



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

陈紫彤,任爱玲,刘烁.石油类污染土壤修复技术研究进展[J].能源环境保护,2020,34(4):1-6.

CHEN Zitong,REN Ailing,LIU Shuo. Research progress in remediation technology of petroleum contaminated soil [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 1-6.

石油类污染土壤修复技术研究进展

陈紫彤,任爱玲*,刘烁

(河北科技大学 环境科学与工程学院,河北 石家庄 050000)

摘要:针对石油类污染土壤,阐述了生物修复、物理修复、化学修复和复合修复技术中的研究热点,概括了典型技术的原理、特点和研究重点。分析认为:生物修复技术应用较为普遍,当前研究重点在于降解菌株筛选和活性剂制备,可运用分子生物学、遗传学理论、DNA诊断和基因工程等手段进行基因重组,筛选或培育转基因生物来提高降解率;物理修复技术效率高、耗时少、能耗高、成本高,需进一步加强尾气处理、能源替代和优化回收处理等方面的研究;化学修复技术效率高、能耗低,仍存在氧化剂残留、副产物残留、修复成本高等问题,可加强对绿色、高效表面活性剂和催化剂的研发;单一修复技术不足以满足当前石油类土壤修复需求,联合修复技术优势明显。

关键词:石油;污染;修复;土壤;修复技术

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)04-0001-06

Research progress in remediation technology of petroleum-contaminated soil

CHEN Zitong,REN Ailing*,LIU Shuo

(College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The research hotspots of bioremediation, physical remediation, chemical remediation and composite remediation technologies for petroleum-contaminated soil treatment were described. The principles, characteristics and research focuses of typical technologies were summarized. The results show that bioremediation technology is widely used and the current related research focuses on the screening of degrading strains and preparation of active agents. Molecular biology, genetic theory, DNA diagnosis and genetic engineering can be used for gene recombination, screening or cultivating transgenic organism to increase the degradation rate. Physical remediation technology has the characteristics of high efficiency, low time consumption, high energy consumption and high cost, so further research on tail gas treatment, energy substitution and recovery treatment optimization is needed. Chemical remediation technology has high efficiency and low energy consumption, but still contains some problems such as oxidant residue, by-product residue and high repair cost. Thus it is suggested to develop green and efficient surfactants and catalysts. Single remediation technology cannot meet the current needs of petroleum soil remediation, however composite remediation technology shows obvious advantages.

Key Words: Oil; Pollution; Remediation; Soil; Remediation technology

0 引言

目前石油资源已成为日常能源,据估计未来

20年,世界石油需求量将增至10.7万桶/天,到2030年,石油将占世界能源供应的32%^[1]。然而,石油在生产、使用过程中产生大量石油类污染

收稿日期:2020-05-07

基金项目:河北省重点研发计划项目(19273714D;19273813D)

第一作者简介:陈紫彤(1997-),女,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为土壤修复。E-mail:chen1997zitong@163.com

通信作者简介:任爱玲(1963-),女,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为土壤修复。E-mail:Ailingr@163.com

物,如环烷烃、芳香烃等总石油烃。石油类污染物进入土壤后不仅影响土壤性质和生物群落,且对人类身体健康也将产生危害。根据《中国环境年鉴》,我国关停、转迁的企业总数超过 1.0×10^5 家^[2],企业搬迁后场地中仍残留高浓度有机污染物。2016年《土壤污染防治行动计划》^[3]提出到2020年,污染地块安全利用率达到90%以上。因此修复污染场地的任务迫在眉睫,如何选择合适的修复技术提高修复效率成为关注问题。

现阶段石油类污染土壤的修复技术分为生物修复技术、物理修复技术、化学修复技术等,通过分析国内外学者的相关研究内容,对各类技术的原理、优缺点、适用条件等进行比较,并对未来修复发展趋势进行展望。

1 生物修复技术

生物修复技术的原理是利用微生物、植物的新陈代谢功能降解有机污染物,因操作简单、污染物降解彻底、不会造成二次污染等特点,已成为常用修复手段。同时修复时间长、去除效率不稳定等成为其弊端。生物修复技术是一种原位治理修复技术,包括植物修复、微生物修复和微生物-植物联用技术等。

1.1 植物修复

植物修复技术可以分为植物降解、植物固定和植物挥发等,其优点在于成本低廉、无二次污染,但因植物生长周期受气温、季节和土壤质地等影响以及不同植物的特性不同等原因,故修复周期较长。研究学者大多从植物种类、部位(根、茎叶)、生长环境等对修复效率影响进行研究,如于一雷等^[4]利用室外盆栽的方式进行碱蓬修复原油污染对照实验,结果表明污染物低、中和高水平下碱蓬对原油的降解率分别为38.61%、47.54%和30.89%,通过一级衰减方程拟合降解曲线,得出降解速率常数分别为0.19、0.12和0.11,并使用分子手段鉴定出根际部分的变形菌为优势降解菌群。目前,单独使用植物修复的工程案例较少,往往将植物修复技术与其他技术联合使用。

1.2 微生物修复技术

微生物修复技术包括生物刺激、生物强化和生物通风等技术。该技术优点为绿色低廉,对低浓度污染物去除效率高,其局限性在于处理高浓度污染效率低,修复时间长达几年,而且筛菌复杂、有生物入侵的风险等。生物刺激是指在污染

土壤中加入生物表面活性剂、营养物质等来刺激土著微生物的生长从而提高降解效率。王建刚等^[5]通过使用生物刺激法修复石油污染荒漠土,研究发现90天后 C_{14} — C_{30} 组分石油烃总含量较修复前下降93%以上,并发现在修复过程中土壤酶的活性递增,对污染物去除率起到促进的作用。生物强化是指通过添加高效降解菌或加入氧化剂改变环境来提高生物降解速度的方法,可用作去除石油烃、卤代烃等有机污染物而不适用去除重金属。学者从驯化菌种、氧化剂选择、各因素如pH值、温度以及去除率等方面进行研究,张秀霞等^[6]通过盆栽种植并筛选高效菌种,在后期加入 H_2O_2 氧化剂对原油污染土壤进行修复实验,研究发现50天后石油烃的去除率达到57.4%,加入氧化剂70天后去除率达到62.1%。

目前有学者将生物刺激与生物强化技术进行联合实验,研究发现两种技术的联用可以显著提高修复效率,如Roy^[7]等通过在污泥中添加磷酸盐、硝酸盐和硝酸盐+磷酸盐刺激炼油厂污泥内的菌种并加入营养素,发现芽孢杆菌菌株对TPH的降解率为57%~75%。

1.3 微生物-植物联用技术

由于植物和微生物修复属于绿色修复技术,但因修复周期过长,因此有学者将植物修复与微生物修复联合技术与单个技术进行对比实验,发现联合技术相较于单个技术,污染物去除率至少提高5%~10%,起到协同的作用。张丽等^[8]开展了石油烃降解菌-盐生植物联合修复技术对石油污染盐碱土壤的修复实验,结果表明,加营养元素的降解菌、盐生植物对石油烃的降解效率分别为38.6%和36.1%,植物、降解菌和营养元素三者相结合对石油烃的降解效率为47.3%。王楚栋等^[9]通过接种丛枝菌根和添加不同粒径猪炭对多氯联苯污染土壤进行对照实验研究;实验表明接种丛枝菌根真菌可提高土壤中有效磷含量,降低有机质含量和pH值,而添加猪炭可提高土壤中有效磷、速效钾、有机碳和pH值含量,前者可以显著提高丛枝菌根真菌侵染率、植物生物量,而猪炭起到抑制作用;并通过测定土壤细菌16SrDNA丰度发现接种真菌后添加小颗粒的猪炭后细菌丰度优于其他对照组,但两者之间没有协同作用;最终发现接种后再添加大粒径生物炭有利于促进二氯、三氯、四氯联苯及总多环芳烃的降解。

1.4 其他生物修复技术

除上述技术,生物修复技术还包括生物碳吸

附、生物堆技术、泥浆相生物反应器等,其中生物堆技术需要通过前期实验测定污染物的生物可降解性以及微生物的需氧量等因素,并且需要挖掘污染土壤和收集处理渗滤液,因此工程量较大,有二次污染的风险。该法适用于修复石油烃类、苯系物、卤代烃等污染物,而对半挥发性有机污染物(SVOCs)、农药的处理效果较差。泥浆相生物反应器处理污染土壤需要进行预处理以及废水处理,修复过程复杂且成本高,该法适用于小范围污染治理。目前生物碳吸附相较于其他两种方法应用较广泛。朱文英等^[10]在 300 °C 无氧条件下将小麦秸秆热解制备成生物碳材料,经过 14 天和 28 天的混合培养,发现土壤中的总石油烃质量分数分别下降了 45.48% 和 46.88%。

2 物理修复技术

常见的物理修复技术包括焚烧法、隔离法、客土法、气相抽提法和热脱附法以及电动修复技术。其中前三种方法应用较早,由于能耗大,大量的人力和设备的投入等问题不适宜广泛应用。相较而言,热脱附法、电动修复等技术更为经济可行。

2.1 焚烧法

焚烧法是将污染土壤进行焚烧以去除有机污染物。该技术适用于去除高浓度持久性有机污染物和石油类污染物,针对面积小且高浓度污染场地,处理效率高,较为彻底;但是焚烧温度要求较高(815 °C 到 1 200 °C),成本高、易形成二次污染成为其局限性。

2.2 隔离法

隔离法指用水泥、粘土等防渗材料将污染土壤隔离,防止石油烃类污染物的迁移扩散。隔离法适用于污染严重且污染物易扩散需要紧急处理的污染场地。其优点在于费用低廉易操作,局限性在于短期内有效,不能作为永久治理方法。

2.3 客土法

客土法指将受污染土壤搬离原地后用洁净土壤替换。客土法适用于污染集中且面积较小的场地。该法优点是操作简单,其局限性在于较深层污染土壤难处理,且挖掘过程中极易破坏土壤性质和局部生态环境。

2.4 气相抽提技术

气相抽提技术是指通过注入并向污染土壤内注入空气,并经抽提井收集污染气体再进行尾气处理。该技术适用于去除挥发性有机污染物

(VOCs)、部分半挥发性有机污染物(SVOCs)等污染土壤,经美国环保署大力推广后广泛应用。学者主要从气相浓度、含水率等影响因素与去除率关系方面进行了研究。如 Amin 等^[11]研究了生物通风与气相抽提的联合技术去除沙土中的甲苯,实验发现土壤含水率的提高促进了甲苯在水相中溶解,使甲苯去除效率降低,并发现在 250 mL/min 的恒速气流通风 96 小时后,甲苯的去除率高达 99.5%。该技术的优点在于去除效率高、便于操作,其局限性在于对设备要求较高且能耗大。气相抽提技术未来发展在于研究其去除机理,优化数值模型和工程设计以及设备与能耗问题^[12]。

2.5 热脱附技术

热脱附技术利用热源使土壤中污染物挥发出来,通常利用载气或真空系统将挥发出来的有机污染物收集后再进行尾气处理。在国内异位热脱附技术使用较多,用以去除 VOCs 和 SVOCs 等有机污染物,一般控制温度在 150~540 °C 之间,在加热方式方面从起初的燃料加热或电加热发展到微波加热。在热脱附处理设备方面,由传统的滚筒式发展到改进的流化床,极大地强化了载气和土壤颗粒间的传热、传质过程^[13]。大部分学者研究了功率、含水率、孔径等影响因素与去除率之间的关系以及去除模型和机理,如 Falciglia 等^[14]使用微波加热装置修复柴油污染土壤,对功率和土壤质地对土壤温度曲线和污染物去除动力学进行研究,并探究了同一功率下含水率与去除效率的关系,结果表明含水率的增加能有效提高微波能量的转化效率,在 2.45 GHz 的微波功率下,柴油去除率高达 90%,符合低功率动力学模型,其相关性 $r^2 > 0.976$ 并发现微波修复技术对沙质土壤极其适用。目前有学者对技术安全性进行评估,如 Luo 等^[15]从结构分析、元素分析和土壤农艺参数分析等方面对低温微波修复石油污染土壤进行评估,并研究去除机理。实验表明:在 300 °C 时,总石油烃最高去除率为 99.52%,且植物种子在 250 °C 微波处理后的土壤中发芽率达到最大值并无不良反应。根据微波热重分析、介电性能和 EDX 映射结果提出一种三级去除机理,即随着温度的升高,碳氢化合物通过汽提、热脱附和热解/碳化三个过程逐渐被去除。

该技术去除效率高,受外界环境影响小,而高能耗、高费用和尾气处理不当易造成二次污染成为弊端。目前国内大多研究热脱附技术各影响因

素与去除效率的关系,因此,加热方式、设备等方面的技术创新将成为未来研究内容。

2.6 电动修复技术

20世纪80年代末电动修复技术出现并不断发展。电动修复技术主要利用电阻加热、电流传导加热和电极传导加热的方式,通过电迁移、电渗流等作用运动,打破有机污染物结合键后去除污染物。该技术在国内外发展尚未成熟,常常被用于修复重金属污染场地、石油类污染场地应用较少。

当前学者主要从各影响因素如电极种类、含水率、去除机理以及联合技术等方面进行研究。如 Effendi 等^[16]通过研究超声波修复技术的粒径、温度、超声波功率等影响因素与去除率的关系以及去除机理,发现超声功率越大,频率越高,化学降解率越高;此外进一步优化混合的速度梯度,可提高受污染土壤和超声波之间的传质和接触,从而提高修复效率。超声波能量可加速浸出动力学,并通过扩散到最外层来提高去除效率。对于碳氢化合物污染的土壤,需要吉布斯能量从土壤表面去除碳氢化合物分子,超声波提供足够的能量提高了石油烃馏分的解吸速率。

电动修复技术的修复效率高,无二次污染,但在修复过程中土壤温度随电压升高而升高,影响去除效率,此外超声波技术对土质有要求,如粘土土质不适宜使用该技术。由于电动修复技术属于绿色修复技术,应用前景好,未来可从电极液或电极与膜复合和改性方面进行深入研究。

3 化学修复技术

化学修复技术一般通过投加药剂的方式与污染物发生反应,最终达到去除污染物的目的。常用的化学氧化剂有臭氧、过硫酸盐、芬顿试剂等,化学还原剂主要为纳米零价铁。化学修复技术分为表面活性剂淋洗法和催化氧化法等。

3.1 表面活性剂淋洗法

表面活性剂淋洗是指将表面活性剂喷洒在污染土壤上,利用自身的亲脂基团和表面张力作用去除有机污染物,从而实现土壤修复^[17-18]。常见的表面活性剂如吐温已经被广泛应用于碳氢化合物污染。现阶段很多学者对表面活性剂进行创新,例如表面活性剂纳米颗粒技术,并探讨了表面活性剂的种类、浓度等与去除率的关系。Ali 等^[19]通过纳米颗粒稳定表面活性剂与单独使用表面活性剂做对比实验,发现前者处理效果更好,

同时非离子表面活性剂与离子表面活性剂相比修复效率更高。Karthick 等^[20]重点讨论了表面活性剂溶液、泡沫表面活性剂和纳米粒子稳定泡沫表面活性剂去除污染物的机理,研究了复合氧化物纳米颗粒在稳定泡沫中的应用。同时 Karthick 等^[21]研究发现,3.5 mg/L 的零价铁对沿海地区、荒漠土和粘土的污染物去除率分别为 95.3%、94.6% 和 57.5%,与 Fe_3O_4 相比,零价铁去除率可提高 10%~25%,显示出更好的泡沫性能,同时金属纳米颗粒可以提供电子,从而利用纳米颗粒与污染物之间的氧化还原反应降解目标污染物。

表面活性剂淋洗的优点在于能耗小、操作简单成本低,修复效率较高,其缺点在于易产生二次污染。该技术需要进一步研究表面活性剂的反应机理,如表面活性剂与污染物在土壤表面的化学反应过程、表面活性剂的内部结构等。

3.2 催化氧化技术

1900年已经出现向污染土壤中加入化学氧化剂,将大分子污染物分解为小分子污染物。目前使用单一氧化剂已经逐步被催化氧化技术代替。常见的催化氧化技术有光催化氧化和金属催化氧化等。

光催化氧化技术是指在氧气充足的情况下利用光照分解污染物。目前光氧催化剂包括氧化锌、氧化钨和硫化锌等。有学者研究了光催化技术的机理和催化剂包覆下的去除效率,如 Logeshwaran 等^[22]研究发现石油烃的光解通过光的相互作用发生,吸收光能后,多环芳烃达到激发态,进一步促进光分解。并提出在结合物理、化学和环境因素下探索与石油烃浓度和类型有关的微生物适应性、多样性以及分解代谢基因/酶的变化将可能成为鉴定有效降解剂的条件,同时该技术特定污染物的特性数据以及单个化合物的毒理学特征数据可以作为污染场地修复策略的考虑因素。除光氧催化外,金属催化氧化技术也在不断发展,环境友好且成本低的金属离子活化剂如 Fe^{2+} 被广泛应用于氧化剂活化实验^[23]。大部分学者从氧化剂的改性、土壤性质、反应时间等方面探讨了金属催化剂对去除效率的影响以及最佳工艺条件,如 XU 等^[24]研究了三种不同改性的芬顿化剂对总石油烃(TPH)的降解效率,实验表明当芬顿浓度大于 1 100 mM 时,土壤中的 TPH 去除效率为 40%~50%,污染物氧化分解受限可能是由于土壤中芬顿氧化剂的氧化选择性较差所致;与单步添加相

比,逐步加入芬顿的 TPH 去除率提高了 25%,同时证明了土壤中的有机物同氧化剂具有不同的选择性。张晓峰等^[25]以自制海胆状钴铜双金属为催化剂,过硫酸钠为氧化剂,发现在中性条件下,当 $n(\text{六氯联苯}) : n(\text{过硫酸钠}) = 1 : 500$,催化剂投加量为 8 g/kg ,反应 30 分钟后六氯联苯的去除率达到 80%。通过实验初步探究了氧化机理,根据 X 射线光电子能谱表征和猝灭自由基反应表明 Cu^0 和 Co^{2+} 是双金属催化剂体系中活化过硫酸钠的主要物质, $\text{SO}_4 \cdot^-$ 和 $\cdot \text{OH}$ 是两种最主要的活性物质,中性条件下对六氯联苯的降解贡献率之比约为 3 : 4。

该技术需要进一步研究催化氧化机理,开发出更加高效便捷、低成本、绿色的催化剂,在不同性质土壤的修复中找到最佳工艺条件,同时需要避免氧化剂残留等二次污染问题。

4 联用技术

无论是生物修复还是物理、化学修复技术都有其局限性,为提高修复效率进行技术创新,国内外学者探究了不同类修复技术的联用。由于植物修复技术的环境影响小,因此常常与其他技术联用并作为最终处理技术,如 Rocha 等^[26]开展了电动修复与植物修复联用实验,研究发现电动反极化促进了生物量的产生,提高 TPH 的去除率。Cameselle 等^[27]研究发现表面活性剂提高了生物利用度,在处理疏水有机污染物时,电动力学与生物修复和植物修复的耦合是最可持续的选择。同时,物理修复技术中微波与超声波可以提供充足的热源,促进有机物污染物的脱附。桑义敏等^[28]研究了微波-超声波耦合热源处理石油烃类污染土壤的脱附规律。研究发现最优工艺参数为土水比 20 : 1、超声波功率 800 W、微波功率 350 W、辐照 10 min,去除率为 77.28%,证明了耦合热源的处理效果优于单热源处理。目前,由于化学、物理修复技术的效率高,两者的联合应用得到广大学者的关注,如 Liu 等^[29]研究了热解吸与氢氧化钙结合修复多氯联苯污染的土壤,结果证明在 600 °C 时,加入氢氧化钙的土壤去除率高达 94% (空白试验为 90.9%),证明了两种技术的联合使用起到了协同作用。Gharace 等^[30]通过紫外光强化纳米零价铁催化芬顿试剂与超声波联用技术对原油污染土壤进行修复,最佳工艺条件为 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^0 = 58/1$ 摩尔比,四种组合方式为芬顿、紫外光

芬顿、超声波芬顿和紫外超声波联用芬顿的去除率分别为 84%、91%、89% 和 99%。

5 结语

石油类污染场地数量、面积日益增长,亟待高效的修复技术。目前生物修复技术应用较为普遍,其最核心的技术在于降解菌株筛选以及活性剂制备。因此未来的研究重点在于运用分子生物学、遗传学等理论,利用 DNA 诊断方法和基因工程等手段进行基因重组、筛选或培育转基因生物来提高降解率。物理修复技术具有修复效率高、耗时少的优点,适用于一些应急事故中,但其能耗和成本双高成为难题。在此后发展中应注重能耗和尾气处理方面的研究,可寻找替代能源和优化回收处理技术等方式解决问题。化学修复技术修复效率高且能耗低但存在氧化剂残留以及反应过程中的副产物残留等问题,处理污染物残留增加了修复成本,同时也对环境造成了潜在危害。因此,未来应该继续研发绿色高效的表面活性剂和催化剂,避免二次污染。

在完成 2020 年的《土壤污染防治行动计划》目标的同时,我们应进一步加大对各类修复技术的创新性研究,实现石油类土壤的高效、绿色、安全修复。笔者认为单一的修复技术已经不足以满足当前需求,国内外学者的研究成果也已证明联用技术的修复效果远好于单一技术,因此各类技术的联合使用将成为未来石油类土壤修复的主流。

参考文献

- [1] DE FIGUEREDO KSL, MARTINEZ-HUITLE CA, TEIXEIRA ABR, et al. Study of produced water using hydrochemistry and multivariate statistics in different production zones of mature fields in the Potiguar Basin-Brazil [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 116: 109-114.
- [2] 吴嘉茵,方战强,薛成杰,等.我国有机污染物场地土壤修复技术的专利计量分析[J].环境工程学报,2019,13(8):2015-2024.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. (2016-05-31) [2020-04-30]. http://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676582.shtml.
- [4] 于一雷,马牧源,徐卫刚,等.碱蓬修复黄河三角洲原油污染土壤试验研究[J].生态环境学报,2018,27(10):1958-1965.
- [5] 王建刚,王婷,卞卫国,等.生物刺激法对石油污染荒漠土的修复效应[J].环境化工,2014,33(12):2214

- 2215.
- [6] 张秀霞, 滕芝, 吴佳东. 生物强化修复石油污染土壤 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (4): 1573-1577.
- [7] ROY A, DUTTA A, SIDDHARTHA P. Biostimulation and bioaugmentation of native microbial community accelerated bioremediation of oil refinery sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 22-32.
- [8] 张丽, 王毅霖, 周平, 等. 石油烃降解菌-盐生植物联合修复石油污染盐碱土壤研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2018, 48 (S1): 57-63.
- [9] 王楚栋, 单明娟, 陆扣萍, 等. 丛枝菌根真菌及猪炭对多氯联苯污染土壤的联合修复作用 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (10): 4157-4164.
- [10] 朱文英, 唐景春. 小麦秸秆生物炭对石油烃污染土壤的修复作用 [J]. 农业资源与环境学报, 2013, 31 (3): 259-264.
- [11] Amin M M, HATAMIPOUR M S, MOMENBEIK F, et al. Toluene removal from sandy soils via in situ technologies with an emphasis on factors influencing soil vapor extraction [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1-6.
- [12] 罗成成, 张焕祯, 毕璐莎, 等. 气相抽提技术修复石油类污染土壤的研究进展 [J]. 环境工程, 2015, 33 (10): 158-162.
- [13] 李佳, 曹兴涛, 隋红, 等. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望 [J]. 石油学报 (石油加工), 2017, 33 (5): 811-833.
- [14] FALCIGLIA P P, VAGLIASINDI F G A. Remediation of hydrocarbon polluted soils using 2.45 GHz frequency-heating: Influence of operating power and soil texture on soil temperature profiles and contaminant removal kinetics [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 151: 66-73.
- [15] LUO H, WANG H, KONG L Z. Insights into oil recovery, soil rehabilitation and low temperature behaviors of microwave-assisted petroleum-contaminated soil remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 341-348.
- [16] EFFENDI AJ, WULANDARI M, SETIADI T. Ultrasonic application in contaminated soil remediation [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, 12: 66-71.
- [17] 陈果, 王景瑶, 李聚揆. 石油烃污染土壤修复技术的研究进展 [J]. 应用化工, 2018, 47 (5): 1014-1018.
- [18] 毕璐莎. 表面活性剂淋洗修复石油类污染土壤实验研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016: 1-64.
- [19] ALI N, BILAL M, KHAN A, et al. Effective exploitation of anionic, nonionic, and nanoparticle-stabilized surfactant foams for petroleum hydrocarbon contaminated soil remediation [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 704: 135391.
- [20] KARTHICK A, ROY B, CHATTOPADHYAY P. A review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 187-205.
- [21] KARTHICK A, ROY B, CHATTOPADHYAY P. Comparison of zero-valent iron and iron oxide nanoparticle stabilized alkyl polyglucoside phosphate foams for remediation of diesel-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 240: 93-107.
- [22] LOGESHWARAN P, MEGHARAJ M, CHADALAVADA S, et al. Petroleum hydrocarbons (pH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 10: 175-193.
- [23] 肖鹏飞, 姜思佳. 活化过硫酸盐氧化法修复有机污染土壤的研究进展 [J]. 化工进展, 2018, 37 (12): 4862-4873.
- [24] XU J, HUANG F, WANG W, et al. Selectivity for modified Fenton's oxidation of crude oil in soils [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2015, 98 (3-4): 1-11.
- [25] 张晓峰, 林亲铁, 罗昊昱, 等. 海胆状钴铜双金属活化过硫酸钠降解土壤中六氯联苯 [J]. 环境科学学报, 2019, 39 (5): 1633-1638.
- [26] ROCHA I M V, SILVA K N O, SILVA D R, et al. Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 208: 194-200.
- [27] CAMESELLE C, GOUVEIA S. Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils [J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2018, 11: 41-47.
- [28] 桑义敏, 艾贤军, 马绍芳, 等. 基于超声波-微波耦合效应的石油烃类污染土壤的热脱附规律与参数优化 [J]. 环境工程学报, 2019, 13 (10): 2311-2319.
- [29] LIU J, ZHANG H, YAO Z T, et al. Thermal desorption of PCBs contaminated soil with calcium hydroxide in a rotary kiln [J]. *Chemosphere*, 2019, 22: 1041-1046.
- [30] GHARAEI A, KHOSRAVI-NIKOU MR, ANVARIPOUR B. Hydrocarbon contaminated soil remediation: A comparison between Fenton, sono-Fenton, photo-Fenton and sono-photo-Fenton processes [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 79: 181-193.