石油烃污染土壤修复技术的研究进展

陈果，王景瑶，李聚揆

( 重庆工商大学 环境与资源学院，重庆 400067 )

摘 要: 针对典型场地石油烃的污染和危害问题，系统介绍了当今具有工程实践应用的几种石油烃污染修复技术 的近年来国内外研究进展，对比分析了其优劣，提出化学修复技术仍是今后国内石油烃污染修复的主体技术，但化 学与生物的联合修复技术也是未来的发展方向。

关键词:石油烃; 污染; 修复技术; 研究进展

中图分类号: TQ 09;TQ 423; TQ 330．9;X 53 文献标识码: A 文章编号:1671 － 3206( 2018) 05 －1014 －05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20180330.075

The research developments in remediation technology of  
petroleum hydrocarbon contaminated soils

CHEN Guo，WANG Jing-yao，LI Ju-kui

(The College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Aiming at the problem of petroleum hydrocarbon pollution and harm in typical sites，the re­search developments of several kinds of petroleum hydrocarbon pollution remediation technologies in re­cent years at home and abroad were systematically introduced,and their advantages and disadvantages were compared and analyzed． The chemical remediation technology should be still the main technology for domestic petroleum hydrocarbon pollution remediation in the future ,and the combination of chemical and biological remediation technology should be also the future direction of development．

Key words: petroleum hydrocarbon; pollution; remediation technology; research development

收稿日期:2017-12-11 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61575033) 作者简介:陈果(1992－),男,重庆人,重庆工商大学在读研究生,师从郑旭煦教授,刘安平副教授,主要从事土壤污染问 题治理与修复方面的研究。电话: 13330292303, E － mail: fruitstein@163． com

全国第一次土壤污染调查公报显示,全国土壤 污染总超标率为 16． 1%［1］。机械油含有的石油烃 类物质造成的场地污染已成为国内典型场地污染 之一。

石油烃类物质的主体物质是由占比70% - 80%的脂肪烃和占比20% ~30%的芳香烃构成，其 余物质是微量的含硫、含氮有机组分。按挥发性划 分,石油烃类物质包含大量的挥发性有机物( VOCs) 和半挥发性有机物( SVOCs) ［2］,因此具有很高的迁 移性、污染面积广、生物有效性高、能够直接影响生 物体。而且,石油烃类物质的长链部分因其分子质 量大,结构紧密,所以其乳化性能较低,在土壤中有 很强的滞留性,将对土壤结构以及生物种群造成严 重影响,并如同重金属污染物质一样,富集于积累性 植物中,进入食物链,对人们的健康造成威胁。

石油中含量较少的苯、甲苯、乙基苯、三种二 甲基苯的异构体( 合称 BTEX) 物质对人体也有十 分严重的危害性。以常见的 BTEX 物质为例: 苯对 人的血液和骨髓具有毒性作用,它能显著降低血 液中淋巴细胞和血小板等成分,致使骨髓细胞发 生遗传变异3 ,是国际致癌机构认定的I类致癌物 质; 甲苯具有很强的挥发性及脂溶性,易透过血脑 屏障,对中枢神经系统具有很强的毒性; 流行病学 调查表明,接触人群有明显的神经功能障碍; 甲苯 中毒可引起急性中毒性脑病、脑水肿,出现不同程 度的意识及精神障碍; 长期吸入甲苯,可引起神经 行为功能紊乱,导致弥漫性小脑萎缩,出现精神疾 病、痴呆甚至死亡［4］。二甲苯的主要危害是麻醉 性,动物实验结果表明,二甲苯的毒性大于甲苯, 短时间内接触高浓度的二甲苯蒸汽将引起头晕、 昏睡和神智不清,严重时可致“即刻死亡”; 长期的 职业性接触二甲苯也将引起中枢神经系统损害, 但很少对其它器官产生危害［5］。

因此,石油烃污染场地的修复处理,不仅对我们 当代人而且对子孙后代的健康生活乃至今后的社会 发展都是一项必须重视的问题。

1. 石油烃污染修复技术

与其他污染物修复类似，常见的石油烃污染修 复方法主要有物理法、化学法和生物法。 1． 1 物理法

利用物理技术修复石油烃污染的优点是: 能在 不改变目标物质本身化学性质的前提下进行有效去 除。其方法大多不会造成二次污染，对 VOCs 的针 对性强，反应迅速。而物理法的劣势也正是由于不 改变目标物质本身化学性质，导致其设备复杂和前 期准备工作量巨大，直接提高了物理法修复成本，阻 碍了技术的广泛推广。

1． 1．1 热解吸技术 此项技术一般建有成套的加 热处理设备，比如加热毯/井、旋转干燥器［6］等，利 用其加热土壤，使目标物质的蒸汽压升高，进而由固 相进入气相形成逸散，达到使目标物质从土壤中去 除的目的，是一种针对挥发性物质的热处理技术。 以热解吸为基础的修复技术，通常需要在一个相对 高温的环境中进行加热，环境中的介质成分对气体 逸散的影响相对较小［7］，利用实验室石英炉即可对 多种有机污染物和重金属污染物产生作用［8］。同 时，热解吸技术操作简单，国际上已经将其作为大气 环境和土壤环境中 VOCs 的检测与处理技术［9-11］， 应用在实际的工程修复之中。

加热技术的关键在于控温，土壤每加热提高 20 T可使目标物质的蒸汽压升高2~3倍明。按 温度划分，热解吸技术可以分为高温(>315*弋*)热 解吸和低温(150 -315 T)热解吸。传统加热方式 在能耗方面的投资较大，据报道，美国本土项目的燃 料占总体投资的 40% -50%［6］，极大地阻碍了热解 吸技术在我国的推广，同时也催生出新型热源与新 型处理工艺的开发市场。 在热源方面，最早开始尝 试的方法是利用微波使土壤中的电介质发生内摩 擦，进而加热土壤使得挥发性物质逸散［13］，有报道 显示，微波技术对极性化合物的处理效果彻底，能将 三氯乙烯( TCE) 从 2%降至 0．01%［14］。 但是该技 术要在国内广泛推广仍有难度。 相对而言，近几年 的新型加热工艺主要聚焦于向土壤投加药剂，增加 污染物质的脱除效率。 例如，适当的 FeCl3 投加量 可以将Hg的热解吸条件降低至450 T，并且极大 地缩短热解吸时间［15］。 这类方法可以更好的降低 物理法的前期投资，增加其商业可行性。

1． 1． 2 土壤气相抽取( SVE) 技术 传统 SVE 技术 与热解吸技术最大的区别是没有使用外加热源。 SVE技术的作用是通过降低土壤环境的蒸汽压，相 对升高目标物质的蒸汽压，间接地增大污染物质进 入气相的速度。 SVE 技术是国内外较早应用于工 程案例的修复技术之一［16］，其高效性对于事故性场 地的补救意义重大［17］。

但是该方法更加受制于土壤原始性质，弊端明 显，因此新型 SVE 技术更多地与辅助技术联合，例 如利用外加热源组合产生的热增强土壤气相抽取 ( T-SVE) 技术。 该技术兼具传统热解吸技术和传统 SVE 技术的优点，不仅缩短了两项技术的处理周 期，减少了修复成本，而且还降低了环境因素的影响 程度，进一步提升了修复效率。 于颖等［18］的研究发 现，该技术的加热温度不需达到传统热解吸技术那 么高，就能得到优异的处理效果，在加热温度分别为 220 T和260 T时，土壤中烷烃污染物的去除率分 别达92．6%和 97．2%。 但是土壤含水率对烷烃污 染物的去除率有阻碍作用，在5% -30%范围内，随 着含水率上升，其阻碍作用越大。

1． 2 化学法

几乎所有的化学修复技术都是以简单高效著称 的，但由于其投加药剂的原因，化学法往往是一把 “双刃剑”。

1．2．1 化学淋洗技术 化学淋洗法最早是用作土 壤中的重金属和有机物回收技术［19］。 该法针对性 强，通过乳化、溶解等作用后，使石油烃类物质与淋 洗剂混合，并在随后的循环过程中与土壤分离。

当前，针对石油烃污染修复的主流淋洗剂为表 面活性剂和碱-碳酰胺淋洗剂。

表面活性剂主要利用自身的亲脂基团和表面张 力作用对石油烃类物质进行处理。 其表面的活性基 团极易附于两相界面形成连带结构，同时进行乳化 增容，进而使污染物质随水流离开土壤。 而碱-碳酰 胺淋洗剂中的碱能与石油烃中的环烷酸和沥青质酸 等酸性组分反应生成表面活性物质，进而降低油水 界面张力，有利于油的活化洗脱; 且碳酰胺氨基上的 氢原子能在分子间形成强的氢键，促使碳酰胺形成 六角形桶状结构，而这种结构能包裹石油烃类分子， 促使土壤中的石油烃类分子去除［20］。 大量研究表 明，单一的表面活性剂对目标污染物质的处理能力 有限，为进一步提升处理效率，进行复合配比的表面 活性剂已成为新型表面活性剂开发的一大热门，并 取得了一定的进展［21］。

生物质表面活性剂是一种绿色修复活性剂，该 类活性剂是生物物质的特点是与化学活性剂的最大 不同。 据报道，该类活性剂大多具有较低的临界胶 束浓度(*CMC)*和表面张力，更优于化学活性剂的增 容效果和去除率［22］。 例如，红球菌产生的代谢产物 能使多环芳烃( PAHs) 的去除率提高 50%以上，其 活性是合成活性剂Tween 60的2.5倍阴。同时，该 类活性剂易降解,不会长时间滞留土壤形成二次污 染。采油工程利用鼠李糖脂作为首选添加剂［24］,其 优异的增容性能可以使原油的采收率额外增加 9． 8 % ［25］,该项应用已发展成微生物强化采油技术 ( MEOR) 。另一方面,由于生物物质受制于生物自 身生长的设定,在产量与成本上,相比化学活性剂而 言存在很大的劣势,因此,现阶段的研发主要集中于 提高产量和投加效果,进而降低使用成本。

1． 2． 2 化学钝化技术 钝化技术不同于淋洗技术 的去除,钝化技术的主要目的在于降低污染物质的 环境毒性,从而减少危害,可以说是最为简便的修复 方案。而固化和氧化还原是钝化中较为常见的两种 方案。

水泥固化技术是化学钝化中的经典方法,通过 固化剂作用,形成固化体并进行处理或掩埋。但是, 受自身材质的限制,该技术在处理具有一定挥发性 的污染物时,污染物的挥发作用会影响最终的修复 效果。

化学氧化技术无论是在重金属污染还是在有机 物污染的场地上都有很大的应用空间。修复时,投 加的药剂通过改变目标物质的原始价态与性质,使 得其迁移性或者毒性降低,从而减少危害。但不同 于一般有机物质,石油烃类物质往往具有很高的分 子质量,因此简单的化学氧化技术无法对特定目标 污染物产生较明显的修复效果。

高级氧化技术中，Fenton试剂法在实际的工程 案例中已有所应用，在调节pH下,Fenton试剂可以 在短时间内对电缆机油产生46%的去除效果［26］, 同时对泄漏事故的处理效果也非常好［27］。但是，该 方法仍然有外源物质的引入，对土壤环境有二次污 染的隐患。

相比之下，声化学技术不需要外加药剂，不存在 二次污染的问题，且对石油烃类的修复效果理想,Li 等［28］利用超声氧化能使土壤石油烃的最大去除率达 61%，对中长链物质最大去除率可达91%。与其优势 相对的，由于低频超声产生时所引起的空化现象，将 使泥浆在超声过程中形成板结［29］，这对土壤的原始 结构和生物群落而言，将造成不可逆转的破坏。

新型技术研发正在尝试将低温等离子体技术 ( DBD) 使用到被芳香烃污染的土壤修复之中，已有 报道证明了 DBD技术在处理多氯联苯方面的有效 性，该报道还显示，在短时间内根据物质范围的不 同，其处理能力于40．1% ~84．6%间存在波动［30］。 该方法被认为是没有二次污染的清洁技术，但在实 际放电过程中将产生一定浓度的臭氧与氮氧化 物［31］，如果不能及时处理，修复工程将会对大气环 境产生影响。

综上所述，化学法的高效总是以环境为直接代 价的，因此对化学法的改良，将会对工程土壤修复技 术带来根本性的改变。

1． 3 生物法 生物法是目前土壤修复行业中最为环保的治理 方案，该法主要利用生物的代谢行为对污染物进行 降解。

生物法进行修复作业是将土壤自净能力进行人 工加强，不仅能去除污染物质，而且对土壤质量也存 在一定的恢复效果。但从工程项目角度来说，生物 法的修复周期过长，在管理上存在难度，无法适应实 际项目的需要，在推广上存在阻碍。

1．3．1 微生物修复技术 按照利用主体划分，可将 微生物修复分为生长修复和产物修复两种类型。生 长修复是将污染物质作为微生物修复的碳源，通过 驯化分离得到特定的菌种，并以此作为修复剂投加 到土壤中［32］。产物修复是对产特定代谢产物的菌 种进行接种，如以脂类多糖物质作为代谢产物的枯 草芽孢杆菌［33］等，再以其代谢产物作为修复剂，进 行土壤淋洗修复。

近年来还涌现出不少的新技术，其中较为热门 的是利用酶降解石油烃物质，例如，郑红婷等［34］报 道了漆酶对土壤中石油烃的降解率为25．01%。在 进一步的研究中 ， Fuentes 等［35］利用加氧酶使分子 氧进入惰性烃分子中，直接对石油烃分子的中间体 发生作用，有望克服碳氢化合物生物降解的速率限 制，缩短微生物技术的修复周期。

采用微生物修复技术对土壤进行治理，能在去 除污染物质的同时，恢复土壤中菌群的多样性，有利 于土壤中营养循环和区域生态系统的运转［36］，而筛 选出的特有菌种或者产物也可以作为生物制剂继续 开发利用。因此，如能将微生物修复技术的研发与 工程有效结合，不仅将极大改善环境修复质量，而且 将进一步体现生物技术的商业性。

1．3．2 植物富集技术 该方法是生物修复中为数 不多的存在二次污染隐患的方法。植物修复技术主 要是利用特定植物根系对目标污染物质的富集作用， 并随着植物上部的蒸腾作用将污染物质提升到根茎 和叶片之中，进而使其随植物的收割从土壤中去除。 而且，某些植物，比如苜蓿，能够在污染压力下对自身 生长的酶环境进行调整，以此适应并在污染土壤中生 长［37］。如果植株选择得当，在合适的条件下，植物修 复也可作为景观工程进行城市美化［38］。

但是植物修复技术大多用于土壤的原位修复， 在修复周期问题上，对于工程上大范围的推广存在 较大阻碍。 而在实验室技术上，研究的热点集中在 植物与微生物的联合修复上。据Agnello等関的研 究发现，相比传统微生物的 59% 去除率和植物的 47%去除率而言，将微生物与植物进行组合修复，能 够使整体修复效率提高10%，从而进一步去除土壤 中的污染物质。 同时，由于相应微生物的接种，对植 株也能起到一定程度上的促进生长的作用［40］，缩短 修复的等待周期。

1. 联合修复技术

联合修复或者协同修复技术是现今效率优化的 一项热门研究。 此类技术大多以化学技术作为环境 辅助，组合物理或生物技术进行修复。 该法能够显 著提高污染物质的去除率，缩短工艺修复时间，降低 某项工艺的修复成本和对环境造成的影响。

该项技术在修复重金属污染方面的应用前景已 得到证明,例如，EDTA41物修复联合。报道显示， EDTA的加入可以使水溶性Cd含量提高400倍左 右，而处于交换态的 Cd 含量同样提高了40 倍［41］。 在石油烃方面，虽然近年来的报道相对较少，但在提 高效率上仍然有不错的效果。在联合修复方面，Lu 等［42］的研究发现，利用生物电化学( BES) 联合技 术，可以将单一电化学阳性对照的效率从37.6% - 43.4%提高至63.5% -78.7%。 在协同修复方面， Zhang阴等利用生物炭作为载体与微生物进行协同 修复，其效率较单一离散接种的微生物而言，可以在 短时间内提高 78. 9%。 同样的，唐景春等［44］的研 究发现，海藻寡糖能增强多酚氧化酶、脱氢酶及尿酶 的活 性，进而将玉米草对石油烃的降解率提高 28. 6% 左右。

1. 总结与展望

从工程技术角度看，物理法与化学法当是首选; 但从可持续发展角度看，生物法更加环保。 我国的 土壤修复行业起步较晚，能结合我国实际的技术相 对较少，因而修复手段上的可选择性不高。 但是，如 果长期用物理、化学等单一方法修复土壤，无疑会对 土壤的可持续性造成危害。

对化学法的改良，将会极大地改变土壤修复这 一课题。 而对化学法改良，笔者认为应持续加强化 学法与生物法的联合或协同上。 具体理由如下: 一 是尽管物理法在国际上已经有了相对成熟的配套体 系，但国内的实际工程还仅仅处在引进和试用的起 步阶段，而化学技术和生物技术已经运用到国内的 实际工程之中，对国内环境更加适合; 二是化学法对 土壤造成的影响可由生物法的恢复作用削弱，保障 修复过程的绿色清洁; 而生物法的缓慢周期可经化 学法的高效性大大加快，缩短项目的等待周期。 因 此，化学法和生物法的有机结合，不仅在技术与商业 上具有可行性，而且其产生的示范性作用，可以使更 多的实验室技术应用于工程项目，形成由研发到工 程的良性循环。

参考文献:

1 全国土壤污染状况调查公报J].中国环保产业,2014

( 5) : 10-11.

1. 邵子婴.强热化土壤气相抽提过程中的污染物去除研 究D].大连：大连海事大学,2015.
2. L Qing，Z Luoping，L Guilan，et al. Hematotoxicity in work­ers exposed to low levels of benzene[J]. Science，2004，306 ( 5702) :1774.
3. 任振华. 甲苯对小鼠神经毒性的行为学与形态学研究

[D]. 合肥: 安徽医科大学，2005.

5] 陈敏娴.二甲苯(Xylene)毒理学综述J].劳动医学，

1985(2) :61-65.

[6] 高国龙，蒋建国，李梦露.有机物污染土壤热脱附技术

研究与应用J].环境工程,2012,30( 1) : 128-131.

7] Wilbourn R G, Newburn J A. Treatment of hazardous wastes

using the matrix treatment system[D] . California: University of California， 2006.

1. Yang G C， C K Y. Remediation of a spiked， oil-contamina­ted soil by a thermal process[J] . Hazardous Industrial Wastes， 1993，26:446-453.
2. Hoshino， Kato， Tanabe， et al. Measurement of VOC and SVOC emitted from automotive interior materials by ther­mal desorption test chamber method C] . // 第十届室内 空气品质和质量国际学术会议.北京:清华大学，2005.

10 Arag**o**n M, Borrull F, Marc**e** R M. Thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry method to determine phthalate and organophosphate esters from air samples [J] . Journal of Chromatography A， 2013， 1303 ( 16) : 76-82.

1. Bass D H. A decision framework for selecting remediation technologies at hydrocarbon-contaminated sites[J] . Jour­nal of Soil Contamination， 1993， 2( 2) :167-189.
2. Poppendieck D G， Loehr R C， Webster M T. Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems. 1 . Laboratory studies[J] . Journal of Hazardous Materials，1999， 69( 1) : 81-93.
3. Jones D A， Lelyveld T P， Mavrofidis S D， et al. Microwave heating applications in environmental engineering———a review[J] . Resources Conservation ＆ Recycling， 2002， 34 (2):75-90.

14 And Z K, Atama**n**czuk T. Microwave-enhanced thermal de­contamination of soil J] . Environmental Science ＆ Tech­nology, 1998,32( 17) :2602-2607.

1. 何依琳,张倩,许端平,等. FeCl3 强化汞污染土壤热解

吸修复J].环境科学研究,2014(9): 10744079.

1. Nobre M M, Nobre R C. Soil vapor extraction of chlorina­ted solvents at an industrial site in Brazil[J] . Journal of HazardousMaterials,2004,110(1/2/3):119-127.
2. Wang P. Determination of technological parameters for rem­edying contaminated sites by SVE technology[J] . Environ­mental Engineering, 2010, 28( 6) : 108-112.
3. 于颖,邵子婴,刘靓,等. 热强化气相抽提法修复半挥 发性石油烃污染土壤的影响因素J].环境工程学报， 2017,11(4):2522-2527.
4. 陈果.重金属污染土壤化学修复剂的研究进展J].应 用化工,2017(9):1810-1813.
5. 籍国东，周国辉.异位化学淋洗修复石油类污染土壤J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(6) :863-871.
6. 何泽能,李振山,籍国东.油田污染土壤中石油回收的 模拟研究J].应用基础与工程科学学报，2005, 13
7. :136-145.
8. 张文. 应用表面活性剂强化石油污染土壤及地下水的 生物修复D].北京：华北电力大学,2012.
9. Zhao F， Shi R， Zhao J， et al. Heterdogous production of

Pseudomonas aeruginosa rhamnolipid under anaerobic condition formicrobial enhanced oil recovery[J] . Journal of Applied Microbiology,2015, 18( 2) :379-389.

24 Amani H, Muller M M, Syldatk C, et al. Production of mi­crobial rhamnolipid by Pseudomonas aeruginosa MM1011 for ex situ enhanced oil recovery[J] . Applied Biochemis- try＆ Biotechnology,2013, 170(5) :1080-1093.

1. Zhao F, Shi R, Zhao J, et al. Heterologous production of

Pseudomonas aeruginosa rhamnolipid under anaerobic conditions for microbial enhanced oil recovery[J] . Journal of Applied Microbiology, 2015, 1 18( 2) :379-389.

1. Xu J, Pancras T, Grotenhuis T. Chemical oxidation of ca­ble insulating oil contaminated soil[J] . Chemosphere, 2011 , 84( 2) :272-277.
2. Tzaitang T, Chihming K, Tzungyuh Y, et al. Remediation of fuel oil-contaminated soils by a three-stage treatment system[J] . Environmental Engineering Science, 2009, 26
3. :651-659.
4. Li J, Song X, Hu G, et al. Ultrasonic desorption of petrole­um hydrocarbons from crude oil contaminated soils[J] . Journal of Environmental Science ＆ Health Part A Toxic / hazardous Substances ＆ Environmental Engineering, 2013,48(11):1378-1389.
5. Yang X J, Jia Y G, Shan H X, et al. Experimental study on impact of marine hydrodynamics on strength of seabed sediments in the Yellow River estuary[J] . Chinese Jour­nal of Geotechnical Engineering, 2010, 32( 4) : 630-637.
6. LI Xiuhua, Zhang Haibo, Luo Yongming, et al. Remedia­tion of soil heavily polluted with polychlorinated biphenyls using a low-temperature plasma technique[J] . Frontiers of Environmental Science ＆ Engineering, 2014, 8 ( 2 ) : 277-283.
7. 王钰恒,汤红卫,仲崇山. 空气介质阻挡放电固氮的研 究 J].高压电器,015(6):81-85.
8. 黄磊,赵婷婷,贺赟,等. 两株绿脓杆菌对石油污染土 壤的修复作用J].生物工程学报，2017, 33 (6): 957-967.
9. Singh A K, Cameotra S S. Efficiency of lipopeptide biosur­factants in removal of petroleum hydrocarbons and heavy metals from contaminated soil[J] . Environmental Science ＆ Pollution Research, 2013, 20( 10) :7367-7376.
10. 郑红婷,张秀霞,钟哲森,等. 漆酶修复石油污染土壤 优化实验J .现代化工,017(4)： 109J12.
11. Fuentes S, M**e**ndez V, Aguila P, et al. Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial com­munities, and applications J] . Applied Microbiology ＆ Biotechnology, 2014, 98( 1 1 ) :4781 -4794.
12. Kennedy A C , Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils J] . Plant ＆ Soil, 1995, 170(1):75-86.
13. Qu M, Zhang Y M. The stress response and remediation of plant on oil-contaminated soil J] . Advanced Materials Research,2010,113/114/115/116:1195-1198.
14. 彭胜巍. 石油污染土壤的花卉植物修复研究 D] . 天 津:南开大学,2009.
15. Agnello A C, Bagard M, van Hullebusch E D, 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, s 563 /564:693-703.
16. Hou J, Liu W, Wang B, et al. PGPR enhanced phytoreme­diation of petroleum contaminated soil and rhizosphere mi­crobial community response J] . Chemosphere, 2015, 138:592-598.
17. 蒋先军,骆永明,赵其国,等. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理 J] . 土壤学报,003,0(2):205409.
18. Lu L, Huggins T, Jin S, et al. Microbial metabolism and community structure in response to bioelectrochemically enhanced remediation of petroleum hydrocarbon-contami­nated soil J] . Environmental Science ＆ Technology, 2014,48(7):4021.
19. Zhang H, Tang J, Wang L, et al. A novel bioremediation strategy for petroleum hydrocarbon pollutants using salt tolerant Corynebacterium variabile HRJ4 and biochar J] . 环境科学学报:英文版,2016,47(9):7-13.
20. 唐景春,王斐,褚洪蕊,等. 玉米草( Zea Mexicana) 与海 藻寡糖联合修复石油烃污染土壤的研究 J] . 农业环 境科学学报,2010,29(11):2107-2113.