计,温度还影响污染物的物理化学特性(如扩散、粘度、溶解度、挥发性),从而影响土壤微生物的生物降解率^[30]。在微生物群落的生长温度范围内,温度的升高会刺激生物降解^[31]。McCarthy等^[32]利用微生物修复石油类污染土壤,历时55d TPH从1400mg/kg降低到430mg/kg,TPH去除率为69.3%。Filler等^[33]在-42℃的条件下利用微生物修复石油类污染土壤,利用电加热和电热毯对土壤进行保温,使土壤温度维持在15℃,土壤中TPH的去除率为60%。

1.3.2 植物修复技术

污染土壤的植物修复机制可以概括为植物直接吸收石油污染物,植物根部分泌各种有机物促进污染物的降解及植物根部微生物对污染物的降解^[34],在植物生长的过程中从环境中去除污染物或使其无害化所涉及的过程如下:植物对污染物的吸收、转移、积累和根部细胞对有机污染物的代谢。植物修复效率取决于环境温度等多种因素,例如土壤的有机质含量、pH值、营养元素等^[35]。利用植物技术

对石油污染土壤进行修复,不仅可以创造健康的环境,还可以恢复土壤的功能。在过去的20年里,人们开发了各种各样的方法来修复被污染的土壤,包括使用溶剂萃取技术、化学氧化、土壤稳定和固化、热处理和生物降解。其中一种方法称为绿色技术,它利用植物及其相关微生物来降解、稳定、减少和清除环境中的污染物。植物修复是一种友好的环境,有效的,低成本的技术,它的污染物修复能力,特别是石油污染土壤。这是一种经济可靠的修复方法,特别是过量的石油碳氢化合物、多环芳烃、危险的有机材料和营养物质。Pradhan等^[36],使用苜蓿和羊草修复受石油污染的土壤,在6个月内,多环芳烃平均减少了57%。Palmroth等^[37]采用了几种植物来修复被柴油污染的土壤,柴油化合物在草根中的浓度较低,每公斤干植物组织约检测到10g柴油化合物,而在豆科植物的根中没有检测到柴油化合物。松树和杨树的处理也提高了柴油的去除率,三角胡杨从氮磷钾施肥改良土壤中去掉柴油的能力最强,平均为60%。真菌与宿主植物根系之间是共生关系,真菌在植物根系中建立了广泛的菌丝网络。真菌在植物对水分和营养物质的吸收中起着重要的作用,通过改善和加速植物生长,从而提高有机污染物的降解率^[38]。表3对各类修复技术的综合比较。

表3 各类修复技术的综合比较

Tab.3 Comparison of various repair technologies

修复方法	修复技术	适用范围	优点	缺点
物理修复技术	焚烧法	适用于高浓度TPH污染,处理方式为异位处置。	①污染物处理彻底;②处理速度快,不需要对污染物长距离运输、储存;③焚烧过程中产生的预热可以二次利用。	①项目投资大,处理成本高;②在焚烧过程中尾气对环境有污染;③需对燃烧尾气进行处理。
	洗涤法	适用于高浓度TPH污染,处理方式为原位或异位处置。	对高浓度石油类污染土壤处理效果好,处理后的石油污染物可回收。	①项目投资大,处理工艺复杂、流程长;②处理成本高。
	气相抽提法	适用于挥发性有机物含量较高的污染土壤,处理方式为原位处置。	对挥发性有机物污染土壤效果非常好,技术工艺成熟。	在处理过程中容易会引起二次污染。
	土壤耕作法	适用于石油工业废物和污泥的处理,对已溶解到水中的低浓度污染物的清除效果显著,处理方式为异位处置。	处理成本小,对土壤渗透性较差、土层较浅、污染物又易降解的土壤处理效果好。	对难降解的和高浓度的污染物效果较差。
化学修复技术	化学氧化法	适用于污染浓度高,污染面积大,土壤渗透性好的土壤,处理方式为原位处置。	可以对土壤深处和地下水的污染物同时治理,且有效治理时间可以控制。	治理过程中有副产物产生。
生物修复技术	生物反应器法	适用于污染浓度高,污染面积小,处理方式为异位处置。	对高浓度的污染土壤处理效果好。	①技术工艺比较复杂;②只适合小范围的污染土壤治理;③对难降解的污染物,处理效果差。
	植物修复技术	适用于面积大、污染轻的地方,处理方式为原位处置。	处理成本低,对环境没有二次污染。	修复周期长。

2 结 论

目前,大量的修复技术仍处于发展阶段,在实践中经常用到的处理石油类污染土壤的方法,都不能完全的解决土壤污染问题。在污染场地选择焚烧、洗涤、化学氧化和生物修复的方法,是因为每个污染现场的实际情况都不相同,在工艺选择方面需要仔细权衡所有相关的因素,比如整治政策的限制、可用的资金支持和大众接受程度。要恢复污染土壤的所有自然功能是不现实的,考虑到各种因素的限制,并不是每个地点都能完全恢复到原始状态。因此,在选择修复工艺过程中以绿色修复为方针,尽可能避免修复过程中的二次污染。

参考文献:

- [1] Chen Y, Zhao R, Xue J, et al. Generation and distribution of PAHs in the process of medical waste incineration [J]. Waste Management, 2013, 33(5): 1165-1173.
- [2] Islam M N, Jo Y T, Park J H. Remediation of PAHs contaminated soil by extraction using subcritical water [J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2012, 18(5): 1689-1693.
- [3] Gong Z, Wang X, Tu Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon removal from contaminated soils using fatty acid methyl esters [J]. Chemosphere, 2010, 79(2): 138-143.
- [4] Conte P, Agretto A, Spaccini R, et al. Soil remediation: humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils [J]. Environmental Pollution, 2004, 135(3): 515-522.
- [5] 何岱,周婷,袁世斌,等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展 [J]. 四川环境, 2010, 29(5): 103-108, 113.
- [6] 沈铁孟,黄国强,李凌,等. 石油污染土壤的原位修复 [J]. 环境科学, 2000, 21(3): 13-15.
- [7] 刘沙沙,陈志良,刘波,等. 土壤气相抽提技术修复柴油污染场地示范研究 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 172-181.
- [8] 陈家桂,黄冠焱,雷蕾,等. 初探污染场地的土壤修复过程与修复技术 [J]. 四川环境, 2012, 31(S1): 122-127.
- [9] Glaze W H, Kang J W, Chapin D H. The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation [J]. Ozone: Science & Engineering, 1987, 9(4): 335-352.
- [10] Rastogi A, Al-Abed S R, Dionysiou D D. Effect of inorganic, synthetic and naturally occurring chelating agents on Fe(II) mediated advanced oxidation of chlorophenols [J]. Water Research, 2009, 43(3): 684-694.
- [11] Brillas E, Sirés I, Oturan M A. Electro-Fenton Process and Related Electrochemical Technologies Based on Fenton's Reaction Chemistry [J]. Chemical Reviews, 2009, 109(12): 6570-6631.
- [12] Haapea P, Tuhkanen T. Integrated treatment of PAH contaminated soil by soil washing, ozonation and biological treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(2): 244-250.
- [13] Liao X, Zhao D, Yan X. Determination of potassium permanganate demand variation with depth for oxidation - remediation of soils from a PAHs-contaminated coking plant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 193(none): 164-170.
- [14] Usman M, Faure P, Hanna K, et al. Application of magnetite catalyzed chemical oxidation (Fenton-like and persulfate) for the remediation of oil hydrocarbon contamination [J]. Fuel, 2011, 90(7): 270-276.
- [15] 吴昊,孙丽娜,王辉,等. CaO₂/Fe²⁺活化过硫酸钠对石油类污染土壤的修复效果 [J]. 环境化学, 2016, 35(4): 623-628.
- [16] Killian P F, Bruell C J, Liang C. Iron (II) Activated Persulfate Oxidation of MGP Contaminated Soil [J]. Soil and Sediment Contamination, 2007, 16(6): 523-537.
- [17] Lundstedt S, Persson Y, Oberg L. Transformation of PAHs during ethanol-Fenton treatment of an aged gaswork's soil [J]. Chemosphere, 2006, 65(8): 1288-1294.
- [18] Silva P T S, Locatelli M A F, Jardim W F, et al. Endogenous iron as a photo-Fenton reaction catalyst for the degradation of PAH's in soils [J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2008, 19(2): 329-336.
- [19] 虞敏达,李定龙,王继鹏,等. 不同化学氧化剂对氯苯类污染土壤修复效果比较 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 4075-4082.
- [20] 徐正国,唐秋萍,王颖,等. 不同氧化剂对某煤制气厂多环芳烃污染土壤的修复效果研究 [J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 988-992.
- [21] Ouriache H, Arrar J, Namane A, et al. Treatment of petroleum hydrocarbons contaminated soil by Fenton like oxidation [J]. Chemosphere, 2019, 232(none): 377-386.
- [22] 文湘华,等. 环境生物技术原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [23] Cookson J R. Bioremediation Engineering: Design and Application [M]. New York: McGrawHill, Inc. 1995.
- [24] Litchfield C. Thirty Years and Counting: Bioremediation in Its Prime? [J]. BioScience, 2005, 55(3): 273-279.
- [25] Dobson R, Schroth M H, Schuermann A, et al. Methods to assess the amenability of petroleum hydrocarbons to bioremediation [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, 23(4): 929-937.
- [26] Aislabie J, Saul D J, Foght J M. Bioremediation of hydrocarbon-contaminated polar soils [J]. Extremophiles, 2006, 10(3): 171-179.
- [27] Hamme J D V, Singh A, Ward O P. Recent advances in petroleum microbiology [J]. microbiology and molecular biology reviews, 2003, 67(4): 503-549.
- [28] Braddock J F, Ruth M L, Catterall P H. Enhancement and Inhibition of Microbial Activity in Hydrocarbon-Contaminated Arctic Soils: Implications for Nutrient-Amended Bioremediation [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(7): 2078-2084.
- [29] Delille D, Coulon F, Pelletier E. Effects of temperature warming during a bioremediation study of natural and nutrient-amended hydrocarbon-contaminated sub-Antarctic soils [J]. Cold Regions

- Science and Technology ,2004 ,40(1-2) : 61-70.
- [30] Ferguson S H , Franzmann P D , Snape I , et al. Effects of temperature on mineralisation of petroleum in contaminated Antarctic terrestrial sediments [J]. Chemosphere , 2003 , 52 (6) : 975-987.
- [31] Mohn W W , Stewart G R. Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperature in Arctic soils [J]. Soil Biology and Biochemistry ,2000 ,32(8-9) : 1161-1172.
- [32] McCarthy K , Walker L , Vigoren L , et al. Remediation of spilled petroleum hydrocarbons by in situ landfarming at an arctic site [J]. Cold Regions Science and Technology ,2004 ,40(1-2) : 31-39.
- [33] Filler D M , Lindstrom J E , Braddock J F , et al. Integral biopile components for successful bioremediation in the Arctic [J]. Cold Regions Science and Technology ,2001 32(1-2) : 143-156.
- [34] 黄荣霞 ,周际海 ,袁颖红 ,等. 石油污染土壤修复研究进展 [J]. 南昌工程学院学报 2016 35(3) : 48-54.
- [35] Agnello A C , Bagard M , Hullebusch E D V , et al. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation , phytoremediation , bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation [J]. Science of the Total Environment ,2016 ,563-564(none) : 693-703.
- [36] Pradhan S P , Conrad J R , Paterek J R , et al. Potential of Phytoremediation for Treatment of PAHs in Soil at MGP Sites [J]. Soil and Sediment Contamination (formerly Journal of Soil Contamination) ,1998 ,7(4) : 467-480.
- [37] Palmroth M R T , Pichtel J , Puhakka J A. Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel [J]. Bioresource Technology ,2002 ,84(3) : 221-228.
- [38] Lenoir I , Fontaine J , Sahraoui H. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review [J]. Phytochemistry , 2016 ,123(none) : 4-15.