

# 十二烷基硫酸钠和 Triton X-100 淋洗菲污染砂土研究

赵保卫, 王海峰, 车海丽, 徐瑾, 张春玲, 王鹏

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 比较研究了阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠 (SDS)、非离子表面活性剂辛基酚聚氧乙烯醚 Triton X-100 (TX100) 及其混合表面活性剂 (SDS-TX100) 对菲污染砂土的柱淋洗作用. 表面活性剂质量浓度为 1 000、1 750、2 500 和 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 混合表面活性剂的质量配比 SDS: TX100 (S: T) 分别为 1: 1、1: 2 和 1: 4. 结果表明, 单一 SDS 对土柱中菲的淋洗曲线规律不明显, 呈锯齿状波动; TX100 和 SDS-TX100 对土柱中菲淋洗规律明显, 随淋洗液孔隙体积数增大, 淋洗液中菲浓度呈先增大, 达到峰值, 然后逐渐降低的趋势, 且随表面活性剂浓度的增大, 淋洗液中菲浓度峰值增大, 所需淋洗液的累积孔隙体积数减小. 在淋洗液累积孔隙体积数相同时, 同种表面活性剂对菲的去除率与表面活性剂浓度呈正相关; TX100 和 SDS-TX100 对土柱中菲的去除效果与表面活性剂浓度和配比有关, 且均远远大于 SDS. 当表面活性剂浓度为 1 000、1 750 和 2 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, TX100 和 SDS-TX100 对菲的累积去除率均可达 95% 以上, 但 SDS-TX100 所需的累积孔隙体积数小于 TX100; 当表面活性剂浓度为 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 5 种表面活性剂 (SDS, TX100, S: T = 1: 1, S: T = 1: 2 和 S: T = 1: 4) 对菲的累积去除率均达到最大, 分别为 70. 8%、99. 9%、99. 9%、98. 7% 和 99. 2%, 而 TX100 所需的累积孔隙体积数最小. 在表面活性剂淋洗修复有机污染土壤时, 表面活性剂种类、浓度和配比等因素对修复效果影响显著.

**关键词:** 表面活性剂; 菲; 土柱淋洗; 土壤修复

中图分类号: X131. 3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1631-07

## Flushing of Phenanthrene in Sandy Soils by Triton X-100 and Sodium Dodecyl Sulfate

ZHAO Bao-wei, WANG Hai-feng, CHE Hai-li, XU Jin, ZHANG Chun-ling, WANG Peng

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** A comparison of column flushing for phenanthrene-contaminated sandy soils was made by using an anionic surfactant, sodium dodecyl sulfate (SDS), a nonionic surfactant, Triton X-100 (TX100), and their mixed surfactants (SDS-TX100). The tested concentrations of surfactants were 1 000, 1 750, 2 500 and 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  while the mass ratios of SDS to TX100 (S: T) in the mixed surfactants were 1: 1, 1: 2 and 1: 4. It was shown that the elution curves (phenanthrene concentration in elutant versus porous volume number) by SDS were zigzag fluctuating rather than regular patterns while those by TX100 and SDS-TX100 were regular ones in which the phenanthrene concentrations in elutant increased, achieved maximum and then decreased with the porous volume numbers of eluting solutions. Moreover, the maximum phenanthrene concentrations increased and the total porous volume numbers decreased with surfactant concentration increasing. Given the surfactant and total porous volume number, the removal efficiencies of phenanthrene were positively related to surfactant concentrations. The removal efficiencies by TX100 and SDS-TX100 depended on concentration and ratio of surfactant and were much larger than those by SDS. Given 1 000, 1 750 and 2 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  of the surfactant concentrations respectively, the removal efficiencies by TX100 and SDS-TX100 were more than 95% but the total porous volume numbers by SDS-TX100 were less than those by TX100. Given 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  of the surfactant concentration, the total removal efficiencies by five surfactants (i. e. SDS, TX100, S: T = 1: 1, S: T = 1: 2 and S: T = 1: 4) achieved their maximum values as 70. 8%, 99. 9%, 99. 9%, 98. 7% and 99. 2%, respectively, but the needed porous volume numbers by TX100 were the least among those by all surfactants. The results illustrates that the factors such as type, concentration and ratio of surfactant play important roles in surfactant-enhanced flushing remediation for soils contaminated by organics.

**Key words:** surfactant; phenanthrene; column flushing; soil remediation

多环芳烃 (PAHs) 是土壤中常见的污染物, 具有“三致”作用, 其蒸气压小、辛醇-水分配系数高、生物可利用性低, 植物吸收或者微生物降解的效率较低. 因此, 土壤 PAHs 污染的修复一直受到人们的关注. 目前, 最具潜力的有机污染土壤修复技术是表面活性剂增效修复 (SER), 它是基于表面活性剂对有机污染物 (如 PAHs) 的增溶作用, 将有机污染物从土

壤中解吸出来, 改善难降解有机物的生物可利用性, 从而达到去除和降解有机污染物的目的<sup>[1-6]</sup>. 阴离

收稿日期: 2009-08-04; 修订日期: 2010-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20577018); 甘肃省中青年科技基金项目 (3ZS042-B25-023); 兰州交通大学“青蓝”人才工程项目

作者简介: 赵保卫 (1968 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染控制化学, E-mail: baoweizhao@mail.lzjtu.cn

子表面活性剂或非离子表面活性剂是 SER 研究中常用的表面活性剂,但是单一阴离子表面活性剂增溶容量小、Krafft 点高、易与地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等离子发生沉淀<sup>[7-9]</sup>;单一非离子表面活性剂具有增溶容量大、易于生物降解等特点,但其在土壤介质上的吸附损失和在非水相液体中的分配损失较大<sup>[10,11]</sup>. 研究发现,阴-非混合表面活性剂具有协同增溶作用<sup>[12,13]</sup>,比单一阴离子表面活性剂增溶能力强,且混合使用可减少阴离子表面活性剂的沉淀损失和非离子表面活性剂的吸附<sup>[7,8]</sup>或分配损失<sup>[10,11]</sup>,有望提高洗脱效率.但是在实际应用中,在复杂的水-土体系下,许多因素诸如表面活性剂种类、浓度、配比、土壤种类等也会影响表面活性剂对于土壤中难溶有机物的洗脱作用<sup>[14,15]</sup>.因此,本实

验以菲为多环芳烃代表,以柱淋洗法比较研究了 SDS、TX100 及其混合物 SDS-TX100 对砂土中菲的洗脱作用,以期表面活性剂在土壤修复中的应用提供参考依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试剂与仪器

SDS (分析纯,东京化成工业株式会社); TX100 (分析纯,Acros Organic, USA); 菲 ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ , 分析纯, Aldrich Chemical Co., USA); 石油醚 (分析纯,天津化学试剂有限公司); 乙醇 (分析纯,天津百世化工有限公司); 丙酮 (分析纯,天津市巴斯夫化工有限公司). 主要试剂理化性质见表 1. 752 型紫外分光光度计 (上海光谱仪器有限公司).

表 1 主要试剂理化性质

Table 1 Physical and chemical parameters of the used reagents

试剂	化学式	相对分子质量	溶解度 / $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	临界胶束质量浓度 (CMC) / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
菲	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	178.17	$6.6 \times 10^{-6}$	—
SDS	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OSO}_3\text{Na}$	288.38	—	1586
TX100	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_{9.5}\text{OH}$	625	—	167.4

### 1.2 材 料

所用砂土取自甘肃武威未经污染的砂土,经自然风干后,去除枯叶和碎石,过 60 目筛后备用.经测定,土壤水分 0.47%,有机碳质量分数 0.12%,pH 值 7.28 (水土质量比 = 2.5:1),土壤粒级 (按国际制)为砂砾 89.7%、粉粒 10% 和黏粒 0.3%.称取 0.5 g 菲,用丙酮溶解后倾倒在 5 kg 的清洁砂土上,然后用玻璃棒搅拌均匀,在通风橱中自然风干混匀后密封储存备用.砂土中菲浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 1.3 淋洗实验

实验装置如图 1 所示<sup>[16]</sup>.所用玻璃淋洗柱外径 5.5 cm,内径 5 cm,高 36 cm,有效高度 26 cm,采用磨口玻璃塞连接控制阀与土柱,以避免菲挥发.先在柱底部装填 1 g 左右玻璃纤维,在其上部均匀放置一层石子,然后准确称取 400 g 污染砂土,分次填装.轻敲柱外壁使土样装填均匀,最后在其上放置一层石子,起到均匀布水的作用.土柱装填后,称取其质量,然后用去离子水从土柱下端饱和土柱,待土柱饱和后再称取其质量,以前后质量差计算土柱的孔隙体积为 100 mL.考虑到 SDS 的 CMC 为  $1586 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,因此,在其 CMC 以上和以下分别配制 1000、1750、2500 和 3250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的表面活性剂溶液 (SDS、TX100、1:1、1:2 和 1:4 的 SDS-TX100),

加入 0.01% 的  $\text{NaN}_3$  作为生物抑制剂 (预实验表明,菲生物降解可忽略),转入马氏瓶.调节控制阀,以表面活性剂溶液持续淋洗,淋洗液取样间隔为 0.5 倍孔隙体积.

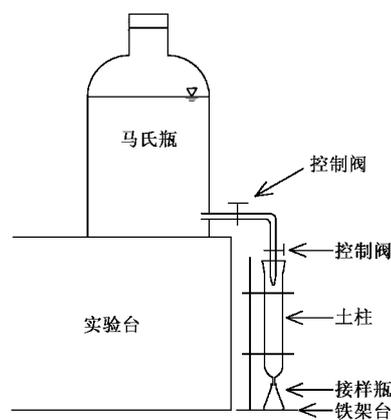


图 1 土柱淋洗实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of column flushing

### 1.4 测试方法

淋洗液中菲浓度采用石油醚萃取-紫外分光光度法测定.取 50 mL TX100 洗脱液,用 20 mL 石油醚萃取 1 次,静置分层,去除下层水液.用 50 mL 去离子水洗滌,静置,分出下层水液,重复洗滌操作.加入

约 0.1 g 的单宁酸振摇破乳并生成絮状沉淀<sup>[17]</sup>,静置 30 min,取上层清液,以石油醚为参比,在波长 248 nm 处,用紫外分光光度法测定菲.对于 SDS 洗脱液,加入 10 mL 体积分数为 50% 的硫酸起破乳作用,加入几滴乙醇以消除泡沫,用石油醚萃取 2 次后,用紫外分光光度法测定<sup>[18]</sup>.对于 SDS-TX100 洗脱液,加入 10 mL 体积分数为 50% 的硫酸破乳,加入几滴乙醇以消除泡沫,然后用石油醚萃取 2 次,加入约 0.1 g 的单宁酸生成絮状沉淀,静置 30 min,取上层清液,以石油醚为参比,用紫外分光光度法测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 单一表面活性剂对菲的柱淋洗

图 2 为淋洗液中菲浓度与单一表面活性剂淋洗液累积孔隙体积数之间的关系.可以看出,SDS 对土柱中菲的淋洗规律不明显.随着淋洗液累积孔隙体积数的增加,淋洗液中菲浓度呈现锯齿状波动.1 000、1 750 和 2 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SDS 对菲的淋洗效率很低,淋洗液中菲浓度最大为 15  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .浓度为 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SDS 对菲的淋洗较前 3 种浓度下稍好,淋洗液中菲浓度最高达 45  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .由于土壤表面呈负电性,SDS 在溶液中电离出的表面活

性剂阴离子与土壤表面产生静电排斥作用,难于接近至土壤表面,从而很难与土壤上菲完全接触,所以淋洗效果较差.

单一 TX100 对土柱中菲的淋洗效果与 SDS 差别较大,淋洗过程规律明显,即在淋洗刚开始时淋洗液中菲含量较低;随着累积孔隙体积的逐渐增大,淋洗液中菲浓度迅速增大,达到峰值后又逐渐减小.开始有菲淋出时的累积孔隙体积数约为 1,达到峰值时淋洗液中菲浓度分别为 39.4、55.5、67.4 和 113.6  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,整个淋洗过程所需的累积孔隙体积数目分别为 23.5、14.5、12.5 和 6.0.可以看出,随着 TX100 浓度增大,淋洗液中菲的峰值浓度逐渐增大,同时淋洗所需的累计孔隙体积逐渐减小.由于 TX100 分子中的聚氧乙烯链与土壤矿物质表面羟基可形成氢键,因此,它首先在土柱上吸附,当吸附达到饱和并在淋洗液中形成胶束后才开始对菲产生增溶作用.而 TX100 在土柱上的吸附量是一定的,低浓度时所需吸附时间较高浓度时长<sup>[19]</sup>.另外,浓度越大,对菲的增溶容量越大,则相同条件下菲由土壤表面向液相(淋洗液)传质驱动力越大.因此,淋洗液中菲峰值浓度与表面活性剂浓度呈正相关,淋洗过程所需的累积孔隙体积数与表面活性剂浓度呈负相关.

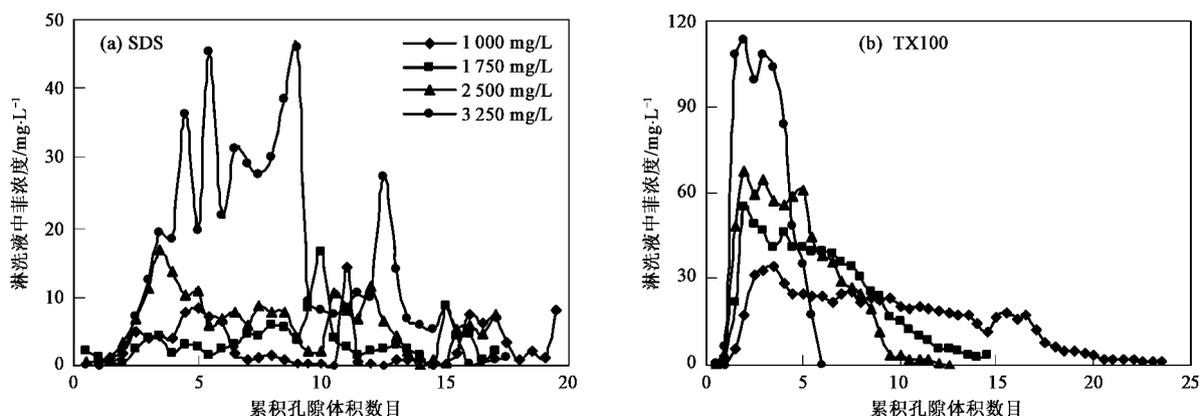


图 2 单一表面活性剂对土柱中菲的淋洗曲线

Fig. 2 Column flushing of phenanthrene by single surfactant solutions

### 2.2 混合表面活性剂对菲的柱淋洗

图 3 为 1:1、1:2 和 1:4 SDS-TX100 对土柱中菲的淋洗曲线.淋洗规律与 TX100 相似,即在淋洗开始时菲浓度很小,随着累积孔隙体积数的增大,淋洗液中菲浓度迅速增大,达到峰值后又逐渐减小.1 000、1 750、2 500 和 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SDS-TX100 在配比为 1:1 时,淋洗菲所需的累积孔隙体积数分

别为 22、13、10.5 和 9,达到峰值时淋洗液中菲浓度分别为 26.1、66.0、76.4 和 99.7  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;在配比为 1:2 时,所需的累积孔隙体积数目分别为 15.5、12、10 和 8.5,菲峰值浓度分别为 49.1、62.7、73.5 和 76.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而当配比为 1:4 时,所需的累积孔隙体积数目分别减小为 15、10、7.5 和 6.5,菲峰值浓度增大为 52.8、59.2、87.6 和 95.3  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .可

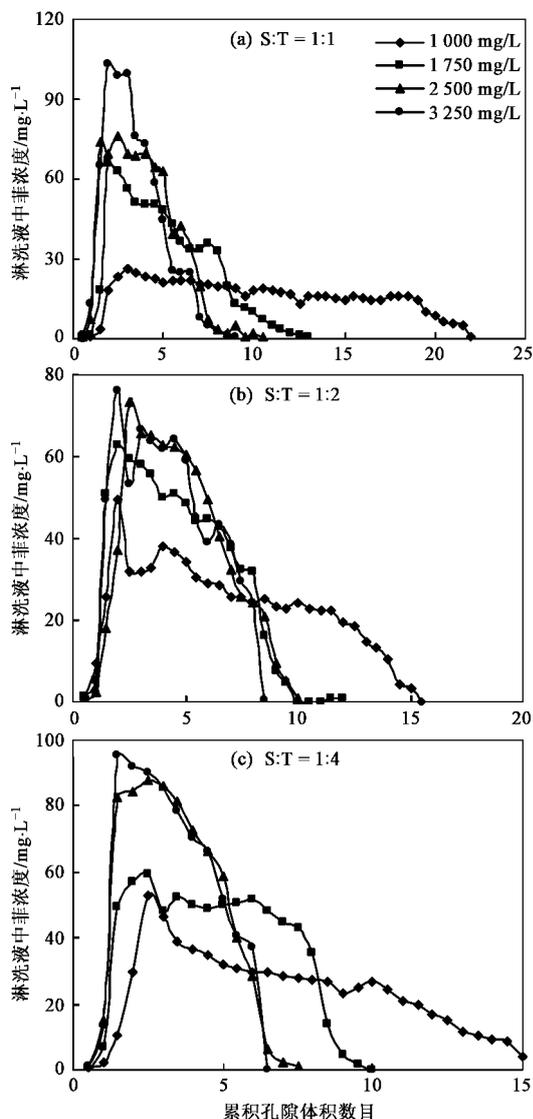


图3 混合表面活性剂 SDS-TX100 对土柱中菲的淋洗曲线  
Fig.3 Column flushing of phenanthrene by anionic-nonionic surfactants (SDS-TX100)

见 SDS-TX100 对土柱中菲具有较好的洗脱效果, 主要是因为: ①阴-非混合表面活性剂对菲可产生协同增溶作用, 阴离子表面活性剂与非离子表面活性剂可形成混合胶束, 使原来带负电荷的表面活性剂离子间的静电斥力减弱, 胶束更易形成; ②菲在阴-非离子混合表面活性剂胶束中的分配系数  $K_{mc}$  增大, 增溶作用增强<sup>[20]</sup>; ③混合胶束的 CMC 小于单一阴离子表面活性剂, 而且, 混合表面活性剂在土壤上的吸附量小于单一非离子表面活性剂, 即阴离子表面活性剂存在下, 非离子表面活性剂的吸附损失可大大降低, 从而在相同条件下水相表面活性剂有效浓度增大, 洗脱作用增强<sup>[7, 8]</sup>。

### 2.3 淋洗的效果对比

图4为5种表面活性剂在淋洗过程中对土柱中菲的去除率与淋洗液累积孔隙体积数之间的关系。可以看出, 单一 SDS 对菲的去除率很低, 且随着累积孔隙体积数增加, 菲去除率逐渐增大。除淋洗初期外(孔隙体积数小于1), SDS 对菲的去除率远小于 TX100 或 SDS-TX100, 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时对菲的最大去除率仅为 70.8%。研究表明, 表面活性剂对土壤中憎水性有机物的洗脱作用存在 2 种机制<sup>[21]</sup>: ①表面活性剂单分子的作用; ②表面活性剂胶束的增溶作用。表面活性剂单分子聚集在土壤-有机物、土壤-水界面, 通过改变体系的润湿性增大土壤和有机物之间的接触角, 促进有机污染物和土壤颗粒的分离; 其次, 表面活性剂在水相中形成胶束, 有机污染物通过分配作用进入胶束憎水性内核。单分子表面活性剂促进有机物分子脱附的程度大大低于表面活性剂胶束的作用。洗脱作用的驱动力主要来自溶质在连续相中的饱和浓度与实际浓度之间的差值, 随着水相中胶束浓度增大(单位体积内可容纳有机物的空间增大), 洗脱速率加快, 洗脱效率提高。一般阴离子表面活性剂 CMC 大, 且增溶能力小于非离子表面活性剂或阴-非离子混合表面活性剂<sup>[12, 13]</sup>, 以摩尔增溶比(增加单位质量表面活性剂所引起溶质的表观溶解度增大, MSR)来衡量增溶能力的大小<sup>[22]</sup>, SDS 对菲的 MSR 仅为 0.002, 而 TX100 对菲的摩尔增溶比为 0.021<sup>[23]</sup>。因此, 尽管 TX100 在土壤表面吸附量较 SDS 大, 但当其吸附达到饱和后, 其洗脱能力远远大于 SDS。

对于 TX100 与混合 SDS-TX100, 在淋洗初期(孔隙体积数小于1)对菲的去除率不高, 随着累积孔隙体积数增大, 菲的去除率迅速增大, 至一定孔隙体积数后去除率达到最大并基本保持不变, 而且对菲的总去除率均在 95% 以上。同一孔隙体积下, 在去除率达到最大并基本保持不变之前, TX100 与 SDS-TX100 对菲的去除效果存在差异, 并与表面活性剂的浓度和配比有关。在表面活性剂浓度为 1 000 和 1 750  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 在相同的累积孔隙体积数目下, S:T = 1:4 与 S:T = 1:2 对土柱中菲的去除率相当, 且均高于 TX100 和 S:T = 1:1。在质量浓度为 1 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, TX100 对菲的去除率高于配比为 1:1 的 SDS-TX100, 而浓度为 1 750  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时情况却刚好相反, S:T = 1:1 对菲的去除率要高于 TX100; 浓度为 2 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 在同一累积孔隙体积数目下, TX100 与 S:T = 1:2 对菲的去除率基本相当, S:T = 1:4 高于 S:T = 1:1, 而后者又高于 TX100 和 S:T =

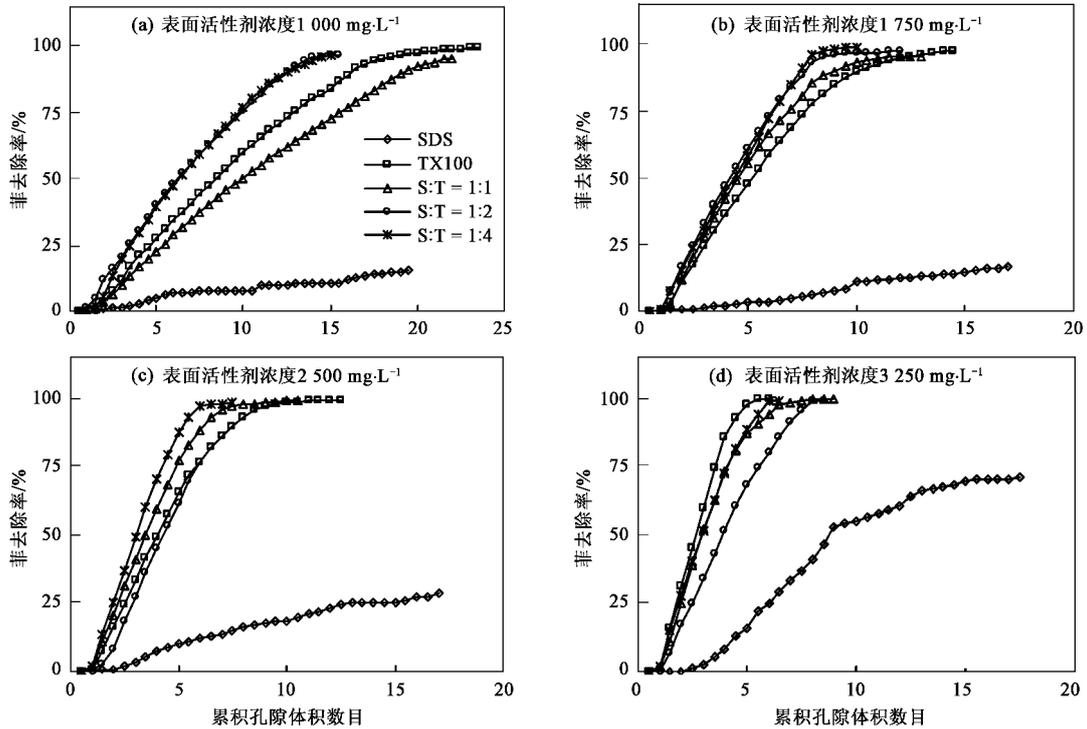


图4 表面活性剂对土柱中菲的去除率与孔隙体积数之间的关系

Fig. 4 Relationship between removal efficiencies of phenanthrene and porous volume numbers in column flushing by surfactants

1:2;质量浓度为3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在相同的累积孔隙体积数目下,TX100 高于3个配比下的 SDS-TX100.在阴-非混合表面活性剂的3个配比中,S:T = 1:4与 S:T = 1:1在相同的累积孔隙体积数目下对菲的去除率基本相同,这两者均高于 S:T = 1:2.

就去除率而言,SDS-TX100 与 TX100 基本相当.但从图4可以看出,在淋洗过程中 SDS-TX100 与 TX100 所需的累计孔隙体积数顺序为 S:T = 1:4 < S:T = 1:2 < S:T = 1:1 < TX100,这说明在去除率差别不大时,阴-非混合表面活性剂可以减少淋洗所需的累计孔隙体积数目,缩短了淋洗时间和降低了淋洗成本. Zhou 等<sup>[24]</sup>研究了 SDS 对 TX100 在土壤上的吸附作用的影响,表明 SDS 降低了 TX100 在土壤上的吸附损失.因而淋洗液中较早形成了胶束,减少了淋洗所需的累计孔隙体积数目.而在浓度为 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,TX100 与 SDS-TX100 的累积孔隙体积数目的关系是 TX100 < S:T = 1:4 < S:T = 1:2 < S:T = 1:1,去除率也高于 SDS-TX100.一方面在于单一的非离子表面活性剂对菲的增溶程度大于阴-非混合表面活性剂<sup>[23]</sup>,另一方面,此时吸附损失相对于 TX100 的投入总量来说对菲洗脱的影响较小.

表2为淋洗结果的对比.可以看出,除单一的阴

离子表面活性剂 SDS 外,累积孔隙体积数均随表面活性剂浓度的增大而减小,菲的最大淋洗浓度随表面活性剂浓度的增大而增大. SDS 对菲的累积去除率随其浓度增大逐渐增大,但去除率较低,最大去除率仅为 70.8%. TX100 和 SDS-TX100 对菲有很好的淋洗效果,4种不同质量浓度的 TX100 对菲的累积去除效率均在 97% 以上,最大去除率高达 99.9%; SDS-TX100 对菲的累积去除率均在 95% 以上,最高的累积去除率也达到 99.9%.表2亦比较了现有实验条件下,去除砂土中单位质量菲所需的淋洗液体积及表面活性剂质量.可以看出,去除单位质量菲所需的淋洗液体积与累积孔隙体积数随表面活性剂浓度变化的规律一致;去除砂土中单位质量菲所需的表面活性剂质量因不同的表面活性剂或配比不同而不同,这与表面活性剂的增溶能力、在土壤表面的吸附及混合表面活性剂的协同增溶作用等因素有关.总体上,使用单一 TX100 与混合 SDS-TX100 时表面活性剂用量少.在淋洗修复中,表面活性剂可通过吸附、沉淀等作用残留在土壤中,对土壤环境可能产生一定的生态风险.因此,实际修复中可通过选择残留量小、易于生物降解的表面活性剂实施修复工程,或最终以清水淋洗修复区域等技术减弱表面活性剂的生态风险.

表 2 表面活性剂对土柱中菲的淋洗结果对比

Table 2 Comparisons of flushing results by surfactants with different concentrations and at different ratios

表面活性剂	浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	累积孔隙 体积数	菲最大淋洗浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	累积去除率 / %	去除单位质量菲所需 淋洗液体积 / $\text{mL} \cdot \text{mg}^{-1}$	去除单位质量菲所需表面 活性剂质量 / $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$
SDS	1 000	19.5	14.3	15.8	3.09	3.09
	1 750	17	16.4	16.6	2.56	4.48
	2 500	17	16.6	28.7	1.48	3.70
	3 250	17.5	46.0	70.8	0.62	2.01
TX100	1 000	23.5	34.9	99.4	0.59	0.59
	1 750	14.5	55.5	97.7	0.37	0.65
	2 500	12.5	67.4	99.5	0.31	0.79
	3 250	6	113	99.9	0.15	0.49
S: T = 1:1	1 000	22	26.1	95	0.58	0.58
	1 750	13	66.0	95.7	0.34	0.59
	2 500	10.5	76.4	99.1	0.26	0.66
	3 250	9	99.7	99.9	0.23	0.73
S: T = 1:2	1 000	15.5	49.7	96.7	0.40	0.40
	1 750	12	62.7	97.3	0.31	0.54
	2 500	10	73.5	98.3	0.25	0.64
	3 250	8.5	76.4	98.7	0.22	0.70
S: T = 1:4	1 000	15	52.8	96.5	0.39	0.39
	1 750	10	59.2	98.7	0.25	0.44
	2 500	7.5	87.6	98.2	0.19	0.48
	3 250	6.5	95.3	99.2	0.16	0.53

### 3 结论

(1) 单一 SDS 对砂土中菲的淋洗规律性不强, 淋洗效率较低, 菲最大去除率仅 70.8%。对于单一 TX100 和 SDS-TX100, 随表面活性剂浓度增大, 累积孔隙体积在减小, 而达到峰值时淋洗液中菲的浓度增大, 淋洗规律明显。

(2) 当表面活性剂浓度为 1 000、1 750 和 2 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 单一 TX100 对菲的淋洗效率高, 菲的去除率达到最大值时所需的累积孔隙体积数的大小关系是 S: T = 1:4 < S: T = 1:2 < S: T = 1:1 < TX100, 在去除率相差不大时, 混合表面活性剂可以明显降低淋洗所需的累积孔隙体积数目。

(3) 当表面活性剂浓度为 3 250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, TX100 去除率达到最大时所需的累积孔隙体积最小, 此时阴-非混合表面活性剂对土柱中菲的淋洗效果相对于单一 TX100 为低。

#### 参考文献:

- [1] Svab M, Kubal M, Müllerova M, *et al.* Soil flushing by surfactant solution: Pilot-scale demonstration of complete technology [J]. *J Hazard Mater*, 2009, **163**(1): 410-417.
- [2] Khalladi R, Benhabiles O, Bentahar F, *et al.* Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil [J]. *J Hazard Mater*, 2009, **164**(2-3): 1179-1184.
- [3] Laha S, Tansel B, Ussawarujikulchai A. Surfactant-soil

interactions during surfactant-amended remediation of contaminated soils by hydrophobic organic compounds: A review [J]. *J Environ Manage*, 2010, **90**(1): 95-100.

- [4] Seo Y, Lee W H, Sorial G, *et al.* The application of a mulch biofilm barrier for surfactant enhanced polycyclic aromatic hydrocarbon bioremediation [J]. *Environ Pollut*, 2009, **157**(1): 95-101.
- [5] Gao Y, Shen Q, Ling W, *et al.* Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Trifolium pretense* L. from water in the presence of a nonionic surfactant [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(4): 636-643.
- [6] Gan S, Lau E V, Ng H G. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *J Hazard Mater*, 2009, **172**(2-3): 532-549.
- [7] Yang K, Zhu L, Zhao B. Minimizing losses of nonionic and anionic surfactants to a montmorillonite saturated with calcium using their mixtures [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2005, **291**(1): 59-66.
- [8] Yang K, Zhu L, Xing B. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**(13): 4274-4280.
- [9] Paria S. Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2008, **138**(1): 24-58.
- [10] Zhao B, Zhu L, Yang K. Solubilization of DNAPLs by mixed surfactant: Reduction in partitioning losses of nonionic surfactant [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(5): 772-779.
- [11] Zimmerman J B, Kibbey T C G, Cowell M A, *et al.* Partitioning of ethoxylated nonionic surfactant into nonaqueous-phase organic

- liquids: Influence on solubilization behavior [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**(1): 169-176.
- [12] Zhu L, Feng S. Synergistic solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by mixed anionic-nonionic surfactants [J]. *Chemosphere*, 2003, **53**(5): 459-467.
- [13] Zhu L, Chiou C T. Water solubility enhancements of pyrene by single and mixed surfactant [J]. *J Environ Sci*, 2002, **13**: 491-496.
- [14] 王良梅,孙成,谢学群. 表面活性剂 Tween 80 及 DOM 对土壤中菲、芘解吸的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 832-837.
- [15] 陈静,胡俊栋,王学军,等. 表面活性剂对土壤中多环芳烃解吸行为的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 361-365.
- [16] 车海丽,赵保卫,王海峰,等. 表面活性剂 Triton X-100 对菲污染黄土柱淋洗的研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2009, **28**: 220-224.
- [17] 朱玫,田洪海,许嘉琳. 水-油-表面活性剂体系中油含量测量方法的改进[J]. *重庆环境科学*, 1996, **18**(5): 42-44.
- [18] 杨建涛,朱琨,马娟,等. 石油污染土壤的淋洗治理技术研究[J]. *甘肃环境研究与监测*, 2003, **16**(1): 1-3.
- [19] Zhou W, Zhu L. Influence of surfactant sorption on the removal of phenanthrene from contaminated soils [J]. *Environ Pollut*, 2008, **152**(1): 99-105.
- [20] 朱利中,冯少良. 混合表面活性剂对多环芳烃的增溶作用及机理[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(6): 774-778.
- [21] Deshpande S, Shiau B J, Wade D, *et al.* Surfactant selection for enhancing ex situ washing [J]. *Water Res*, 1999, **33**(2): 351-360.
- [22] Edwards D A, Luthy R G, Liu Z B. Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in micellar nonionic surfactant solutions [J]. *Environ Sci Technol*, 1991, **25**(1): 127-133.
- [23] 蒋兵,赵保卫,赵兰萍,等. 阴-非混合表面活性剂对菲和萘的增溶作用[J]. *兰州交通大学学报*, 2007, **26**(1): 153-157.
- [24] Zhou W, Zhu L. Enhanced soil flushing of phenanthrene by anionic-nonionic mixed surfactant [J]. *Water Res*, 2008, **42**(1-2): 101-108.