

# 表面活性剂对菲的增溶动力学及质量增溶比(WSR)与亲水亲油平衡值(HLB)的关系\*

钟金魁<sup>1</sup> 赵保卫<sup>1,2\*\*</sup> 朱 琨<sup>1</sup> 马锋锋<sup>1</sup> 冉婧媛<sup>1</sup> Obemah David Nartey<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州, 730070; 2. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州, 730070)

**摘 要** 采用振荡实验方法,比较研究了2种非离子表面活性剂(Triton X-100和Tween80)和2种阴离子表面活性剂(SDS和SDBS)对菲的最佳增溶振荡时间及其对菲的增溶能力,同时也比较分析了表面活性剂对菲的质量增溶比(WSR)与其亲水亲油平衡值(HLB)的关系.结果表明,Triton X-100、Tween 80、SDBS和SDS对菲的最佳增溶振荡时间分别为12、12、24和36 h.在表面活性剂临界胶束浓度(CMC)上下,4种表面活性剂对菲均具有增溶能力,尤其表面活性剂浓度超过其临界胶束浓度(CMC)时,增溶效果更加明显.实验数据也表明4种表面活性剂对菲的增溶能力存在差异,即非离子表面活性剂对菲的增溶能力大于阴离子表面活性剂对其的增溶能力,具体表现为Triton X-100 > Tween80 > SDS > SDBS.该顺序与表面活性剂的HLB有关.

**关键词** 表面活性剂, 多环芳烃, 增溶, 动力学, 亲水亲油平衡值.

当前,污染土壤修复的主要方式有物理修复、化学修复与生物修复<sup>[1-2]</sup>.其中,表面活性剂强化修复土壤有机污染因其周期短、效率高,有望成为土壤和地下水有机污染治理的实用技术<sup>[3-6]</sup>.

一些多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)具有致癌、致畸、致突变效应,被认为是最有害的环境污染物<sup>[6]</sup>.美国环保局(USEPA)已经将16种不带支链的PAHs列入优先污染物黑名单<sup>[7-9]</sup>.PAHs在水中溶解度小,当其通过地面径流、大气沉降等进入土壤环境后,易于强烈吸附到土壤有机质上<sup>[10]</sup>,由此限制了PAHs的水淋洗/清洗效率.表面活性剂化学强化修复是利用表面活性剂的增溶和增流作用来提高污染物的迁移性,提高其在水溶液中的溶解度,然后通过原位淋洗和异位清洗,达到现场修复的目的.因此,提高难降解有机物的溶解度,同时降低表面活性剂的用量,减少其污染是土壤有机污染化学与生物修复,特别是表面活性剂增效修复的关键.国内外将表面活性剂广泛用于增溶疏水性有机污染物的研究不少<sup>[11-17]</sup>,但对表面活性剂增溶多环芳烃的能力及动力学与其亲水-亲油平衡值(Hydrophile-lipophile balance, HLB)的相关性方面的研究鲜有报道.

本文以菲为代表,研究了2种阴离子表面活性剂(SDS和SDBS)和2种非离子表面活性剂(Triton X-100和Tween80)对多环芳烃的增溶动力学,考察了4种表面活性剂对菲的质量增溶比(WSR)及WSR与表面活性剂的HLB之间的关系,以期为今后开展多环芳烃污染土壤的化学修复提供参考.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂和仪器

阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)(分析纯, J&K Chemical LTD, Japan)和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)(分析纯, TOKYO KASEI KOGYO. Co., Japan)、非离子表面活性剂聚氧乙烯辛基苯酚醚(Triton X-100)和聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯(Tween80)(分析纯, Acros Organic, USA);菲(分析纯, Aldrich Chemical Co., USA);甲醇(色谱纯);超纯水.主要试剂的物化参数见表1.

Thermo Fisher LCQ Advantage 4000液质联用仪的Surveyor高效液相色谱系统,配置有PDA(光电二极管阵列检测器),自动进样器和载样泵;高效液相色谱分析柱(4.6 mm × 250 mm × 5 μm, LICHROM

2010年11月22日收稿.

\* 国家自然科学基金项目(20577018)资助;长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0966)资助;甘肃省自然科学基金计划项目(1010RJZA068, 1010RJZA070)资助.

\*\* 通讯联系人, Tel: (0931)4938017; E-mail: baoweizhao@mail.lzjtu.cn

ODS2);DG 超声波清洗器;SHZ-82 气浴恒温振荡器;Anke TDL80-2B 离心机和 MilliQ 去离子水发生器.

表 1 表面活性剂和非的物化参数

| Table 1 Physico-chemical parameters of surfactants and PHE |                                                                                                                                                                       |        |                               |                  |                               |                         |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 试剂名称                                                       | 结构式                                                                                                                                                                   | 相对分子质量 | CMC<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | HLB <sup>a</sup> | 溶解度<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 聚集数                     |
| Triton X-100                                               | (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> CCH <sub>2</sub> C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>9.5</sub> OH | 625    | 167.4                         | 13.5             | —                             | 100—155 <sup>[18]</sup> |
| Tween80                                                    | C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOS <sub>6</sub> (OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> OH                                                                | 1310   | 73.36                         | 15               | —                             | 60 <sup>[18]</sup>      |
| SDBS                                                       | C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> SO <sub>3</sub> Na                                                                                      | 348.48 | 963.2                         | 10.6             | —                             | 87 <sup>[19]</sup>      |
| SDS                                                        | C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> OSO <sub>3</sub> Na                                                                                                                   | 288.38 | 2420                          | 40               | —                             | 89 <sup>[20]</sup>      |
| 菲                                                          | C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>                                                                                                                                       | 178    | —                             | —                | 1.0                           |                         |

注: a 代表亲水-亲油平衡值(Hydrophile-Lipophile Balance, HLB),数据来自文献[18, 20-23];S<sub>6</sub>:山梨醇环—C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>O—.

1.2 实验方法

在 50 mL 碘量瓶中,分别加入稍过量的菲晶体和 20 mL 一定浓度的表面活性剂溶液,盖紧塞子,在 25 ℃ 和 150 r·min<sup>-1</sup> 条件下振荡一定时间,将悬浮液倒入 15 mL 离心管中,加盖密封后以 3500 r·min<sup>-1</sup> 离心 30 min,完全分离未溶解的菲,用棉签仔细地将离心管壁及上清液表面的漂浮物蘸去,然后将上清液转入另一离心管中.准确移取适量上清液于 25 mL 比色管中,往其中加入 10 mL 甲醇后用去离子水定容,定容后的待测液过 0.22 μm 的注射器滤膜到进样瓶中,用 HPLC 分析水溶液中菲的浓度.

1.3 液相色谱条件

AT-LICHROM ODS2 C18 反相色谱柱(250 mm×4.6 mm×5 μm);流动相为甲醇:水(80:20);流速 1 mL·min<sup>-1</sup>;柱温 40 ℃;进样量 10 μL;检测波长 254 nm.

2 结果与讨论

2.1 增溶动力学

用 2000 mg·L<sup>-1</sup> 的非离子表面活性剂(Triton X-100 和 Tween80)和 4000 mg·L<sup>-1</sup> 的阴离子表面活性剂(SDS 和 SDBS)进行了增溶动力学实验,结果如图 1 所示.菲在 Triton X-100、Tween80、SDS 和 SDBS 溶液中的最大表观溶解度分别出现在 12 h、12 h、36 h 和 24 h,将其定为以后实验的增溶振荡时间.

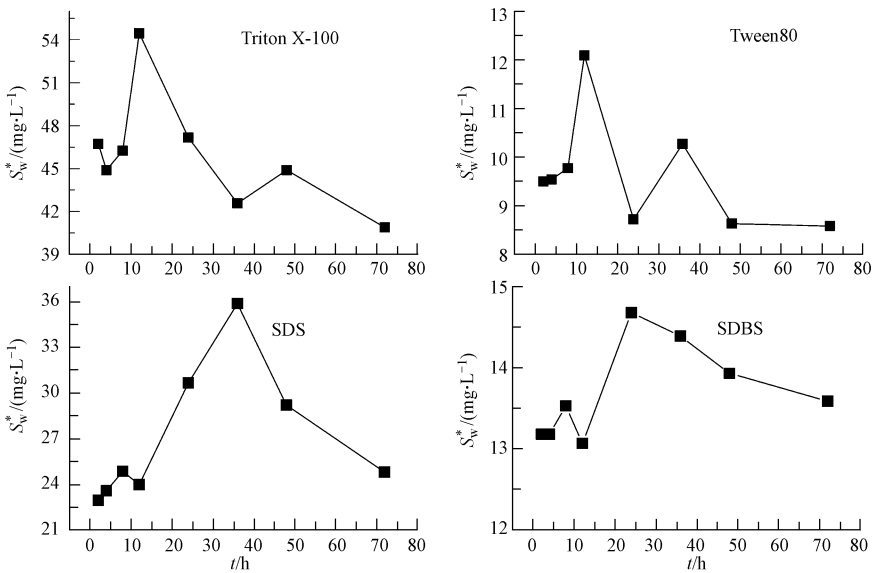
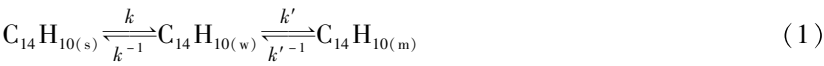


图 1 表面活性剂对菲的最佳增溶振荡时间

Fig.1 The optimal agitation duration for solubilizing phenanthrene by surfactants

设菲在表面活性剂溶液中的增溶过程为:



式中,  $C_{14}H_{10(s)}$ 、 $C_{14}H_{10(w)}$  和  $C_{14}H_{10(m)}$  分别为固相、水相和胶束相中的菲,  $k$  和  $k^{-1}$  分别表示菲从固相进入水相以及从水相回到固相的速率常数;  $k'$  和  $k'^{-1}$  表示菲从水相进入胶束相以及从胶束相逃逸重新回到水相的速率常数. 增溶开始阶段,  $k > k^{-1}$ ,  $k' > k'^{-1}$ , 菲通过表面活性剂增溶进入胶束内核, 表面活性剂对菲的增溶速度较快, 表观增溶速度为正值, 并随着振荡时间的延长, 菲的表观溶解度( $S_w^*$ )达最大值, 如图 1 所示, 4 种表面活性剂对菲的表观溶解度均出现一个峰值. 但是, 随着振荡时间的进一步延长, 增溶于胶束中的菲又逃逸回水相, 进而重新回到固相, 胶束及其胶核内的菲也可能通过疏水作用吸附在固相菲表面, 这时  $k < k^{-1}$ ,  $k' < k'^{-1}$ , 表观增溶速度又变为负值, 致使菲的表观溶解度又出现下降<sup>[24]</sup>.

2.2 表面活性剂浓度对菲的增溶影响

试验了表面活性剂 Triton X-100、Tween80、SDS 和 SDBS 在其临界胶束浓度(CMC)上下对菲的增溶作用, 见图 2.

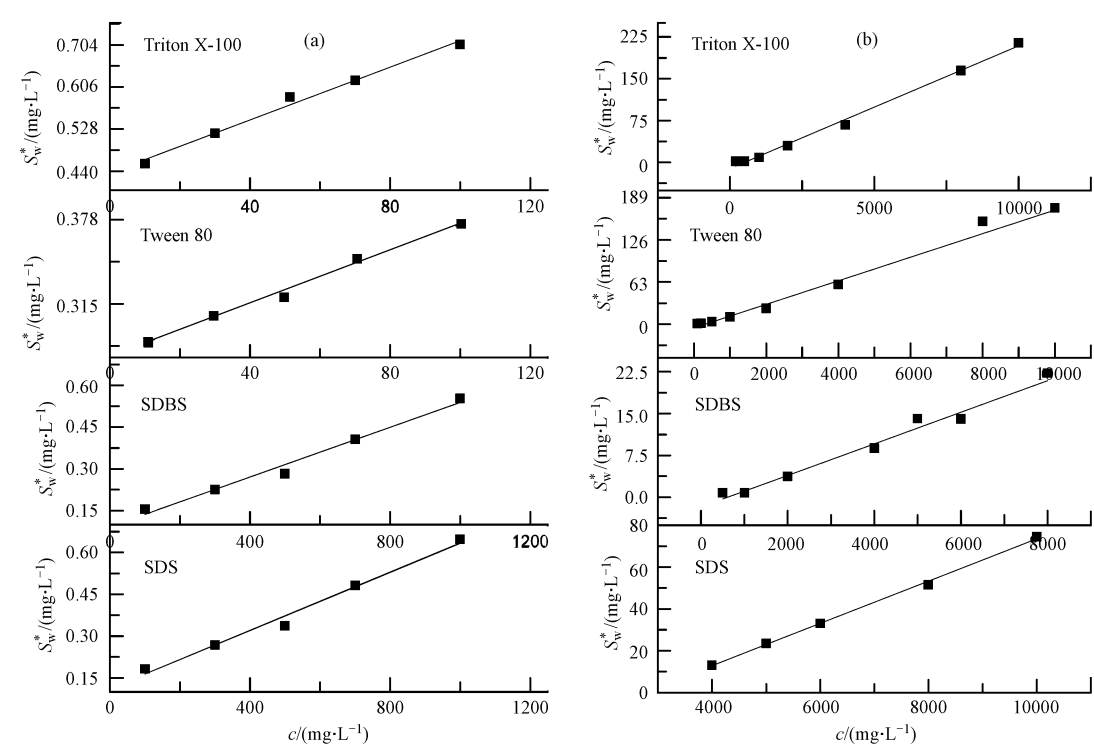


图2 表面活性剂浓度对菲增溶的影响  
(a)  $c < CMC$ ; (b)  $c > CMC$

Fig. 2 Influence of surfactant concentration on the solubility enhancement of phenanthrene

菲的表观溶解度在表面活性剂 CMC 前后均表现为线性增加, 但增溶效果不同. 当表面活性剂浓度超过 CMC 后, 菲的表观溶解度随着表面活性剂浓度的增大而显著增加. 这是因为, 当表面活性剂浓度超过 CMC 后, 溶液中出现胶团. 菲很快在胶团相和水相之间进行分配而进入胶团, 根据相似相溶原理, 胶团相/水相间的分配系数很大, 导致表面活性剂浓度大于 CMC 时, 菲的表观溶解度同表面活性剂的浓度成线性关系<sup>[25]</sup>. 4 种表面活性剂增溶菲的线性回归数据见表 2.

表面活性剂对有机物增溶作用的大小与表面活性剂单体、胶束浓度和溶质在单体/水、胶束/水介质间的分配系数有关, 表达如下<sup>[26]</sup>:

$$S_w^*/S_w = 1 + X_{mn}K_{mn} + X_{mc}K_{mc}$$

(2)

式中,  $S_w^*$  是表面活性剂总浓度为  $X$  ( $X = X_{mn} + X_{mc}$ ) 时, 溶质的表观溶解度,  $mg \cdot L^{-1}$ ;  $S_w$  是溶质在纯水中的表观溶解度,  $mg \cdot L^{-1}$ ;  $X_{mn}$  是表面活性剂单体的浓度,  $mg \cdot L^{-1}$  (当  $X \leq CMC$ ,  $X_{mn} = X$ ; 当  $X > CMC$ ,  $X_{mn} =$

CMC); $X_{mc}$ 是以胶束形式存在的表面活性剂浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (当  $X\leq\text{CMC}$ ,  $X_{mc}=0$ ;当  $X\geq\text{CMC}$ ,  $X_{mc}=X-X_{mn}$ ); $K_{mn}$ 是溶质在单体和水之间的分配系数,  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $K_{mc}$ 是溶质在胶束与水之间的分配系数,  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ . 经数学推导,  $K_{mn}$ 和  $K_{mc}$ 与增溶曲线的线性斜率  $K_1$ 和  $K_2$ 的关系如下:

$$K_{mn}=K_1\times10^6/S_w$$

(3)

$$K_{mc}=K_2\times10^6/S_w$$

(4)

式中,  $K_1$ 、 $K_2$ 分别为表面活性剂浓度在 CMC 前、后增溶曲线线性回归方程的斜率. 经计算得到的  $K_{mn}$ 、 $K_{mc}$ , 数据见表 2.

在 CMC 以上, 可通过 WSR 比较表面活性剂对菲的增溶能力的大小<sup>[27]</sup>. WSR 表示增加单位表面活性剂质量浓度时菲表观溶解度的增加, 表达式如下:

$$\text{WSR}=(S_{\text{PHE},mc}^*-S_{\text{PHE},cmc}^*)/(C_{\text{surf}}-\text{CMC})$$

(5)

式中,  $S_{\text{PHE},mc}^*$ 是表面活性剂胶束浓度为  $C_{\text{surf}}$ 时菲的表观溶解度;  $S_{\text{PHE},cmc}^*$ 是表面活性剂浓度为 CMC 时菲的表观溶解度, WSR 数值可以通过增溶曲线 CMC 以上直线的斜率求出.

由图 2 及表 2 可知, 4 种表面活性剂对菲都具有增溶作用. 在表面活性剂浓度低于 CMC 时, 表面活性剂对菲的增溶顺序为 Triton X-100 > Tween80 > SDS > SDBS, 相应的  $K_{mn}$  值分别为  $2.76\times10^3$ 、 $9.91\times10^2$ 、 $5.23\times10^2$ 、 $4.46\times10^2$ , 而表面活性剂浓度高于 CMC 时, 表面活性剂对菲的增溶顺序与低浓度时的一致, 相应的  $K_{mc}$  分别为  $2.20\times10^4$ 、 $1.81\times10^4$ 、 $1.01\times10^4$ 、 $2.83\times10^3$ . 由此可见, 菲在水中表观溶解度的增大是由于其在表面活性剂胶体中的分配作用所致. 在表面活性剂浓度为  $4000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 菲在 Triton X-100、Tween80、SDS、SDBS 中的增溶倍数分别为: 67.5、59.6、13.1、8.8; 在表面活性剂浓度为  $8000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,  $S_w^*/S_w$  分别为 164、153、52、22. 两种非离子表面活性剂的增溶能力远大于两种阴离子表面活性剂对菲的增溶能力, 这与非离子表面活性剂具有较低的 CMC 有关.

表 2 表面活性剂对菲的增溶曲线的线性回归数据

Table 2 Linear regression data of solubility enhancement curve of phenanthrene by surfactants

| 表面活性剂        | 浓度小于 CMC |                     |                       |                                                | 浓度大于 CMC |                     |                       |                     |                                                |
|--------------|----------|---------------------|-----------------------|------------------------------------------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------------------|
|              | <i>a</i> | <i>b</i>            | <i>R</i> <sup>2</sup> | $K_{mn}$<br>/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | <i>a</i> | <i>b</i>            | <i>R</i> <sup>2</sup> | WSR                 | $K_{mc}$<br>/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |
| Triton X-100 | 0.436    | $2.76\times10^{-3}$ | 0.9850                | $2.76\times10^3$                               | -10.85   | $2.20\times10^{-2}$ | 0.994                 | $2.20\times10^{-2}$ | $2.20\times10^4$                               |
| Tween80      | 0.276    | $9.91\times10^{-4}$ | 0.980                 | $9.91\times10^2$                               | -8.86    | $1.81\times10^{-2}$ | 0.997                 | $1.81\times10^{-2}$ | $1.81\times10^4$                               |
| SDS          | 0.111    | $5.23\times10^{-4}$ | 0.982                 | $5.23\times10^2$                               | -27.47   | $1.01\times10^{-2}$ | 0.997                 | $1.01\times10^{-2}$ | $1.01\times10^4$                               |
| SDBS         | 0.093    | $4.46\times10^{-4}$ | 0.978                 | $4.46\times10^2$                               | -1.75    | $2.83\times10^{-3}$ | 0.982                 | $2.83\times10^{-3}$ | $2.83\times10^3$                               |

注: *a*、*b* 分别表示线性回归直线的截距和斜率.

2.3 表面活性剂 HLB 与增溶的关系

如图 3 所示, 非离子表面活性剂 Triton X-100 和 Tween80 的 HLB 分别为 13.5 和 15, 远小于阴离子表面活性剂 SDS 的 HLB 值 40, 对憎水性有机物菲具有较强的增溶能力. Doong 等<sup>[28]</sup>也认为, 与非离子表面活性剂相比, 阴离子表面活性剂对多环芳烃的增溶能力较小是由于具有较大的 HLB 值. 但对 SDBS 来说, 其 HLB 值在 4 种表面活性剂中最小, 但其对菲的增溶能力却最弱, 与经验规律不符.

杨坤<sup>[29]</sup>认为表面活性剂 HLB 越小, 其亲水性越弱, 导致用于增溶菲的表面活性剂水溶液的浓度过高, 从而降低其增溶能力. 另外, 由于 SDS 的 CMC 比 SDBS 的 CMC 大的多, 由此引起的  $\text{Na}^+$  浓度也较大,  $\text{Na}^+$  浓度越大, 使表面活性剂 SDS 形成胶束的聚集数越高 (SDS 聚集数为 89, SDBS 的聚集数为 87), 胶束体积变大, 可以使更多疏水有机物进入胶束内部<sup>[30]</sup>. 其次, SDBS 碳氢链中的苯环易极化, 将减小碳氢链的疏水性, 而且可能因为苯环的存在, 增加了位阻效应, 加之菲的极性很小, 增溶位置主要在胶束烃核内, 由于位阻的关系, 深入胶束内部较困难, 增溶量较小. 还有, SDBS 胶团形成过程中, 与磺酸根直接相连的苯环具有一定的负电荷, 应该表现为极性基, 这种极性基在烷基苯磺酸钠形成的胶团中, 苯环应该作为极性基伸展在胶团内核的外部, 由于极性增加, 因此渗透到胶团栅栏层中的水分子相应增加, 导致菲周围环境的极性增加, 增溶菲的能力相应降低<sup>[19]</sup>. 以上因素的综合效应, 引起 SDS 降低表面张力的能力和效率都比 SDBS 的大 (用  $\pi_{\text{CMC}}$  表示表面活性剂降低表面张力的能力, 其中 SDS 的  $\pi_{\text{CMC}}$  为 33.5,

SDBS 的  $\pi_{CMC}$  为 25.8; 用  $C_{cmc}/C_{2,\pi}$  表示降低表面张力的效率, SDS 的  $C_{cmc}/C_{2,\pi}$  为 2.96, SDBS 的为 1.33)<sup>[30]</sup>. 综上所述, 表面活性剂的 HLB 与其增溶能力为负相关的论述对结构相似的同系物可能有一定的参考价值, 但是要作为一个普遍规律应用于所有表面活性剂增溶能力的判断上还存在一定局限.

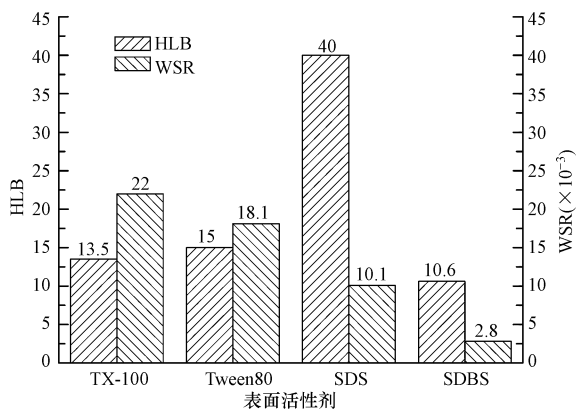


图3 表面活性剂对菲的增溶能力  
Fig.3 The solubilization enhancement capacity of surfactants for PHE

3 结论

- (1) 确定了表面活性剂 Triton X-100、Tween80、SDBS 和 SDS 对菲的增溶最佳增溶平衡时间分别为 12 h、12 h、24 h 和 36 h.
- (2) 表面活性剂单体和胶束对多环芳烃菲均具有增溶作用, 增溶能力大小的顺序在表面活性剂 CMC 上下一致, 即: Triton X-100 > Tween80 > SDS > SDBS, 但在 CMC 前后, 增溶能力不同. 当表面活性剂浓度大于 CMC 时, 可显著提高菲的表观溶解度.
- (3) 非离子表面活性剂的增溶能力强于阴离子表面活性剂.

参 考 文 献

[ 1 ] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005:397-441

[ 2 ] 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

[ 3 ] 赵保卫, 朱利中. 蓖麻油衍生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(2): 130-134

[ 4 ] Lee M, Kang H, Do W. Application of nonionic surfactant-enhanced *in situ* flushing to a diesel contaminated site[J]. Water Research, 2005, 39(1):139-146

[ 5 ] Park S K, Bielefeldt A R. Non-ionic surfactant flushing of pentachlorophenol from NAPL-contaminated soil[J]. Water Research, 2005, 39(7):1388-1396

[ 6 ] Siebielec G. Influence of zinc, lead and cadmium on selected biological indexes of agricultural soils in Tarnowskie Gory area[D]. Pulawy Ph. D. Dissertation, 2001

[ 7 ] 杨建刚, 刘翔, 余刚, 等. 非离子表面活性剂溶液中多环芳烃的溶解特性[J]. 环境科学, 2003(6):79-82

[ 8 ] Woo S H, Park J M, Rittmann B E. Evaluation of the interaction between biodegradation and sorption of phenanthrene in soil-slurry systems[J]. Biotechnology and bioengineering, 2001, 73(1):12-24

[ 9 ] Liu Z, Jacobson A M, Luthy R G. Biodegradation of naphthalene in aqueous nonionic surfactant systems[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(1):145

[ 10 ] Brion D, Pelletier E. Modelling PAHs adsorption and sequestration in freshwater and marine sediments[J]. Chemosphere, 2005, 61(6): 867-876

[ 11 ] Zhang Y, Maier W J, Miller R M. Effect of rhamnolipids on the dissolution, bioavailability, and biodegradation of phenanthrene[J]. Environ Sci Technol, 1997, 31(8):2211-2217

[ 12 ] Li J L, Chen B H. Solubilization of model polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(14):2825-2835

[ 13 ] 高士祥, 王边生. 环糊精对多环芳烃的增溶作用[J]. 环境化学, 1998, 17(4):365-369

- [14] 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
- [15] 吴应琴, 陈慧, 王永莉, 等. 腐殖酸对萘的增溶作用及其影响因素[J]. 环境化学, 2009(4):515-518
- [16] 王晓光, 巩宗强, 图影, 等. 应用脂肪酸甲酯淋洗去除土壤中多环芳烃[J]. 环境化学, 2010(1):12-17
- [17] 郭利果, 苏荣国, 梁生康, 等. 鼠李糖脂生物表面活性剂对多环芳烃的增溶作用[J]. 环境化学, 2009(4):510-514
- [18] Sigma-aldrich C. T9284 (Sigma-Aldrich) [EB/OL]. [2010-10-16]. <http://www.sigmaaldrich.com>
- [19] 史福强, 张路, 赵滩, 等. 支链烷基苯磺酸钠聚集性质的实验与理论研究[J]. 感光科学与光化学, 2005, 23(3):175-182
- [20] 陈宗洪, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001:238-255
- [21] 张玉, 武晓洁. 阴离子表面活性剂的 HLB 值与端基和碳原子数的关系[J]. 内蒙古石油化工, 2004, 30(4):4-5
- [22] 于涛, 刘先军, 丁伟, 等. 阴离子表面活性剂 HLB 值与结构关系的拓扑化学研究[J]. 日用化学工业, 2004, 34(6):341-343
- [23] Rosen M J. Surfactants and interfacial phenomena[M]. 2nd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2004:328-329
- [24] 赵剑曦, 叶向宇. 苯在 Pluronic F127 和 P123 胶束水溶液中的增溶动力学[J]. 物理化学学报, 2002, 18(4):377-380
- [25] 董亮, 戴树桂. 憎水性污染物在表面活性剂溶剂中的增溶动力学[J]. 环境科学, 2000, 21(1):27-31
- [26] Kile D E, Chiou C T. Water solubility enhancements of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration[J]. Environmental Science & Technology, 1989, 23(7):832-838
- [27] 赵保卫. 增效试剂对难降解有机物的增溶作用, 机理及生物可利用性影响[D]. 浙江大学博士学位论文, 2004
- [28] Doong R, Lei W. Solubilization and mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pseudomonas putida* in the presence of surfactant [J]. Journal of hazardous materials, 2003, 96(1):15-27
- [29] 杨坤. 表面活性剂对有机污染物在土壤/沉积物上吸附行为的调控机制[D]. 浙江大学博士学位论文, 2004
- [30] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984:156-158

## SOLUBILIZATION KINETICS OF PHENANTHRENE BY SURFACTANTS AND RELATION BETWEEN WEIGHT SOLUBILIZATION RATIO (WSR) AND HYDROPHILE-LIPOPHILE BALANCE VALUE (HLB) OF SURFACTANTS

ZHONG Jinkui<sup>1</sup>      ZHAO Baowei<sup>1,2</sup>      ZHU Kun<sup>1</sup>      MA Fengfeng<sup>1</sup>  
RAN Jingyuan<sup>1</sup>      Obemah David Nartey<sup>1</sup>

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University; 2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Lanzhou, 730070, China)

### ABSTRACT

Surfactants can increase the solubility of hydrophobic organic compounds (HOC). They have been applied to areas such as soil washing, flushing and treatment of non-aqueous phase liquids (NAPLs). In this research, the ability of two nonionic surfactants (Triton X-100 and Tween80) and two anionic surfactants (SDS and SDBS) for phenanthrene solubilization was investigated by comparing their solubilization kinetics using agitated experimental method. The relationship between the weight solubility ratio (WSR) and hydrophile-lipophile balance value (HLB) of surfactants was also examined. The optimal solubilizing duration of agitation in Triton X-100, Tween80, SDBS and SDS for phenanthrene was 12, 12, 24 and 36 h, respectively. Solubility enhancement for phenanthrene by the four surfactants was observed either above the critical micellar concentration (CMC) or below it. Especially, the solubilization was increased significantly above the CMC. The experimental data obtained also showed some differences among the four surfactants, and indicated that the solubilization ability of the nonionic surfactants was much higher than the anionic surfactants. The order of solubility enhancement was Triton X-100 > Tween80 > SDS > SDBS. This order is related to HLB of the surfactants.

**Keywords:** surfactant, polycyclic aromatic hydrocarbons, solubilization, kinetics, hydrophile-lipophile balance value.