表面活性剂和土壤有机质对莠去津在土壤上吸附的相互影响

李克斌[2],陈经涛[1],魏 红[3],王建军[1]

(1 陕西教育学院 化学系,陕西 西安 710061;2 西北大学 化学系,陕西 西安 710069;
3 西安理工大学 环境科学系,陕西 西安 7100481)

[摘 要] 【目的】研究不同类型表面活性剂对不同有机质含量土壤吸附莠去津行为的影响。【方法】采集 6 种有机质含量为 2.5～43 g/kg 的土壤,配制一系列含一定质量浓度莠去津和 6 个不同质量浓度十二烷基苯磺酸钠(DBS)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和吐温 20(Tween-20)溶液,用振荡平衡技术测定莠去津在水/土相间的表观分配系数 K_d^*(有表面活性剂)和 K_d(无表面活性剂),并计算吸附的表面活性对莠去津的分配系数。【结果】初始质量浓度为 0～3 353 mg/L 的 CTAB 能提高 6 种土壤对莠去津的吸附能力。当 CTAB 初始质量浓度为 1 677 mg/L 时,K_d^* 开始显著增加,CTAB 质量浓度为 3 353 mg/L 时,K_d^* 为 K_d 的 2～26 倍;DBS 和 Tween-20 对土壤吸附莠去津能力的影响因土壤有机质含量大小分为 2 类:(1)对有机质含量较高的土壤(28～43 g/kg),DBS 初始质量浓度为 0～400 mg/L 时,其对 K_d^* 影响不大,DBS 质量浓度为 500 mg/L 时,K_d^* 减小为 K_d 的 37%～75%;Tween-20 初始质量浓度为 0～10 100 mg/L 时,K_d^* 随 Tween-20 质量浓度的增加先增大后减小,然后稍有增加,K_d^* 为 K_d 的 0.95～1.5 倍;(2)对有机质含量较低的土壤(2.5～4.0 g/kg),DBS 初始质量浓度为 0～500 mg/L 时,K_d^* 和 K_d 均随 DBS 质量浓度的增加先增大后减小,且 $K_d^* > K_d$;Tween-20 初始质量浓度为 0～990 mg/L 时,K_d^* 随 Tween-20 质量浓度的增加而增大,当 TWeen-20 的质量浓度大于 990 mg/L 时开始明显增加,TWeen-20 质量浓度为 10 100 mg/L 时,K_d^* 约为 K_d 的 3 倍。【结论】除表面活性剂种类和质量浓度外,土壤有机质含量对莠去津在土壤中的吸附行为也有影响;吸附的表面活性剂对莠去津增溶能力的大小顺序为:CTAB>DBS>Tween-20。

[关键词] 莠去津;吐温 20;烷基苯磺酸钠;十六烷基三甲基溴化铵

[中图分类号] X13 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2008)08-0119-06

Mutual effect of surfactant and soil organic matters on the absorption of atrazine in soils

LI Ke-bin[2], CHEN Jing-tao[1], WEI Hong[3], Wang Jian-jun[1]

(1 *Department of Chemistry, Shaanxi Institute of Education, Xi'an, Shaanxi* 710061, *China*;
2 *Department of Chemistry, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710069, *China*;
3 *Department of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to examine the effect of the surfactant nature and concentration on the absorption of atrazine in various soils. 【Method】 Six soils that contain 2.5 to 43 mg/kg of soil organic matter (SOM) contents were used. The surfactants tested included cationic, anionic and nonionic types, with concentrations up to several times the critical micelle concentration (CMC). The

* [收稿日期] 2007-09-05
[基金项目] 陕西省科技计划项目(2004K03-G3);陕西省教育厅专项科研计划项目(04JK234)
[作者简介] 李克斌(1968－),男,陕西岐山人,副教授,博士,主要从事典型有机污染物的环境化学行为及其治理技术研究。Email: kebinli@sohu.com
[通讯作者] 陈经涛(1955－),男,陕西富平人,教授,主要从不无机及应用化学研究。E-mail:chenjingtao118@163.com

batch equilibrium technique was employed to determine the distribution coefficients of atrazine in solid-water mixtures in the presence (K_d^*) and absence of surfactants (K_d). A three-phase model was employed to estimate the partition coefficients of atrazine to the sorbed surfactants.【Result】 The obtained results showed that atrazine adsorption was enhanced in all soils in the presence of cationic surfactant (cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB), especially at the concentrations above 1 677 mg/L(5 CMC). When CTAB was used with an initial concentration of 3 353 mg/L, the K_d values were increased by 2− to 26−fold. The effects of anionic surfactant (sodium dodecylbenzene sulfonate, DBS) and nonionic surfactant (Tween-20) on the atrazine adsorption behaviors could be classified into two groups with regard to soil organic matter contents. For the higher organic matter soils (28−43 g/kg OM), addition of DBS at concentration below 400 mg/L had a minor effect on K_d^*, whereas addition of 500 mg/L DBS reduced K_d^* to 37%−75% of the corresponding K_d values; Addition of Tween-20 at concentration below 10 100 mg/L resulted in a marginal change of the K_d^* values, and the ratios of K_d^* to K_d varied in the range of 0.95 to 1.5. In contrast, for low organic matter soils (2.5−4.0 g/kg OM), K_d^* values initially increased with increasing DBS concentration before decreasing at higher concentration, but the K_d^* values were always larger than those of corresponding K_d over the whole concentration range examined; Addition of Tween-20 appreciably increased K_d^* values at concentration below 990 mg/L, while 10 100 mg/L Tween-20 could enhance K_d values by 3 times.【Conclusion】 Besides surfactant type and concentration, soil organic mater contents played an important role in the effect of surfactants on atrazine adsorption in soils. The solubilization of the sorbed surfactants to atrazine decreased in the order of CTAB>DBS>Tween-20.

Key words: artazime; tween-20; sodium dodecylbenzene sulfonate; cetyltrimethyl ammonium bromide

表面活性剂是一类同时具有亲水和亲油特性的有机物质,在工、农业生产中应用广泛。在农业生产中,表面活性剂常用作农药助剂、土壤润湿剂、调节剂等。另外,人们的日常生活用品,如清洁剂、护理产品中也含有表面活性剂。大量使用的表面活性剂会通过多种途径进入水体、土壤。据报道,我国太湖地区土壤中阴离子表面活性剂 SAS 含量达 2～10 mg/kg[1]。

虽然表面活性剂本身对动、植物无较大毒性,但分子结构上的双亲性特点使其具有降低水/土界面张力、增溶疏水有机物等性能[2]。因此,当表面活性剂与其他污染物在水/土体系中共存时,其能极大地影响其他有机污染物的环境行为,如吸附/解吸[3]、微生物降解[4]、水解[5]等。水/土壤体系中表面活性剂/污染物的相互作用十分复杂,受到多种因素(如土壤溶液中表面活性剂的浓度、表面活性剂的胶束浓度、表面活性剂与污染物的土壤吸附特性、污染物在水中的溶解度及土壤性质等)的影响[3]。目前,对水/土体系中污染物/表面活性剂的研究,一般多是针对某一类型的表面活性剂或一种土壤开展的,污染物也多为非极性或弱极性有机物[6-11],而对不同类型表面活性对污染物环境行为影响的差异性报道较少[12],土壤性质对污染物/表面活性剂作用行为的影响则更是鲜见报道。近年来,一些研究表明,土壤质地在表面活性剂/有机污染物相互作用过程中扮演着较为重要的角色[7,10,12-14]。所以,系统研究不同类型的表面活性剂对污染物在土壤上的吸附/解吸行为的影响及土壤性质对污染物/表面活性剂相互作用的影响,对于准确预测土壤中污染物的环境归宿及其治理均有极其重要的意义。

莠去津是一种曾在世界各国广泛使用的除草剂,其 $pK_a=1.7$,$K_{ow}=219$,在土壤 pH 范围内通常以分子态存在。莠去津在土壤、沉积物等上的吸附行为及机理已有许多报道[15],但表面活性剂对不同土壤吸附莠去津行为的影响还鲜见报道。为此,本研究选择该农药为污染指示物,研究了表面活性剂性质、浓度以及土壤性质对莠去津在土壤中吸附行为的影响,以期为开展农药和表面活性剂共存时农药对土壤污染的风险评价及土壤修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤和试剂

土样取自浙江省北部,风干过筛(孔径为 2.0 mm)后待用,土壤类别及部分理化性质见表 1。莠去津(纯度≥99%)购自美国 Chemical Service;阳离

子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB,纯度≥99%)和阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(DBS,纯度≥83%)购自上海化学试剂公司;非离子表面活性剂 Tween-20,CP 级,由温州明清试剂厂生产。

表 1　供试土壤的理化性质

Table 1　Physical and chemical properties of soils

土壤编号 No. of soil	采样地 Sampling site	土壤类别 Soil type	有机质/(g·kg^{-1}) OM	pH (V(soil)∶V(H_2O)=1∶1)	粘粒/(g·kg^{-1}) Clay	沙粒/(g·kg^{-1}) Sand	粉粒/(g·kg^{-1}) Silt	阳离子交换容量/(cmol·kg^{-1}) CEC
1	余杭 Yuhang	水稻土 Paddy soil	40.0	7.67	378	61	482	30.0
2	临安 Lin'an	红壤 Red soil	4.0	4.14	493	156	310	15.7
3	安吉 Anji	水稻土 Paddy soil	43.0	7.36	151	344	442	17.8
4	安吉 Anji	水稻土 Paddy soil	28.0	4.79	254	293	408	6.4
5	德清 Deqing	黄壤 Yellow soil	2.5.0	5.23	253	371	326	34.2
6	德清 Deqing	水稻土 Paddy soil	40.0	4.9	289	113	535	12.4

1.2　平衡吸附试验

莠去津在土壤/水溶液间的表观分配系数 K_d^*(有表面活性剂)和 K_d(无表面活性剂时的分配系数)测定过程大体如下:称5.00 g 土壤分虽置于 5 支具塞离心管中,然后在其中分别加入 10.00 mL 含不同浓度表面活性剂、0.01 mol/L $CaCl_2$ 及一定浓度莠去津的混合液,密封后在(20±2) ℃下机械振荡 24 h,12 000 r/min离心分离 30 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜后用 HPLC (Shimadzu LC-10Advp) 分析莠去津浓度,每个试验重复 3 次。表面活性剂 DBS、CTAB、Tween-20 的质量浓度分别为:0.0,100.0,200.0,300.0,400.0,500.0 mg/L,0.0,6.7,33.5,335.3,1 676.5,3 352.9 mg/L 及 0.0,50.0,99.0,990.0,5 100.0,10 100.0 mg/L。以 DBS,CTABT 和 Tween-20 为表面活性剂进行试验时,莠去津的质量浓度分别为 15.5,8.5,15.5 mg/L。色谱分析条件为:色谱柱为 10 μm,250 mm×4.6 mm (I.D.)的 YWG C18(大连依利特公司生产);流动相为甲醇/水(H_3PO_4 调 pH = 2.8,V(甲醇)∶V(水)=66∶34),流速为 0.8 mL/min;检测波长为 218 nm。

K_d^*、K_d 的计算公式如下:

$$K_d^*(K_d)=\frac{V\times(C_0-C_e)}{m\times C_0}。$$

式中:K_d^*、K_d 分别为有、无表面活性剂时,农药在土壤/水相间的表观分配系数(L/kg);V 为溶液体积(L);C_0,C_e 分别是吸附前、后溶液中的农药质量浓度(mg/L);m 为土壤质量(kg)。

2　结果与分析

2.1　不同质量浓度 DBS 对莠去津 K_d^* 的影响

由图 1 可见,2 号与 5 号土壤中莠去津的 K_d^* 随 DBS 初始质量浓度变化而变化的趋势相似,在 DBS 初始质量浓度为 0～300 mg/L 时,K_d^* 逐渐增大,之后略有减小;在本试验设置的质量浓度范围内,DBS 的存在提高了 2,5 号土壤对莠去津的吸附能力,其 K_d^* 分别为 K_d 的 1～2.6 和 1.2～1.6 倍。1 号土壤在 DBS 初始浓度质量为 0～400 mg/L 时,K_d^* 略有增加,K_d^*/K_d 约为 1.3,之后随 DBS 质量浓度增加,K_d^* 降低。在 DBS 初始质量浓度为 0～400 mg/L 时,莠去津在 3,4 和 6 号土壤/表面活性剂溶液中的 K_d^* 随 DBS 质量浓度的增大变化不大,且与 K_d 无显著差异($P>0.05$)。当 DBS 初始质量浓度为 500 mg/L 时,莠去津在 1,3,4,6 号土壤/表面活性剂溶液中的 K_d^* 明显减小,且小于 K_d,K_d^*/K_d分别为 0.52,0.37,0.58 和 0.75,表明 500 mg/L DBS 易使莠去津发生解吸。

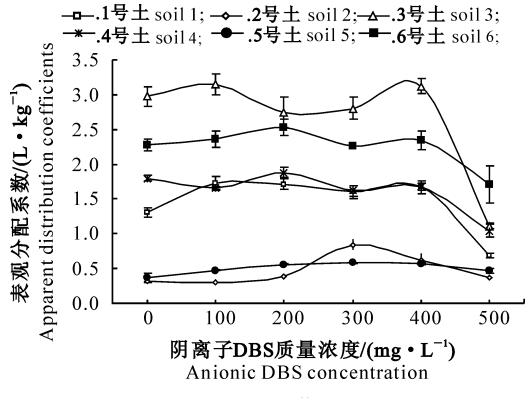

图 1　DBS 用量对土壤吸附莠去津能力的影响

Fig. 1　Effects of adding DBS on adsorption of atraine in soils

结合土壤性质(表 1)可见,DBS 对土壤吸附莠去津行为的影响与土壤有机质含量有一定关系。在有机质含量较低的土壤中,添加 0～500 mg/L DBS 能提高土壤对莠去津的吸附;在有机质含量较高的土壤中,添加 0～400 mg/L DBS,土壤对莠去津的吸附能力变化不大(1 号略有提高),但添加 500

mg/L的 DBS 降低了土壤对莠去津的吸附。2,5 号土壤有机质含量较低(表 1),溶液中的低浓度 DBS 以单体存在,对莠去津的增溶能力不明显;随 DBS 质量浓度的增加,吸附在矿物质上的 DBS 提高了土壤有机质的碳含量,增加了土壤对莠去津的吸附。另外,表面活性剂具有提高土壤分散程度,增加土壤表面积和可接近的吸附点,增强土壤吸附能力的作用[16],当 DBS 质量浓度较高时,溶液中可能有胶束形成,这时吸附在矿物表面和存在于溶液中的表面活性剂胶束对莠去津的增溶作用相互竞争,导致 K_d^* 随 DBS 质量浓度的增加而略有减小。1,3,4,6 号土壤有机质含量较高,DBS 可能主要吸附在有机质上[17]。虽然添加低质量浓度的 DBS 能提高土壤的有机碳含量,增强土壤对莠去津的吸附能力,但由于分配进入到有机质中的 DBS 不能形成胶束[18],而单体 DBS 对莠去津的吸附能力较弱,所以 K_d^* 随 DBS 质量浓度的增加变化不大;当 DBS 质量浓度较高时,溶液中的 DBS 可能形成胶束,其对莠去津增溶作用增大,导致 $K_d^* < K_d$。

2.2 不同质量浓度 CTAB 对莠去津 K_d^* 的影响

由图 2 可见,CTAB 初始质量浓度为 1 677 mg/L(5CMC)时,1～6 号土壤中莠去津的 K_d^* 均明显增加($P<0.05$),K_d^* 分别为 K_d 的 1.3,13.1,1.3,1.8,3.3 和 1.9 倍;2 号土壤中的 K_d^* 出现明显增加时 CTAB 的最小质量浓度比 5 号土壤低,与它们对 CTAB 的吸附量大小关系相反[17];6 种土壤中莠去津的 K_d 为 0.31～2.78,添加 3 353 mg/L CTAB(10 CMC)时的 K_d^*(为 4.4～8.2)是 K_d 的 2～26 倍,不同土壤间 K_d^* 的差别缩小,表明 CTAB 对莠去津有较强的吸附能力。

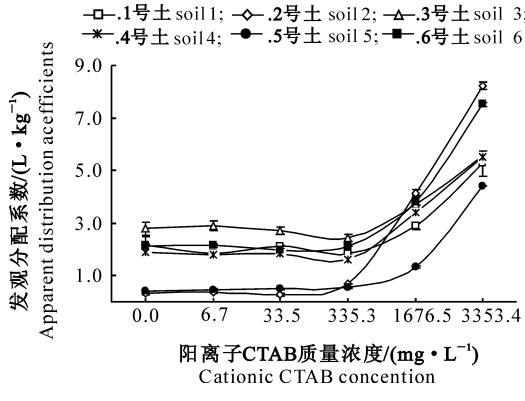

图 2 CTAB 用量对土壤吸附莠去津能力的影响

Fig. 2 Effects of adding CTAB on adsorption of atrazine in soils

Brownawell 等[19]研究发现,在许多吸附剂表面,表面活性剂在其单层覆盖率为 1%～10%时形成胶束。初始质量浓度为 1 677 mg/L 的 CTAB 被土壤完全吸附时,CTAB 约为土壤阳离子交换量(CEC)的 2.7%～7.5%。据此推测,本试验 K_d^* 出现明显增加时,吸附的 CTAB 可能形成半胶束或不完全片状双层胶束,其对莠去津的增溶能力大于溶液中的 CTAB 单体,因此,土壤对莠去津的吸附能力增强;低质量浓度的 CTAB 对莠去津在 1,3,4 和 6 号土壤上的 K_d^* 影响不明显,可能与 4 种土壤有机质含量较高有关。

2.3 不同质量浓度 Twenn-20 对莠去津 K_d^* 的影响

由图 3 可见,Tween-20 对莠去津在土壤上吸附行为的影响分为 2 类:(1)对有机质含量较低的 2 和 5 号土壤,K_d^* 随 Tween-20 质量浓度的增加而增大,表明 Tween-20 增强了土壤对莠去津的吸附。当 Tween-20 初始质量浓度为 10 100 mg/L 时,2,5 号土壤的 K_d^* 增加最为显著,分别为 K_d 的 3 和 3.5 倍;(2)对有机质含量较高的 1,3,4 和 6 号土壤,初始质量浓度为 50 mg/L 的 Tween-20 可提高土壤对莠去津的吸附能力,K_d^* 分别为 K_d 的 1.5,1.3,1.2,1.2 倍;之后随着 Tween-20 质量浓度的增加 K_d^* 先减小后增大,当 Tween-20 质量浓度为 10 100 mg/L 时,莠去津在 1,3,4,6 号土壤中的 K_d^* 分别为 K_d 的 1.2,1.0,1.4,1.1 倍,结果与 Iglesias-Jiménz 等[12]的研究结果类似。

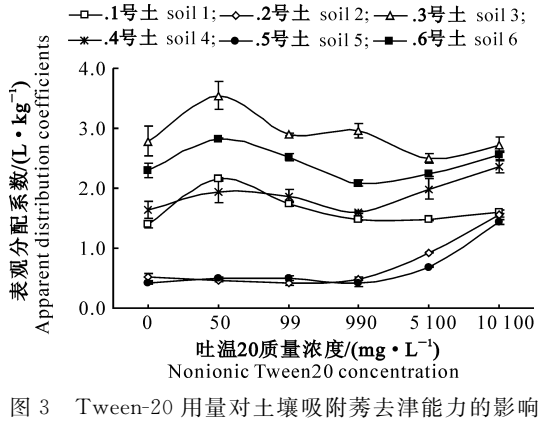

图 3 Tween-20 用量对土壤吸附莠去津能力的影响

Fig. 3 Effects of adding Tween-20 on adsorption of atrazine in soils

非离子表面活性剂在土壤上的吸附机理有 2 种,一种是表面活性剂疏水链通过分配作用吸附在土壤有机质中;另一种是在有机质含量低的土壤上非离子表面活性剂通过氢键、质子化 EOH^+ 与带负电的水合铝硅酸盐发生静电吸附[17]。另外,已有的

研究结果表明,有机质是土壤吸附莠去津的重要成分;土壤黏粒中的硅酸盐矿对莠去津也有中等强度的亲和力[15]。因此,Tween-20 对土壤吸附莠去津行为的影响取决于两方面因素:(1)Tween-20 提高土壤分散程度,增加土壤有机碳含量,增强吸附;(2)Tween-20 与莠去津竞争吸附点,提高莠去津在水中溶解度,减小吸附。Tween-20 初始质量浓度为 0～990 mg/L 时,以上两方面因素在 2,5 号土壤吸附莠去津过程中的作用可能相当,所以其 K_d^* 随 Tween-20 质量浓度的增加变化不大,分别为 0.42～0.48 和 0.40～0.51,且与 K_d(分别为 0.52 和 0.42)相当。当 Tween-20 初始质量浓度大于 990 mg/L 时,吸附在 2,5 号土壤上的表面活性剂可能形成胶束,由于胶束对莠去津的增溶作用更强,所以土壤对莠去津的吸附增加。1,3,4 和 6 号土壤有机质含量较高,Tween-20 容易分配到土壤有机质中,不易在土壤表面形成胶束[18]。当 Tween-20 初始质量浓度为 50 mg/L 时,土壤吸附能力的提高可能主要是由于土壤分散程度的提高增加了表面可接近的吸附点数目。Tween-20 质量浓度大于 50 mg/L 时,溶液中可能出现了表面活性剂胶束,所以 K_d^* 减小;之后随 Tween-20 质量浓度的增加有机质对 Tween-20 的吸附趋于饱和,Tween-20 在土壤表面可能形成胶束,使 K_d^* 略有增加。

2.4　表面活性剂对土壤中莠去津移动性的影响

土壤中农药移动性大小可用滞留因子 R_f 来衡量,其与表观分配系数存在以下关系[6,20]:

$$R_f=1+K_d^*\cdot\rho\cdot(1-\eta)/\eta。$$

式中:ρ 和 η 分别为土壤密度(g/mL)和孔隙率。R_f 值越大农药的移动性就越低,根据 $R_f>100$,$100>R_f>10$,$R_f<10$ 可依次把农药分为低移动性、中等移动性和易移动 3 类[20]。由上式可推知,500 mg/L DBS 能使莠去津在 1,3,4,6 号土壤中的 R_f 减小,移动性增加,但对莠去津在 2,5 号土壤中移动性的影响不大;大于 335.3 mg/L 的 CTAB 能使莠去津在 1～6 号土壤中的 R_f 增加,移动性降低;50 mg/L Tween-20 能使莠去津在有机质含量高的 1,3,4,6 号土壤中的 R_f 增大,移动性降低,但对莠去津在有机质含量低的 2,5 号土壤中的 R_f 影响不大,移动性几乎不受影响;10 100 mg/L Tween-20 能明显提高莠去津在 2,4,5 号土壤中的 R_f,减小农药在其中的移动性。

2.5　表面活性剂对土壤吸附莠去津能力的影响

表面活性剂对土壤吸附农药能力的提高可用农药在表面活性剂和水溶液间的分配系数(K_{sc})来衡量。对含有表面活性剂的土壤/农药悬浮体系,农药在表面活性剂水溶液/土壤间的表观分配系数 K_d^* 可表示为[18]:

$$K_d^*=\frac{f_{oc}K_{oc}+f_{sc}K_{sc}}{1+X_{mn}K_{mn}+X_{mc}K_{mc}}。$$

式中:f_{oc},f_{sc} 分别为土壤有机碳和吸附的表面活性剂有机碳的土壤质量分率;K_{oc},K_{sc} 分别为土壤有机碳和表面活性剂有机碳含量标化的农药在土壤有机质与水及吸附的表面活性剂与水间的分配系数;K_{mn},K_{mc} 分别是农药在表面活性剂单体与水及胶束与水间的分配系数;X_{mn},X_{mc} 分别是溶液中表面活性剂单体和胶束的质量浓度。

由于 5 号土壤有机质含量较低,表面活性剂对其吸附莠去津行为的影响显著,所以 5 号土壤中莠去津的 K_d^* 可用来计算 K_{sc}。另外,溶液中表面活性剂单体对农药的分配系数一般远小于胶束的分配系数[21],由上式可得:

$$K_d^*-K_d=\frac{f_{oc}K_{oc}+f_{sc}K_{sc}}{1+X_{mc}K_{mc}}\cdot f_{oc}K_{oc}。$$

根据表面活性剂在土壤上的吸附结果[17],计算 DBS、CTAB、Tween-20 在 5 号土壤上的吸附量、平衡浓度,结果表明,本试验 $X_{mc}=0$。于是上式可进一步简化为:

$$K_d^*-K_d=f_{sc}K_{sc}。$$

用此式来计算莠去津在吸附的 DBS、CTAB 和 Tween-20 与水溶液间的分配系数 lg K_{sc},并用 Nayyar 等[22]的经验公式计算莠去津在吸附的 DBS 与水溶液间的分配系数 lg K_{sc},用 Valsaraj 等[23]的经验公式计算莠去津在 DBS 胶束与水间的分配系数 lg K_{mc},其结果见表 2。

表 2　莠去津在表面活性剂胶束及吸附的表面活性剂中的分配系数

Table 2　Atrazine partition coefficients to surfactant micelles (K_{mc}) and sorbed surfactant (K_{sc})

表面活性剂 Surfactants	lg K_{sc}		估算的 lg K_{mc} Estimated
	测定值 Determined	估算值 Estimated	
DBS	2.4	2.6	2.0
CTAB	3.0	—	—
Tween-20	1.3	—	—

注:"—". 表示未得到.

Note:"—" means not available

由表 2 可知,莠去津在吸附的 DBS 与水溶液间的分配系数 K_{sc} 的测定结果与 Nayyar 等[22]经验公式的计算结果符合较好;吸附的 DBS 对莠去津的增

溶能力较溶液中 DBS 胶束的强，K_{sc} 约为 2.5 K_{mc}。Liu 等[24]报道，莠去津的 lg K_{oc} 大约为 2.2，将此值与表 2 中测定的 lg K_{sc} 进行比较，可见吸附的 CTAB 对莠去津的吸附能力较土壤有机质强，吸附的 DBS 对莠去津的吸附能力与土壤有机质相当，吸附的 Tween-20 对莠去津的吸附能力较土壤有机质弱。这与 DBS 和 Tween-20 在一定质量浓度范围内对莠去津在高有机质含量土壤中的 K_d^* 影响不明显，而 CTAB 能明显提高 K_d^* 值，且在较高用量时减小了不同土壤中 K_d^* 值的差别等结果一致。

3 结 论

1)初始质量浓度为 500 mg/L 的 DBS 能使有机质含量相对较高的土壤对莠去津的吸附能力减弱；初始质量浓度为 1 677～3 353 mg/L 的 CTAB 能明显提高 6 种土壤对莠去津的吸附能力；初始质量浓度为 990～10 100 mg/L 的 Tween-20 能较大程度地提高有机质含量较低土壤对莠去津的吸附能力，而对有机质含量较高的土壤吸附莠去津能力的提高作用较小。

2)吸附的表面活性剂对莠去津增溶能力的大小为：CTAB＞DBS＞Tween-20。

3)阴离子表面活性剂 DBS，特别是当其质量浓度较高时，会增加莠去津在有机质含量较高土壤中的移动性和其对水体的危害；相反，阳离子表面活性剂 CTAB 能减小莠去津在土壤中的移动性及其对水体的危害。

4)根据具体目的(固定还是清洗污染物)选择表面活性剂时，应同时考虑表面活性剂类型、质量浓度以及土壤组成对污染物吸附/解吸行为的影响。

[参考文献]

[1] 潘根兴，韩永镜，诸清河. 太湖地区土壤环境中 SAS 的分别和降解特点 [J]. 应用生态学报，2002，13(2)：171-174.
Pan G X，Han Y J，Zhu Q H. Distribution and degradation of SAS in soil environments in the Taihu Lake region [J]. Chin J Appl Ecol，2002，13(2)：171-174. (in Chinese)

[2] Rao P H，He M，Yang X. Effect of an anionic surfactant on hydraulic conductivities of sodium- and calcium-saturated soils [J]. Pedosphere，2006，16(5)：673-680.

[3] Haigh S D. A review of the interaction of surfactants with organic contaminants in soil [J]. Sci Total Environ，1996，185：161-170.

[4] Li K B，Chen J T，Wang X F，et al. Degradation of herbicides atrazine and bentazone applied alone and in combination in soils [J]. Pedosphere，2008，18(2)：265-272.

[5] 戴树桂，承雪琨，刘广良，等. SDBS 及腐殖酸对涕灭威及其氧化产物水解的影响 [J]. 中国环境科学，2002，22(3)：193-197.
Dai S G，Cheng X K，Liu G L，et al. The influences of sodium dodecylbenzenesulfonate and humus on hydrolysis of aldicarb and its oxidation products [J]. China Environ Sci，2002，22(3)：193-197. (in Chinese)

[6] Hari A C，Paruchuri R A，Sabatini D D，et al. Effects of pH and cationic and nonionic surfactants on the adsorption of pharmaceuticals to a natural aquifer material [J]. Environ Sci Technol，2005，39(8)：2592-2598.

[7] Rodriguez-Cruz M S，Sanchez-Martin M J，Sanchez-Camazano M. Enhance desorption of herbicides sorbed on soils by addition of Triton X-100 [J]. J Environ Qual，2004，33(3)：920-929.

[8] Zhou W J，Zhu L Z. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil-water system containing a nonionic surfactant [J]. Chemosphere，2005，60：1237-1245.

[9] 周文军，杨瑞强，姜 梅，等. 表面活性剂对 2，4-二氯苯酚在黄土中吸附行为的影响 [J]. 中国环境科学，2002，22(4)：316-319.
Zhou W J，Yiang R Q，Jiang M，et al. Effect of surfactant on sorption behavior of 2，4-dichlorophenol in loess soils [J]. China Environ Sci，2002，22(4)：316-319. (in Chinese)

[10] Lee J F，Liao P M，Kuo C C，et al. Influence of a nonionic surfactant (Triton X-100) on contaminant distribution between water and several soil solids [J]. J Colloid Interface Sci，2000，229：445-452.

[11] Liao M，Xie X M. Adsorption of metsulfuron and bensulfuron on a cationicsurfactant-modified paddy soil [J]. Pedosphere，2007，17(1)：101-108.

[12] Iglesias-Jiménez E，Sánchez-Martín M J，Sánchez- Camazano M. Pesticide adsorption in a soil-water system in the presence of surfactants [J]. Chemosphere，1996，32(9)：1771-1782.

[13] Lee D H，Cody R D，Kim D J，et al. Effect of soil texture on surfactant-based remediation of hydrophobic organic- contaminated soil [J]. Environ Int，2002，27：681-688.

[14] Zhou W J，Zhu L Z. Efficiency of surfactant-enhanced desorption for contaminated soils depending on the component characteristics of soil-surfactant-PAHs system [J]. Environ Pollut，2007，147(1)：66-73.

[15] 李克斌，魏 红，陈经涛，等. 灭草松和莠去津在土壤中的竞争吸附[J]. 环境科学学报，2006，26(7)：1164-1171.
Li K B，Wei H，Chen J T，et al. Competitive adsorption between bentazone and atrazine in soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2006，26(7)：1164-1171. (in Chinese)

[16] Huggenberger F，Letey J，Farmer W J. Effect of two nonionic surfactants on adsorption and mobility of selected pesticides in a soil system [J]. Soil Sci Soc Amer Proc，1973，37：215-219.

(下转第 131 页)