

表面活性剂对土壤中石油类污染物的洗脱效果研究^①

李莎莎^{1,2}, 孙玉焕¹, 胡学锋², 章海波², 骆永明^{2*}, 吴学勇^{2,3}

(1 青岛科技大学, 山东青岛 266042; 2 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 3 烟台大学, 山东烟台 264003)

摘要: 表面活性剂具有增溶和乳化性质, 能够有效去除土壤中的石油类污染物。本研究以实验室配制的原油污染土壤和苯并[a]蒽污染土壤为供试土壤, 采用批量洗脱方法, 研究阴、阳离子和非离子等 11 种表面活性剂的洗脱效果, 从而筛选出效果较好的单一表面活性剂进行阴-非复配, 并以苯并[a]蒽污染土壤为试验土样, 采用单一控制变量法研究复配比、浓度、液固比、温度和添加无机盐种类对洗脱效果的影响。结果表明: 对单一表面活性剂, 洗脱效果最好的为 SDS、Tw80 和 TX100, 三者浓度 10 g/L, 液固比为 40:1 时对苯并[a]蒽去除率分别为 85.3%、74.3% 和 67.9%; 在浓度 6 g/L, 液固比为 20:1 时对原油的去除率分别为 65.3%、57.6% 和 67.3%。SDS-Tw80 混合表面活性剂对苯并[a]蒽有协同增溶作用, SDS-Tw80 在 25℃, 浓度 6 g/L, 液固比 20:1, 复配比例 6:4, 添加 0.02 mol/L 碳酸钠为助剂条件下洗脱效果最好, 苯并[a]蒽去除率为 84.5%。

关键词: 苯并[a]蒽; 表面活性剂; 复配; 土壤洗脱

中图分类号: S143.1; S511

土壤是生态环境的重要组成部分, 是地球上生命活动不可缺少的物质。随着经济的迅速发展, 石油需求大幅度增加, 在石油开采、运输、储藏和加工等过程中造成的土壤石油污染问题日益严重。据统计, 我国每年造成的石油污染土壤近 10 万 t, 累计堆放量近 50 万 t。土壤中的石油污染物多集中在 0~20 cm 左右的表层, 土壤石油污染会严重影响土地的使用功能, 引起土壤结构与性质改变、微生物群落变化、土壤酶活性降低、植被破坏和生态变异, 引起土壤有机质的碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)变化, 导致农作物代谢过程紊乱、水体污染严重等环境问题^[1-3]。石油中毒性较大的芳香烃类物质(PAHs)是典型的疏水性有机污染物, 部分多环芳烃还具有“三致”效应, 能够在农作物中大量累积, 并通过食物链对人体健康构成巨大威胁。由于石油类污染物的疏水性强, 辛醇-水分配(K_{ow})系数高, 与土壤中的有机质结合紧密, 难以彻底去除, 成为土壤修复的难点之一。

表面活性剂是由非极性疏水基和极性亲水基构成, 具有增溶和乳化作用。其能降低水的表面张力和

相界面张力, 增强疏水性有机物的流动性, 形成胶束提高其溶解度, 在疏水性有机污染物污染土壤的清洗中具有较好的应用前景^[4-5]。目前国内外对单一表面活性剂对有机污染土壤的洗脱做了大量研究, 并取得了一定的成效。单宝来等^[6]研究表明 LAS、CTAB 和 Tween-80 均利于蒽在土壤表面的解吸, 且随着表面活性剂浓度的升高, 解吸效果变好。杨建刚等^[7]研究了非离子表面活性剂 Tween80、Tween20 和 TritonX-100 对土壤中多环芳烃的增溶作用。Kalali 等^[8]研究表明 Brij35 对污染土壤中的原油有良好的洗脱作用, 当浓度为 8 g/L 时, 其去除率可达 93.54%。López-Vizcaino 等^[9-10]研究了阴离子表面活性剂 SDS 对有机污染土壤中的多环芳烃、柴油类物质的洗脱作用, 效果显著。但单一表面活性剂增溶能力有限, 修复效率较低, 且在土壤介质的吸附损失较大, 成本较高。有研究表明^[11-13], 阴-非表面活性剂复配对土壤中有有机物具有显著的协同增溶作用, 二者复配能形成混合胶束和混合吸附层, 减弱阴离子表面活性剂离子间的排斥作用, 显著降低混合溶液的临界胶束浓度, 使胶束更易形成, 且阴-非离子混合表面活性

①基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)课题项目(2013AA06A207-1)资助。

* 通讯作者(ymluo@yic.ac.cn)

作者简介: 李莎莎(1989—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染监测、评价与生态修复。E-mail: 1304397443@qq.com

剂的胶束相/水相间的分配系数 K_{mc} 增大,从而增加疏水性有机物的洗脱率,同时减少了表面活性剂用量,减少成本。

本研究以石油烃及其重要的芳香烃组分苯并[a]蒽为目标污染物,通过对单一表面活性剂的筛选,主要研究阴-非复配表面活性剂对土壤中石油类污染物的洗脱作用,考察了复配比、液固比及无机盐等因素对洗脱率的影响,为实际污染土壤中石油类污染物的清除提供了科学依据以及具体的清洗参数。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土壤	含水量 (g/kg)	pH	有机质 (g/kg)	CEC (cmol/kg)	颗粒组成(%)		
					黏粒 ($<2\ \mu\text{m}$)	粉粒 ($2\sim20\ \mu\text{m}$)	砂粒 ($20\sim2\ 000\ \mu\text{m}$)
棕壤	19.7	7.0	18.1	17.7	5.9	45.0	49.1

1.1.2 石油污染土壤 称取 200 g 过 100 目的供试土壤于 500 ml 烧杯中,将 10 g 原油溶解在 200 ml 四氯化碳后加入烧杯中与土壤充分混匀,配制成石油污染土壤,将配置好的污染土壤放置在通风橱内老化一周,待四氯化碳挥发后再放入冷冻干燥机中干燥。总石油烃的测定参考 HJ 637-2012^[15],最后测定土壤中石油烃含量为 35 470 mg/kg。

洗脱方法:将 1 g 污染土壤与一定量一定浓度的表面活性剂溶液混合于 50 ml 玻璃离心管中,置于恒温振荡箱中,150 r/min 振荡 24 h,振荡完成后以 4 000 r/min 的转速离心 30 min,静置后弃去上清液,将离心管放入冷冻干燥机中干燥,至干燥完全后在电子天平上准确称取 0.5 g 土壤于 50 ml 比色管中,加入 20 ml 四氯化碳,塞紧塞子放入超声仪中萃取,30 min 后将比色管缓缓摇晃使四氯化碳与土壤完全接触,超声 45 min 后取出比色管,将萃取液经砂芯漏斗过滤(加 1 cm 厚的无水硫酸钠)后用四氯化碳定容至 50 ml,摇匀后取适量萃取液通过硅酸镁吸附柱,弃去前约 5 ml 滤液后余下部分接入玻璃瓶后用红外分光光度法测定石油烃含量,所测得石油烃含量即为表面活性剂溶液洗脱后土壤中剩余石油烃含量。

1.1.3 苯并[a]蒽污染土壤 与配制石油污染土壤类似,将 40 mg 苯并[a]蒽溶解在 200 ml 甲醇中,并加入到过 100 目的 200 g 供试土壤中充分混匀,在通风橱内老化一周,待四氯化碳挥发后再放入冷冻干燥机中干燥。苯并[a]蒽的测定参考高效液相色谱法,最后测定土壤中苯并[a]蒽含量为 200 mg/kg。

洗脱方法:将 1 g 污染土壤与一定量一定浓度的表

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集制备与洗脱方法

1.1.1 供试土壤 本实验所用供试土壤取自烟台海岸带研究所绿化带未被污染的表层土壤(棕壤)。将土壤混合均匀,放在室温条件下自然风干,去掉残根、塑料等杂物,用研钵研磨,分别过 10 目、60 目和 100 目筛作不同分析用途,储于棕色的广口瓶内备用。土壤基本理化性质的测定参考《土壤农业化学分析方法》中的相应方法^[14],分析结果如表 1 所示。

面活性剂溶液混合于 50 ml 玻璃离心管中,置于恒温振荡箱中,150 r/min 振荡 24 h,振荡完成后以 4 000 r/min 的转速离心 30 min,静置后取一定量的上清液,用高效液相色谱法测定萃取液中苯并[a]蒽含量。

液相色谱条件为:流动相:10% 水:90% 乙腈;进样量:10 μl ;柱温:40℃;流速:1.2 ml/min。

1.2 主要仪器和试剂

试验过程中使用到的主要仪器包括:卧式全温振荡培养箱(上海知楚仪器有限公司);OIL460 型红外分光测油仪(北京华夏科创仪器技术有限公司);KQ-500GDV 型恒温数控超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司);JL530 台式低速离心机(湖南湘仪实验室仪器有限公司);QBZY 系列全自动表面张力仪(上海方瑞仪器有限公司);FD-1-50 真空冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司);Alliance e2695 高效液相色谱仪(Waters, U.S.)。

试验过程中使用的主要试剂包括:四氯化碳(分析纯,天津傲然精细化工);无水硫酸钠和硅酸镁(60-100 目)(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),使用前参照 GB/T 16488—1996 处理;乙腈、甲醇均为色谱纯;羧甲基- β -环糊精(CMCD)98%; β -环糊精(β -CD)(国药集团化学试剂有限公司);苯并[a]蒽(含量 $>98\%$,东京化成工业株式会社)。

阴离子表面活性剂 3 种:十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基苯磺酸钠(LAS)和脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠(AES);非离子表面活性剂 5 种:聚氧乙烯醚脂肪酸酯(LAE9)、壬基酚聚氧乙烯醚 10(NP10)、 C_{12-14} 醇聚氧乙烯醚 9(AEO9)、聚氧乙烯(20)失水山梨醇单油酸

酯(Tween-80, 简称为 Tw80)和聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100, 简称为 TX100); 阳离子表面活性剂 1

种: 十六烷基三甲基溴化铵(HTAB)。表面活性剂的基本性质如表 2 所示。

表 2 实验所用表面活性剂的理化参数^[16-17]
Table 2 Physicochemical properties of tested surfactants

表面活性剂	类型	相对分子量(g/mol)	表面张力(mN/m)	CMC (mg/L)	HLB
十二烷基硫酸钠(SDS)	阴离子	288.38	32.2	2100	40
十二烷基苯磺酸钠(SDBS/LAS)	阴离子	348.48	29.1	1000	11
脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠(AES)	阴离子	332.434	36.2	1458	11.7
聚氧乙烯醚脂肪酸酯(LAE9)	非离子	522	29.4	52.2	13~13.5
壬基酚聚氧乙烯醚 10(NP10)	非离子	616.82	32.1	173.3	13.2
C ₁₂₋₁₄ 醇聚氧乙烯醚 9(AEO9)	非离子	582.81	31.4	730	12.5
聚氧乙烯(20)失水山梨醇单油酸酯(Tween-80/Tw80)	非离子	1309	37.8	15.7	15
聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100/TX100)	非离子	625	34.2	144	13.5
十六烷基三甲基溴化铵(HTAB)	阳离子	364.446	30	335	15.8

注: CMC 为临界胶束浓度; HLB 为亲水亲油平衡值。

1.3 试验设计

1.3.1 单一表面活性剂对污染土壤的洗脱效果 为了研究不同表面活性剂对有机污染土壤的洗脱作用, 实验分别选用浓度为 6 g/L 的阴离子表面活性剂(SDS、LAS 和 AES)、非离子表面活性剂(LAE9、NP10、AEO9、Tw80 和 TX100)和阳离子表面活性剂(HTAB)对人工石油污染土壤以及 10 g/L 的 SDS、LAS、TX100、Tw80、Tw60、羧甲基-β-环糊精(CMCD)和 β-环糊精(β-CD)对苯并[a]蒽污染土壤进行洗脱试验, 从而为下一步试验筛选出效果较好的表面活性剂。

1.3.2 复配表面活性剂对污染土壤的洗脱效果 选用上步试验所筛选的效果较好的阴、非表面活性剂进行复配, 在复配比为 6 : 4, 浓度 10 g/L, 液固比 40 : 1, 振荡温度为 25℃条件下进行苯并[a]蒽污染土壤洗脱实验, 并通过单一控制变量法研究复配比、浓度、液固比、温度以及添加无机盐的种类 6 种因素对洗脱试验的影响, 从而得到优化的条件参数。

2 结果与讨论

2.1 单一表面活性剂对污染土壤的洗脱效果

从图 1 可以看出, 不同类型的表面活性剂对土壤的淋洗效果不同, 在实验浓度下对石油烃的洗脱率在 30% ~ 70%, 对苯并[a]蒽的洗脱率在 85% 以内。表面活性剂对疏水性有机污染物的洗脱作用主要是通过降低油-水之间的液-液界面张力和油-土及水-土之间的液-固界面张力, 提高疏水性有机污染物在水相的溶解度^[1]。比较土壤中这两种不同污染物的洗脱效果可以看出, 阴离子和非离子表面活性剂的效果明显高于阳离子表面活性剂。其中阴离子表面活

性剂 SDS 对两种污染物的洗脱效果均较好, 对土壤中苯并[a]蒽的去除率达到 85.3%, 对石油烃的去除率为 65.3%。非离子表面活性剂中 Tw80 和 TX100 淋洗效果相对较好, 对两种类型污染物的去除率均达到 60%以上。故选择 SDS、Tw80 和 TX100 进行复配洗脱试验。

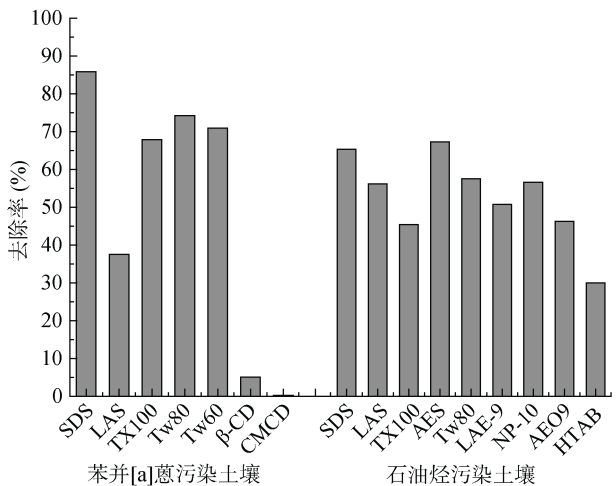


图 1 不同类型表面活性剂对污染土壤的洗脱作用
Fig. 1 Removal efficiencies of contaminated soils with different kind of surfactants

2.2 复配表面活性剂对污染土壤的洗脱效果

2.2.1 复配比的影响 从图 2 中可以看出, SDS 与 TX100, SDS 与 Tw80 都在 6 : 4 的配比下对苯并[a]蒽都具有最好的洗脱效果, 两种复配表面活性剂对土壤中苯并[a]蒽的洗脱率都达到 95% 以上, 洗脱效果都明显优于单一的表面活性剂 SDS、TX100 和 Tw80, 具有良好的协同作用。由于 Tw80、TX100 的临界胶束浓度比 SDS 小很多, 因此, SDS 与 Tw80、

TX100 复配后可减低混合试剂的临界胶束浓度。同时,非离子表面活性剂 Tw80、TX100 与阴离子表面活性剂 SDS 不同,它更容易被土壤颗粒吸附,使表面活性剂失活。因此,增加 Tw80 和 TX100 的比例可能会增加复配表面活性剂的吸附率,从而降低洗脱效率。从图 2 也可以看出,随着 Tw80、TX100 比例的增加,土壤中苯并[a]蒽的洗脱率呈现下降趋势。故在后续实验中所采用的阴-非表面活性剂复配比为 6:4。

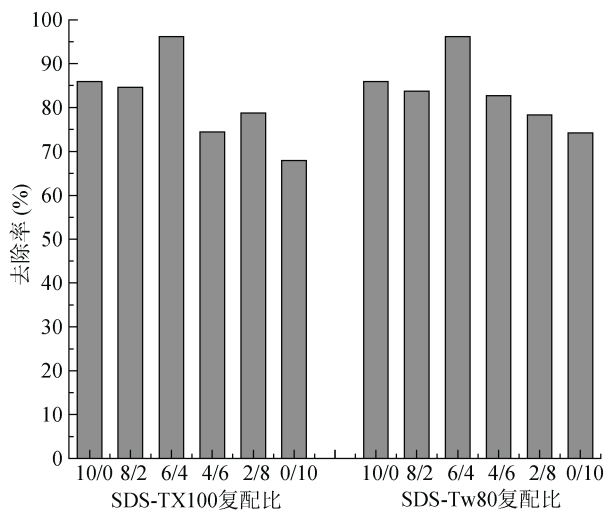


图2 两种表面活性剂的复配比对土壤中苯并[a]蒽的洗脱效果

Fig. 2 Removal efficiencies of Benz[a]anthracene with mixed-surfactants at different mixing ratios

2.2.2 浓度的影响 由图 3 可知,随着复配表面活性剂浓度的增加,土壤中苯并[a]蒽的去除率逐渐提高。通常表面活性剂浓度越大越容易形成胶束,对土壤中的有机物的洗脱率越高,但表面活性剂的过量使用会导致土壤的二次污染和药剂浪费。为更好地确定复配表面活性剂的最佳浓度,实验选用 6:4 的 SDS-Tw80 对石油污染土壤中总石油烃做了进一步洗脱试验。实验结果如图 4 所示,随着 SDS-Tw80 混合表面活性剂浓度的增加,土壤中石油烃的去除率增加,当表面活性剂浓度大于 6 g/L 时去除率基本不变,土壤中易于解吸的石油烃组分已经被洗脱下来,洗脱率达到 70%以上,符合试验洗脱要求。故确定最佳浓度为 6 g/L,且在后续条件参数的测定中主要选用 SDS-Tw80 混合表面活性剂。

2.2.3 液固比的影响 液固比是土壤洗脱过程中的重要影响参数。由图 5 可知,随着清洗剂比例的增加,土壤中苯并[a]蒽的去除率逐渐提高。这可能是由于液固比例太低,导致洗脱液中表面活性剂有效量减少,形成的胶束较少,且淋洗液较少,不易于振荡,

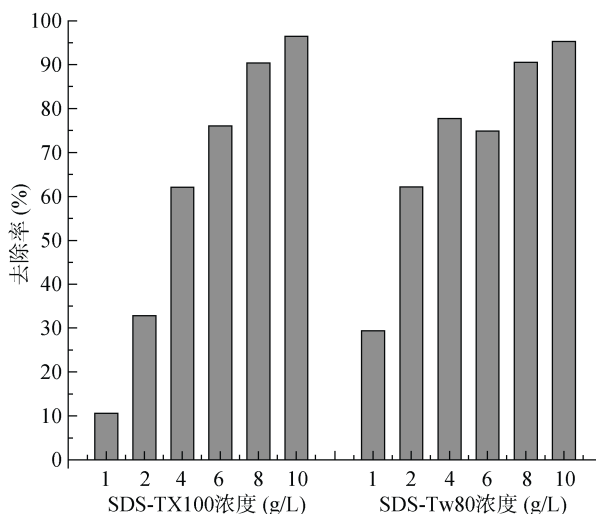


图3 不同浓度复配表面活性剂对土壤中苯并[a]蒽的洗脱效果

Fig. 3 Removal efficiencies of Benz[a]anthracene with mixed-surfactants at different concentrations

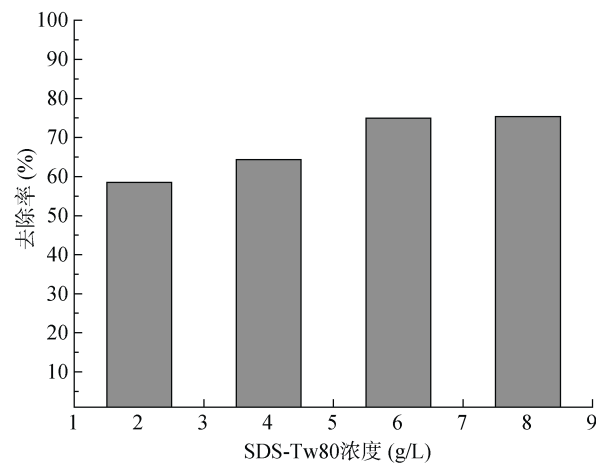


图4 不同浓度 SDS-Tw80 对土壤中石油烃的洗脱效果

Fig. 4 Removal efficiencies of petroleum hydrocarbons with SDS-Tw80 at different concentrations

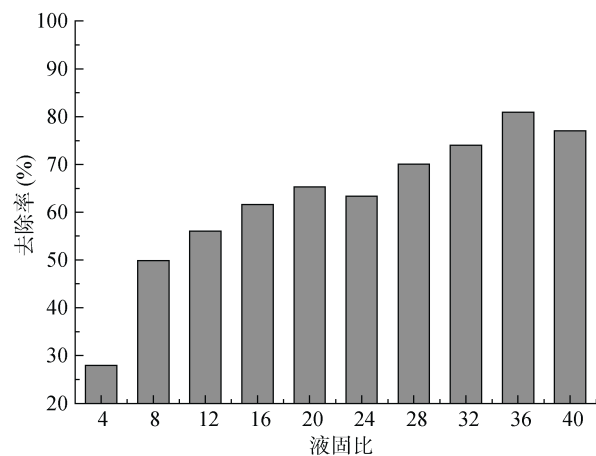


图5 不同液固比对土壤中苯并[a]蒽的洗脱效果

Fig. 5 Removal efficiencies of Benz[a]anthracene with mixed-surfactants at different liquid soil ratios

易于发生强烈的乳化作用,使表面活性剂的淋洗效果较弱;而当液固比增加时,土壤和表面活性剂的接触范围增加,洗脱效果加强。但过高的液固比会增加表面活性剂的用量和废液的产生,增加实验成本,且容易对环境造成二次污染^[18]。由试验数据得知,当液固比为 20:1 时,土壤中苯并[a]蒽的去除率达 60% 以上,清洗剂用量可以满足本试验的需求,故为下一步试验提供合理参数选用最佳液固比为 20:1。

2.2.4 温度的影响 由图 6 可知,随着振荡温度的增加,土壤中苯并[a]蒽的去除率先增加后不断减少,并在 35℃ 时达到最高值。这可能是因为实验过程中温度的升高使 SDS 形成的胶束稳定性减小,不利于表面活性剂分子聚集成胶束,同时使憎水剂周围水结构破坏,妨碍胶束形成,使 SDS 的 CMC 增大。同时, Tw80 的 CMC 随温度的升高呈下降趋势,温度升高加强了活性剂分子疏水链的缔合力,易于形成分子聚集体,同时可破坏醚键中的氧原子与水分子中的氢原子之间的氢键作用,也就是令亲水基的水化作用减小,促进胶束形成^[19]。当两种表面活性剂复配后其混合临界胶束浓度在以上两种作用下随温度不断变化,因此可能出现实验中去除率先增加后不断减少的现象。同时温度过高会使表面活性剂的溶解度降低,部分受热分解,降低表面活性剂的洗脱效率,且增加了能量消耗和成本。另外实验结果中,温度在 25℃ 时的去除效率与最高去除率相差不多,故选择振荡温度为 25℃。

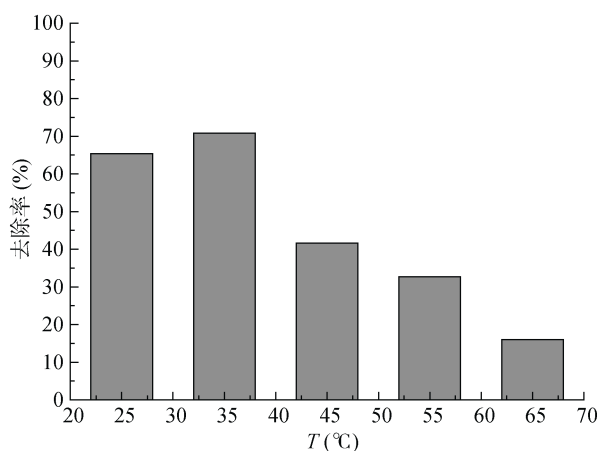


图 6 温度对土壤中苯并[a]蒽去除的洗脱效果
Fig. 6 Removal efficiencies of Benz[a]anthracene with mixed-surfactants at different temperatures

2.2.5 无机盐的影响 本实验在上述试验所确定的条件基础上,添加 0.02 mol/L 不同种类的无机盐对土壤进行洗脱实验,实验结果如图 7 所示。加入相同

浓度的无机盐后,氯化镁、氯化钙使土壤中苯并[a]蒽去除率降低,硫酸钠、碳酸钠和氯化钠使苯并[a]蒽的去除率升高,当加入 0.02 mol/L 的碳酸钠时对土壤中的苯并[a]蒽的去除效果最好。

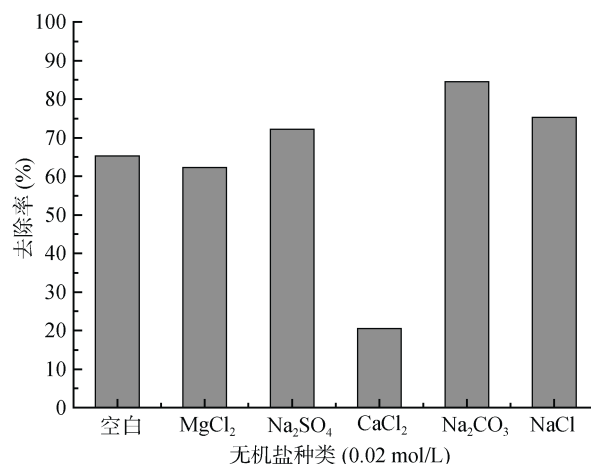


图 7 添加无机盐对土壤中苯并[a]蒽的洗脱效果
Fig. 7 Removal efficiencies of Benz[a]anthracene with mixed-surfactants at different inorganic salts

土壤中存在各类无机盐,同时无机盐也是在表面活性剂清洗实验中最常用的一种助剂。无机盐的加入可以减小表面活性剂的 CMC 和浊点,增加胶束疏水内核的容积,提高表面活性剂活性^[20]。在 SDS-Tw80 复配体系中,阴离子表面活性剂 SDS 在水溶液中电离产生 $C_{12}H_{25}O-SO_3^-$,能和钙镁离子作用生成沉淀,减少 SDS 的有效作用物质的量,破坏复配体系,故而降低土壤中苯并[a]蒽的去除率。氯化钠电离产生的钠离子能增加离子胶束的扩散双电层,提高表面活性剂活性,硫酸钠电离除了产生钠离子外,硫酸根可以提供大量负电荷减少土壤对表面活性剂的吸附,降低表面活性剂溶液的表面张力和固液界面张力,提高表面活性剂的增溶作用。碳酸钠属于强碱弱酸盐,水解溶液呈碱性,能与石油中的酸性组分反应而生成盐,同时使表面活性剂分子与土壤间的排斥作用变大,减少土壤对表面活性剂溶液的吸附而增加苯并[a]蒽的去除率。

3 结论

1) 表面活性剂对土壤中的疏水性有机物具有显著的去除作用,特别是阴离子表面活性剂 SDS 和非离子表面活性剂 Tw80、TX100 都对土壤中疏水性有机污染物有较高的洗脱效率,去除率均在 60% 以上;而阳离子表面活性剂由于易于被带负电的土壤颗粒吸附,其洗脱效果并不明显。

2) 通过系统研究阴-非表面活性剂的复配比例、

浓度、液固比和添加无机盐的种类等对土壤中疏水性有机污染物苯并[a]蒽及原油的去除率的影响,可知 SDS-Tw80 混合表面活性剂对苯并[a]蒽有协同增溶作用, SDS-Tw80 在 25℃, 浓度 6 g/L, 液固比 20:1, 复配比例 6:4, 添加 0.02 mol/L 碳酸钠为助剂条件下洗脱效果最好, 苯并[a]蒽去除率为 84.5%。

参考文献:

- [1] Zhou W J, Zhu L Z. Enhanced desorption of phenanthrene from contaminated soil using anionic/nonionic mixed surfactant[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147: 350–357
- [2] 白静, 赵勇胜, 周冰, 等. 非离子表面活性剂 Tween80 增溶萘实验模拟[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(11): 1 993–1 998
- [3] Von Lau E, Gan S, Ng H K, et al. Extraction agents for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from soil in soil washing technologies[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 640–649
- [4] 肖鹏飞, 宋玉珍, 王剑桥. 表面活性剂对东北黑土中苯并[a]芘的增溶洗脱作用[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 743–748
- [5] 马超, 刘光全, 赵林, 等. 表面活性剂在油污土壤修复中的应用[J]. *污染防治技术*, 2013, 26(5): 55–59
- [6] 单宝来, 张秀霞, 张剑杰, 等. 表面活性剂对蒽在土壤中吸附的影响[J]. *三峡环境与生态*, 2010, 32(4): 55–57
- [7] 杨建刚, 刘翔, 余刚, 等. 非离子表面活性剂溶液中多环芳烃的溶解特性[J]. *环境科学*, 2003, 24(6): 79–82
- [8] Kalali A, Ebadi T, Rabbani A, et al. Response surface methodology approach to the optimization of oil hydrocarbon polluted soil remediation using enhanced soil washing[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, 8(2): 389–400
- [9] López-Vizcaino R, Sáez C, Cañizares P, et al. The use of a combined process of surfactant-aided soil washing and coagulation for PAH-contaminated soils treatment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 88: 46–51
- [10] Khalladi R, Benhabiles O, Bentahar F, et al. Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164: 1 179–1 184
- [11] Zhang Y X, Long Y Y, Zhang Y C, et al. Effect of a mixed anionic-nonionic surfactant adsorption on bentonite structure and on distribution of pentachlorophenol[J]. *Applied Clay Science*, 2012, 69: 93–98
- [12] Zhang M, Zhu L Z. Effect of SDBS-Tween80 mixed surfactants on the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil-water system[J]. *Soils Sediments*, 2010, 10: 1 123–1 130
- [13] Yang K, Zhu L Z, Xing B S. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40: 4 274–4 280
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [15] 环境保护部. HJ 637—2012: 水质 石油类和动植物油的测定 红外分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012
- [16] 习潘, 刘静, 张永奎, 等. 阴离子/非离子表面活性剂体系洗涤含油污泥[J]. *化工进展*, 2014, 33(10): 2753–2757
- [17] 李果, 毛华军, 巩宗强, 等. 几种表面活性剂对柴油及多环芳烃的增溶作用[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(7): 775–780
- [18] Peng S, Wu W, Chen J J. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: Influencing factors and removal effectiveness[J]. *Chemosphere*, 2011, 82: 1 173–1 177
- [19] 舒梦, 陈萍华, 蒋华麟, 等. 十二烷基硫酸钠的临界胶束浓度的测定及影响分析[J]. *化工时刊*, 2014, 28(3): 1–3, 15
- [20] 吴耀国, 张小燕, 胡思海, 等. 无机盐与表面活性剂对菲在黄土上吸附/解吸行为的联合影响[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(2): 319–326

Elution Effects of Surfactants on Petroleum Contaminants in Soil

LI Shasha^{1,2}, SUN Yuhuan¹, HU Xuefeng², ZHANG Haibo², LUO Yongming^{2*}, WU Xueyong^{2,3}

(1 *Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042, China*; 2 *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China*; 3 *Yantai University, Yantai, Shandong 264003, China*)

Abstract: Surfactants have the potential to clean up the crude oil contaminated soil owing to their excellent properties of solubilization and emulsification. Here, the elution efficiency of crude oil and Benz[a]anthracene from soil by 11 kinds of surfactants including anionic, cationic, and non-ionic surfactants were examined using batch elution experiments. According to the elution efficiency, better anionic and nonionic surfactants were selected and mixed, and then, the influence of mass ratio, concentration of mixed surfactants, liquid soil ratio (L/S), temperature and the species of the added inorganic salts on elution efficiency of Benz[a]anthracene in contaminated soil were investigated in the experiment. The results showed that, for single surfactant, SDS, Tw80 and TX100 had greater effects on Benz[a]anthracene and crude oil elution test, and the elution rates of Benz[a]anthracene were 85.3%, 74.3% and 67.9% under the condition of concentration of 10 g/L and liquid soil ratio of 40 : 1, meanwhile, the elution rates of crude oil were 65.3%, 57.6% and 67.3% under the concentration of 6 g/L and liquid soil ratio of 20 : 1, respectively. The solubilization of Benz[a]anthracene could be increased significantly by SDS-Tw80 mixed surfactants. The elution rate of Benz[a]anthracene could be up to 84.5% when the concentration and the mass ratio of SDS-Tw80 were 6 g/L and 6 : 4, the liquid soil ratio (L/S) was 20 : 1, the concentration of sodium carbonate as additive was 0.02 mol/L.

Key words: Benz[a]anthracene; Surfactant; Compound; Soil elution