

多环芳烃污染土壤表面活性剂清洗及生物柴油强化

毛华军¹, 巩宗强^{2*}, 方振东¹, 金京华³, 杨 辉⁴, 杨 琴¹, 孙翼飞²

(1.后勤工程学院营房管理与环境工程系, 重庆 401311; 2.中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 3.轻工业环境保护研究所, 北京 100089; 4.吉林师范大学旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000)

摘 要:针对某焦化厂内高浓度多环芳烃污染土壤,以烷基苷(APG)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和曲拉通 X-100(TX100)为表面活性剂代表物,采用静态平衡法和高效液相色谱分析,探索采用单一及混合表面活性剂清洗修复多环芳烃污染土壤,并考察生物柴油对多环芳烃去除效果的影响。结果表明,单一表面活性剂对土壤中多环芳烃去除率顺序为 SDBS>APG>TX100。APG/SDBS 混合处理及 TX100/SDBS 为 9:1 混合处理提高了土壤中多环芳烃去除率,而 APG/TX100 混合处理没能提高多环芳烃去除率。生物柴油对 TX100 及 TX100/SDBS 去除多环芳烃效果没有明显提高,对 APG 及 APG/TX100 去除多环芳烃略有提高。当 APG/SDBS 为 9:1 时,生物柴油可以使多环芳烃去除率从(63.3±2.0)%提高到(75.6±2.0)%。单一表面活性剂、混合表面活性剂、及表面活性剂-生物柴油乳液对多环芳烃各组分去除率比较类似,对菲的去除率最高,茚并[1,2,3-d]芘次之,其余相对较低。因此,建议采用 APG/SDBS+生物柴油的混合体系对高浓度多环芳烃污染土壤进行修复。

关键词:表面活性剂;混合表面活性剂;多环芳烃;土壤;生物柴油

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1847-06

Washing of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil Using Single and Mixed Surfactants and Removal Enhancement by Biodiesel

MAO Hua-jun¹, GONG Zong-qiang^{2*}, FANG Zhen-dong¹, JIN Jing-hua³, YANG Hui⁴, YANG Qin¹, SUN Yi-fei²

(1. Department of Barracks Management & Environmental Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 4. Department of Tourism & Geography, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract: Single and mixed surfactants were used in this study as solubilization agents for remediation of soils contaminated with high concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and the effect of biodiesel on PAH removal by using single and mixed surfactants was also evaluated. A coking plant soil from Beijing with total PAH concentration of 190.6 mg·kg⁻¹ was washed using alkylpolyglucosides (APG), sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS), Triton X-100 (TX100), and their binary mixtures at different ratios as representative surfactants. Soil washing experiments were conducted in glass bottles with the soil and solubilization agents (1% surfactant, with or without 2% biodiesel) at ratio of 1:5 (W/V), and individual and total PAHs in the solubilization agents were analyzed by high performance liquid chromatography. The order of total PAH removals from the coking plant soil using single surfactant was SDBS>APG>TX100, and the removals were (62.4±9.0)%, (55.4±1.5)% and (34.5±3.6)% respectively. A synergistic effect for PAH removal from the contaminated soil was observed for APG/SDBS and TX100/SDBS mixtures, as the PAH removals by these mixtures were higher than those calculated by using same amount of single corresponding solubilization agent, whereas APG/TX100 mixture did not show this synergistic effect. Among these solubilization systems, APG/SDBS mixture at ratio of 9:1 showed the highest total PAH removal of (63.3±2.0)%. Phenanthrene and indeno[1,2,3-cd]pyrene showed the first two highest removals among individual PAH removals by the single surfactant systems. Total PAH removal from the contami-

收稿日期: 2011-01-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2008AA06Z331); 国家自然科学基金面上项目(20707030)

作者简介: 毛华军(1982—), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 主要从事土壤环境研究。E-mail: hjmaotz@163.com

* 通讯作者: 巩宗强 E-mail: zgong@iae.ac.cn

nated soil was increased from (63.3±2.0)% to (75.6±2.0)% when 2% biodiesel was added to the APG/SDBS mixture at ratio of 9:1, showing that biodiesel had a good potential to improve PAH removal efficiency while using surfactant mixture. Similar to the APG/SDBS mixture, this solubilization system also demonstrated highest removals of phenanthrene and indenopyrene, (86.9±1.6)% and (67.5±17.0)% respectively. Thus the solubilization system containing APG/SDBS mixture and biodiesel was suggested in this study for remediation of industrial soils with high concentrations of PAHs.

Keywords: surfactant; mixed surfactant; polycyclic aromatic hydrocarbons; soil; biodiesel

多环芳烃(PAHs)是一类广泛存在于环境中的难降解有机污染物,具有致癌、致畸、致突变性。土壤中多环芳烃可通过渗透和扩散进入水体,可被植物吸收进入食物链,对生态环境和人类健康具有很大潜在危害。人工煤气厂^[1]、焦化厂^[2]、化工厂^[3]等场地多环芳烃污染浓度高、生物可利用性差,建立快速有效的土壤场地修复方法是当前一个亟待解决的问题。

表面活性剂淋洗法被认为是去除该类场地污染的较好方法之一。常用的淋洗剂为化学合成表面活性剂,但存在着修复效率不高、不易生物降解、二次污染等问题。高效、低二次污染淋洗剂的选取是表面活性剂淋洗修复研究的重要内容之一,近几年来,主要集中于对生物可降解表面活性剂和混合表面活性剂的研究,取得了较好的效果。其中,生物可降解表面活性剂主要有鼠李糖脂^[4]、皂角苷^[5]和烷基苷(APG)^[6-7]等,混合表面活性剂主要为阴/非离子混合表面活性剂^[8-9]。但是,研究主要集中于模拟污染土壤,应用于高浓度原污染土壤时,修复效率仍有待进一步提高。

添加有机溶剂,可以提高修复效率,降低修复成本,减少二次污染。Chu 等^[10]研究指出,溶于胶束中的有机溶剂可促进分配过程,从而提高对疏水性污染物的去除作用。Walter 等^[11]研究表明,以脂肪烃为主的低粘度油有助于降低多环芳烃在土壤上的吸附。已有研究表明,植物油-水乳液体系对土壤有机污染具有较好的修复作用^[12-13]。生物柴油主要是由动植物油脂经反应改性得来的长链脂肪酸烷基酯,具有粘度低、环境友好、易生物降解等优点,能大量溶解土壤中的多环芳烃,对高浓度多环芳烃污染土壤的修复具有明显意义^[14]。但是,目前缺少在表面活性剂溶液中添加生物柴油进行高浓度原污染土壤清洗修复的研究。

本文针对某焦化厂内多环芳烃污染土壤,探索采用单一及混合表面活性剂清洗修复污染土壤,并考察生物柴油对多环芳烃去除效果的影响,旨在实现多环芳烃的最大去除,建立经济可行的高浓度多环芳烃污染土壤清洗修复方法。

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

污染土壤取自北京某焦化厂内,研磨并过 2 mm 筛,盛于广口瓶中,备用。其多环芳烃组成如表 1 所示。多环芳烃总浓度为(190.6±15.7)mg·kg⁻¹,主要由菲、蒽、荧蒽和芘组成,苯并[a]蒽、蒎、苯并[b]荧蒽、苯并[k]蒽、苯并[a]芘、苯并[g,h,i]芘、茚并[1,2,3-d]芘等含量相对较少,二苯并[a,h]蒽未检出。

十二烷基苯磺酸钠(SDBS,分析纯),为北京市旭东化工厂生产;曲拉通 X-100(TX-100,化学纯),购自国药集团化学试剂有限公司;烷基糖苷(APG, 50%,聚合度 1.2~1.8),购自山东恒佳药化开发有限公司。3 种表面活性剂主要理化性质见表 2。生物柴油(密度 0.876 kg·L⁻¹),为重庆华正生物能源开发有限公司提供。氯化钠(分析纯),为天津市科密欧化学试剂有限公司生产;乙腈(色谱纯),为 Sigma-Aldrich 公司生产;多环芳烃标准样,购自美国 Accustandard。

HZQ-C 空气浴恒温振荡器,哈尔滨市东明医疗

表 1 焦化厂土壤中多环芳烃组成

Table 1 PAH concentrations in the coking plant soil

多环芳烃	* 水中溶解度/ mg·L ⁻¹	*lgK _{ow}	土壤中多环芳烃 浓度/mg·kg ⁻¹ 偏差/mg·kg ⁻¹	
菲(phen)	1.29	4.46	98.4	10.7
蒽(ant)	0.07	4.45	20.86	2.5
荧蒽(flt)	0.26	5.33	26.2	2.7
芘(pyr)	0.14	5.32	17.2	1.3
苯并[a]蒽(baa)	0.014	5.61	5.8	0.4
蒎(chry)	0.002	5.61	4.7	0.3
苯并[b]荧蒽(bbf)	0.001 2	6.57	6.4	1.2
苯并[k]蒽(bkf)	0.000 6	6.84	1.2	0.1
苯并[a]芘(bap)	0.003 8	6.04	3.4	0.7
二苯并[a,h]蒽(daha)	0.000 5	6.5	未检出	未检出
苯并[g,h,i]芘(bghip)	0.000 26	7.1	3.6	0.3
茚并[1,2,3-d]芘(icdp)	0.062	7.66	2.9	0.3
总量			190.6	15.7

注:* 数据来源于文献[1]。

表 2 表面活性剂性质

Table 2 Properties of the surfactants

表面活性剂	摩尔质量	CMC/mg·L ⁻¹	HLB	参考文献
SDBS	348	963.2	—	[15]
TX100	625	193.8	13.5	[16]
APG	390	25.9	10~14	[7, 17]

仪器厂;HJ-2 恒温磁力加热搅拌器,金坛市安普实验仪器厂;DT5-2 低速自动平衡离心机,北京时代北利离心机有限公司;Sartorius 电子天平(型号 BP221S),德国赛多利斯公司;高效液相色谱仪(1200 series),美国安捷伦科技公司;色谱柱为 C-18 柱。

1.2 表面活性剂溶液配制

单一表面活性剂:分别称取表面活性剂 SDBS、TX100 各 20.0 g,APG 为 40.0 g,用蒸馏水逐渐溶于 2 L 容量瓶中,再加入 0.40 g 叠氮化钠以抑制微生物生长。这样,配制的表面活性剂浓度为 1%。

按单一表面活性剂溶液体积比为 1:9、1:3、3:1、9:1 加入上述已配制好的表面活性剂溶液,搅拌均匀,获得混合表面活性剂溶液。共配制 APG/SDBS、TX100/SDBS、APG/TX100 等 3 种混合表面活性剂,且编号。例如,AS31 表示 APG/SDBS 混合表面活性剂,其混合比例为 3:1,其余以此类推。

按表面活性剂溶液与生物柴油 50:1(V:V)的比例混合,磁力搅拌 5 h 后,离心分离(5 000 r·min⁻¹,30 min),取下层液体,获得表面活性剂-生物柴油乳液。

1.3 多环芳烃污染土壤的清洗

在 50 mL SCHOTT DURAN 试剂瓶中,加入 4.0 g 污染土壤和上述已配制好的表面活性剂、混合表面活性剂或表面活性剂-生物柴油乳液 20 mL,加盖密封后置于摇床中。摇床温度为 30 ℃,转速为 140 r·min⁻¹。48 h 后取出,离心分离(5 000 r·min⁻¹,30 min)取水相,过 0.45 μL 水膜后使用高效液相色谱测定。

1.4 高效液相色谱分析条件

本文主要测定了土壤中菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、蒄、苯并[b]荧蒽、苯并[k]蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[g,h,i]花、茚并[1,2,3-d]芘共 12 种多环芳烃,分析条件为:流动相为乙腈和水,初始 35 min,乙腈配比由 60%线性增加到 100%,保持此配比运行 10 min,在下一个 10 min 之内乙腈配比再由 100%线性减小到 60%并保持此配比运行 5 min;柱温 35 ℃,流速为 0.5 mL·min⁻¹,进样量为 10 μL。多环芳烃浓度根据外标法测定。

2 结果与讨论

2.1 表面活性剂对土壤中多环芳烃的去除效果

单一及混合表面活性剂对土壤中多环芳烃的总去除率见图 1,并将其与混合表面活性剂无协同去除多环芳烃的理论值进行了比较,理论值从各表面活性剂单独处理效率推算(例如 AS31 理论处理效果=APG 去除率×75%+SDBS 去除率×25%)。

单一表面活性剂的去除率顺序为 SDBS>APG>TX100,其去除率大小分别为(62.4±9.0)%、(55.4±1.5)%和(34.5±3.6)%。阴离子表面活性剂对土壤中多环芳烃去除率高于非离子表面活性剂 TX100。离心过后,SDBS 体系仍为浑浊体系,表明清洗过程中阴离子表面活性剂挟带着大量细小颗粒一起去除,而土壤中多环芳烃主要吸附于细小颗粒上,这可能是导致 SDBS 清洗效率较高的原因,而非离子表面活性剂(APG 和 TX100)没有这种现象。实验中观察到 APG 的泡沫稳定性比 TX100 好,这也可能是 APG 比 TX100 去除多环芳烃效率高的原因之一。

混合表面活性剂中 SDBS 含量较高时,细小颗粒无法分离,因此未进行探讨。从图 1 可以看出,AS31、AS91 及 TS91 混合处理提高了多环芳烃去除率,即 APG/SDBS 混合处理及 TX100/SDBS 9:1 混合处理提高了土壤中多环芳烃的去除率,表明非离子表面活性剂与阴离子表面活性剂混合具有较好协同作用。Zhang 等^[18]研究表明,麦芽糖苷与十二烷基硫酸钠(SDS)在 3:1、1:1、1:3 混合时具有较强的相互作用,其胶束内表面活性剂分子的相互作用系数分别为-4.00、-3.77、-3.25。APG 与 SDBS 可能也存在着类似的相互作用,从而有利于降低表面活性剂临界胶束浓度,起到协同作用。Zhou 等^[9]研究结果也表明 TX100/SDBS 可以体现出较好协同作用。然而,APG 和 TX100 混合处理没能提高多环芳烃的去除率,表明非离子表面活性剂之间没有协同作用,这可能是由于非离子表面活性剂之间胶束内分子相互作用较弱的缘故。总体上 AS91 处理实现了多环芳烃的较大去除(63.3%),且表面活性剂体系中 APG 的比例较高(90%)。因为 APG 是容易降解的环境友好型表面活性剂,所以 AS91 清洗是高效环保的多环芳烃污染土壤修复方式。

单一表面活性剂、混合表面活性剂对多环芳烃各组分去除率类似,其中单一表面活性剂对各组分去除率如图 2 所示。在不同组分去除率比较上,菲的去除

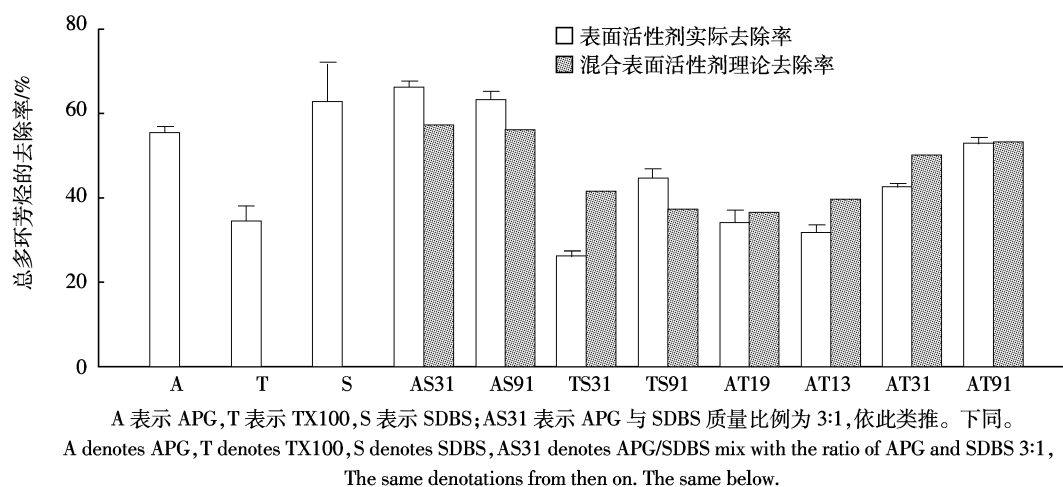


图1 单一及混合表面活性剂对土壤总多环芳烃的去除率

Figure 1 Total PAH removals from contaminated soil by single and binary surfactant systems

率最高, APG、SDBS、TX100 的去除率分别为 $(66.1 \pm 2.1)\%$ 、 $(75.3 \pm 10.9)\%$ 、 $(39.8 \pm 4.2)\%$, 茚并[1,2,3-d]芘的去除率次之, 分别为 $(58.8 \pm 15.7)\%$ 、 $(62.4 \pm 12.1)\%$ 、 $(33.6 \pm 4.2)\%$, 其余组分去除率相对较低。Zheng 等^[9]针对经11个月老化的多环芳烃模拟污染土壤进行研究, 结果表明, 吐温-80 对高分子量多环芳烃去除率明显高于低分子量多环芳烃。Gong 等^[14]针对人工煤气厂高浓度多环芳烃污染土壤(浓度为 $997 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 进行研究, 结果也表明, 吐温-80 和 TX100 对高分子量多环芳烃去除率明显高于低分子量多环芳烃。本文研究与上述结果不一致, 可能与土壤性质、土壤中多环芳烃含量等不同有关。

2.2 生物柴油对表面活性剂去除土壤多环芳烃的影响

本文采用表面活性剂-生物柴油乳液, 考察了生物柴油对土壤中多环芳烃去除率的影响, 结果见图3。生物柴油对 TX100 单一表面活性剂及 TX100/SDBS 混合表面活性剂去除多环芳烃的效果没有明

显提高, 对 APG 单一表面活性剂及 APG/TX100 混合表面活性剂去除多环芳烃的效果略有提高。当 APG 与 SDBS 以 9:1 混合时, 生物柴油可以使多环芳烃去除率从 $(63.3 \pm 2.0)\%$ 提高到 $(75.6 \pm 2.0)\%$, 具有协同作用。这可能是 APG 的结构有利于生物柴油分子插入胶束内表面活性剂分子之间, 从而有利于提高土壤中多环芳烃的去除率。当体系中存在 SDBS 时, SDBS 与 APG 的强烈相互作用更有利于生物柴油分子插入胶束内表面活性剂分子之间, 从而进一步提高多环芳烃去除率。在上面的清洗剂体系中, APG/SDBS(9:1)混合表面活性剂体系对土壤中多环芳烃实现了最大去除率, 且本研究证明通过添加少量生物柴油, 可进一步提高土壤中多环芳烃的去除率, 因此建议采用 APG/SDBS+生物柴油的混合体系对高浓度多环芳烃污染土壤进行清洗修复, 可以实现 75% 的多环芳烃去除。

选择 APG/SDBS 混合体系, 考察了生物柴油对多

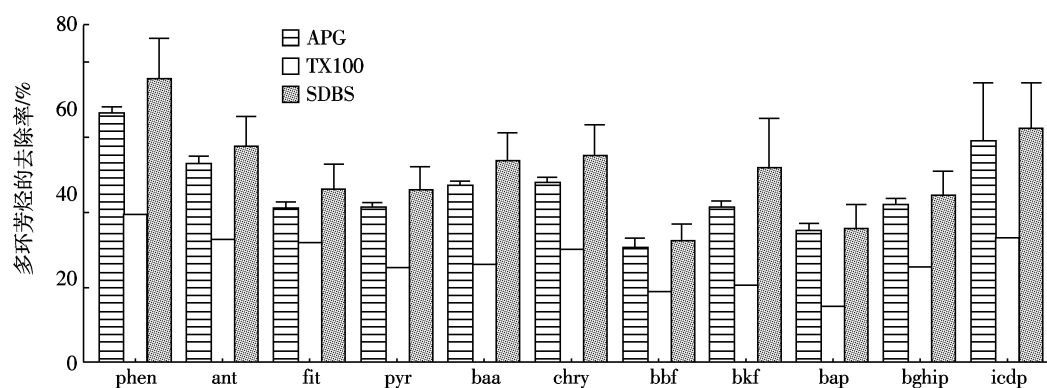


图2 单一表面活性剂对多环芳烃各组分的去除率

Figure 2 Individual PAH removals from the contaminated soil by single surfactant systems

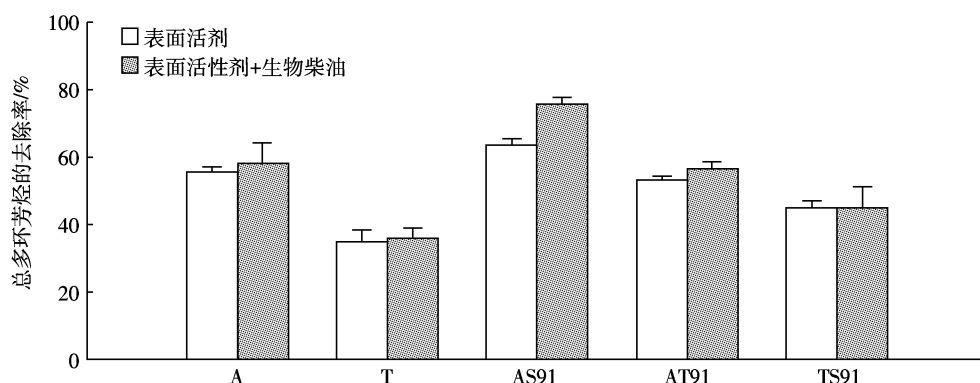


图3 生物柴油对表面活性剂去除土壤总多环芳烃的影响

Figure 3 Effect of biodiesel addition on total PAH removals from the contaminated soil by surfactant systems

环芳烃各组分去除率的影响,结果见图4。生物柴油可以提高多环芳烃各组分的去除率。添加生物柴油后,各组分去除率同样表现出菲最高,达到 $(86.9 \pm 1.6)\%$,茚并[1,2,3-d]芘次之,达到 $(67.5 \pm 17.0)\%$ 。其余组分去除率大小顺序与未加生物柴油基本类似,这表明生物柴油对多环芳烃各组分去除率的提高作用不存在选择性。

2.3 生物柴油强化表面活性剂清洗机理

在表面活性剂清洗体系中,加入溶剂可以提高清洗效率,减少表面活性剂用量。通常采用的溶剂为水溶性,可在水相和胶束核中分布,例如丙酮、三乙胺、乙醇、异丙醇等^[10,19-22]。水相中溶剂可以促进疏水性有机污染物从土壤颗粒中扩散至水相,胶束核中溶剂可以提高胶束核有效尺寸,增加胶束核对有机物的亲和性,从而提高有机污染物在胶束中的分配能力。然而,由于生物柴油不溶于水,在表面活性剂溶液中的溶解度仍很低。生物柴油对表面活性剂清洗的提高作用,可能与生物柴油分子和胶束内表面活性剂分子的相互作用有关。生物柴油具有一定的表面活性,其分子

可以插入胶束内表面活性剂分子之间,从而提高胶束对PAHs的增溶能力,进而增加PAHs在水相中的分配能力^[23-24]。此外,插入胶束内表面活性剂分子之间的生物柴油可以更好地与土壤接触,提高生物柴油对土壤PAHs的溶解能力,从而有利于PAHs从土壤颗粒上解吸进入胶束中。

3 结论

单一表面活性剂对土壤中多环芳烃去除率顺序为SDBS>APG>TX100。APG/SDBS混合处理及APG/SDBS为9:1混合处理均提高了土壤中多环芳烃去除率,而APG/TX100混合处理没能提高多环芳烃去除率。生物柴油对TX100单一表面活性剂及TX100/SDBS混合表面活性剂去除多环芳烃效果没有明显提高,对APG单一表面活性剂及APG/TX100混合表面活性剂去除多环芳烃略有提高。当APG/SDBS为9:1时,生物柴油可以使多环芳烃去除率从 $(63.3 \pm 2.0)\%$ 提高到 $(75.6 \pm 2.0)\%$ 。

单一表面活性剂、混合表面活性剂、及表面活性

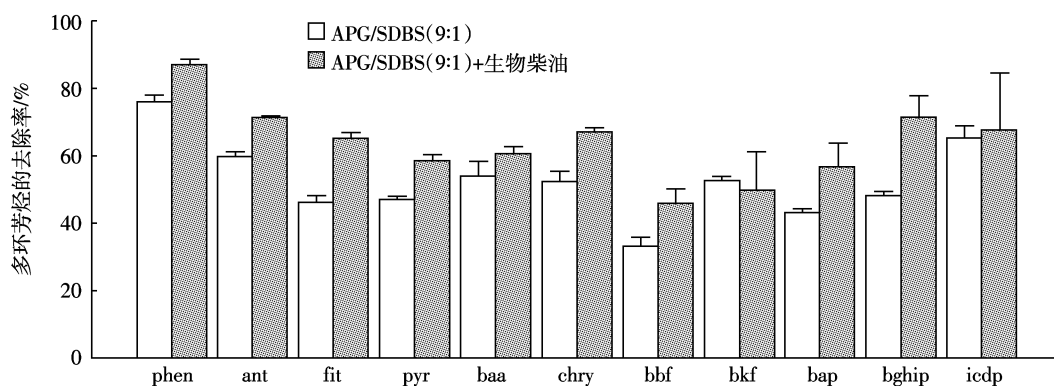


图4 生物柴油对表面活性剂去除土壤多环芳烃各组分的影响

Figure 4 Effect of biodiesel addition on individual PAH removals from the contaminated soil by surfactant systems

剂-生物柴油乳液对多环芳烃各组分去除率比较类似。在不同组分去除率比较上,菲的去除率最高,茚并[1,2,3-d]芘次之,其余组分去除率相对较低。APG/SDBS混合体系中,生物柴油可以提高多环芳烃各组分去除率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ahn S, Werner D, Luthy R G. Physicochemical characterization of coke-plant soil for the assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon availability and the feasibility of phytoremediation[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(9):2185-2195.
- [3] 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*, 2005, 135(3):515-522.
- [4] Bordas F, Lafrance P, Villemur R. Conditions for effective removal of pyrene from an artificially contaminated soil using *Pseudomonas aeruginosa* 57SJ rhamnolipids[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1):69-76.
- [5] 童丹, 吴应琴, 郭宏栋, 等. 生物表面活性剂对黄土中菲的增溶作用[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(16):4911-4912, 4938. TONG Dan, WU Ying-qin, GUO Hong-dong, et al. Solubility enhancements of phenanthrene by biosurfactant in loess soil[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(16):4911-4912, 4938.
- [6] Han M, Ji G D, Ni J R. Washing of field weathered crude oil contaminated soil with an environmentally compatible surfactant, alkyl polyglucoside[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(5):579-586.
- [7] Yang J, Lee Y, Park J, et al. Application of APG and Calfax 16L-35 on surfactant-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from kaolinite[J]. *Engineering Geology*, 2005, 77(3-4):243-251.
- [8] Zhou W J, Zhu L Z. Solubilization of pyrene by anionic-nonionic mixed surfactants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 109(1-3):213-220.
- [9] Zhou W J, Zhu L Z. Enhanced desorption of phenanthrene from contaminated soil using anionic/nonionic mixed surfactant[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2):350-357.
- [10] Chu W, Kwan C Y. Remediation of contaminated soil by a solvent/surfactant system[J]. *Chemosphere*, 2003, 44(1):9-15.
- [11] Walter T, Ederer H J, Forst C, et al. Sorption of selected polycyclic aromatic hydrocarbons on soils in oil-contaminated systems[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(3):387-397.
- [12] Pannu J K, Singh A, Ward O P. Vegetable oil as a contaminated soil remediation amendment: Application of peanut oil for extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(10):1211-1216.
- [13] Lee Y C, Kwon T S, Yang J S, et al. Remediation of groundwater contaminated with DNAPLs by biodegradable oil emulsion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1-2):340-345.
- [14] Gong Z Q, Wang X G, Tu Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon removal from contaminated soils using fatty acid methyl esters[J]. *Chemosphere*, 2010, 51(2):138-143.
- [15] 赵保卫, 车海丽, 王海峰, 等. 阴/非表面活性剂对菲污染砂土柱淋洗研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3):458-464. ZHAO Bao-wei, CHE Hai-li, WANG Hai-feng, et al. Column leaching of phenanthrene in sandy soil by anionic and nonionic surfactants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):458-464.
- [16] Zhu L Z, Zhou W J. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons to solid-sorbed nonionic surfactants[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1):130-137.
- [17] 邓廷昌, 李满洋. 生物质表面活性剂烷基多苷的发展[J]. *精细与专用化学品*, 2009, 17(10):36-40. DENG Ting-chang, LI Man-yang. Progress on surfactant alkyl polyglucoside made from biomass[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2009, 17(10):36-40.
- [18] Zhang R, Zhang L, Somasundaran P. Study of mixtures of n-dodecyl- β -D-maltoside with anionic, cationic, and nonionic surfactant in aqueous solutions using surface tension and fluorescence techniques [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 278(2):453-460.
- [19] Zheng Z M, Obbard J P. Polycyclic aromatic hydrocarbon removal from soil by surfactant solubilization and *Phanerochaete chrysosporium* oxidation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6):1842-1847.
- [20] Deshpande S, Shiau B J, Wade D, et al. Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing[J]. *Water Research*, 1999, 33(2):351-360.
- [21] Zhong L R, Mayer A S, Pope G A. The effects of surfactant formulation on nonequilibrium NAPL solubilization[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 60(1-2):55-75.
- [22] Martel R, Gelinat P J, Desnoyers J E. Aquifer washing by micellar solutions: 1 Optimization of alcohol-surfactant-solvent solutions[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 29(4):319-346.
- [23] Wellert S, Karg M, Imhof H, et al. Structure of biodiesel based bicontinuous microemulsions for environmentally compatible decontamination: A small angle neutron scattering and freeze fracture electron microscopy study[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 325(1):250-258.
- [24] Tchakalova V, Testard F, Wong K, et al. Solubilization and interfacial curvature in microemulsions I. Interfacial expansion and co-extraction of oil[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects*, 2008, 331(1-2):31-39.