

复合表面活性剂(SDS/Tw-80)对长链烷烃的增溶和柴油污染土壤的洗脱作用

陈 刚^{1,2}, 姜 霞²

(1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要:表面活性剂能够快速高效处理石油污染土壤,但由于所选用表面活性剂的类型和配比、土壤性质、污染物种类的差异,洗脱效果和作用原理不尽相同。通过研究复合表面活性剂 SDS/Tw-80 对石油烷烃的表观增溶和从受试土壤中的洗脱过程,探讨和阐释影响洗脱过程的各种因素。结果表明,复合表面活性剂对污染土壤中的石油烷烃洗脱效果较单一表面活性剂更好,且随复合表面活性剂 SDS/Tw-80 中的组分配合比例的增大而显著提高,同时能够降低胶束的成束浓度要求,扩大目标物在单位胶束内的容纳量,促使各目标长链烷烃进入胶束内部的趋势加大。复合表面活性剂的适用不仅能够改善胶束构成,且组分间表现出显著的协同作用,从而在保证较高洗脱效率的同时能够大幅降低试剂用量,有效地克服土壤的吸附作用,把对土壤性状的影响降低,对土壤质量的恢复具有积极意义。

关键词:烷烃;增溶;复合试剂;洗脱

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1283-07

Compound Surfactants(SDS/Tw-80) Effects on the Solubilization and Washing of Long-chain Alkyl from the Diesel Oil Contaminated Soil

CHEN Gang^{1,2}, JIANG Xia²

(1.College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract:Oil contaminated soil can be treated by composite surfactant eluent effectively. Different surfactants, mixing ratio, soil texture and contaminants have different removal mechanism and efficiency. In this research, a composite surfactant SDS/Tw-80 was used to wash the contaminated soil to investigate its removal mechanism from the soil and the factors influencing the efficiency. The results showed that composite surfactant was better than individual components in soil washing. A higher SDS/Tw-80 ratio significantly increased the apparent solubility of contaminants, lowered the micelle-forming concentration, increased the capacity of micelle to hold contaminants, and increased the chance for the long-chain alkanes to enter the micelle. Composite surfactant could improve micelles composition and showed markedly synergistic effect. For these reasons, it could reduce surfactant dosage to a great extent while remaining high elution efficiency. Using composite surfactant is an effective solution to overcoming the sorption of contaminant by soils while minimizing the impact on soil quality.

Keywords:alkyl; enhanced solubilization; compound surfactants; elution

石油制品的大量生产和应用,以及在相应的运输、运送甚至事故发生中都不可避免地周边土地产生不同程度的污染。当前对生物方法处理石油类污染土壤的研究开展得很多,该类方法因处理过程和手段

自然、生态而广受好评^[1-2],是较为理想的环境友好型措施;但对有机污染物种类多、污染程度重或应急性污染的场地,由于受到菌种筛选及培育周期的限制,而不能得到高效使用。表面活性剂洗脱方法具备兼容性广、洗脱效率高,以及流程简单、快速低耗的特点^[3-4],因此很有希望成为石油或有机类污染土壤修复的有效方法,特别是针对石油类重污染土壤的前中期处理。然而,由于土壤本身和污染的复杂性,表面活性剂的选择及使用效果不近相同。目前研究更多关注的

收稿日期:2010-03-05

基金项目:中央院所公益项目(2009KYYW15);国家重大水专项(2008ZX07101-010)

作者简介:陈 刚(1981—),男,博士研究生,开展土壤有机污染治理技术与原理方向研究。E-mail:chengangwf22@163.com

责任作者:姜 霞 E-mail:jiang_xia2002@163.com

是处理流程中的各操作参数以及效果,伴生的现象和作用缺少机理方面的结合与解释,使得该类技术局限于实验室阶段,很少能够成熟地推向实际应用。

本文考察了复合试剂十二烷基硫酸钠(SDS)和聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯(Tw-80)对柴油中的正十二烷、十四烷、十六烷、十八烷4种长链石油正构烷烃的增溶以及从受试土壤中的洗脱情况,探讨了设定类型表面活性剂在不同复配比例下胶束的形成情况,揭示其作用形式,阐释了 SDS/Tw-80 复合试剂洗脱目标链烃的行为,临界胶束浓度(CMC)以下对应单一试剂应用表现。希望为有机污染场地修复方法的选择使用和相关研究提供参考与帮助。

1 材料与方法

1.1 实验溶液、土样制备与试剂

实验中单一表面活性剂 SDS(图 1,a)和 Tw-80(图 1,b)的配置浓度为 0.6、1、2、4、6、8、10 CMC;SDS/Tw-80 复合表面活性剂是以 Tw-80 浓度为 1、2、4、6、8、10 CMC 为基准,其中 $CMC_{Tw-80}=15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $CMC_{SDS}=2\ 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SDS:Tw-80 摩尔浓度比分别配置为 10:1、20:1、30:1。

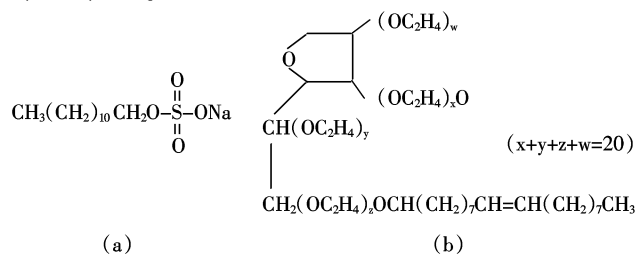


图 1 十二烷基硫酸钠(SDS)和聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯(Tw-80)的分子结构式

Figure 1 Molecular structure of Sodium dodecyl sulfate(SDS) and Polyoxyethylene sorbitan monooleate(Tw-80)

受试的清洁土壤采自大庆肇源(基本理化性质见表 1),实验前未测出石油类污染物质,土壤经室内风干、破碎、去除杂质、研磨,过 $150\ \mu\text{m}$ (100 目)筛。取-20[#]柴油 25 g 溶解于 300 mL 丙酮,分散均匀后,边搅拌边添加到 500 g 土样中;25℃避光条件下通风老

表 1 受试的清洁土壤基本性质

Table 1 Basic characteristics of clear soil sample

含水率/ %	土壤 pH	有机质 含量/%	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	颗粒组成/ %	干容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
				粘粒 2.71	
38	5.75	1.76	19.48	粉粒 63.97	1.07
				砂粒 33.32	

化,每日早晚各搅拌 1 次;待丙酮挥发完全后继续通风老化 20 d,转移土样密封避光冷冻保存。每次实验前检测土样中目标污染物背景含量。

实验所用乙酸乙酯、正己烷、丙酮、甲醇、二氯甲烷和 Tw-80 均为色谱纯,购自 Sigma 公司;SDS、 H_2SO_4 、无水 Na_2SO_4 等均为分析纯,购自北京试剂公司。

1.2 实验方法

1.2.1 表面活性剂对长链烷烃的增溶

单一、复合表面活性剂溶液 50 mL、加 0.5 mL-20[#]柴油于 150 mL 锥形瓶中,封口、避光,室内 20℃条件下 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 12 h,静置 12 h;从锥形瓶底部移取溶液 2 mL、加 4 mL 乙酸乙酯、0.2 mL 1:1(V/V) H_2SO_4 (破乳作用)溶液于顶空瓶中,室温下 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h,静置 15 min 分层,上清液过无水硫酸钠柱;取 0.2 mL 过柱溶液,用乙酸乙酯稀释至 2 mL;以柴油中正十二烷到正十八烷 4 种偶碳长链烷烃作为目标监测代表物,气相色谱检测。

1.2.2 土壤中目标污染物的洗脱

取 1 g 制备土样、10 mL 表面活性剂溶液于顶空瓶中,室内 20℃避光条件下, $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 连续振荡 48 h;转移混合液于具塞玻璃离心管中,控温 10~12℃, $4\ 500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,离心 30 min;取 2 mL 上清液、4 mL 正己烷、0.2 mL 1:1(V/V) H_2SO_4 (破乳作用),室温下 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h,静置 15 min 分层,取上清液过无水硫酸钠柱;气相色谱检测设定目标物。

1.3 分析方法

1.3.1 萃取剂

采用乙酸乙酯作为 1.2.1 节增溶实验中增溶溶液和 1.2.2 节实验部分洗脱液中的目标污染物的萃取剂,正己烷作为 1.2.2 节洗脱后土样中柴油残留目标物的萃取试剂。所采用萃取剂的一次性萃取效率高^[5],毒性小,使用安全^[6-7],使用效果见表 2。

1.3.2 色谱条件

Agilent GC (6890,FID),HP-5 毛细管柱(0.32 mm×30 m×0.25 μm)。载气 N_2 ($32\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$), H_2 ($32\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$)、Air($320\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$)、He($1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$),均为高纯气(99.999%);线速 $37\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;柱温 60℃,1 min,

表 2 洗脱液及土样当中目标物萃取效果(%)

Table 2 Extractions efficiency of targets in washing solutions and soil examples(%)

目标物	C ₁₀	C ₁₂	C ₁₄	C ₁₆	C ₁₈
乙酸乙酯/洗脱液	95.86	93.31	95.84	94.72	92.91
正己烷/土样	87.95	83.91	86.36	79.37	74.67

15 °C·min⁻¹ 升温至 260 °C、25 °C·min⁻¹ 升温至 280 °C, 吹扫 5 min; 进样口温度 230 °C, 不分流进样, 进样量 3 μL (Agilent 7683B 自动进样器); 检测器温度 300 °C。检测下限 1 μg·L⁻¹, 外标法计算。

1.3.3 结果表征方法

CMC_{comp} (复合表面活性剂临界胶束浓度)^[8]按下式计算:

$$\frac{1}{\text{CMC}_{\text{comp}}} = \frac{\alpha}{\text{CMC}_{\text{nonionic}}} + \frac{1-\alpha}{\text{CMC}_{\text{ionic}}} \quad (1)$$

式中: α 、 $1-\alpha$ 分别为复合试剂中非离子、离子型表面活性剂的摩尔比例; CMC_{comp}、CMC_{nonionic}、CMC_{ionic} 分别为复合表面活性剂、非离子表面活性剂、离子型表面活性剂的临界胶束浓度。

MSR (摩尔增溶比)^[9]按下式计算:

$$\text{MSR} = (S_w^* - S_{\text{CMC}}) / (C_s - \text{CMC}) \quad (2)$$

式中: MSR 为单位胶束当中增溶目标物的量; S_w^* 、 S_{CMC} 分别为一定浓度下 (>CMC) 和 CMC 时目标物增溶量; C_s 为表面活性剂浓度。

K_{mc} (胶束/水分配系数)^[10]按下式计算:

$$K_{\text{mc}} = 55.4 \times \text{MSR} / [S_{\text{CMC}} (1 + \text{MSR})] \quad (3)$$

式中: S_{CMC} 为 CMC 时目标物增溶量。

表面活性剂间作用表达^[11]如下:

$$\frac{(X_1)^2 \ln[(\alpha_1 C_{12} / X_1 C_1)]}{(1-X_1)^2 \ln[1-\alpha_1] C_{12} / (1-X_1) C_2} = 1 \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\ln[(\alpha_1 C_{12} / X_1 C_1)]}{(1-X_1)^2} \quad (5)$$

式中: α 为其中一种试剂摩尔比例; C_1 、 C_2 、 C_{12} 分别为单一表面活性剂与复合表面活性剂胶束 CMC; X_1 为某一受试表面活性剂在复合表面活性剂中的摩尔比例; β 为复合表面活性剂成分间的相互作用系数。

2 结果与讨论

2.1 单一表面活性剂的增溶作用

正十二烷等 4 种高响应具有代表性的长链偶碳柴油烷烃^[12-13]作为典型的憎水型有机物在纯水溶液当中的溶解度相对较低, 分别为 30.24、24.91、23.95、23.37 mg·L⁻¹。表面活性剂的存在能够整体上显著提高几种目标链烃在水溶液中的表观溶解度, 即便是在 CMC 以下表观溶解度也有一定程度的提高, 如图 2 所示。

单一表面活性剂的类型、浓度不同, 其对难溶有机物的增溶作用也存在很大差异。Tw-80 和 SDS 对柴油中正十二烷至正十八烷 4 种目标物增溶的表观溶解度峰值顺序分别为: 1 157.47、1 104.46、925.47、886.16 mg·L⁻¹ 和 595.38、496.38、496.33、423.67 mg·L⁻¹。以表面活性剂浓度为 10 CMC 时对应的正十八烷溶解度为例, Tw-80 与 SDS 的存在分别使其表观溶解度提高了 37 倍和 18 倍。但是前者的用量却远低于后者, 因为同样的 10 CMC, Tw-80 的浓度为 150 mg·L⁻¹, 而 SDS 为 21 000 mg·L⁻¹。如果用于受试土壤, 由于 SDS 的毒性相对要大、易造成土壤板结等问题^[14-15], 即便脱除污染效率较高, 也会带来二次污染的引入甚至是土壤质地的破坏。这些也是文中选择 SDS 复配 Tw-80 的一个主要考虑方面。

2.2 复合表面活性剂的增溶作用

表面活性剂溶液去除土壤中难溶性有机污染物的一个基本作用原理就在于, 提高表面活性剂容纳有机污染物的能力, 最终实现污染物脱离受试土壤。这也是当前大多数相关研究选择表面活性剂去除污染土壤中有机污染的重要依据^[16-17]。与单一表面活性剂

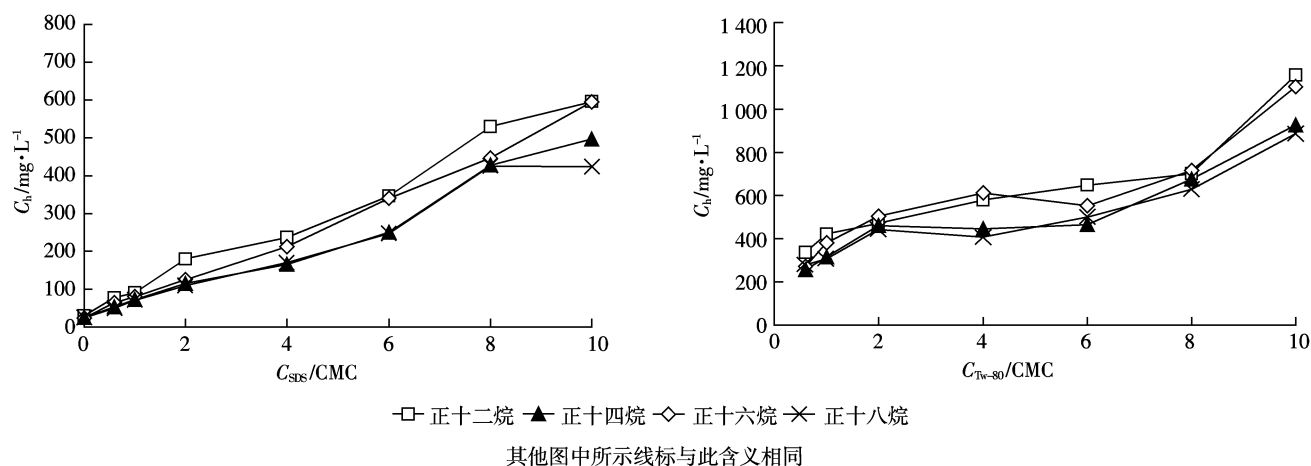
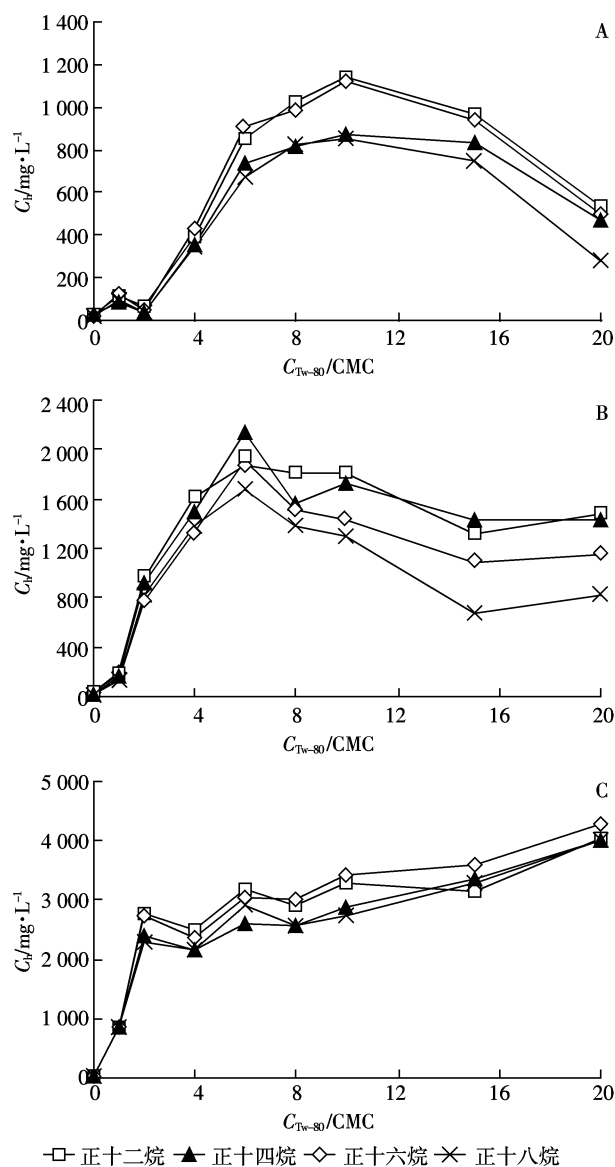


图2 单一试剂对长链烷烃的增溶作用

Figure 2 Enhanced solubility of long-chain alkyl by single surfactants

相比,复合表面活性剂的增溶效果更加显著:正十二烷等 4 种目标物的表观溶解度峰值伴随复合试剂(SDS:Tw-80)配合比例的增大而逐步提高,分别为:1 140.7、1 125.3、876.7、851.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10:1); 1 938.8、2 141.4、1 909.4、1 674.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (20:1)和 4 025.1、4 274.4、3 990.0、3 994.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (30:1)。同时,增溶峰值平衡点对应的复合表面活性剂中 Tw-80 浓度由复配比例 10:1 时的 10 CMC,经 20:1 的 6 CMC 下降到 30:1 的 2 CMC,如图 3 所示。



□ 正十二烷 ▲ 正十四烷 ◇ 正十六烷 × 正十八烷

A、B、C 中 SDS/Tw-80 摩尔比例分别为 10:1、20:1 和 30:1

为方便示意,图中横坐标以复合试剂当中受配成分 Tw-80 浓度 (CMC) 表示,后续图示与此相同

图 3 复合试剂 SDS/Tw-80 对目标长链烷烃的增溶作用

Figure 3 Enhanced solubility of target long-chain alkyl by SDS:Tw-80

要在原有表面活性剂增溶效果的基础上更加显著地提高目标链烃的溶解程度,一个重要的前提条件就是能够增加胶束(Micelle)量,也就是说在受配表面活性剂浓度不变的前提下,复合表面活性剂形成胶束所需的单体(Monomer)数量要下降。通过公式(1),结合设定的 3 个配比的实验结果,复合表面活性剂的临界胶束浓度分别为:245.74(10:1)、424.03(20:1)、571.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (30:1),介于两种表面活性剂临界胶束浓度之间($\text{CMC}_{\text{Tw-80}}=15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CMC}_{\text{SDS}}=2\ 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);得到的复合试剂临界胶束浓度数值随复配比例的提高逐步增大,说明有更多的 SDS 作为构成组分进入受配的 Tw-80 胶束当中,形成混合胶束。因此,选择适当适量表面活性剂进行配比,与单一试剂相比可以大幅降低试剂的临界成束浓度,同时增大目标污染物的表观溶解度。

难溶性有机污染物的增溶作用受表面活性剂及其本身理化性质及相互作用的影响。以摩尔比 20:1 复合表面活性剂的 SDS/Tw-80 在 10 CMC 和 1 CMC 时的增溶结果为例,结合公式(2)、(3)计算,得到本实验设定条件下复合表面活性剂的摩尔增溶比(MSR)和长链烷烃胶束/水分配系数($\lg K_{\text{mc}}$),如表 3 所示。

表 3 复合试剂 SDS/Tw-80 MSR* 与 $\lg K_{\text{mc}}$ ** 变化

Table 3 MSR* and $\lg K_{\text{mc}}$ ** changes of compound surfactant SDS/Tw-80

配合比例	正十二烷		正十四烷		正十六烷		正十八烷	
	MSR	$\lg K_{\text{mc}}$	MSR	$\lg K_{\text{mc}}$	MSR	$\lg K_{\text{mc}}$	MSR	$\lg K_{\text{mc}}$
10:1	3.30	1.00	2.73	0.99	1.97	0.93	1.58	0.85
20:1	3.55	1.78	2.98	1.71	2.06	1.60	1.76	1.50
30:1	3.60	1.98	3.33	1.81	2.26	1.79	1.90	1.70

注:* 单位胶束增溶能力表征系数;** 溶质在两相环境间的分配趋势。

同一比例下,正十二烷到正十八烷的 MSR、 $\lg K_{\text{mc}}$ 均逐渐变小,说明碳链的增长会使目标物自身的憎水性增强,胶束容纳目标污染物的能力也相应地下降。因此,图 1 中像正十八烷这样的长链烷烃分配进入胶束内部憎水环境的趋势减弱,增溶曲线才会比其他成分低。但是,提高复配比例可以扩大复合胶束对各难溶有机物的单位(胶束)增溶能力-MSR,从而容纳相对更多的难溶有机物,同时也使这些长链烷烃在两相环境间选择进入胶束内部的趋势增强- $\lg K_{\text{mc}}$,结合图 3 中的增溶表现也可以得到验证。

图 3 前两个比例中平衡拐点过后整体表观溶解度有下降表现,与“应该的预期”似乎不太相符;之后

复配比例提高到 30:1 情况得到改善,并呈现较高的增溶效果及良好规律性。这期间复配所加入的 SDS 用量都在其 CMC 以下,SDS 自身的亲水部分构成是硫酸钠盐端头,亲水性可能会更强。因此推测,实验过程中目标物可能会与部分 SDS 单体结合而在水中呈现互溶的假象,从而进入复合胶束的量有所下降^[18]。当然,这还需要从微观的角度做更加深入的研究。

但这至少说明 SDS、Tw-80 的复合试剂对长链烷烃增溶性的加强与它们之间复合比例的变化关系密切。结合公式(4)、(5),并依据公式(1)得到的复合临界胶束浓度结果,比例提高时的 X_1 值(即 SDS 在复合胶束构成中比例)从 10:1 的 0.106,经 20:1 的 0.192 提高到 30:1 的 0.263,说明 2 种试剂的复配不是简单的添加、混合,而是复合胶束构成上的改变;同时,相应的 β 值分别为 -0.302×10^{-3} 、 -0.128×10^{-3} 、 -0.238×10^{-4} ,负值说明 SDS 与 Tw-80 之间以协同作用为主^[11]。实验结果数值变化表明这种作用随复配比例的提高在逐步改善和加强,长链烷烃在 SDS/Tw-80 中的增溶程度也因这种机理上的变化表现为加大行为。

2.3 土壤中难溶目标物的洗脱

受试土壤中正十二烷等 4 种长链烷烃的洗脱随着 SDS、Tw-80 复配比例的加大分别有不同程度的提高,各难溶有机物的洗脱效率峰值分别为:39.11%、38.20%、41.04%、44.41%、42.13%、40.92%、41.73%、47.44%和 49.65%、52.30%、54.91%、53.83%。同时,伴随洗脱峰值出现的平衡拐点也逐渐提前,所需复合试剂当中 Tw-80 的浓度也从 SDS、Tw-80 复配比例 10:1 的 15 CMC,经 20:1 的 10 CMC 下降到 30:1 的 4 CMC,如图 4 所示。这几个数值与增溶时候的平衡拐点比较都有大小不同的增大及延滞。原因可能在于表面活性剂与受试土壤之间的接触^[19],非离子型试剂与 LAS、SDS、SAS 等离子型试剂相比容易被土壤吸附^[20],必定要造成发挥有效作用的表面活性剂大量损失、受试土壤中目标有机污染物的洗脱去除效率大幅下降(如图 5)。

Tw-80 被吸附实际上增加了土壤中有机质的量,从而反到增强了土壤对柴油等目标物的束缚,甚至增大了土壤反向吸附已脱离出来的目标链烃的可能。这也从一个方面解释了为什么图 4 中 A、B 所示,同一比例下高 Tw-80 浓度时洗脱效率会产生下行的倾向。SDS 的复配则能够有效地克服 Tw-80 容易被土壤吸附的情况,同时也随复配比例变化不同程度地提高了 SDS/Tw-80 洗脱土壤中目标物的效率。能发挥这

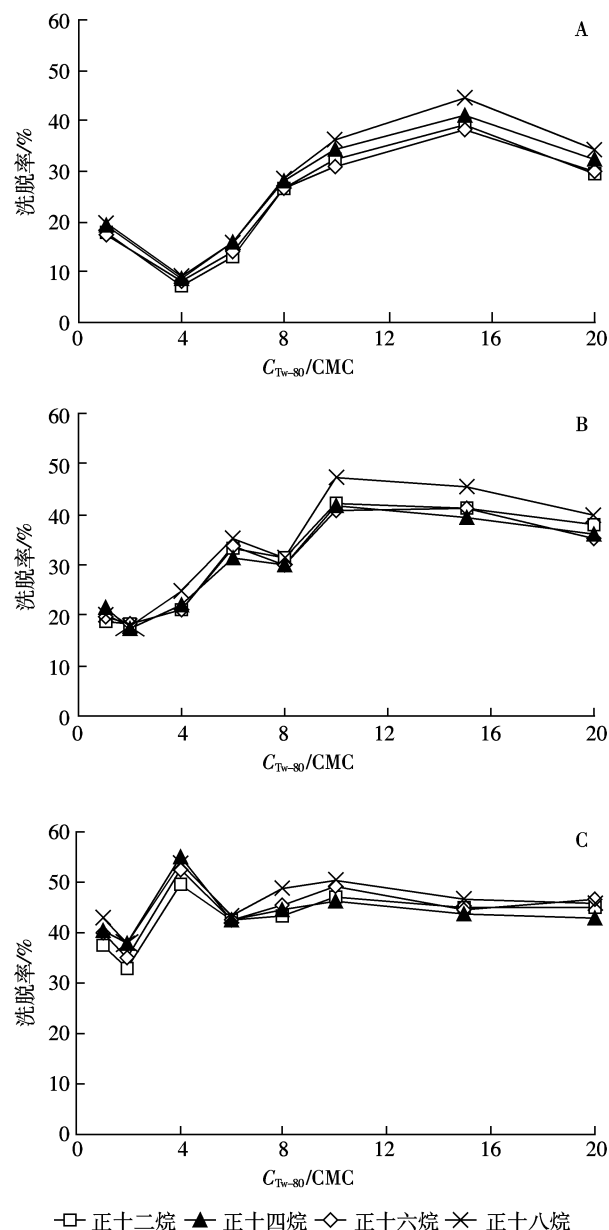


图 4 复合试剂 SDS/Tw-80 洗脱土壤中长链烷烃

Figure 4 Long-chain alkyls wahing-off from contaminated soil with compound surfactants SDS/Tw-80

样的作用与 SDS 在溶液中电离产生 Na^+ ,进而通过与土壤颗粒表面的 Ca^{2+} 等发生置换^[21],减少吸附 Tw-80 的位点有关系;另外,Kibbey^[22]发现对于复合表面活性剂,往往 CMC 较高的($\text{CMC}_{\text{SDS}}=2\ 100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CMC}_{\text{Tw-80}}=15\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)表面活性剂容易被吸附,这也避免了文中复合表面活性剂主要成分 Tw-80 的损失。此外,SDS 复配比例的提高也减少了复合表面活性剂的用量,降低了土壤外来干扰成分的引入,对促进污染土壤修复具有积极意义。

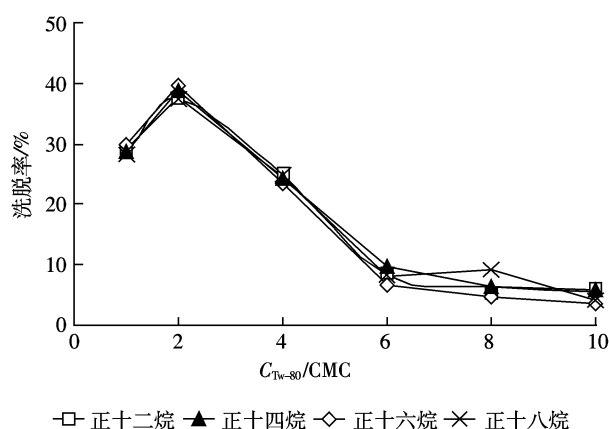


图 5 Tw-80 土壤中长链烷烃的洗脱作用
Figure 5 Effects of Tw-80 on the washing-off of Long-chain alkyls from soil

图 4 中复合表面活性剂对受试土壤中长链烷烃的洗脱,其浓度在 1 CMC 附近都出现效率高于或略高于 2 CMC 时的情况,即成束时(前)的效果似乎要好于成束后的情况。在图 5 中 Tw-80 的单独洗脱效率峰值出现在 2 CMC 而不是 1 CMC,这与前述的土壤吸附造成实际 CMC 成束用量变相增大有关。本文中 CMC 附近有机物的增溶和洗脱涉及当前关于表面活性剂作用机理的争论^[23-24],然而实验结果则从一方面支持了被研究论及较少的卷缩机理作用。

分别以 CMC 以下浓度的 Tw-80 和 SDS 洗脱受试土壤中目标链烃为例。结果显示,CMC 以下试剂都具备不同程度的洗脱能力,而且效率都要高于 Tw-80 浓度在 CMC 以上的单独使用情况。但是,CMC 以下浓度的 Tw-80 洗脱效率在浓度越接近成束浓度时越低,而 SDS 则恰好与之相反,如图 6 所示。

表面活性剂浓度在接近 CMC 时对目标物增溶效率下降可能是由于表面活性剂本身在土壤中的吸附作用造成了有效作用量的降低,它与图 5 中成束后 Tw-80 所表现的易被土壤吸附的状况相同;而 SDS 的情况之所以相反则很大程度上与其成束后形成的外层亲水的负离子环境刚好与土壤通常呈现的负离子性质一致^[25-26],由于电性的关系显示相反的状况。这也说明为什么复配的 SDS 浓度在 CMC 以下的情况下却能够扭转 Tw-80 的土壤吸附现象,很可能与 SDS 电离后的电性改善了复合试剂胶束与土壤之间的作用性状有关系。至于是否所有的阴离子试剂以及 CMC 以上的复配试剂都具备如上的情况,还有待进一步研究和更细致深入地探析。

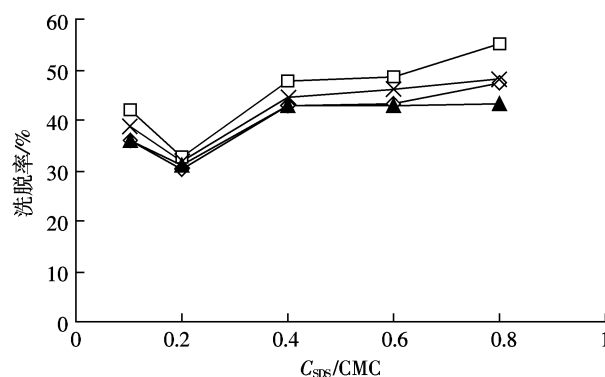
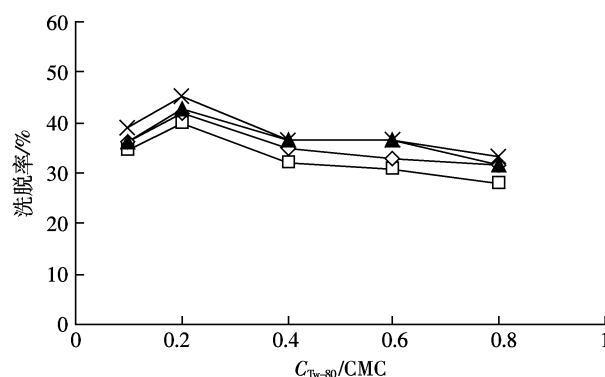


图 6 CMC 以下 Tw-80、SDS 洗脱土壤中目标物
Figure 6 Target alkyls washing with Tw-80 and SDS from soil under CMC

3 结论

与单一试剂比较,复合试剂 SDS/Tw-80 能够显著提高正十八烷等长链烷烃的表观溶解度,复配比例可以大幅地压缩溶解平衡时所需要的试剂成分;降低复合试剂的成束要求,增大试剂的单位增溶能力和目标物相间选择进入胶束内部的分配倾向。SDS 和 Tw-80 间的协同作用不但可以达到良好的复配效果,而且能够在保证较高土壤中目标链烃洗脱效率的同时克服土壤对受配试剂 Tw-80 的吸附,降低平衡时所需试剂剂量,减少对受试土壤的外来引入影响。

参考文献:

- [1] Reddy D G. High-energy intense ultraviolet light maybe an approach to treating groundwater contaminated with organics[J]. *Environ Sci Technol*, 1991, 25(3):359.
- [2] Joseph S Clifford, Marios A Ioannidis, Raymond L Legge. Enhanced aqueous solubilization of tetrachloroethylene by a rhamnolipid biosurfactant[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 305:361-365.
- [3] 吕 喆,曾凡刚,薛南冬,等.某油泥堆放场地中多环芳烃的污染及

- 其垂向分布特征[J]. 环境科学研究, 2008(1):85-89.
- LV Zhe, ZENG Fan-gang, XUE Nan-dong, et al. Contamination and vertical distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons at an oil sludge storage site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008(1):85-89.
- [4] 张秀娟, 黄平瑜. 液膜分离中同步迁移概念的建立[J]. 化工学报, 1988, 5:570-577.
- ZHANG Xiu-juan, HUANG Ping-yu. Establishment of synchronous-transport concept in liquid membrane separation[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1988, 5:570-577.
- [5] 陈刚, 姜霞, 金相灿, 等. 水流模拟断面中硝基苯的迁移转化规律[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1):78-84.
- CHEN Gang, JIANG Xia, JIN Xiang-can, et al. Research of nitrobenzene's translocation and transformation rule in simulative section of stream[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1):78-84.
- [6] 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.
- [7] 康晓丽, 孙磊, 吕涯, 等. 选择性萃取用于改善高含蜡柴油馏分低温流动性能的研究[J]. 石油炼制与化工, 2006, 37(12):17-22.
- KANG Xiao-li, SUN Lei, LV Ya, et al. Improving the low-temperature fluidity of light gas oil with high wax content by solvent extraction[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2006, 37(12):17-22.
- [8] Holland P M, Rubingh D N. Nonideal multicomponent mixed micelle model[J]. *Chem*, 1983, 87:1984-1990.
- [9] Attwood D, Florence A T. Surfactant solutions[M]. Shinoda D Ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1967, 189-262.
- [10] Shaobai Sun, William P Inskeep, Stephen A Boyd. Sorption of nonionic organic compounds in soil-water systems containing a micelle-forming surfactant[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29:903-913.
- [11] D N Rubingh/K L Mittal (Ed.). Solution chemistry of surfactants[M]. vol. 3, New York: Plenum Press, 1979:337.
- [12] 姜霞, 高学晟, 应佩峰, 等. 表面活性剂的增溶作用及在土壤中的行为[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):2072-2076.
- JIANG Xia, GAO Xue-sheng, YING Pei-feng, et al. Solubilization and behavior of surfactants in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):2072-2076.
- [13] Razika Khalladia, Ouassila Benhabilesa, Fatiha Bentahara, et al. Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2009, 164:1179-1184.
- [14] 黄勇成, 周龙保, 潘克煜. 直喷式柴油机燃用 FOT 柴油时燃烧特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1):5-9.
- HUANG Yong-cheng, ZHOU Long-bao, PAN Ke-yu. Study on combustion characteristics of a direct injection diesel engine fueled with fischer-tropsch diesel fuel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(1):5-9.
- [15] Santanu Paria. Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water[J]. *Advances of Colloid and Interface Science*, 2008, 138:24-58.
- [16] Abdul A S, Gibson T L, Rai D N. Use of humic and solution to remove organic contaminations from hydrogeologic systems[J]. *Env Sci Technol*, 1990, 24(3):328-333.
- [17] 陈宝梁, 马战宇, 朱利中. 表面活性剂对萘的增溶作用及应用初探[J]. 环境化学, 2003, 22(1):53-58.
- CHEN Bao-liang, MA Zhan-yu, ZHU Li-zhong. Water solubility enhancements of acenaphthene by single-and mixed-surfactant solution and its application[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(1):53-58.
- [18] Kingsley Urum, Steve Grigson, Turgay Pekdemir, et al. A comparison of the efficiency of different surfactants for removal of crude oil from contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2006, 62:1403-1410.
- [19] Alisa V Sineva, Aksana M Parfenova, Anna A Fedorova. Adsorption of micelle forming and non-micelle forming surfactants on the adsorbents of different nature[J]. *Colloid and Surfactes*, 2007, 306:68-74.
- [20] Wenjun Zhou, Lizhong Zhu. Enhanced soil flushing of phenanthrene by anioni-nonionic mixed surfactant[J]. *Water Research*, 2008, 42:101-108.
- [21] Cowell M A, Kibbey T C G, Zimmerman J B, et al. Partitioning of ethoxylated nonionic surfactants in water/NAPL systems: Effects of surfactant and NAPL properties[J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34(8):1583-1588.
- [22] Kibbey T C G, Hayes K F. Effects of surfactant concentration and sorbent properties on the sorption and transport of ethoxylated nonionic surfactant mixtures[J]. *Environ Microbiol*, 2000, 41:1-22.
- [23] 饶品华, 何明. 表面活性剂在土壤中的行为及其对土壤物理特性的影响[J]. 上海交通大学学报, 2005, 23(3):325-329.
- RAO Pin-hua, HE Ming. The Behavior of surfactant in soils and its effect on physical characteristics of soils[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 23(3):325-329.
- [24] Chu W, So W S. Modeling the two stages of surfactant-aided soil washing[J]. *Water Res*, 2001, 35(3):761-767.
- [25] Urum K, Pekdemir T, Copur M. Evaluation of biosurfactants for crude oil contaminated soil washing[J]. *Chmosphere*, 2004, 57(9):1139-1150.
- [26] 杨建成, 曾清如, 张静, 等. 非离子表面活性剂在土壤/沉积物中的吸附模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1396-1401.
- YANG Cheng-jian, ZENG Qing-ru, ZHANG Jing, et al. Sorption model of nonionic surfactant on soil/sediment[J]. *Journal of Agro-Environ Science*, 2007, 26(4):1396-1401.