

北京土壤对甲苯和萘的吸附及影响因素分析

张景环¹, 曾溅辉²

(1. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102200; 2. 中国石油大学(北京)石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200)

摘要: 通过静态吸附实验, 研究了北京地区土壤对甲苯和萘的吸附行为, 考察了温度和表面活性剂对甲苯和萘吸附的影响。结果表明, 尽管 7 种土壤对甲苯和萘的吸附能力差别较大, 但其吸附等温线均很好的符合 Freundlich 吸附模式; 同一土壤中, 萘的吸附量大于甲苯的吸附量。温度升高不利于甲苯和萘在土壤中的吸附。十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)均利于甲苯和萘在土壤表面的解吸, CTAB 和 SDBS 对甲苯和萘的解吸率最高分别可达 27.5%、12.1% 和 64.3%、48.8%, 说明 SDBS 的解吸效果更好。甲苯和萘的吸附量随 SDBS 浓度的升高而降低; 当 CTAB 的浓度小于临界胶束浓度 CMC 时, 甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而升高; 当 CTAB 的浓度等于或大于 CMC 时, 甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而降低。

关键词: 北京土壤; 甲苯; 萘; 吸附等温线; 表面活性剂

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1889-06

Adsorption of Toluene and Naphthalene on Beijing Soils and Its Influence Factor

ZHANG Jing-huan¹, ZENG Jiar-hui²

(1. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200, China; 2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200, China)

Abstract: Static adsorption experiments were carried out to investigate the adsorption of toluene and naphthalene on Beijing soils, and to determine the influence of temperature and surfactants on adsorption. Although the affinity of petroleum hydrocarbons for seven soils is different, the adsorption isotherms of toluene and naphthalene on seven soils are well described by the Freundlich type. The adsorbed amount of naphthalene is higher than that of toluene on the same soil. High temperature doesn't benefit adsorption. Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) and sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) both have a positive effect on desorption of toluene and naphthalene from soil. The desorption rate of toluene and naphthalene in the presence of CTAB and SDBS is 27.5%、12.1% and 64.3%、48.8%, respectively, which show that SDBS plays a much more important role in desorption than CTAB. The adsorbed quantities of toluene and naphthalene decrease with increasing SDBS concentration. When CTAB concentration is lower than the critical micelle concentration (CMC), adsorption increases with increasing CTAB concentration; When CTAB concentration is equal to or higher than CMC, adsorption decreases with increasing CTAB concentration.

Key words: Beijing soil; toluene; naphthalene; adsorption isotherm; surfactant

近年来,在北京发生的加油站渗漏事故对该地区的土壤造成了严重污染。石油中芳香烃的毒性最大,尤其是多环芳烃毒性更大,石油进入土壤后,会不断的被土壤矿物和有机质所吸附,这必然影响石油烃在土壤中的迁移与分布。排入土壤中的石油烃,会破坏土壤结构,影响土壤通透性,损害植物的根部,最终导致植物死亡,也会通过呼吸、皮肤接触、饮食摄入等方式进入人体,造成人体损伤^[1]。

目前,国内外有关菲在土壤和沉积物中的吸附报道较多^[2~8],而有关其他石油烃的吸附研究却较少。汽油中的芳香烃主要是甲苯和萘,柴油中的芳香烃主要是萘,1-乙基萘,2,5-二乙基萘,菲,蒽和芘^[9]。鉴于此,本研究以北京土壤、甲苯和萘为研究对象,通过静态吸附实验确定北京土壤对甲苯和萘的吸附等温线,并分析温度和表面活性剂对吸附的

影响,为北京地区加油站污染土壤的修复提供理论依据,并有助于选择合适的表面活性剂来修复石油污染土壤。

1 材料与方法

1.1 土样的采集与分析

实验所用 7 种土样采自北京昌平区 0~20cm 表层土壤,样品经自然风干、研碎及 2mm 筛筛分,放入烘箱(100℃)烘干后储存于广口瓶中备用。按中国土壤学会农业化学专业委员会制定的方法^[10],测定了土壤的 pH 值(水土质量比为 2.5:1,电位法),有

收稿日期: 2005-09-23; 修订日期: 2005-11-27

基金项目: 中国地质大学(北京)水资源与环境工程重点实验室项目(G1999045706)

作者简介: 张景环(1982~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤及地下水的石油污染, E-mail: vickyhuan@163.com

表 1 土样的机械组成及主要性质¹⁾

Table 1 Mechanical composition and major characteristics of soil samples

样品	土壤质地	pH 值	有机质含量/ %	颗粒组成/ %				Total/ %
				> 2mm	2~ 0.01mm	0.01~ 0.001mm	< 0.001mm	
土样 1	重壤土	8.12	0.46	0.0	51.2	36.1	12.7	100.0
土样 2	轻壤土	8.05	5.26	20.7	53.5	12.8	12.9	99.9
土样 3	中壤土	8.33	1.09	12.0	50.4	18.6	19.0	100.0
土样 4	砂壤土	8.45	1.30	36.4	45.8	9.9	7.7	99.8
土样 5	轻壤土	8.24	1.07	5.8	64.4	15.8	14.0	100.0
土样 6	轻粘土	8.28	4.05	0.0	48.2	27.5	24.3	100.0
土样 7	紧砂土	8.14	0.29	0.0	90.5	0.60	8.90	100.0

1) 中国农科院土壤肥料研究所土壤室测定

机质含量(重铬酸钾氧化外加热法)和土壤颗粒组成(吸管法),依据前苏联制定标准分析了土壤质地,见表 1.

1.2 储备液的配制

在 500mL 去离子水中用微量进样器加入 250μL 甲苯,充分搅拌,得到 433.5 mg•L⁻¹的甲苯储备液.准确称取 10mg 萘,加入到 1 000mL

0.01 mol•L⁻¹的 CaCl₂ 溶液中,充分搅拌,得到 10 mg•L⁻¹的萘储备液,用 0.01 mol•L⁻¹的 CaCl₂ 溶液将萘储备液稀释到一系列不同的浓度.

准确称取 1.600g SDBS 和 0.536g CTAB,分别加入到 1 000 mL 去离子水中,充分搅拌,得到浓度分别为 1 600 mg•L⁻¹和 536 mg•L⁻¹的 SDBS 和 CTAB 储备液.2 种表面活性剂的性质见表 2.

表 2 2 种表面活性剂的性质

Table 2 Characteristics of two surfactants

名称	缩写	类型	化学分子式	分子量	临界胶束浓度 CMC/ mg•L ⁻¹
十二烷基苯磺酸钠	SDBS	阴离子	C ₁₂ H ₂₅ C ₆ H ₅ SO ₃ ⁻ Na ⁺	348.48	1 000
十六烷基三甲基溴化铵	CTAB	阳离子	CH ₃ (CH ₂) ₁₅ (CH ₃) ₃ ⁺ Br ⁻	364.45	335

1.3 实验方法

1.3.1 不同土壤对甲苯和萘吸附等温线的测定

选用 7 种土壤,分别称取 0.25g 置于 50mL 具塞锥形瓶中,加入一系列不同浓度的甲苯或萘溶液 25mL,放入 HZQ-C 型恒温(25℃)振荡器(振荡频率为 140 r/min)中振荡 24h(预实验表明 24h 内吸附达到平衡),以 4 000 r/min 的速度在 LD4-2A 型离心机中离心 45min,取上层清液用正己烷萃取,再用气相色谱法测定甲苯和萘的浓度^[9],仪器采用 GC7890 II 型气相色谱仪,色谱柱为 HP-5MS (30m × 0.25mm × 0.25μm),检测器为 FID,He 气的流速为 1.0 mL/min,柱温为 55℃,进样口温度为 120℃,检测气温度为 270℃,进样量为 1μL,以峰面积外标法定量,最后计算吸附量.固相吸附量的计算式为^[11]: $S = (c_0 - c) \cdot V / m$, 式中, S 为土壤对甲苯或萘的吸附量, μg•g⁻¹; c_0 为液相初始浓度, mg•L⁻¹; c 为液相平衡浓度, mg•L⁻¹; V 为溶液体积, L; m 为土样质量, g. 对每种土样分别以 S - c 作图.

1.3.2 温度和表面活性剂对甲苯和萘吸附量的影响

土样 2 为有机质含量较高的碱性壤土,因此选

取土样 2 进行以下实验,称取 0.25g 置于 50mL 具塞锥形瓶中,分别加入一系列不同浓度的甲苯或萘溶液 25mL,在 15℃和 35℃下置于恒温振荡器(振荡频率为 140 r/min)中振荡,以下同吸附等温线的测定.

称取 0.25g 置于 100mL 具塞锥形瓶中,分别加入一系列不同浓度的甲苯或萘溶液 25mL 和表面活性剂的储备液 25mL,以下同吸附等温线的测定.用“CTAB+ 土样 2”表示土样 2、甲苯或萘与 CTAB 的混和溶液,用“SDBS+ 土样 2”表示土样 2、甲苯或萘与 SDBS 的混和溶液.

称取 0.25g 置于 100mL 具塞锥形瓶中,分别加入甲苯或萘的储备液 25mL 和一系列不同浓度的表面活性剂溶液 25mL,以下同吸附等温线的测定.

2 结果与讨论

2.1 不同土壤对甲苯和萘的吸附等温线

图 1 和图 2 为甲苯和萘在不同土壤中的吸附等温线.由图 1 和图 2 知,同一液相初始浓度下,不同土壤对甲苯和萘的吸附量差别较大,其对甲苯和萘的吸附量的大小顺序为:土样 2> 土样 6> 土样 3> 土样 4> 土样 5> 土样 1> 土样 7.同一土壤中,萘的

吸附量大于甲苯的吸附量。

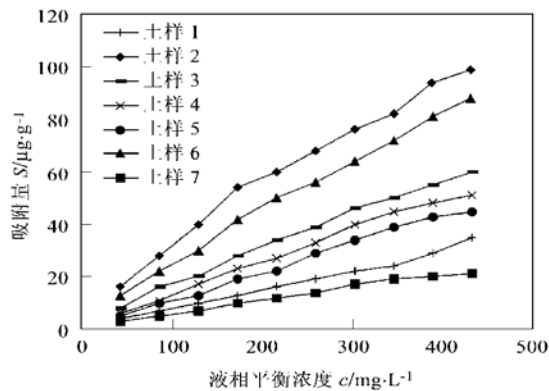


图 1 不同土壤对甲苯的吸附等温线

Fig. 1 Adsorption isotherms of toluene on different soils

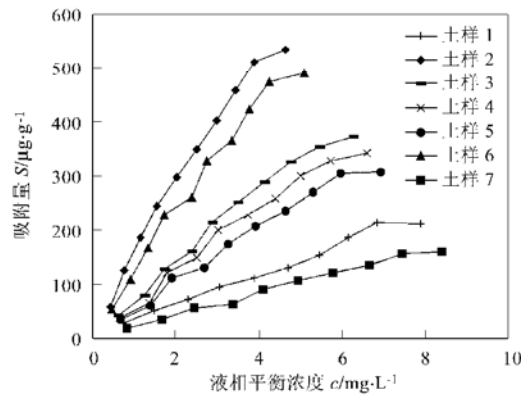


图 2 不同土壤对萘的吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherms of naphthalene on different soils

对图 1 和图 2 中的吸附等温线分别采用线性等

温方程和 Freundlich 方程进行拟合, 线性等温方程可表示如下: $S = K_d \cdot c + b$; Freundlich 方程可表示如下^[12]: $S = K_f \cdot c^n$, 其线性关系式为: $\lg S = \lg K_f + n \lg c$ 式中, S 为吸附量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; K_d 为线性等温方程的吸附系数, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, K_f 为 Freundlich 吸附系数, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, K_f 的值反映了土壤对甲苯和萘吸附能力的强弱, K_f 越大, 土壤对甲苯和萘的吸附能力越强; c 为液相平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; n 为指数项常数. 分别对 S - c 和 $\lg S$ - $\lg c$ 进行线性回归, 即得 K_d 、 b 、 K_f 、 n 和相关系数 R^2 的值, 见表 3.

由表 3 知, 2 种方程对甲苯和萘的吸附等温线均表现出较好的相关性, 且 Freundlich 方程的拟合效果更好, 说明 7 种土壤对甲苯和萘的吸附等温线均很好地符合 Freundlich 吸附模式. 不同土壤对甲苯和萘的吸附系数 K_f 不同, 说明不同土壤对甲苯和萘的吸附能力相差较大, 其大小顺序为: 土样 2> 土样 6> 土样 3> 土样 4> 土样 5> 土样 1> 土样 7. 这主要是由于不同土壤的 pH 值、有机质含量和颗粒组成差别较大的缘故(表 1). 土壤对甲苯和萘的吸附量随土壤有机质含量的升高而升高, 在有机质含量相近的情况下, 吸附量主要受土壤颗粒大小的影响, 颗粒越大越不利于吸附^[9], 且吸附量与粘粒含量呈正相关关系, 相关程度较高^[13]. 同一土壤中, 萘的吸附系数 K_f 较甲苯的吸附系数 K_f 大, 说明萘的吸附量大于甲苯的吸附量. 这主要是因为萘在水中的溶解度较甲苯小的多, 更易吸附在土壤表面, 从而增大了吸附量.

2.2 温度对甲苯和萘吸附量的影响

表 3 不同土壤对甲苯和萘的吸附参数

Table 3 Adsorption parameters of toluene and naphthalene on different soils

石油烃	样品	Freundlich 方程			线性等温方程		
		K_f	n	R^2	K_d	b	R^2
甲苯	土样 1	0.118 8	0.917 1	0.993 8	0.074 6	0.133 6	0.986 2
	土样 2	0.844 6	0.789 5	0.995 8	0.209 2	11.96	0.986 3
	土样 3	0.308 1	0.871 2	0.997 0	0.133	3.938 8	0.995 1
	土样 4	0.160 1	0.958 1	0.997 8	0.120 5	1.401 9	0.992 7
	土样 5	0.121 6	0.979 6	0.995 3	0.108 2	0.133 7	0.993 3
	土样 6	0.533 1	0.84	0.997 8	0.191 9	6.145 4	0.996 8
	土样 7	0.099 4	0.890 1	0.994 7	0.049 0	1.134	0.988 3
萘	土样 1	36.981	0.855 0	0.991 8	27.313	9.554 9	0.981 6
	土样 2	150.21	0.908 2	0.985 4	115.37	47.531	0.977 6
	土样 3	70.044	0.974 1	0.991 2	61.672	18.583	0.978 3
	土样 4	60.027	0.983 0	0.980 1	54.012	15.425	0.975 9
	土样 5	51.236	0.986 4	0.986 3	47.023	11.307	0.978 9
	土样 6	121.2	0.930 6	0.990 1	98.643	33.528	0.975 9
	土样 7	21.994	0.962 0	0.992 4	19.657	4.485 1	0.988 2

不同温度下, 甲苯和萘在土样 2 中的吸附等温线见图 3 和图 4. 由图 3 和图 4 可知, 同一液相初始浓度下, 土样 2 对甲苯和萘的吸附量均随温度的升高而降低, 当温度从 15℃ 升高到 35℃ 时, 在液相初始浓度为 $433.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下, 甲苯的吸附量从 $165\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到 $65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 在液相初始浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下, 萘的吸附量从 $649\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到 $461\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 相同条件下, 萘的吸附量大于甲苯的吸附量.

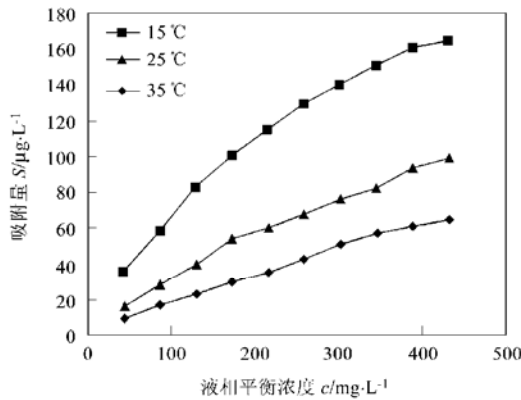


图 3 不同温度下, 土样 2 对甲苯的吸附等温线
Fig. 3 Adsorption isotherms of toluene on soil 2 at different temperatures

对图 3 和图 4 中的吸附等温线分别采用线性等温方程和 Freundlich 方程进行拟合, 吸附参数见表

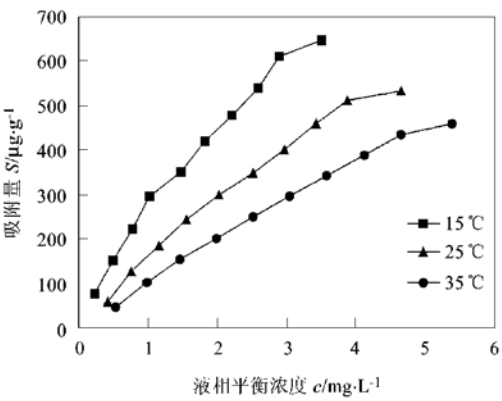


图 4 不同温度下, 土样 2 对萘的吸附等温线
Fig. 4 Adsorption isotherms of naphthalene on soil 2 at different temperatures

4. 由表 4 知, 不同温度下, 甲苯和萘在土样 2 中的吸附等温线均很好的符合 Freundlich 吸附模式, 其吸附系数 K_f 随温度的升高而降低, 温度从 15℃ 升高到 35℃ 时, 甲苯和萘的吸附系数 K_f 分别从 $3.0525\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $262.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $0.3417\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $97.834\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且萘的吸附系数大于甲苯的吸附系数, 说明温度升高不利于甲苯和萘的吸附, 这主要是因为温度升高会导致甲苯和萘在水相中的溶解度增大并减小土壤表面与甲苯和萘之间的各种作用力, 从而使甲苯和萘不易吸附在土壤表面.

表 4 不同温度下, 土样 2 对甲苯和萘的吸附参数

Table 4 Adsorption parameters of toluene and naphthalene on Soil 2 at different temperatures							
石油烃	温度/℃	Freundlich 方程			线性等温方程		
		K_f	n	R^2	K_d	b	R^2
甲苯	15℃	3.052 5	0.669 2	0.992 7	0.329 2	35.995	0.961 8
	25℃	0.844 6	0.789 5	0.998 5	0.209 2	11.96	0.986 3
	35℃	0.341 7	0.869 3	0.998 1	0.147 4	4.006 2	0.993 8
萘	15℃	262.96	0.770 2	0.995 6	175.61	80.916	0.980 2
	25℃	150.21	0.908 2	0.985 4	115.37	47.531	0.977 6
	35℃	97.834	0.978 2	0.992 7	87.214	20.932	0.989 9

2.3 表面活性剂对甲苯和萘吸附量的影响

2.3.1 表面活性剂类型的影响

在阳离子表面活性剂 CTAB 和阴离子表面活性剂 SDBS 存在的情况下, 甲苯和萘的吸附等温线如图 5 和图 6 所示. 图 5 和图 6 表明, 同一液相初始浓度下, 甲苯和萘在“土样 2”、“CTAB+ 土样 2”和“SDBS+ 土样 2”中的吸附量依次降低. CTAB 对甲苯和萘的解吸率最高可达 27.5% 和 12.1%, SDBS 对甲苯和萘的解吸率最高可达 64.3% 和 48.8%, 说

明 CTAB 和 SDBS 均利于甲苯和萘在土壤表面的解吸, 这是由于胶束对甲苯和萘的增溶作用^[14], 且 SDBS 的解吸效果更好, 这主要是因为土壤胶体带负电荷, CTAB 易吸附在土壤表面, 水相中的部分甲苯和萘会重新被 CTAB 所吸附, 而 SDBS 很难被土壤吸附, 从而使 SDBS 更利于甲苯和萘的解吸.

2.3.2 表面活性剂浓度的影响

图 7 和图 8 为 SDBS 的浓度对甲苯和萘吸附量的影响. 由图 7 和图 8 可知, 甲苯和萘的吸附量随

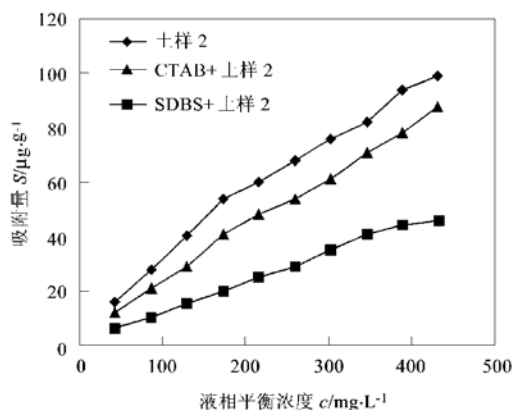


图 5 在 CTAB 和 SDBS 存在的情况下, 甲苯的吸附等温线

Fig. 5 Adsorption isotherms of toluene in the presence of different surfactants

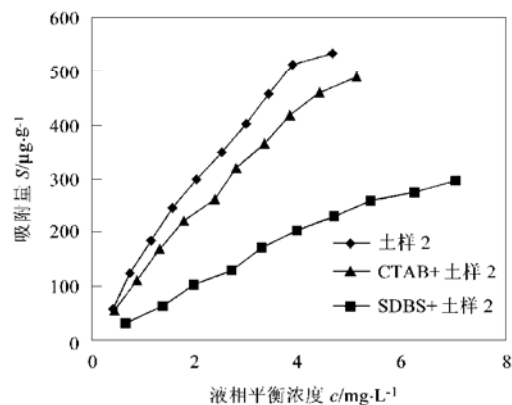


图 6 在 CTAB 和 SDBS 存在的情况下, 萘的吸附等温线

Fig. 6 Adsorption isotherms of naphthalene in the presence of different surfactants

SDBS 浓度的升高而降低. SDBS 的浓度从 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $1600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甲苯和萘的吸附量分别从 $95 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $528 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低到 $46 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $295 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 图 9 和图 10 为 CTAB 的浓度对甲苯和萘吸附量的影响. 由图 9 和图 10 知, 当 CTAB 的浓度小于 CMC ($335 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而升高. CTAB 的浓度从 $67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $335 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甲苯和萘的吸附量分别从 $102 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $538 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高到 $118 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $558 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 当 CTAB 的浓度等于或大于 CMC 时, 甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而降低. CTAB 的浓度从 $335 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $536 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甲苯和萘的吸附量分别从 $118 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $558 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低到 $85 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $488 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

在土壤-水体系中, 土壤对甲苯和萘的吸附量主

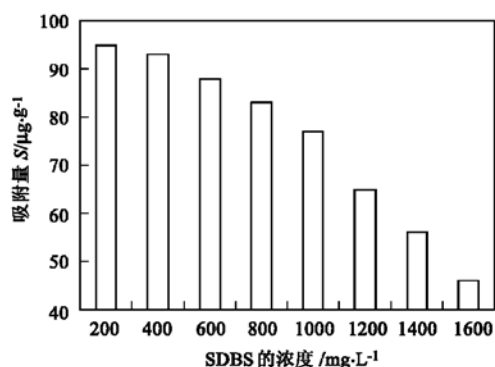


图 7 SDBS 浓度对甲苯吸附量的影响

Fig. 7 Effect of SDBS concentration on adsorbed quantity of toluene

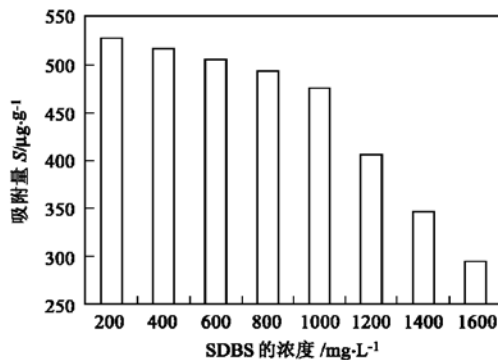


图 8 SDBS 浓度对萘吸附量的影响

Fig. 8 Effect of SDBS concentration on adsorbed quantity of naphthalene

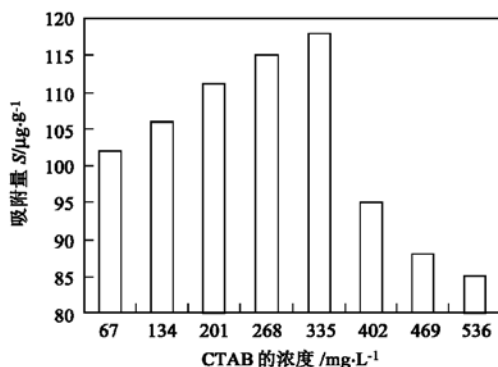


图 9 CTAB 浓度对甲苯吸附量的影响

Fig. 9 Effect of CTAB concentration on adsorbed quantity of toluene

要取决于表面活性剂在单体、半胶束和胶束形态之间的分配作用、甲苯和萘与表面活性剂在土壤表面的竞争吸附作用、水相对甲苯和萘的溶解作用、吸附在土壤表面的半胶束对甲苯和萘的吸附作用以及自由胶束对甲苯和萘的溶解作用^[15].

当表面活性剂的浓度小于 CMC 时, 体系中无

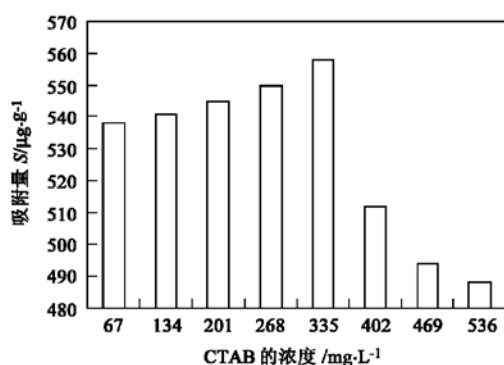


图 10 CTAB 浓度对萘吸附量的影响

Fig. 10 Effect of CTAB concentration on adsorbed quantity of naphthalene

胶束相形成,此时甲苯和萘的吸附量主要取决于土壤对甲苯和萘与表面活性剂的竞争吸附作用和半胶束对甲苯和萘的吸附作用.由于 SDBS 不易吸附在土壤表面,随着 SDBS 浓度的升高,SDBS 与甲苯和萘的竞争吸附作用越明显,SDBS 会占据土壤表面活跃的烃吸附位,从而使甲苯和萘的吸附量降低.同时半胶束对甲苯和萘的吸附作用会使吸附量增大,但此作用较 SDBS 与甲苯和萘的竞争吸附作用弱的多^[4],因此最终导致甲苯和萘的吸附量降低(图 7 和图 8).由于 CTAB 易被土壤所吸附,随着 CTAB 浓度的升高,吸附在土壤表面的半胶束会吸附更多的甲苯和萘,从而使甲苯和萘的吸附量增大(图 9 和图 10).当表面活性剂的浓度等于或大于 CMC 时,体系中会形成胶束相,由于胶束对甲苯和萘有增溶作用^[14],使甲苯和萘易于从土壤表面解吸下来,从而减小了甲苯和萘的吸附量(图 7、图 8、图 9 和图 10).

3 结论

(1) 7 种土壤对甲苯和萘的吸附等温线均很好的符合 Freundlich 吸附模式,其吸附能力的大小顺序为:土样 2> 土样 6> 土样 3> 土样 4> 土样 5> 土样 1> 土样 7,这主要是由于不同土壤的 pH 值、有机质含量和颗粒组成差别较大的缘故.同一土壤中,萘的吸附量远远大于甲苯的吸附量.

(2) 温度升高不利于甲苯和萘在土壤中的吸附,温度从 15℃升高到 35℃时,甲苯和萘的吸附系数 K_f 分别从 $3.0525 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $262.96 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $0.3417 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $97.834 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(3) 阳离子表面活性剂 CTAB 对甲苯和萘的解吸率最高可达 27.5% 和 12.1%,阴离子表面活性剂 SDBS 对甲苯和萘的解吸率最高可达 64.3% 和 48.8%.说明 CTAB 和 SDBS 均利甲苯和萘在土壤表面的解吸,且 SDBS 的解吸效果更好.

(4) 甲苯和萘的吸附量随 SDBS 浓度的升高而降低.当 CTAB 的浓度小于 CMC 时,甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而升高;当 CTAB 的浓度等于或大于 CMC 时,甲苯和萘的吸附量随 CTAB 浓度的升高而降低.

参考文献:

- [1] 任磊,黄廷林. 土壤的石油污染[J]. 农业环境保护, 2000, **19** (16): 360~ 363.
- [2] Gaboriau H, Saada A. Influence of heavy organic pollutants of anthropic origin on PAH retention by kaolinite [J]. Chemosphere, 2001, **44**: 1633~ 1639.
- [3] Walter T, Ederer H J, Forst C, *et al.* Sorption of selected polycyclic aromatic hydrocarbons on soils in oil-contaminated systems[J]. Chemosphere, 2000, **41**: 387~ 397.
- [4] Qu Z Q, Yediler A, Ketrup A, *et al.* Effects of alkylbenzene sulfonate(LAS) on the adsorption behavior of phenanthrene on soils[J]. Chemosphere, 1995, **30**(2): 313~ 325.
- [5] 潘波,刘文新,林秀梅,等. 水溶性有机碳对菲吸附系数测定的影响[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 162~ 166.
- [6] 陈宝琛,朱利中,陶澍. 非离子表面活性剂对菲在水/土壤界面间吸附行为的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(1): 1~ 5.
- [7] 陈华林,陈英旭,王子健,等. 中国南方河流和湖泊沉积物对菲的吸附特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 120~ 124.
- [8] 何孟常,邓焕哲,李杏茹,等. 土壤胡敏酸对菲的吸附特征研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 982~ 988.
- [9] Adam G, Gamoh K, G. Morris D, *et al.* Effect of alcohol addition on the movement of petroleum hydrocarbon fuels in soils[J]. Sci. Total Environ., 2001, **286**: 15~ 25.
- [10] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 12~ 16; 22~ 29; 272~ 282.
- [11] Pernyeszi T, Patzko A, Berkesi O, *et al.* Asphaltene adsorption on clays and crude oil reservoir rocks[J]. Colloids and Surfaces, 1998, **137**: 373~ 384.
- [12] Aksu Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(3-4): 831~ 847.
- [13] Aelion C M. Impact of aquifer sediment grain size on petroleum hydrocarbon distribution and biodegradation[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1996, **22**: 109~ 121.
- [14] Deshpande S, Shiau B J, Wade D. Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing[J]. Wat. Res., 1999, **33**(2): 351~ 360.
- [15] Haigh S. A review of the interaction of surfactants with organic contaminants in soil[J]. Sci. Total Environ., 1996, **185**: 161~ 170.