

韩玉娇,张伟红,董 军,等.SDS 原位微乳液对含水层中多氯代烃混合污染物的增溶作用 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4626-4631.

Han Y J, Zhang W H, Dong J, et al. Solubility of *in situ* SDS microemulsion on chlorinated hydrocarbon mixed pollutants in an aquifer [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4626-4631.

SDS 原位微乳液对含水层中多氯代烃混合污染物的增溶作用

韩玉娇,张伟红,董 军*,莫言阳,梁 雪 (吉林大学新能源与环境学院,石油化工污染场地控制与修复技术国家地方联合工程实验室,吉林 长春 130021)

摘要: 为制备出适用于含水层中多种氯代烃混合污染物高效增溶的原位微乳液,利用 PCE、CT、TCE 和 CF 等混合氯代烃作为油相,选用十二烷基硫酸钠(SDS)、正丁醇以及氯化钾(KCl)的混合溶液作为微乳液前驱液,构建了原位微乳液体系,并探究了含水层温度 and 无机盐成分对原位微乳液增溶效果的影响,评估了原位微乳液在地下环境的适用性.结果表明,微乳液中正丁醇浓度与混合氯代烃的等效烷基碳数(EACN)存在二次函数关系,可用于混合氯代烃污染场地微乳液前驱液配方参数的确定;微乳液对氯代烃的增溶浓度可达 500g/L 以上,增溶能力为 PCE>CT>TCE>CF;前驱液的粘度小于 2cp,在地下环境中较好的迁移性能;zeta 电位为负值,不易被带负电的介质吸附;温度(10~20℃)对微乳液增溶氯代烃的影响不大,低浓度的水化学成分有利于微乳液增溶氯代烃,无机盐阳离子的影响顺序表现为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^{+}>\text{Na}^{+}$.

关键词: 原位微乳液; 混合氯代烃; 增溶作用

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)09-4626-06

Solubility of *in situ* SDS microemulsion on chlorinated hydrocarbon mixed pollutants in an aquifer. HAN Yu-jiao, ZHANG Wei hong, DONG Jun*, MO Yan-yang, LIANG Xue (National and Local Joint Engineering Laboratory of Petrochemical Contaminated Site Control and Remediation Technology, College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China). *China Environmental Science*, 2023,43(9): 4626-4631

Abstract: In order to prepare an *in situ* microemulsion suitable for the efficient solubilization of a variety of chlorinated hydrocarbon mixed pollutants in aquifers, this study used a mixture of chlorinated hydrocarbons such as PCE, CT, TCE and CF as the organic phase, and selected a mixture of sodium dodecyl sulfate (SDS), *n*-butanol and potassium chloride (KCl) as the precursor solution of microemulsion to construct an *in situ* microemulsion system. The effect of layer temperature and inorganic salt composition on the solubilization effect of *in situ* microemulsion was evaluated. The experimental results show that there is a quadratic function relationship between the concentration of *n*-butanol in microemulsion and the equivalent alkyl carbon number (EACN) of mixed chlorinated hydrocarbons, which can be used to determine the formulation parameters of the precursor liquid of microemulsion in the contaminated site of mixed chlorinated hydrocarbons. The solubility of chlorinated hydrocarbons in microemulsion can reach more than 500g/L, and the solubilization capacity is PCE>CT>TCE>CF. The viscosity of the precursor fluid was less than 2cp, and it had good migration performance in the underground environment. zeta potential was negative, which means it is not easy to be absorbed by a negatively charged medium. Temperature (10~20℃) has little effect on the solubilization of chlorinated hydrocarbons in microemulsion. The low concentration of chemical composition in water favored the dissolution of chlorinated hydrocarbons in microemulsion, and the order of influence of inorganic salt cations is $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^{+}>\text{Na}^{+}$.

Key words: *in situ* microemulsion; mixed chlorinated hydrocarbon; solubilization

氯代烃作为常用的化学原料,被广泛应用于电子元件清洗、织物干洗剂及化学合成等领域^[1].然而,由于在生产、储存或者处置不当,导致地下水中氯代烃污染问题普遍存在.该类污染物多是致癌、致畸和致突变的有毒有害化学物质,对人体的危害极大^[2-4].大部分氯代烃属于重非水相液体(DNAPLs),密度比水大,水溶解度小,会在重力作用下垂直向下迁移,并被截留在介质孔隙中,作为污染源持续向地下水中

释放污染物,对地下水造成长期污染^[5].

表面活性剂强化抽出-处理是目前常用的修复技术之一^[6-8],然而传统单一表面活性剂的增溶能力有限,在实际场地中的应用量大、成本较高^[9].已有研

收稿日期: 2023-02-11

基金项目: 国家重大研发计划项目(2020YFC1808202);国家自然科学基金资助项目(42077167)

* 责任作者, 教授, dongjun@jlu.edu.cn

研究表明,微乳液是由表面活性剂、助表面活性剂、油和盐等组分按一定的比例混合后形成的透明或半透明、热力学稳定体系,其具有较低的界面张力、超强的增溶能力,被广泛应用于纳米材料制备^[10]、日用化工产品生产^[11]、三次采油^[12-13]、药物输送^[14]、食品^[15]等领域。近年来,有学者提出将其应用于土壤地下水修复^[16-21],目前大多是将微乳液预先制备好再注入至地下,微乳液制备所需的油相通常为植物油、轻质烷烃等,在含水层中引入额外的有机溶剂可能会增加二次污染及修复成本。因此,为了去除含水层中游离相或自由相 NAPL,可直接将表面活性和助表面活性剂的混合溶液注入至含水层,与介质中的 NAPL 相污染物混合原位生成微乳液。已有相关研究^[22-23]利用表面活性剂及正丁醇溶液对四氯乙烯(PCE)进行增溶,表明可在原位形成微乳液并对 PCE 的去除率达到 94%以上。但实际场地中通常是多种污染物的混合物^[24-25],污染物作为原位微乳液形成的条件之一,其组成和性质对原位微乳液的形成及其增溶效果都会产生影响。但原位微乳液对多种污染物的混合物可能会产生非理想增溶行为^[26-27]。综上所述,目前针对原位微乳液的研究,多数是以单一污染物为增溶目标,因此有必要探究基于混合氯代烃的原位微乳液增溶体系。

本研究构建以 PCE、四氯化碳(CT)、三氯乙烯(TCE)及三氯甲烷(CF)等污染物为代表的混合油相微乳体系,并对不同混合污染物体系微乳液前驱液的配方进行探究,以及对混合氯代烃的增溶效果进行研究,探究环境温度和水化学成分对微乳液增溶效果的影响,评估微乳液在地下环境中的适用性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验用试剂:十二烷基硫酸钠(SDS,天津市光复精细化工研究所),正丁醇(国药集团化学试剂有限公司),TCE(天津市光复精细化工研究所),CT(天津市光复精细化工研究所),CF(上海麦克林生化科技有限公司),PCE(上海麦克林生化科技有限公司),无机盐包括无水氯化钙、氯化钠、氯化镁、氯化钾、无水碳酸氢钠、无水碳酸钠和无水硫酸钠(国药集团化学试剂有限公司)。

实验用仪器:电子天平(PL203 型,梅特勒-托利

多)、15mL 具塞玻璃管、SHZ-B 型恒温振荡培养箱(上海博讯医疗生物仪器公司),高速离心机(上海菲恰尔分析仪器有限公司),Agilent7890B-5977B 气相-色谱-质谱联用仪。

1.2 实验方法

1.2.1 混合氯代烃 SDS 原位微乳液的制备 向一系列具盖玻璃管中加入 5mL 超纯水,用电子天平称取定量的表面活性剂和盐(3wt.% SDS 和 2wt.% KCl)加入玻璃管内,再加入不同体积正丁醇,待全部溶解后加入 5g 混合氯代烃,使得形成下相(过剩的油相)体积最小的 Winsor III 型微乳液,并记录各污染体系所需的正丁醇浓度。在 20℃下静置平衡 24h 后,得到 SDS 微乳液。

1.2.2 SDS 原位微乳液对氯代烃的增溶作用 按照 1.2.1 的步骤制备微乳液,从玻璃管中取出微乳液相,稀释一定倍数后,使用吹扫捕集-气相色谱-质谱法测定各污染物的浓度。

1.2.3 主要性质参数的测定 配制一系列 3wt.% SDS-2wt.% KCl 溶液,分别加入 6wt.%、7wt.%、8wt.%、9wt.%、10wt.%的正丁醇,待混合均匀后用旋转粘度计测定溶液粘度;用 Zeta 电位仪测定溶液 Zeta 电位;分别将其置于 10、15、20℃的恒温培养箱中,平衡 48h 后观察溶液是否出现析出现象。

1.2.4 环境温度对 SDS 原位微乳液成相能力及增溶能力的影响 按照 1.2.1 的步骤制备微乳液,分别置于 10、15、20℃的培养箱中静置 24h,观察微乳液的形态并记录各相体积。

1.2.5 水化学成分对 SDS 原位微乳液成相能力及增溶能力的影响 在 SDS-KCl-正丁醇混合液中分别加入不同浓度的 NaCl、NaHCO₃、Na₂CO₃、Na₂SO₄、KCl、CaCl₂、MgCl₂,其余步骤同 1.2.1,观察形成的微乳液形态,并记录相关油相体积。

1.3 测试方法

使用吹扫捕集仪对待测样品进行前处理及进样过程,然后使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS-MS)对样品中的 PCE、CT、TCE、CF 进行定量分析。应用 Excel 2019 和 Origin 2021 对数据进行分析处理与作图。

2 结果与讨论

2.1 混合氯代烃 SDS 原位微乳液的制备

首先取 PCE-TCE、PCE-CT 和 PCE-CF 二组分混合物分别作为油相,按照第 1.2.1 节的方法配制微乳液,获得各混合油相形成 Winsor III 型微乳液所需的最大正丁醇浓度.在测定原油与表面活性剂体系的界面张力时,为了比较,当油品与某一碳数的正构烷烃对表面活性剂体系的界面张力相等时,则该正构烷烃碳数称为该油品的等效烷烃碳数 (EACN).本研究引入等效烷基碳数(EACN)表示混合物的疏水性,寻求针对不同氯代烃污染场地的配方选择方法.根据式(1)计算出各比例条件下混合油相的 EACN 值:

$$(EACN)_{\text{mix}} = \sum_i (EACN)_i x_i \quad (1)$$

式中: x_i 为 i 组分的摩尔分数;实验用污染物的 EACN 值分别为:PCE 为 2.9,TCE 为 -3.81,CCl₄ 为 -0.06,CHCl₃ 为 -13.67.

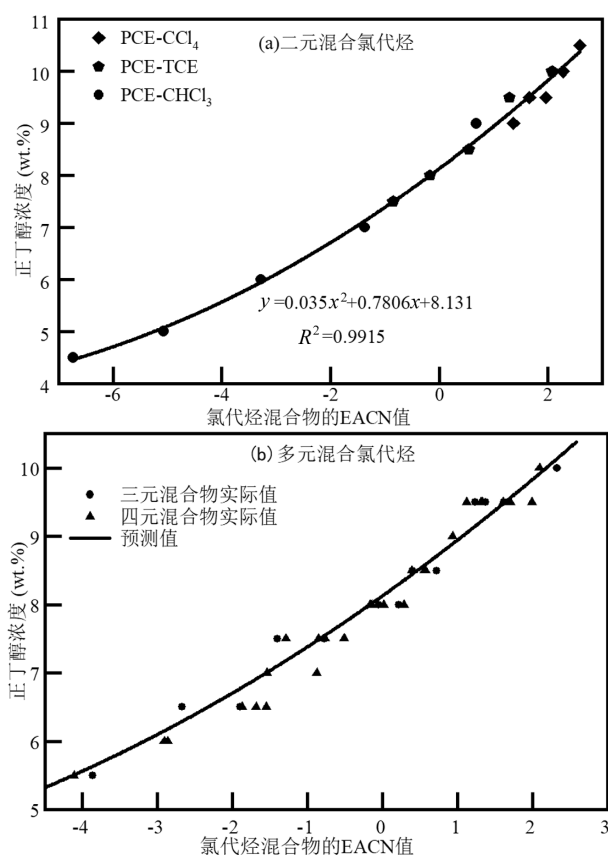


图 1 二元和多元混合氯代烃所需正丁醇浓度与 EACN 值的关系

Fig.1 Relationship between n-butanol concentration and EACN under binary and multiple mixed chlorinated hydrocarbons

将 PCE-TCE、PCE-CT 和 PCE-CF 3 组烃类混

合物微乳体系所需正丁醇浓度与混合污染物的 EACN 的关系作图.如图 1(a)所示,混合氯代烃所需正丁醇浓度与其 EACN 值有关,与污染物种类无关.图 1(a)中数据拟合可得二次函数关系,在实验变化范围内,随着混合物 EACN 值的增大,所需正丁醇的浓度也逐渐增大.这是由于 EACN 值越大的污染物穿透力减弱,不易穿过栅栏层,界面处需要更大的正丁醇用量才能达到稳定状态^[28].

为了验证上述函数关系的适用性,将 PCE、TCE、CT 和 CF 以不同比例混合,得到不同的 EACN 值,同样进行醇度扫描获得实验所得正丁醇浓度.将预测值与实测值进行比较得到图 1(b).从图中可以看出,预测值与实际值的趋势基本吻合.综上所述,在其他条件恒定时,不论是二元、三元还是四元组分的污染物体系,体系中仅有 EACN 值变化的情况下,所需配方中的正丁醇浓度随 EACN 值变化而变化,因此二者之间存在的二次函数关系式可用于对配方参数的确定.

2.2 微乳液对混合氯代烃的增溶作用

选用 4 种混合组分的氯代烃为油相,测定了各组分的浓度.分析表 1 数据可知,SDS 微乳体系对不同组成的混合氯代烃均具有较好的增溶效果,总氯代烃的增溶浓度可达 500g/L 以上,高增溶能力与形成微乳液的结构有关,相较于胶束结构拥有更大的内部空间供有机物进入^[29].对各污染物的增溶浓度与污染物的质量占比有关,质量占比越大,相应的增溶浓度也越高.当污染物的质量占比相同时,增溶浓度也会存在差异,表明微乳液对混合氯代烃进行非理想增溶,污染物组成会影响对某一组分的增溶作用.随后对增溶浓度进一步分析,得到增溶前后物质的质量占比(如表 2),可以看出,微乳液中氯代烃混合物的组分与增溶前的组分不一致,PCE 的质量占比比较增溶前有所减少,CT 较增溶前保持不变或略有减小,TCE 和 CF 的质量占比均有增加,SDS 原位微乳液选择性增溶弱疏水性的有机物.Szekeres 等^[30]指出混合油相的选择性增溶与油相组分以及形成的界面膜曲率有关,选择性增溶与其增溶位置有关,弱疏水性有机物会增溶于亲水头基以及栅栏层,强疏水性有机物增溶于疏水内核中,界面膜曲率越小,选择性相对越大.Liu 等^[31]在甲苯/正辛烷混合物的微乳液体系中观察到对甲苯的选择性增溶,本研究得

出了相同的结论.

表 1 微乳液对混合氯代烃的增溶性能

Table 1 Solubilisation properties of microemulsions on mixed chlorinated hydrocarbons

项目	氯代烃	编号					
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
增溶前物质质量比例(%)	CHCl ₃	4	8	18	8	10	30
	CCl ₄	8	4	6	24	20	10
	TCE	8	8	6	8	20	10
	PCE	80	80	70	60	50	50
增溶浓度(g/L)	CHCl ₃	27.1	62.0	119.3	55.7	67.2	191.0
	CCl ₄	56.8	27.7	39.8	153.1	109.7	63.7
	TCE	66.1	58.4	42.8	59.1	119.4	70.4
	PCE	528.9	449.3	392.5	353.0	265.9	280.0
	总量	678.9	597.4	594.3	620.9	562.2	605.2

表 2 增溶前后混合氯代烃的组成变化

Table 2 Composition changes of mixed chlorinated hydrocarbons before and after solubilization

项目	氯代烃	编号					
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
增溶前物质质量分数(%)	CHCl ₃	4	8	18	8	10	30
	CCl ₄	8	4	6	24	20	10
	TCE	8	8	6	8	20	10
	PCE	80	80	70	60	50	50
增溶后物质质量分数(%)	CHCl ₃	4	10	20	9	12	32
	CCl ₄	8	5	7	25	20	11
	TCE	10	10	7	10	21	12
	PCE	78	75	66	57	47	46

2.3 微乳液前驱液的性质

2.3.1 粘度 前驱液的粘度会影响在实际应用过程中的注入难度,从不同正丁醇浓度前驱液的粘度值图(图 2(a))可以看出,粘度随着正丁醇浓度的增大而略有增大,但均不超过 2cp,与水的粘度值差别不大,可在地下环境中迁移,且易注入.

2.3.2 Zeta 电位 由于地下环境中介质的存在可能会使表面活性剂吸附损失,使其增溶效能大大降低,因此对前驱液的 Zeta 电位进行了测定,结果如图 2(b)所示,实验结果表明前驱液的 Zeta 电位均为负值,对于带负电的地下介质环境,两者存在排斥作用,不易被地下环境中的介质所吸附.

2.3.3 低温析出损失 阴离子表面活性剂在低温环境下容易因析出问题造成表面活性剂的应用效率降低,因此将 SDS-正丁醇-KCl 混合液分别置于 10,15,20℃ 条件下观察混合液的析出情况(表 3).实

验结果表明,当正丁醇浓度<7wt.%时,在 10,15℃ 下会出现析出现象,当正丁醇浓度≥7wt.%时,前驱液不会因低温地下环境造成表面活性剂的析出损失.

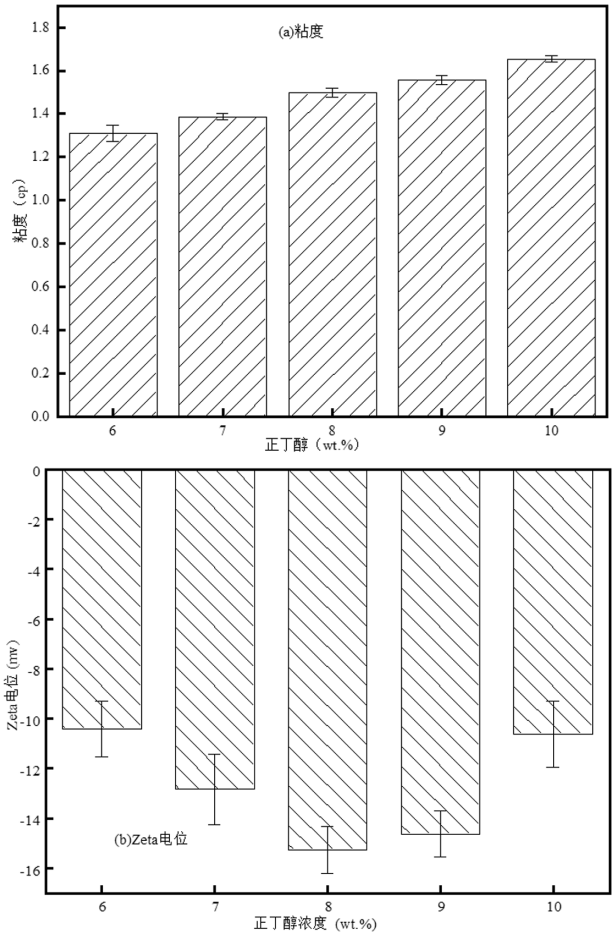


图 2 不同正丁醇浓度前驱液的粘度和 Zeta 电位
Fig.2 Viscosity and Zeta potential of precursor solution with different n-butanol concentration

表 3 前驱液在不同温度下的析出情况

Table 3 Precipitation of precursor liquid at different temperatures

温度(℃)	正丁醇浓度(%)						
	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
10	×	×	×	×	×	√	√
15	×	×	×	√	√	√	√
20	√	√	√	√	√	√	√

注:“×”表示存在析出情况;“√”表示不存在析出情况.

2.4 环境温度对不同污染体系成相状态和增溶效果的影响

微乳液受温度影响较大,而地下环境一般在 10~20℃ 之间,图 3 显示的是温度对不同污染体系成

相状态和增溶效果的影响.可以看出,针对不同污染物筛选出的配方,在 10,15,20℃下均能形成增溶能力较强的 Winsor III型微乳液,成相能力受环境温度的影响不大;随着温度降低污染物相体积占比略有减小,增溶作用增强.这可能是由于温度升高使表面活性剂分子运动剧烈而难以聚集,进而使增溶能力减弱.Intiso 等^[32]也得出了微乳液的增溶能力随着温度降低而增强的结果.

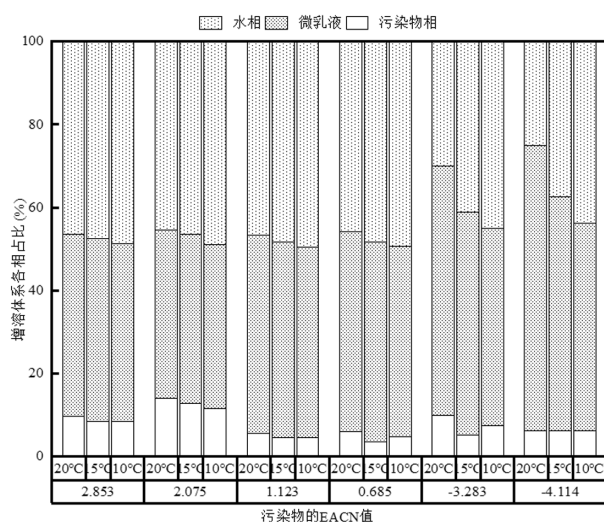


图3 不同温度下增溶体系中各相占比

Fig.3 Phase proportions of solubilizing system at different temperatures

2.5 水化学成分对不同污染体系成相形态和增溶效果的影响

应用原位微乳进行修复时,需考虑到地下环境中离子的干扰,无机盐对阴离子表面活性剂制成的微乳液相态影响较大.本文对地下水中的常见无机盐离子对微乳液的增溶效果的影响进行了探究.实验结果表明,无机盐浓度过大时会使微乳液由 Winsor III型向 Winsor II型转变,不利于对污染物的去除.由无机盐引起微乳液相转变的限值($\text{NaCl} < 17 \text{ mmol/L}$, $\text{KCl} < 11 \text{ mmol/L}$, $\text{CaCl}_2 < 2 \text{ mmol/L}$, $\text{MgCl}_2 < 5 \text{ mmol/L}$)可知,无机盐阳离子的影响顺序表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,这是由于高价态的钙镁离子具有较高的表面电荷密度,对于阴离子表面活性剂有更强的盐效应.

3 结论

3.1 混合氯代烃的 EACN 值越大,其微乳液配方中

所需正丁醇浓度越高,两者之间存在二次函数关系.

3.2 原位微乳液对不同污染物体系的增溶浓度可达 500g/L 以上,增溶能力为 $\text{PCE} > \text{CT} > \text{TCE} > \text{CF}$.

3.3 微乳液前驱液的粘度均不超过 2cp,易注入至地下环境中及在地下环境中迁移,Zeta 电位均为负值,不易被同带负电的地下介质吸附,较高正丁醇浓度(>7wt.%)的淋洗剂在低温下不会发生析出现象,减少表面活性剂在地下环境中的损失.

3.4 针对不同混合污染物体系筛选出的配方在 10~20℃ 环境下,均能形成增溶能力较强的 Winsor III型微乳液;无机盐阳离子的影响顺序表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,较低浓度的水化学成分对体系的增溶效果具有促进作用,较高浓度的水化学成分会产生不利影响.

参考文献:

- [1] 李传维,迟克宇,杨乐巍,等.碱活化过硫酸盐在某氯代烃污染场地地下水修复中的应用 [J]. 环境工程学报, 2021,15(6):1916-1926.
Li C W, Chi K Y, Yang L W, et al. Application of alkali-activated persulfate in groundwater remediation of a chlorinated hydrocarbon contaminated site [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021,15(6):1916-1926.
- [2] 张凤君,刘哲华,苏小四,等.土壤类型及组分对热活化过硫酸盐氧化降解土壤中挥发性氯代烃的影响 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018,48(4):1212-1220.
Zhang F J, Liu Z H, Su X S, et al. Effect of soil type and composition on oxidative degradation of volatile chlorinated hydrocarbons in heat-activated persulfate oxidative degradation of soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018,48(4):1212-1220.
- [3] 陆强,李辉,林匡飞,等.上海浦东某氯代烃场地地下水污染现状调查 [J]. 环境科学学报, 2016,36(5):1730-1737.
Lu Q, Li H, Lin K F, et al. Investigation on groundwater pollution at a chlorinated hydrocarbon site in Pudong, Shanghai [J]. Journal of Environmental Science, 2016,36(5):1730-1737.
- [4] Xiao Z, Jiang W, Chen D, et al. Bioremediation of typical chlorinated hydrocarbons by microbial reductive dechlorination and its key players: A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,202:110925.
- [5] Engelmann C, Händel F, Binder M, et al. The fate of DNAPL contaminants in non-consolidated subsurface systems – Discussion on the relevance of effective source zone geometries for plume propagation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,375:233-240.
- [6] Jiang X, Lu W, Hou Z, et al. Ensemble of surrogates-based optimization for identifying an optimal surfactant-enhanced aquifer remediation strategy at heterogeneous DNAPL-contaminated sites [J]. Computers and Geosciences, 2015,84:37-45.
- [7] 伍斌,杨宾,李慧颖,等.表面活性剂强化抽出处理含水层中 DNAPL 污染物的去除特征 [J]. 环境工程学报, 2014,8(5):1956-1964.
Wu B, Yang B, Li H Y, et al. Removal characteristics of DNAPL pollutants in aquifers treated by surfactant enhanced extraction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014,8(5):1956-1964.
- [8] 任加国,鄧普闻,徐祥健,等.地下水氯代烃污染修复技术研究进展 [J]. 环境科学研究, 2021,34(7):1641-1653.
Ren J G, Gao P C, Xu X J, et al. Research progress on groundwater

- chlorinated hydrocarbon pollution remediation technology [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(7):1641–1653.
- [9] 董雯娟,赵保卫,蒋 兵,等.阴-非混合表面活性剂对 DNAPLs 的增溶作用 [J]. 安全与环境学报, 2007,(2):24–28.
Dong W J, Zhao B W, Jiang B, et al. Solubilization of DNAPLs by yin-unmixed surfactants [J]. Journal of Safety and Environment, 2007, (2):24–28.
- [10] 赵筱茜,王 聪,田 勇,等.微乳液法制备介孔碳材料 [J]. 化学进展, 2022,34(10):2316–2328.
Zhao X Q, Wang C, Tian Y, et al. Preparation of mesoporous carbon materials by microemulsion [J]. Progress in Chemistry, 2022,34(10): 2316–2328.
- [11] 毛雪彬,杜志平,台秀梅,等.微乳液的理论及应用研究进展 [J]. 日用化学工业, 2016,46(11):648–653,660.
Mao X B, Du Z P, Tai X M, et al. Research progress on theory and application of microemulsions [J]. China Surfactant and Cosmetics, 2016,46(11):648–653,660.
- [12] 耿向飞,丁 彬,管保山,等.微乳液技术在储层改造中的应用研究进展 [J]. 精细石油化工, 2022,39(2):74–77.
Geng X F, Ding B, Guan B S, et al. Research progress on application of microemulsion technology in reservoir transformation [J]. Fine Petrochemical Industry, 2022,39(2):74–77.
- [13] 崔乐雨,李应成,何秀娟,等.微乳液泡沫驱油技术原理、挑战和研究进展 [J]. 精细化工, 2022,39(1):56–64.
Cui L Y, Li Y C, He X J, et al. Principles, challenges and research progress of microemulsion foam oil displacement technology [J]. Fine Chemicals, 2022,39(1):56–64.
- [14] Abruzzo A, Parolin C, Rossi M, et al. Development and Characterization of Azithromycin-Loaded Microemulsions: A Promising Tool for the Treatment of Bacterial Skin Infections [J]. Antibiotics, 2022,11(8):1040.
- [15] 闫文佳,贾 鑫,颜金鑫,等.微乳液凝胶颗粒制备及其应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021,42(15):383–388.
Yan W J, Jia X, Yan J X, et al. Research progress on preparation and application of microemulsion gel granules [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021,42(15):383–388.
- [16] 赵保卫,朱利中.微乳液对难溶有机物的增溶作用及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2003,23(5):5.
Zhao B W, Zhu L Z. Solubilization effect and influencing factors of microemulsion on poorly soluble organic compounds [J]. China Environmental Science, 2003,23(5):5.
- [17] 袁影影,李晓军,贾春云,等.生物柴油基微乳液的制备及其对钢铁厂多环芳烃污染土壤的修复性能 [J]. 环境工程学报, 2020,14(12):3505–3514.
Yuan Y Y, Li X J, Jia C Y, et al. Preparation of biodiesel-based microemulsion and its remediation performance on polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil in iron and steel plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020,14(12):3505–3514.
- [18] 侯 宁.咪唑型表面活性剂复配微乳液体系增溶卤代烃的性能及相行为的研究 [D]. 山东师范大学, 2016.
Hou N. Study on the performance and phase behavior of solubilized halogenated hydrocarbons in imidazole-type surfactant compound microemulsion system [D]. Shandong Normal University, 2016.
- [19] 张瀚元,鹿豪杰,任黎明,等.不同油相微乳液性质及其增溶菲的性能研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(10):4296–4302.
Zhang H Y, Lu H J, Ren L M, et al. Properties of different oil-phase microemulsions and their properties of solubilized phenanthrene [J]. China Environmental Science, 2019,39(10):4296–4302.
- [20] 赵保卫,朱利中.蓖麻油衍生效微乳液对菲的增溶和洗脱作用及其对菲污染土壤的修复机理 [J]. 环境工程学报, 2007,1(2):130–134.
Zhao B W, Zhu L Z. Solubilization and elution of phenanthrene by castor oil-derived microemulsion and its remediation mechanism on phenanthrene contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007,1(2):130–134.
- [21] Fu Y, Qin C, Gao S, et al. Aquifer flushing using a SDS/1-butanol based in-situ microemulsion: Performance and mechanism for the remediation of nitrobenzene contamination [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,424:127409.
- [22] 张婧懿,付玉丰,姚 禹,等.Brij35 构筑原位微乳液对四氯乙烯的增溶及脱附效果 [J]. 中国环境科学, 2021,41(5):2203–2210.
Zhang J Y, Fu Y F, Yao Y, et al. Solubilization and desorption effects of Brij35 constructed in situ microemulsion on tetrachloroethylene [J]. China Environmental Science, 2021,41(5):2203–2210.
- [23] Mo Y, Dong J, Li Y, et al. Formation of in-situ microemulsion and its efficiency for residual PCE removal in low temperature aquifers [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023,656:130461.
- [24] 宋易南,侯德义,赵勇胜,等.京津冀工场地地下水污染修复治理对策研究 [J]. 环境科学研究, 2020,33(6):1345–1356.
Song Y D, Hou D Y, Zhao Y S, et al. Remediation strategies for contaminated groundwater at chemical industrial sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(6):1345–1356.
- [25] 于 淇.某化工厂地下水挥发性卤代烃在地下水中的污染迁移研究 [D]. 济南:济南大学, 2017.
Yu Q. Study on pollution migration of groundwater volatile halogenated hydrocarbons in groundwater in a chemical plant [D]. Jinan: University of Jinan, 2017.
- [26] Talawat J, Sabatini D A, Tongcumpou C. Behavior of DNAPL mixture of organometallic and chlorinated solvent in the presence of surfactants and alcohols as density modifying agents [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2013,48(13):1619–1627.
- [27] Jayanti S, Britton L N, Dwarakanath V, et al. Laboratory evaluation of custom-designed surfactants to remediate NAPL source zones [J]. Environmental Science and Technology, American Chemical Society, 2002,36(24):5491–5497.
- [28] 吴章辉,马雁冰,刘会娥,等.微乳液最佳中相醇用量和增溶能力与油相等效烷基碳数的定量关系 [J]. 化工学报, 2016,67(4):1399–1404.
Wu Z H, Ma Y B, Liu H E, et al. Correlations between alcohol content or solubilization parameter and equivalent alkane carbon number of oil mixtures for optimum middle phase microemulsions [J]. CIESC Journal, 2016,67(4):1399–1404.
- [29] 张瀚元,鹿豪杰,任黎明,等.不同油相微乳液性质及其增溶菲的性能研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(10):4296–4302.
Zhang H, Lu H, Ren L, et al. Properties of microemulsions with different oil phase and their solubilization capacities for phenanthrene [J]. China Environmental Science, 2019,39(10):4296–4302.
- [30] Szekeres E, Acosta E, Sabatini D A, et al. A two-state model for selective solubilization of benzene-limonene mixtures in sodium dihexyl sulfosuccinate microemulsions [J]. Langmuir, 2004,20(16): 6560–6569.
- [31] Liu W, Chai J L, Chen L S, et al. Effect of the composition of mixed oils on the phase behavior and solubilization ability of microemulsion systems [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2012,57(2): 469–474.
- [32] Intiso A, Miele Y, Marchettini N, et al. Enhanced solubility of trichloroethylene (TCE) by a poly-oxyethylene alcohol as green surfactant [J]. Environmental Technology and Innovation, 2018,12:72–79.

作者简介: 韩玉娇(1998-),女,河北衡水人,吉林大学硕士研究生,主要从事污染场地修复方面研究.3127775866@qq.com.