

不同表面活性剂对土壤中 BaP 的去除研究

邓钞潇¹ 王 兵^{1,2}

(1. 西南石油大学化学化工学院; 2. 四川省油气田环境污染防治与环境安全重点实验室)

摘 要 将非离子型表面活性剂 Brij35、阳离子型表面活性剂 CTAB、阴离子型表面活性剂 SDBS、生物表面活性剂鼠李糖脂 Rhamnolipid 对苯并芘(BaP)的增溶能力和对 BaP 污染土壤的洗脱效果进行了对比研究,当表面活性剂浓度为 10 g/L 时,其洗脱效果: Brij35(71.3%)>Rhamnolipid(49.9%)>SDBS(43.2%)>CTAB(13.1%)。通过计算与比较临界胶束浓度(CMC)、摩尔增溶比(MSR)、表面活性剂在土壤表面的饱和吸附量,几种表面活性剂中确定 Brij35 为最佳清洗剂。同时探究了液固比、表面活性剂浓度、温度、洗脱时间对土壤中 BaP 去除率的影响。结果表明最佳的洗脱条件为:液固比 10:1, Brij35 10 g/L,反应温度 20℃,洗脱时间 24 h。此条件下 BaP 的去除率最高可达 72.4%。研究证实了 Brij35 能促进土壤中 BaP 的分离以达到修复目的。

关键词 洗脱; 苯并芘; 增溶; 表面活性剂

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.02.012

文章编号: 1005-3158(2021)02-0051-06

Research on the Removal of BaP from Soil by Different Types of Surfactants

Deng Chaoxiao¹ Wang Bing^{1,2}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering of Southwest Petroleum University;

2. Key Laboratory of Environmental Pollution Prevention on Oil and Gas Fields and Environmental Safety in Sichuan)

ABSTRACT The effects of non-ionic surfactant(Brij35), cationic surfactant(CTAB), anionic surfactant(SDBS), biosurfactant(rhamnolipid) on solubility enhancement and elution of benzopyrene(BaP) from soil was investigated and compared. When the surfactant concentration was 10 g/L, the elution rates sequence of BaP from soil was Brij35(71.3%)>Rhamnolipid(49.9%)>SDBS(43.2%)>CTAB(13.1%). By calculating and comparing the critical micelle concentration(CMC), molar solubilization ratio(MSR), and the saturated sorption capability of surfactants on the surface of soil contaminated by BaP, it was determined that Brij35 to be the best eluent for BaP. Meanwhile, the influence of liquid-soil ratio, surfactant concentration, temperature and elution time on the removal rate of BaP from soil was explored. The results showed that the optimal elution conditions are liquid-soil ratio 10:1, Brij35 10 g/L, reaction temperature 20℃, elution time 24 hours. Under this condition, the removal rate of BaP can reach up to 72.4%. This study demonstrated that Brij35 can promote the separation of BaP from soil to achieve reparation purpose.

KEY WORDS elution; benzopyrene; solubilization; surfactant

0 引 言

多环芳烃(PAHs)中苯并芘(BaP)具有强致癌性和致畸性,其疏水性极强,难以被生物降解^[1-2],常规方法处理难以达标,因此环境固体介质中 BaP 的去除具有重要的研究价值。作为一种修复疏水性有机物污染土壤的重要方式,表面活性剂增强

修复具有效率高、操作方便等优点^[3-4]。研究表明,当表面活性剂浓度超过其临界胶束浓度 CMC 时,疏水性物质的溶解度将显著提高,从而达到去除污染物的目的^[5]。国内外学者在表面活性剂对 PAHs 污染土壤修复方面进行了不少研究^[6-7],却少有对于土壤中 BaP 去除的报道,更鲜有针对不同类型

表面活性剂对 PAHs 污染土壤的洗脱效果比较的研究。

本文将对非离子表面活性剂聚氧乙烯月桂醚(Brij35)、阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、生物表面活性剂鼠李糖脂(Rhamnolipid, 简称 Rha)对 BaP 的增溶能力和洗脱效果,通过计算与比较 CMC、摩尔增溶比 MSR 以及在固相的吸附量,筛选出对土壤中 BaP 洗脱效果最好的表面活性剂,并研究了液固比、表面活性剂浓度、温度、时间等因素对去除效果的影响,为表面活性剂在 PAHs 污染土壤修复中的应用提供理论依据。

表 1 表面活性剂的参数性质

名称	化学式	CMC/(mg · L ⁻¹)	摩尔质量/(g · mol ⁻¹)	类型
Brij35	C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ CH ₂) ₂₃ OH	66	1 200	非离子
CTAB	C ₁₆ H ₃₃ (CH ₃) ₃ NBr	400	364.45	阳离子
SDBS	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ C ₆ H ₄ SO ₃ Na	380	348.48	阴离子
Rha	Rha-C ₁₀ -C ₁₀ , Rha-Rha-C ₁₀ -C ₁₀	20~30	601	非离子型生物

1.1.3 土壤的来源与性质

样品新鲜土壤采自市郊某处,深度 0~20 cm。经分拣风干磨碎后过 2 mm 筛备用。

将 BaP(30 mg)溶解在二氯甲烷中加入到上述土壤中,混合均匀后自然干燥 7 d;最后置于黑暗环境中 3 个月,配成 30 mg/kg 的污染土壤^[8]。

1.2 实验方法

1.2.1 表面活性剂对 BaP 的增溶平衡实验

配制浓度为 5,10,15,20,25 g/L 的表面活性剂 Brij35、CTAB、Rha、SDBS 溶液。称取 BaP(约 10 mg)置于 20 mL 的具塞玻璃瓶中,分别加入各表面活性剂溶液 10 mL,在 25±1℃,200 r/min 下振荡培养 48 h。取出静置后在 3 500 r/min 的转速下离心 45 min,取上清液用 HPLC 测定 BaP 的浓度。通过计算水中 BaP 的表观溶解度,绘制表面活性剂对 BaP 的增溶曲线。

1.2.2 表面活性剂对土壤中 BaP 的洗脱实验

向盛有 1 g 污染土样的 20 mL 具塞玻璃瓶中加入 10 mL 不同浓度的各表面活性剂溶液(液固比 10:1),后续步骤同 1.2.1。

1.2.3 表面活性剂在土壤表面的吸附实验

向盛有 1 g 污染土样的 20 mL 具塞玻璃瓶中加入 10 mL 各表面活性剂溶液,后续步骤同 1.2.1。上

1 实验器材与方法

1.1 仪器与材料

1.1.1 主要仪器

MP502B 精密电子天平:上海双旭电子有限公司;水浴恒温振荡器:常州市仪都仪器有限公司;CL8R 低速离心机:湘仪离心机仪器有限公司;Agilent1200 型高效液相色谱仪(HPLC):安捷伦科技有限公司。

1.1.2 主要实验材料

表面活性剂:Brij35、CTAB、Rhamnolipid、SDBS,均为化学纯,其参数性质见表 1。其他化学试剂包括 NaN₃、NaCl、NaHCO₃、CH₂Cl₂,均为分析纯。

清液用甲醇稀释后用 KI-I₂ 可见光度法^[9]测定表面活性剂浓度。平衡吸附量的计算见公式(1)。

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

式中:Q_e为平衡时的吸附量,mg/g;C₀为液相中表面活性剂的初始质量浓度,mg/L;C_e为液相表面活性剂的平衡质量浓度,mg/L;V 为溶液体积,L;m 为固相质量,g。

1.2.4 影响因素实验

以 Brij35 为清洗剂,将一定量的污染土壤(0.5,1,2,3,5 g)称重,放入 50 mL 具塞锥形瓶中,加入不同浓度(1~20 g/L)的 Brij35 溶液或去离子水 10 mL 后放入转速为 200 r/min 的恒温摇床中,在不同的温度(5~60℃)下反应不同时间(0.5~48 h)。后续步骤同 1.2.1。

1.3 分析方法

取上清液 2.0 mL 加入 10 mL CH₂Cl₂,萃取 1 h 后用 HPLC 测定 BaP 的浓度。

2 结果与讨论

2.1 不同表面活性剂对 BaP 的增溶作用

不同表面活性剂对 BaP 的增溶曲线见图 1。

由文献^[10]可知,在纯水中,BaP 的溶解度为 0.004~0.012 mg/L。几种表面活性剂对 BaP 有一定增溶作

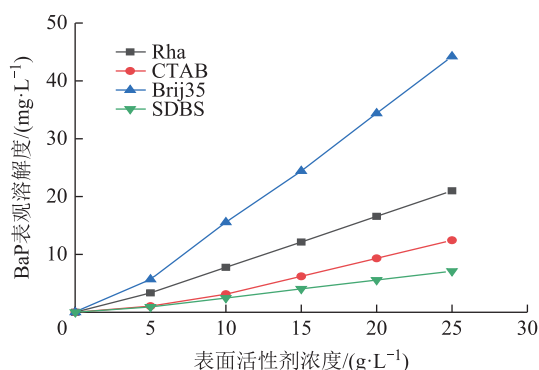


图 1 不同表面活性剂对 BaP 的增溶曲线

用,当其浓度大于 CMC 时,增溶作用显著提升。当浓度大于 CMC 时形成胶束,BaP 在胶束-水混合体系的分配下易于转移至胶束相中^[11],随着其浓度继续增大,胶束数量增多,被增溶的 BaP 增加^[12]。由于亲水端离子间的静电斥力,离子型表面活性剂的 CMC 较大^[13]。因此,非离子型表面活性剂的增溶能力往往强于离子型,这与实验结果一致。

CMC 能一定程度反映表面活性剂增溶能力。通常,CMC 越小,其增溶能力越强^[14]。当几种表面活性剂浓度相同且均超过 CMC 时,其对 BaP 的增溶能力顺序为:Brij35>Rha>CTAB>SDBS。说明 CMC 的降低并不绝对意味着增溶能力的增强。

摩尔增溶比 MSR 通常用来表征表面活性剂对水中疏水性有机物的增溶潜力。MSR 的计算见公式(2)。

$$MSR = (S - S_{CMC}) / (C_s - CMC) \quad (2)$$

式中: C_s 为表面活性剂浓度 ($C_s > CMC$), mmol/L; S 为表面活性剂浓度为 C_s 时污染物的总表观溶解度, mmol/L; S_{CMC} 为表面活性剂浓度为 CMC 时污染物的表观溶解度,近似于其水中的溶解度, mmol/L。

图 1 的线性方程拟合结果和 MSR 值见表 2。

表 2 4 种表面活性剂对 BaP 增溶结果的拟合分析

表面活性剂	拟合回归方程	R^2	MSR
Brij35	$y = 0.0091x + 0.0157$	0.9993	0.0091
CTAB	$y = 0.0008x + 0.009$	0.9947	0.0008
SDBS	$y = 0.0004x + 0.0025$	0.9997	0.0004
Rha	$y = 0.0035x + 0.0085$	0.9992	0.0035

根据获得的 MSR 值,对 BaP 的增溶能力:Brij35>Rha>CTAB>SDBS。说明 Brij35 对 BaP 的增溶能力最强。

2.2 不同表面活性剂对污染土样中 BaP 的去除效果

不同表面活性剂对污染土壤中 BaP 的去除效果

见图 2。

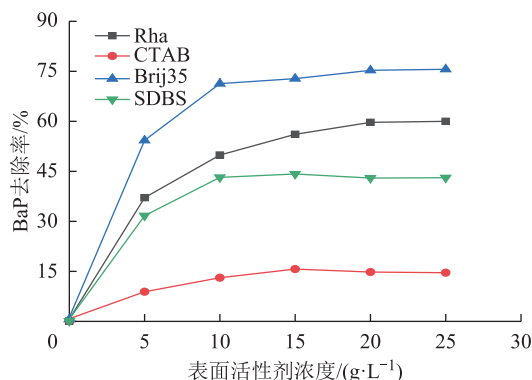


图 2 不同表面活性剂对污染土壤中 BaP 的去除

由图 2 可以看出,各表面活性剂均对 BaP 表现出一定的去除效果,去除率随浓度增大而增加。当初始浓度大时,表面活性剂形成胶束,导致 BaP 向胶束相中分配^[15],其去除率不断增大。当表面活性剂浓度达到 10 g/L 后,去除率趋于平缓,甚至负增长。因固相紧密结合的部分 BaP 难以脱附,继续加大浓度可能会造成土壤孔隙堵塞,导致更大的表面活性剂吸附损失。

比较表面活性剂对 BaP 的去除效果,发现离子型和非离子型存在巨大差异。当浓度为 10 g/L 时,Brij35、CTAB、Rha、SDBS 的去除率分别为 71.3%,13.1%,49.9%,43.2%。其中 SDBS 的去除效果强于 CTAB,与 2.1 结论不符。由于土壤颗粒带负电^[16],阳离子表面活性剂由于离子交换吸附导致其在固相表面的吸附量较大,CMC 提升,形成的胶束较少,洗脱效果差。而阴离子与固相中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等结合沉淀造成部分表面活性剂损失^[17],非离子型通过氢键作用吸附在固相表面,吸附损失远小于离子型^[9]。以上结果表明,对污染土样中 BaP 的去除效果顺序是:Brij35>Rha>SDBS>CTAB。

2.3 不同表面活性剂在 BaP 污染土壤表面的等温吸附

不同表面活性剂在 BaP 污染土壤表面的吸附等温线见图 3。

由图 3 可知,土壤表面对 Brij35 和 Rha 的吸附等温线呈“L”型,对 SDBS 的吸附等温线呈“LS”型,而对 CTAB 的吸附等温线呈“S”型。随着平衡浓度升高,吸附量均增加,随后达到饱和。

表面活性剂在固相表面的吸附一般分为以下几种^[18]:离子对吸附、离子交换吸附、氢键吸附、疏水作用吸附、 π 电子极化吸附、范德华力。吸附等温曲线

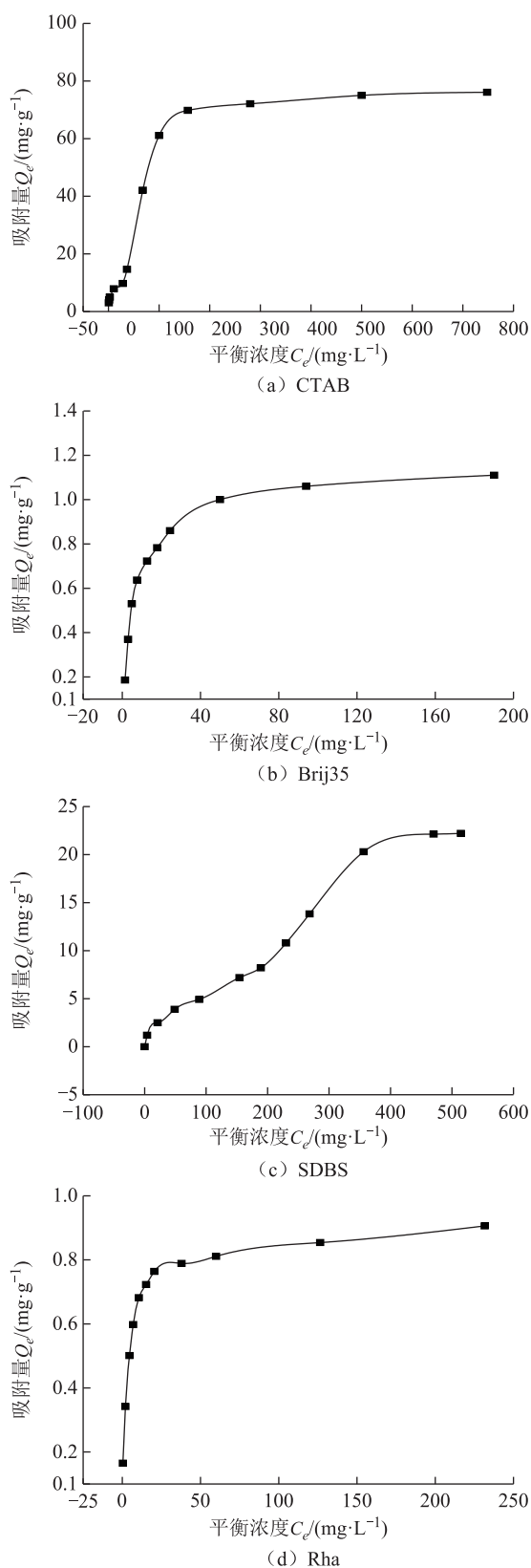


图3 不同表面活性剂在BaP污染土壤表面的吸附等温线

经拟合后,Brij35和Rha符合Langmuir吸附等温式,属于单分子层吸附模式,而SDBS和CTAB符合Freundlich

吸附等温式,属于多分子层不均匀吸附模型。据分析,CTAB和SDBS在固相表面首先发生离子对吸附,随后通过疏水作用吸引更多表面活性剂单体,形成局部双分子层吸附,其饱和和吸附量大,分别为78.49, 22.13 mg/g。而Rha和Brij35不会电离,低浓度时主要通过氢键吸附^[19],饱和和吸附量很小,分别为0.906, 1.11 mg/g。由于洗脱效果由吸附态表面活性剂对有机物的截留作用、表面活性剂单体与疏水有机物在固相表面竞争吸附^[20]、胶束的增溶作用共同决定,因此Brij35更利于土壤中BaP的洗脱。

2.4 去除效果的影响因素

实验研究了液固比、Brij35浓度、温度和洗脱时间对固相中BaP去除率的影响。

2.4.1 液固比对BaP去除率的影响

不同液固比下BaP去除率随Brij35浓度的变化见图4。

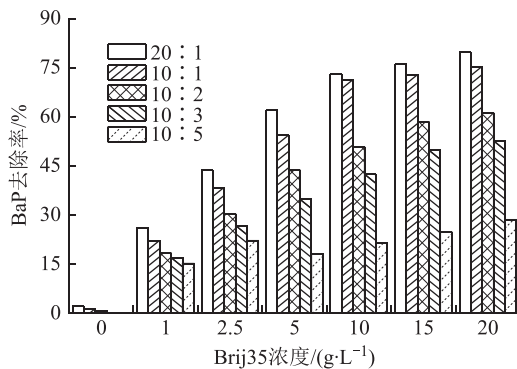


图4 不同液固比下BaP去除率随Brij35浓度的变化

由图4可知,BaP的去除率均随液固比的降低而降低。当Brij35浓度保持在10 g/L且液固比为10:1时,BaP的去除率为71.3%,远高于较低的液固比。当液固比增至20:1,去除率仅上升到73%。保持Brij35浓度增加液固比,意味着洗脱时引入了更多Brij35分子。随着液固比升高,固相分散更均匀,与Brij35分子充分接触^[21]。另一方面,BaP有一部分被固相紧密吸附,难以解吸,当去除率达到某个值后再增加液固比不会使去除率明显提升。因此,选择液固比为10:1。

2.4.2 表面活性剂浓度对BaP去除率的影响

图4表明,少于3%的BaP被去离子水洗脱。当加入Brij35,去除率明显增加,随着Brij35浓度增加到20 g/L,BaP的去除率持续上升到75.3%(液固比为10:1)。这之前研究一致^[22],表面活性剂的浓度越大,生成胶束越快,胶束数目越多,其与固相中BaP分子接触的机会愈大,且胶束能容纳的BaP愈多。但是当Brij35浓度增至20 g/L,去除率增速明显

变缓。高浓度可能会造成 Brij35 在固相表面吸附量较大,吸附已被洗脱的 BaP 分子,造成去除率下降。基于此,选择 Brij35 浓度为 10 g/L。

2.4.3 温度对 BaP 去除率的影响

不同温度下 BaP 去除率随 Brij35 浓度的变化见图 5。

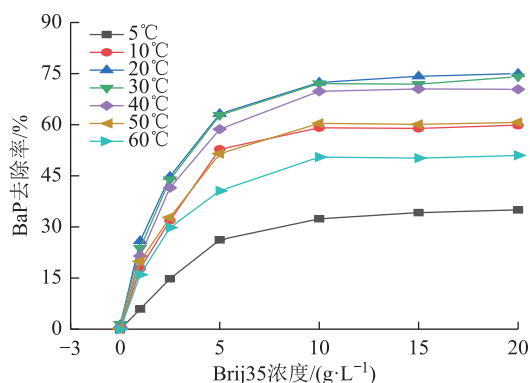


图 5 不同温度下 BaP 去除率随 Brij35 浓度的变化

由图 5 可知,随着温度从 5℃ 升高到 20℃,BaP 去除率显著提升。温度升高增强了分子热运动,BaP 与固相间黏附力下降,流动性增加,有助于胶束和固相颗粒间的间隙充分接触,促进 BaP 向胶束中分配^[23];此外,由于分子热运动,胶束体积变大,相同数量的胶束能增溶的有机物更多。从 20℃ 提高到 30℃ 时,BaP 的去除率和趋势几乎一致。但当温度提升到 40℃ 以上时,去除效果大幅下降。可解释为:非离子表面活性剂分子间氢键在较高温度下断裂,表面活性剂的溶解度降低,可能会导致 Brij35 吸附在固相表面上^[17]。同时,无论温度高低,随着表面活性剂浓度的递增,BaP 去除率均先明显增高后趋于平缓,这与 2.4.2 中结果一致。由于在 20℃ 达到了最高去除率,20℃ 是 BaP 去除的最佳温度。

2.4.4 洗脱时间对 BaP 去除率的影响

在上述实验获得的最优反应条件下,探索了 BaP 去除所需的时间,洗脱时间对 BaP 去除率的影响见图 6。

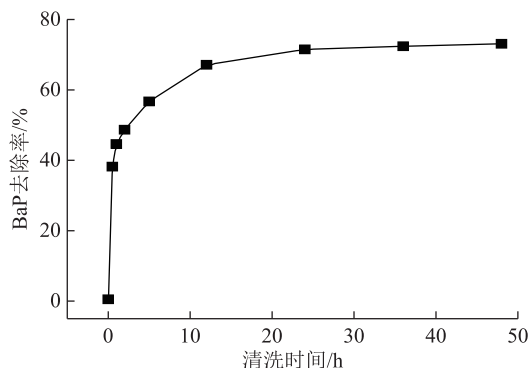


图 6 洗脱时间对 BaP 去除率的影响

从图 6 可以看出,BaP 的去除率在前半小时达到 38.4%,持续到 24 h 时去除率缓慢提高到 72.4%,而后趋于稳定。在其后 24 h 内,BaP 去除率仅增加了 3.1%。由于反应前期与固相结合不紧密的 BaP 迅速向胶束中分配,随着时间推移,结合紧密的 BaP 也会被缓慢地洗脱到液相中去,在实验后期,从固相解吸的 BaP 减少,去除率增长缓慢直至保持平稳态势。因此,24 h 是去除 BaP 的最佳洗脱时间。

3 结论

1)通过 4 种表面活性剂对水中 BaP 的增溶能力的对比,得出结论:非离子表面活性剂的增溶能力明显强于离子型,且通过对比表面活性剂的 MSR 值,得到表面活性剂对 BaP 的增溶能力: Brij35 > Rha > CTAB > SDBS。

2)对比不同类型表面活性剂对模拟污染土壤中 BaP 的去除效果,其大小顺序为: Brij35 > Rha > SDBS > CTAB。其与增溶结果有差异。几种表面活性剂在污染土壤表面的饱和吸附量: CTAB > SDBS > Brij35 > Rha。洗脱效果由溶解态表面活性剂的增溶能力和吸附态表面活性剂对 BaP 的吸附效果共同决定。

3) Brij35 能促进模拟污染土壤中 BaP 分离。最佳的洗脱条件为:液固比 10:1, Brij35 浓度 10 g/L,反应温度 20℃,洗脱时间 24 h,去除率最高可达 72.4%。

参考文献

- [1] LIU S, GUO C, LIANG X, et al. Nonionic surfactants induced changes in cell characteristics and phenanthrene degradation ability of sphingomonas sp. GY2B. [J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2016, 129: 210-218.
- [2] LI Y, LIAO X. The combined effects of surfactant solubilization and chemical oxidation on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbon from soil[J]. Science of the total environment, 2019, 647: 1106-1112.
- [3] PEI G, ZHU Y, CAI X, et al. Surfactant flushing remediation of o-dichlorobenzene and p-dichlorobenzene contaminated soil[J]. Chemosphere, 2017, 158: 1112-1121.
- [4] SALES P S, DE ROSSI R H, FERNA, et al. Different behaviours in the solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in water induced by mixed surfactant solutions[J]. Chemosphere, 2011, 84(11): 1700-1707.
- [5] CHEN C, LIU Y, STONE H, et al. Visualization of Surfactant Dynamics to and along oil-water Interfaces using solvatochromic fluorescent surfactants (Article) [J]. Langmuir, 2018, 34(36): 10512-10522.
- [6] LAMICHHANE S, BAL KRISHNA K C, SARUK-KALIGE R. Surfactant-enhanced remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review[J]. Journal of en-

- vironmental management, 2017, 199:46-61.
- [7] SHAH M U H, MONIRUZZAMAN M, SIVAPRAGASAM M, et al. A binary mixture of a biosurfactant and an ionic liquid surfactant as a green dispersant for oil spill remediation[J]. Journal of molecular liquids, 2019, 280: 111-119.
- [8] GUO J, GAO Q, YANG S, et al. Degradation of pyrene in contaminated water and soil by Fe^{2+} -activated persulfate oxidation: Performance, kinetics, and background electrolytes (Cl^- , HCO_3^- and humic acid) effects[J]. Process safety and environmental protection, 2021, 146:686-693.
- [9] 杨成建, 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.
- [10] 管融资, 吴航利, 王佳, 等. 苯并芘污染现状及其生物毒性效应[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2019, 38(3):49-54.
- [11] ZHANG W, HUANG G, WEI J. Study on solubilization capability of various Gemini micelles in micellar-enhanced ultrafiltration of phenol-contaminated waters[J]. Desalination & water treatment, 2015, 54(3):672-682.
- [12] DONG R, ZHONG Z, HAO J. Self-assembly of onion-like vesicles induced by charge and rheological properties in anionic-nonionic surfactant solutions[J]. Soft matter, 2012, 8(30):3812-3821.
- [13] CHATTERJEE S, CHATTERJEE T, WOO S H. Effect of chitosan addition on phenanthrene solubilization in anionic or cationic surfactant solutions[J]. Desalination & water treatment, 2012, 37(1-3):253-258.
- [14] KHAIRUL M A, SHAH K, DOROODCHI E, et al. Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids[J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 98:778-787.
- [15] MAO X, JIANG R, XIAO W, et al. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: A review[J]. Journal of hazardous materials, 2015, 285:419-435.
- [16] 陈宝梁. 表面活性剂在土壤有机污染修复中的作用及机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2004:18-23.
- [17] 万卷敏. 壤土—多环芳烃—表面活性剂之间的相互作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011:16-19.
- [18] YANG C, LIN W, WANG Q, et al. Inorganic salts effect on adsorption behavior of surfactant AEC at liquid/liquid interface[J]. Research journal of applied sciences, engineering and technology, 2013, 6(8):1424-1427.
- [19] 刘玥晓. 离子型表面活性剂对泥沙起动和沉降影响机制研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2018:11-17.
- [20] 戚兴超. 离子型表面活性剂在土壤上的吸附及其对土壤性质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016:14-18.
- [21] 马婵媛, 赵保卫, 吴咏琪, 等. 表面活性剂对土壤中多环芳烃非洗脱作用的比较研究[J]. 安全与环境学报, 2008(4):19-22.
- [22] 朱长银, 方国东, 司友斌, 等. 洗脱-过硫酸钠氧化联合去除土壤中 PCBs 的研究[J]. 土壤, 2015, 47(6):1125-1131.
- [23] LAMICHHANE S, BAL KRISHNA K C, SARUKKALIGE R. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: A review[J]. Chemosphere, 2016, 148:336-353.

(收稿日期 2020-11-30)

(编辑 王蕊)

(上接第 50 页)

间,显色反应要在水浴中进行;应考虑比色管选取及操作的影响,选取管口大小适当的比色管;使用标准方法规定并且在使用有效期范围内的化学试剂;严格按照操作规程使用分光光度计;严格把握操作条件和细节。

2)样品采集过程中要注意避光,吸收管可以选择棕色不吸附二氧化硫的材质,吸收前保持干燥,吸收后两端口无残液,吸收管要顺直,采样过程要控制采样流量以免检测结果发生偏离。

甲醛法测定二氧化硫在样品采集、保存及检测的全过程中,必须严格把握操作条件和操作细节,以降低对检测结果的影响。

参考文献

- [1] 王艳秋. 环境空气中二氧化硫的测定—甲醛吸收-副玫瑰

苯胺分光光度法验证报告[J]. 江西化工, 2018(2): 202-204.

- [2] 张绮纯. 环境空气二氧化硫采样及分析的质量控制[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(6):142-143.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气 二氧化硫的测定 甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法: HJ 482—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气 二氧化硫的测定 四氯汞盐吸收-副玫瑰苯胺分光光度法: HJ 483—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [5] 陈金凤. 甲醛法测定环境空气中二氧化硫影响因素的探讨[J]. 广东化工, 2015, 42(15):230-231.

(收稿日期 2021-03-11)

(编辑 王蕊)