

复合表面活性剂对石油烃污染土壤的增溶研究

吴一帆¹ 史丽红^{2*} 霍昕怡³ 殷鸿洋⁴ 张若琳¹

1. 常州环保服务公司, 江苏 常州 213000
2. 常州环保科技开发推广中心, 江苏 常州 213000
3. 常州大学环境科学与安全学院, 江苏 常州 213164
4. 常州科清环保科技有限公司, 江苏 常州 213000

[摘要]通过使用表面活性剂来提升油污土壤恢复的效果是目前一种被广泛认可且有效的解决方法。在本项实验中我们选取受石化类化学品侵害的地域作为试验场地并利用纵轴散射设备进行了深入的研究分析;同时我们也探讨了一系列关于添加物如硫酸钠(Na_2SiO_3)或碳酸钠(Na_2CO_3), 氯盐 NaCl 等对于提高地层中的有机废弃物的吸附能力及改善其分散性的影响因素及其作用机制。研究结果显示, 单一表面活性剂 SDS 在添加 24 小时后对石油的增溶效率最高, 达到 55.85%, 且 24 小时为解析平衡点;当 Tween80/SDS 的比例为 2:3 时, 最大增溶率为 67.68%, 而 Tween80/SDS 复合表面活性剂最佳增溶效果的浓度为 4.5 g/L。 Na_2SiO_3 和 Na_2CO_3 可以推动表面活性剂的溶解度增加, 但是 NaCl 会对此效果产生阻碍。该研究为治理石油烃污染土壤提供了重要参考。

[关键词]表面活性剂; SDS; Tween80; 助剂; 增溶率

DOI: 10.33142/nsr.v1i3.14908

中图分类号: X53

文献标识码: A

Study on Solubilization of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil by Composite Surfactants

WU Yifan¹, SHI Lihong^{2*}, HUO Xinyi³, YIN Hongyang⁴, ZHANG Ruolin¹

1. Changzhou Environmental Protection Service Company, Changzhou, Jiangsu, 213000, China
2. Changzhou Environmental Protection Technology Development and Promotion Center, Changzhou, Jiangsu, 213000, China
3. School of Environmental Science and Safety, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu, 213164, China
4. Changzhou Keqing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213119, China

Abstract: The use of surfactants to enhance the effectiveness of oil contaminated soil restoration is currently a widely recognized and effective solution. In this experiment, we selected the area affected by petrochemical chemicals as the experimental site and conducted in-depth research and analysis using longitudinal scattering equipment; At the same time, we also discussed a series of additives such as sodium sulfate (Na_2SiO_3) or sodium carbonate (Na_2CO_3). The influencing factors and mechanisms of chloride salts such as NaCl on improving the adsorption capacity and dispersibility of organic waste in geological formations. The research results show that the single surfactant SDS has the highest solubilization efficiency for petroleum after 24 hours of addition, reaching 55.85%, and 24 hours is the analytical equilibrium point; When the ratio of Tween80/SDS is 2:3, the maximum solubilization rate is 67.68%, and the optimal concentration of Tween80/SDS composite surfactant for solubilization effect is 4.5 g/L. Na_2SiO_3 and Na_2CO_3 can increase the solubility of surfactants, but NaCl can hinder this effect. This study provides important reference for the treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil.

Keywords: surfactant; SDS; Tween80; auxiliary; solubilization rate

引言

作为一种主要能源来源,石油在开采、提炼、利用和运输过程中往往面临泄漏风险,可能导致环境污染。尤其在石油和天然气开采阶段,大量含油废水和泥浆的产生使得这类污染物容易进入土壤环境^[1]。

环境污染土壤恢复技术主要包括三种:即以物理手段为主导的方法;通过微生物处理的方式来实现的环境治理方式(也称之为生态工程);最后是采用化工材料对受污土地实施清洗的技术措施——其中就包含了使用表面活性剂去清除油气类的有害成分这一具体操作过程。这种特殊

的复合型有机体可以有效减少介面间的摩擦系数并提高其稳定度与抗腐蚀能力,从而达到改善或消除各种不良现象的目的如使固态颗粒变为悬浮状态或者从水中分离出来等等效果都非常明显且实用价值高。

大量的实验结果证实了表面活性剂能够增强环境中有害化合物的可溶性和移动能力,并减少地层内剩余石油分解所需的时间长度,这有助于大幅度地优化有害化学品从土地中的清除速度与效果。据报道,当使用含水量达 1%、名为“脂肪醇聚氧乙烯醚”的无机类清洁材料处理污渍后,其一次性的去脂功效高达 94%^[3]。此外,根据 Zhou 的研究

成果显示:如果加入适量的 SDS,它就能有效减缓 TX-100;即 Triton X-100 在土粒上沉积的现象发生,并且相比于单独使用的 TX-100 而言,添加有 SDS 和 TNX-100 混合体的清洗效力更高,而且这种效应会随着所用浓缩水中含有硫酸钠的比例增加进一步加强。此过程的决速步骤为胶束的脱落和扩散。鉴于此类研究的结果各异,进一步研究复合表面活性剂对污染物增溶效应是十分必要的。

总的来说,关于表面活性剂的研究主要集中在单一表面活性剂对石油烃污染土壤增溶效果的影响上,而没有深入探讨不同类型表面活性剂如何影响石油烃污染土壤的增溶效果。本实验旨在探究表面活性剂复合方式、浓度以及添加助剂 Na_2SiO_3 、 Na_2CO_3 和 NaCl 对增溶效果的影响,以提高土壤中石油烃的去除率,为石油烃污染土壤的治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤取自常州某绿地深度为 50~100cm 的表层土,土壤颗粒组成如表 1 所示。试验前,挑拣出土壤中粒径较大的砂石、枯树枝,置于通风橱风干。土壤经碾碎后过 2mm 筛,储存备用。

表 1 土壤颗粒组成

土壤质地	各颗粒质量分数/%		
	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量
粉质粘土	35.23	40.82	23.95

在实验室中,选择无污染的土壤作为石油烃污染的土壤。具体的制备步骤如下:首先,将 15 克的 0#柴油倒入烧杯,然后称取 1000 克的土壤与 0#柴油混合均匀,接着把准备好的污染土样装进袋子密封起来,并放置在通风橱里静止一个月^[5]。

柴油石油烃污染的土壤,其初始石油烃浓度为 10409.41mg/kg。

1.2 实验试剂与设备

1.2.1 实验试剂

表面活性剂的性质如表 2 所示。

表 2 表面活性剂的基本性质

表面活性剂	化学名称	类型	分子量
SDS	十二烷基硫酸钠	阴离子型	288
Tween80	失水山梨醇单油酸酯	非离子型	1310

1.3 实验方法

1.3.1 复合表面活性剂增溶试验研究

采用大样本测试法来探讨单种表面活性剂如 SDS 或 Tween80 在 4.5g/L 浓度的环境下对于石油烃污染土质的提升吸附作用。该项实验是在 100ml 锥形试管内完成,并未调整其酸碱度。首要步骤是精确地测量出 SDS 及 Tween80 各自 2.5g 的重量并将其融化至 500ml 的烧杯里,

然后把它们分装到 500ml 的容量瓶中以达到饱和状态。接着,我们将 25 支 100ml 的锥形试管标记成从 1 到 25 的序列,其中最后一位即为对照组。每个试管都放入 10g 被石油烃污染过的土壤,然后再添加上 50ml 含有 4.5g/L 浓度的表面活性剂,每一组都有两个副本供参考。

把封闭的圆柱状容器放入平板震动器里摇晃,速度设定为每分钟 200 次,同时保持环境温度恒定在 25° C。经过 24 小时之后,样本被移除出来,用 5000r/min 的慢速离心机处理了十分钟。随后,去掉了上面的透明液体,再把干燥后的颗粒物转移到表面盘子上,接着放在有空气流通的环境下让其自然干燥。等土壤样本完全变干以后,我们便会拿出它来,采用红外线光谱分析方法(红外测油仪器)测量土壤中的石油烃含量,并且对其中石油烃的吸附能力进行评估。

(1) 表面活性剂配比的影响

利用大样本测试法来探究表面活性物质 SDS 与 Tween80 之间的各种混合比例对于改善石油烃污染土质的效果。此项实验是在 100 毫升的圆柱形试管内完成,其中所使用的表面活性物质的浓度设定为四点五克每升,并且没有设置酸碱度的限制。起初,我们将不同的重量份额的表面活性物质 SDS 和 Tween80 放入到烧杯里,然后使用玻璃棍对其进行搅动以使其完全融化,接着将其倒进 500 毫升的大容量瓶子并添加纯净的水直至达到满标线,从而得到各式各样的 Tween80/SDS 复合表面活性物质的混合物。接下来,从二十二只圆柱形的试管中抽出一部分作为对照组(编号为 22),而其他则被分配成七种不同的组合:0:5、1:4、2:3、1:1、3:2、4:1、5:0 的比例。每个小组都进行了两次独立的重复测量。

把封闭好的圆锥状容器放在平板震动器里摇晃,速度设定为每分钟 200 次,同时保持环境温度为 25° C。经过 24 小时之后,样本被提取出来,然后使用慢速离心机以 5000 r/min 的旋转频率分离 10 分钟。接着,丢掉上面的清澈部分,并将沉淀物转移到表面的盘子上,最后将其放入恒温室内晾干。干燥后的土壤样本从里面拿出来,通过红外线光谱分析方法(红外测量油脂仪器)来检测土壤中的石油烃含量,并且对其中石油烃的吸附能力进行评估。

(2) 表面活性剂浓度的影响

我们使用批次试验的方式,研究了表面活性剂 sds 和 tween80 在不同复配浓度下对石油烃污染土壤的增溶效果。实验在一个 100 毫升的锥形瓶中进行,并且在实验过程中并未控制 pH 值。

我们按照质量比 2:3 的比例准备了两种表面活性剂 SDS 与 Tween80,并将其混合均匀之后放入容量瓶内,然后注入适量的去离子水使其达到标线,从而得到了不同浓度的 Tween80/SDS 复合表面活性剂,包括 2g/L、3.5g/L、4g/L、4.5g/L、5g/L 及 6.5g/L 等六种不同的浓度。接下

来,将19只锥型试管编号从1到18(其中第19支是作为对照),并在每个编号的试管里依次添加10克被石油烃污染过的土壤样本,接着又逐一滴加相应的Tween80/SDS复合表面活性剂,总共分为两个重复试验。

把封闭的圆锥状容器放入平板振动设备里摇晃,速度设定为每分钟200次,同时保持环境温度为25℃。经过24小时之后,抽取样本,然后将其放在以5000 r/min 旋转速度运行的慢速离心机内静止十分钟。随后丢掉上面的透明液体,接着把沉淀物倒进微型盘子里,最后把它安置到恒温室内晾干。待土壤样本完全干燥后再拿出,利用红外线光谱分析技术(即使用红外测量油量仪器)来检测土壤中的石油烃含量,并且算出其中石油烃的吸附效率。

(3) 助剂的影响

我们通过使用批量测试方法来探究三种助剂(Na₂SiO₃、Na₂CO₃和NaCl)对于石油烃污染土壤增溶效应的研究。该实验以100mL锥形瓶作为反应器,设定表面活性剂的浓度为4.5g/L,并保持其增容时间长达24小时,同时并不调节pH值。精确地从烧杯中提取出所需数量的这三种助剂,然后将其与去离子水混合并在容量瓶内配成规定浓度的溶液,得到的是浓度分别为0.025mol/L、0.05mol/L、0.075mol/L、0.1mol/L和0.125mol/L的助剂溶液。接下来,我们将46个锥形瓶分成五组,其中一组是空白对照组,其余四组则按照上述步骤依次添加不同浓度的Na₂SiO₃到锥形瓶里,每个小组都进行了两次重复测量。

把封闭的圆锥状容器放入平板振动设备里摇晃,速度设定为每分钟200次,同时保持环境温度为25℃。经过24小时之后,样本被移除出来,然后使用慢速离心机以5000r/min的旋转频率离心十分钟。随后丢弃上面的清澈液体,并将沉淀物转移到表面盘子里,接着将其放在恒温室内的空气流通区域晾干。干燥后的土壤样本从室内拿出,通过红外线光谱分析技术(即利用红外测量油量仪器)来检测土壤中的石油烃含量,并且根据这个数据计算出沉积物内部石油烃的吸附效率。

1.3.2 模拟复合表面活性剂增溶石油烃污染土壤研究

基于横向扩散装置,模拟表面活性剂增溶石油烃污染土壤,装置如图1所示^[6]。实验容器被垂直置于已准备好的测试土壤内,同时不断压实,使其成为均一的土柱。位于顶部的添加液口则代表了仿真药物的输入点,使用蠕动泵以每分钟40mL的速度向预先调试过的土壤内部灌输由0.125mol/L Na₂SiO₃和2:3比例的Tween80:SDS构成的合成溶液。接下来,我们会在接下来的七天里每天从九个采样位置收集样本来检测土壤内的石油烃含量,并且计算出其中固态部分的石油烃吸附量。

试验用土柱采用人工分层填筑,用以下公式计算所加载土体的质量:

$$G = \gamma_d \pi r^2 h (1 + \theta_i)$$

其中, $\theta_i = 0.02\%$, $r = 4.5\text{cm}$ 时,黏土 γ_d 的设计干容重为 1.3g/cm^3 ,加载高度 h 为5cm。计算出装载5cm黏土所需的干土体质量为420g。土柱的实际高度为100cm,所需的干土体质量为8,400g。

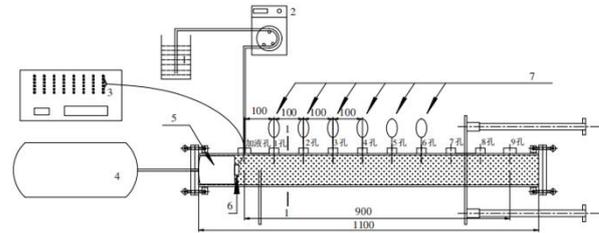


图1 横向扩散装置 (1)药剂溶液,(2)KCS PRO蠕动泵,(3)静态电阻应变仪,(4)气泵,(5)气囊,(6)土压力传感器,(7)含水率应变仪。

2 结果与讨论

2.1 单一表面活性剂增溶率

根据图表2的数据分析结果显示,前12小时内,SDS对于土壤中石油烃的增溶能力呈现出快速增长的现象,而在接下来的12至24小时里,这种增溶能力的提升速度开始减慢,最终达到最大的增溶效果为49.37%。然后在之后的24小时内,石油烃的增溶能力略有下滑,但之后又逐步回升。同样地,在初始阶段的前12小时内,Tween80的增溶速率较为平缓,但在随后的12到24小时内,它的增溶速率显著提高,达到了最高的增溶效果43.58%。然而,在此后的24小时之内,它却出现了持续减少的情况。24小时被认为是解析平衡的关键时刻,因为大部分的清洗工作都是在这一时间内完成的。如果增溶的时间超出了这个范围,那么土壤可能会重新吸收这些污染物质,从而导致增溶效能的降低,所以我们应该把增溶时间限制在一个合适的区间内。接下来我们的试验将会使用24小时作为增溶时间。

比较同一时间内不同类型物质(如SDS和Tween80)对于TPHs的提升能力后得出结论:相比之下,使用SDS能带来更显著的效果。例如,当观察到经过24小时处理后的结果显示,相较而言,用SDS来提高油田污泥中有机物含量要高于采用Tween80的方法达至约百分之四点二九的比例差异。这种现象的发生主要是由于Tween80是一种无极性的界面活化分子,它的特性是能够以一种类似吸引的方式结合并粘帖住土质层面上的一些特定部位从而导致大量的此类成分无法充分发挥应有的功能效应,^[7]而相反的是,利用具有强力去垢能力的阳离子的SDS则能在保持自身浓度相对稳定的条件下实现最大化的清洗功效并且还能进一步增强土地粒子间的分离度及降低他们的凝聚程度进而有利于有毒有害物的释放出来,^[8]最后值得一提的是,一项重要因素就是因为两者之间的异性电子性质而产生的互相推拒的现象因此也决定着它们各自所占用的空间位置不会出现任何偏移或移动的情况同时也能

确保他们自身的化学反应过程始终处于可控状态下从上述讨论中可以发现,阴离子表面活性剂的性能优于非离子表面活性剂,因为它们的吸附损失较低。

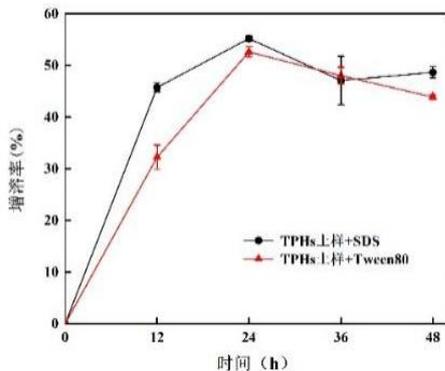


图2 SDS与Tween80对TPHs污染土壤的增溶处理

2.2 表面活性剂复配增溶

2.2.1 表面活性剂配比的影响

相比于单个表面活性剂如 SDS 或 Tween80 而言,二者混合形成的新物质(即: Tween80 和 SDS)对于去除环境中的有机化合物的效率更高、更有效。观察到的现象是随着比例的变化而发生明显的波动;当两种成分的比例增加至一定程度之后会出现反向的效果——这可能是由于过量的 Tween80 使得其具有了较强的疏水特性并容易被粘附到了污泥中导致的结果(见图 3)。值得注意的是在这个特定条件下最佳的选择应该是以一种适当的方式来调整这两者的组合方式使之能够获得最高的性能表现,比如选择合适的浓度范围内的最优解就是其中的一种方法之一。

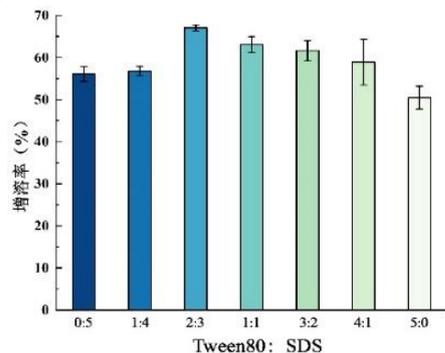


图3 不同配比下复合表面活性剂的增溶效果

2.2.2 表面活性剂浓度的影响

针对油污污染的地表土,随着 Tween80/SDS 混合表面活性剂含量的增加,其能有效提升石油烃的溶解度,由初始的 45.19% 上升至 51.88%。然而,进一步升高此种物质的浓度至 6.5g/L 后,这种效果却开始减弱。过高的 Tween80 可能引发污染物和它们的结合产生乳化现象,这会阻塞土壤微粒之间的空隙并使土壤中有机质总量增加,进而增强了土壤对有机污染物的吸收能力,最终影响清洗

的效果^[9]。尽管增加了表面活性剂的清洁效力,但通常情况下,SDS 表面活性剂的应用浓度较高且具有较大的阴离子特性,可能会对土壤生态系统内的微生物带来伤害^[10],同时也会触发土壤质量构造的转变,对其恢复目标构成严重威胁。所以,在利用表面活性剂处理土地的过程中,应适当地调整用量以找到最合适的数量。

研究也证实了,随着表面活性剂的增多,石油烃的溶解度先上升后稳定^[11]。因此,为了降低表面活性剂的浪费,我们应选择适宜的浓度。在本次研究的后续试验中,选择 4.5g/l 作为表面活性剂的浓度。

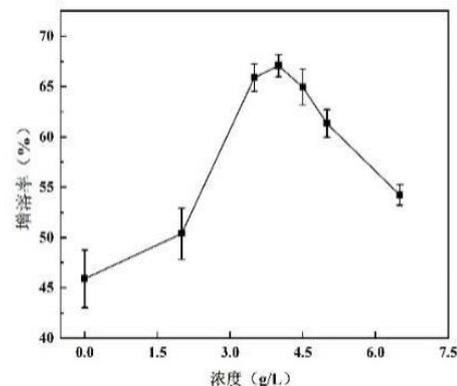


图4 不同浓度下复合表面活性剂的增溶效果

2.3 助剂对复合表面活性剂增溶率的影响

一般情况下,无机盐被用作辅助物质以增强表面活性剂的增溶效果,它能减少表面活性剂的临界胶束浓度及浊度,并扩大其亲油核心溶剂范围,从而提升表面活性剂的功能^[12]。在本研究中,我们选取了具有不同属性的两类无机盐:一为强碱弱酸盐(如 Na_2SiO_3),另一为中性盐(如 Na_2CO_3 与 NaCl),旨在探讨这些化合物对于表面活性剂增溶石油烃的效果。

通过使用 Na_2SiO_3 和 Na_2CO_3 可以有效地提升油类物质从受污土质表面的清除效率并改善其性能表现。根据我们的试验数据(见图 5)显示出随着这两种化合物的浓度上升,它们的效用也随之加强;这主要归因于它们各自的水解后产生的氢氧根能进一步强化阴极粒子的分散能力及降低阳极负荷的能力,同时也能使原本就具有活性的界面活性分子更具活力以达到更好的吸收效应——即提高了对于含碳有机体的提取量及其渗透深度都得到了明显的增长:前者达到了约 14%,而后面则超过 8%;这些改进的效果是十分可观并且有实际意义的。

NaCl 为中性盐,价格低廉,简单易得。如图 5 所示,在加入 NaCl 后,表面活性剂对石油烃污染土壤的增溶率随 NaCl 浓度的增加而减小,增溶率下降了 14.86%。 NaCl 对表面活性剂的增溶效果起到抑制作用。这与以往的研究不同,在 NaCl 存在下,SDS 的 CMC 会因双电层的压缩而下降,有更多更大尺寸的胶束可用于溶解污染物降低了表

面活性剂的有效性，从而表现出抑制作用。这可能与 Na⁺ 的普通离子效应有关，在不添加 SiO₃²⁻ 和 CO₃²⁻ 的情况下，表面活性剂溶液中 Na⁺ 的共同离子效应占主导地位，SDS 溶解度的降低可能导致洗脱效率的降低。

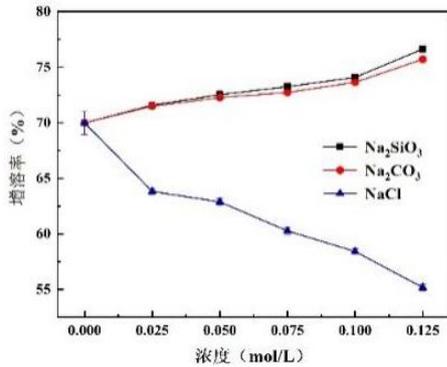


图5 助剂对复合表面活性剂增溶效果的影响

2.4 表面活性剂增溶石油烃 7d 增溶率变化

本试验采用浓度为 4.5g/L, Tween80/SDS 配比为 3 : 2 的复合表面活性剂，且复合表面活性剂中加入浓度为 0.125mol/L 的 Na₂SiO₃。修复药剂在横向扩散装置中的注入速率为 40 mL/min，连续测得 7d 个孔的增溶率。如图 7 所示，D1 药剂扩散至 3 号孔，D2-D4 药剂扩散至 6 号孔，剩余 3d 逐渐扩散至 8 号孔。各孔首次与药剂接触的 24h 达到最大增溶率，随后均有所降低。1~3 号孔在 D1 时增溶率达到最大，分别达到 47.33%、50.03%和 47.67%。这可能是因为 24 小时后，表面活性剂胶束内的石油烃解吸，重新进入土壤，导致增溶率降低。随着药剂的深入，溶解的石油烃也有可能在今后的土壤中解吸，导致后续孔的增溶率下降。

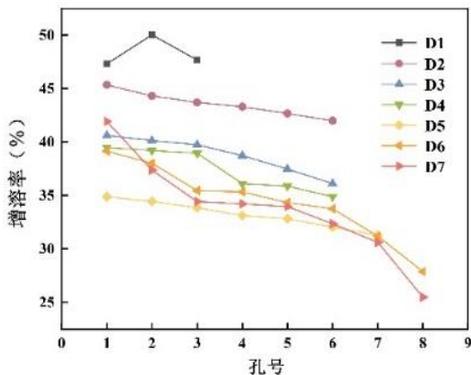


图6 横向扩散过程中各孔 7d 内复合表面活性剂对石油烃污染土壤增溶效果

3 结语

(a) 相比于 Tween80，表面活性剂 SDS 能更有效地提升石油烃污染土壤的溶解度，其效率相差了 4.29%。而这个效应会在 24 小时内达到最优状态。对于石油烃的溶解能力来说，Tween80 和 SDS 的比例对其有显著的影响：随着比例增加，初始阶段会呈上升态势，然后逐渐减弱。

然而，混合使用这两种表面活性剂 (Tween80 与 SDS) 能够带来更好的石油烃溶解结果，尤其是在配比为 2 : 3 的时候，可以实现最大的溶解度，高达 67.68%。此外，研究发现，Tween80/SDS 复合表面活性剂的最适宜浓度是 4.5g/L，在这个浓度的范围内，石油烃的溶解率由最初的 45.19%逐步增长至 51.88%。

(b) 表面活性剂对石油烃的增溶率随 Na₂SiO₃、Na₂CO₃ 浓度的增加而增大，增容率分别增加了 7.0%、7.9%，促进增溶效果较为显著。加入 NaCl 后，表面活性剂对石油烃污染土壤的增溶率随 NaCl 浓度的增加而减小，增溶率下降了 14.86%。NaCl 对表面活性剂的增溶效果起到抑制作用。

(c) 各孔首次与药剂接触的 24h 达到最大增溶率，随后均有所降低。1~3 号孔在 D1 时增溶率达到最大，分别达到 47.33%、50.03%和 47.67%。在 24 小时后，表面活性剂胶束内的石油烃解吸，重新进入土壤，导致增溶率降低。

【参考文献】

[1] 李波. 石油烃的污染及其检测方法综述[J]. 广东化工, 2010, 37(4): 269-71.

[2] 李广辉, 杨伟, 魏军, 等. 表面活性剂驱油化学机理分析及降压增注实验研究[J]. 当代化工, 2023, 52(12): 2946-2949.

[3] 朱玫, 许嘉琳, 田洪海. 应用表面活性剂治理包气带石油污染的研究[J]. 环境科学, 1996(4): 21-24.

[4] SHAEIWITZ J A C F C, CUSSLER E L. The mechanism of solubilization in detergent solutions[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1981, 84(1): 47-56.

[5] 殷鹂婷. 生物通风修复石油烃污染土壤降解效果及微生物多样性研究[D]. 北京: 科学出版社, 2024.

[6] 郭恒, 殷德顺, 曹晨曦. 污染治理药剂在土壤中水平扩散的试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(7): 1159-1166.

[7] GUO H L, ZHENYU, YANG, SHAOGUI, SUN, CHENG. The feasibility of enhanced soil washing of p-nitrochlorobenzene (pNCB) with SDBS/Tween80 mixed surfactants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(2): 1236-1241.

[8] 姜霞, 陈刚, 金相灿, 等. 复合表面活性剂对污染土壤中柴油的增溶和洗脱作用[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 523-530.

[9] LI G G, SHUHAI, HU, JINXUAN. The influence of clay minerals and surfactants on hydrocarbon removal during the washing of petroleum-contaminated soil[J]. Chemical Engineering Journal, 2016(286): 191-7.

[10] SUTTON N M, FARAI, MORILLO-P é REZ, JOSE ANTONIO,

ABU AL-SOUD, WALEED, LANGENHOFF, ALETTE, GROTENHUIS, TIM, RIJNAARTS, HUUB, SMIDT, HAUKE. Impact of Long-Term Diesel Contamination on Soil Microbial Community Structure[J]. Applied and environmental microbiology, 2012(15):79.

[11] 杜艳梅, 廉景燕, 杨坚, 等. 表面活性剂处理重度石油污染土壤的改良[J]. 天津理工大学学报, 2009(2):3.

[12] RITORÉ E C, BRUNO, ARNAIZ, CARMEN, MORILLO, JOS

É, USERO, JOS É. Guidelines for surfactant selection to treat petroleum hydrocarbon-contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022(3):29.

作者简介: 吴一帆(1989—), 男, 江苏常州人, 硕士, 工程师, 研究方向: 环境工程; *通信作者: 史丽红(1978—), 女, 河南焦作人, 硕士, 工程师, 研究方向: 环境影响评价、环境管理。