

张 洋, 孟昭福, 李文斌, 等. BS-DTAB 复配修饰红壤对苯酚的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 132–139.

ZHANG Yang, MENG Zhao-fu, LI Wen-bin, et al. Adsorption of phenol onto red soil modified with a BS-DTAB complex[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 132–139.

BS-DTAB 复配修饰红壤对苯酚的吸附

张 洋¹, 孟昭福^{1,2*}, 李文斌³, 任 爽¹, 王 腾¹, 刘 伟¹, 田 凯¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西华师范大学环境科学与工程学院, 四川 南充 637009)

摘 要: 为了探究复配修饰后, 可变电荷类型的红壤与恒电荷土壤对苯酚的吸附差异, 以红壤作为供试土样, 在两性表面活性剂 BS-12(十二烷基二甲基甜菜碱)修饰的基础上, 以阳离子型表面活性剂 DTAB(十二烷基三甲基溴化铵)复配修饰制备两性-阳离子复配修饰红壤, 采用批处理法研究在单一苯酚及 Cd^{2+} 复合条件下供试土样对苯酚的吸附效果, 并分析不同修饰比例、温度、离子强度和 pH 的影响。结果表明, DTAB 复配修饰增强了 BS-12 两性修饰红壤对苯酚的吸附能力, 单一苯酚表现出在总修饰比例小于 150%CEC 时吸附量随着修饰比例的增加而递增; 各修饰土对苯酚的吸附具有增温负效应; 苯酚吸附量随着 pH 的升高而降低; 随着离子强度的增大, 苯酚单一处理时供试土样对苯酚吸附量减少, 但苯酚和 Cd^{2+} 复合处理时, 则呈现先降低后升高的趋势。Henry 模型能较好地拟合各修饰红壤对苯酚吸附的等温吸附数据, 吸附以分配机制为主; 供试土样对苯酚的吸附属于自发的物理吸附过程。复配修饰红壤的苯酚吸附量低于恒电荷土壤, 其黏土矿物成分决定的低 CEC 是主要影响因素。

关键词: 复配修饰; 红壤; 苯酚; 吸附

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)01-0132-08 doi:10.11654/jaes.2018-0293

Adsorption of phenol onto red soil modified with a BS-DTAB complex

ZHANG Yang¹, MENG Zhao-fu^{1,2*}, LI Wen-bin³, REN Shuang¹, WANG Teng¹, LIU Wei¹, TIAN Kai¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Lab of Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: To investigate the differences in adsorption of phenol between variable-charge red soil and constant-charge soil after organic complex modification, phenol adsorption via either phenol only or phenol+ Cd^{2+} treatment onto variable-charge red soil modified by a mixture of amphoteric modifier, dodecyl dimethyl betaine (BS-12) and the cationic modifier dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB) was tested in a batch experiment. The influence of total modifier ratio (TMR), temperature, ionic strength, and pH on the discrepancies in adsorption were studied. The results showed that phenol adsorption onto amphoteric-modified red soil was enhanced by DTAB and increased with an increase in modifier ratio for phenol only treatment when the TMR was within 150% of the CEC. The Henry equation was the best model for describing the phenol adsorption isotherm, demonstrating that the mechanism of phenol adsorption onto the red soil modified with the BS-DTAB complex was controlled by the partition effect. The phenol adsorption decreased with increases in temperature, pH, and ionic strength, while an increase was appeared in phenol+ Cd^{2+} mixture treatment with an increase in ionic strength. The adsorption of phenol onto BS-DTAB-modified red soil was a spontaneous physical adsorption process and was lower than that onto constant-charge soil. The low CEC due to the clay mineral composition was the determining factor in controlling phenol adsorption onto the amphoteric-complex-modified red soil.

Keywords: complex modification; red soil; phenol; adsorption

收稿日期: 2018-03-05 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 张 洋(1993—), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事环境污染修复研究。E-mail: 329569503@qq.com

*通信作者: 孟昭福 E-mail: zfmeng1996@263.net

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271244); 陕西省重点研发计划项目(2017SF-385)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41271244); Social Key Research-development Development Project in Shaanxi Province(2017SF-385)

由于天然土壤其本身的亲水性特征,土壤中的有机污染物具有较大的活动性和生物有效性,可能进入食物链或向下迁移进入地下水而造成环境污染。因此,提高天然土壤对有机污染物的吸附固定能力对于保护生态环境和人体健康具有重要意义^[1-3]。

国内外研究者通过化学修饰增大土壤吸附有机污染物能力的研究开展较多,采用阳离子^[4-8]、双阳离子^[9-11]、阳-非离子^[12]和阴-阳离子^[13-15]表面活性剂复合修饰及其他复合修饰^[16-17]黏土矿物或土壤,可以提高有机污染物在土壤中的吸附。两性表面活性剂同时具有疏水碳链结构和两个分别带正、负电荷亲水基团,对恒电荷性质的膨润土^[18]、壤土^[19]进行修饰后,苯酚吸附量为未修饰原土的1.25~4.35倍,Cd²⁺吸附量为未修饰原土的0.92~1.70倍,即对有机、重金属的复合污染物具有良好的共吸附能力。为进一步提高对有机污染物的吸附能力,有研究采用两性-阳离子复配修饰陕西关中地区恒电荷土壤——壤土^[20]、陕西南部地区恒电荷土壤——黄棕壤^[21]对苯酚进行吸附,结果表明复配修饰增强了两性修饰恒电荷土壤对苯酚的吸附能力。

对于可变电荷土壤,有研究发现,SDS、CTAB等表面活性剂的加入可明显地改变红壤对噻吩磺隆的吸附能力,但不同类型表面活性剂对红壤吸附噻吩磺隆的影响情况不尽相同^[32]。本课题组前期研究发现,可变电荷性质的红壤性水稻土经两性修饰后可具有增强持留重金属Cd²⁺的能力和吸持的稳定性^[22],而低碳链长度的八烷基氨基酸^[23]未能较好地提高红壤对重金属Cd²⁺的吸附能力,两性修饰剂羧基上的负电荷点位和土壤表面上的正电荷点位的结合可能是主要的修饰机理。可见,由于可变电荷土壤的组成及电荷性质同恒电荷土壤差异较大^[33],两性及其复配表面活性剂对可变电荷土壤进行复配修饰机制必然与恒电荷土壤有所不同,进而也就影响其对有机、重金属吸附的能力。但可变电荷土壤两性复配修饰的相关研究迄今尚未见报道。

可变电荷土壤分布较为广泛,研究可变电荷土壤的两性及其复配修饰,对于探明可变电荷土壤修饰后对污染物的吸附效应及其与恒电荷土壤的差异,拓展

两性复配修饰的实际应用,建立两性有机修饰的构效机制具有实际意义。本文选取典型的可变电荷土壤——红壤,以两性修饰剂BS-12及阳离子表面活性剂DTAB对其进行复配修饰,研究复配修饰后红壤在不同温度、pH、离子强度以及Cd²⁺存在下对苯酚吸附的影响,旨在为可变电荷类型土壤的两性复配修饰的研究和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

土样为红壤,采自云南省昆明市北郊黑龙潭,海拔1983 m。采样深度为10~30 cm,经风干、去除动植物残体,研磨过60目尼龙筛,备用,基本理化性质见表1。

采用BS-12(十二烷基二甲基甜菜碱,以BS表示,购自天津兴光助剂厂)作两性修饰剂;采用DTAB(十二烷基三甲基溴化铵,以DT表示,购自天津市致远化学试剂有限公司)作阳离子型修饰剂。有机污染物采用苯酚(购自西陇化工股份有限公司)配制;重金属污染物采用Cd²⁺溶液,以3CdSO₄·8H₂O(购自天津市福晨化学试剂厂)配制。上述试剂均为分析纯。

BS修饰红壤和BS-DT复配修饰红壤均采用湿法制备^[18]。

BS、DT修饰计算公式如下:

$$W=m \times \text{CEC} \times M \times 10^{-6} \times R \times b^{-1} \quad (1)$$

式中: W 为修饰剂质量,g; m 为土样质量,g;CEC为红壤的阳离子交换量,mmol·kg⁻¹; M 为修饰剂的摩尔质量,g·mol⁻¹; R 为修饰比例; b 为修饰剂的含量(BS取30%,DT取100%)。

1.2 实验设计

按修饰比例+修饰剂的方式表示以下修饰土样,如50BS是指BS-12按红壤CEC以50%比例进行修饰,100BS+100DT是指BS-12与DTAB均按红壤CEC以100%比例进行复配修饰。

BS+DT复配比例设置分别为50BS+25DT、50BS+50DT、50BS+100DT、50BS+150DT、100BS+25DT、100BS+50DT、100BS+100DT、100BS+150DT,以未修饰红壤(CK)和50%CEC(50BS)、100%CEC(100BS)单

表1 红壤理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of red soil

土样	有机质/ g·kg ⁻¹	pH值	CEC/ mmol·kg ⁻¹	主要黏土矿物质量分数/%			
				高岭石	三水铝矿	石英	赤铁矿
红壤	16.41	5.05	103.34	38	20	15	13

—BS修饰土作对照。

单一苯酚处理设9个浓度梯度:5、10、20、50、100、200、300、400、500 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,苯酚+ Cd^{2+} 复合处理设9个浓度梯度:5+5、10+10、20+20、50+50、100+100、200+200、300+300、400+400、500+500 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,温度为25 $^{\circ}\text{C}$,pH值为6,均以0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl作为背景离子,3个平行处理。

温度影响:分别设10、25、40 $^{\circ}\text{C}$,pH值为6,0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl作为背景离子。

离子强度影响:设KCl背景溶液浓度分别为0.01、0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,温度为25 $^{\circ}\text{C}$,pH值为6。

pH影响:单一苯酚分别设为4、6、7、8;苯酚+ Cd^{2+} 复合处理设为3、4、5、6。温度为25 $^{\circ}\text{C}$,0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl作为背景离子。

1.3 实验方法

吸附实验均采用批量平衡法进行^[20],苯酚采用紫外分光光度法^[24]测定(BS-12、DTAB在287 nm处无吸收),差减法计算平衡吸附量。

1.4 数据处理

采用Henry模型^[25]拟合吸附等温线,如式(2)所示:

$$q_e = KC_e \quad (2)$$

式中: q_e 为吸附剂的平衡吸附量, $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;K为吸附质在固液两相中的分配系数; c_e 为吸附质平衡浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

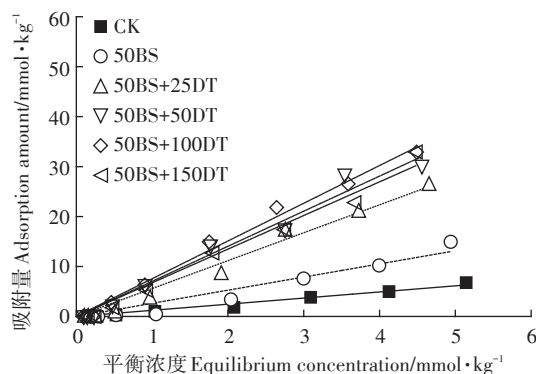
引入参数 K_r ^[26], K_r 为各修饰土与CK土样的K值的比值。

模型拟合采用CurveExpert 1.3拟合软件;绘图采用Origin 9.0软件。

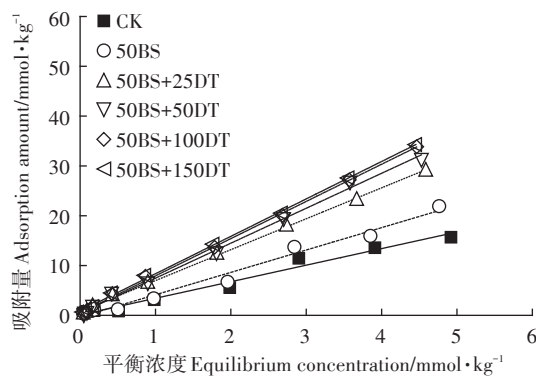
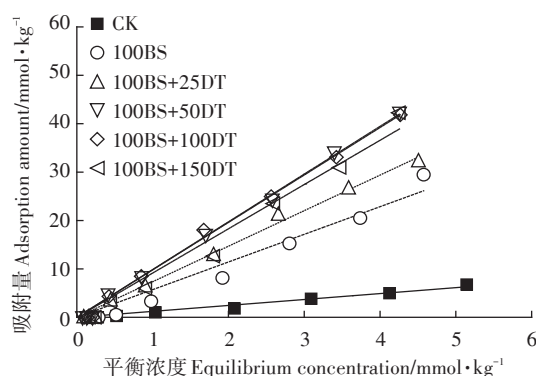
2 结果与分析

2.1 苯酚的等温吸附

各供试土样对苯酚的吸附等温线如图1所示。采用Henry模型拟合各供试红壤土样对苯酚的吸附等温线,模型拟合参数的结果如表2所示,在25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,各供试红壤土样对苯酚的吸附量随苯酚平衡浓度的增大而增加,且吸附等温线均为直线,呈现出较好的一致性。采用Henry模型拟合的各供试红壤土样吸附等温线的相关系数 r 均达到极显著水平($P < 0.01$),说明Henry模型适用于描述各供试红壤土样对苯酚的吸附。在实验浓度范围内各修饰土对苯酚的吸附均未达到吸附饱和程度,吸附等温线仍呈现上升



(a)单一苯酚



(b)苯酚+ Cd^{2+}

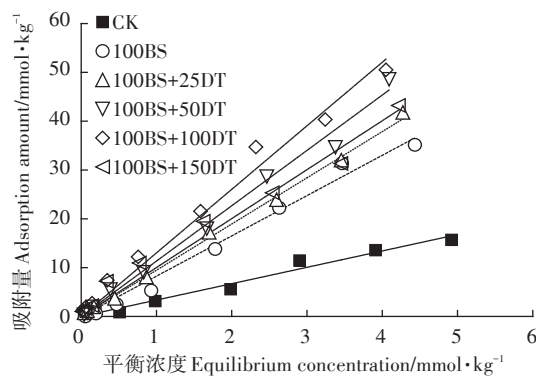


图1 各土样对苯酚的等温吸附线

Figure 1 Adsorption isotherms of phenol adsorption

趋势。

苯酚单一处理时,由图 1(a)及表 2 拟合参数可得出,单一 BS 修饰土对苯酚的吸附随着修饰比例的增加,吸附量呈上升趋势,表现为 100BS>50BS>CK。在 50BS 和 100BS 两性修饰基础上,DT 复配能提高供试红壤对苯酚的吸附量,当 BS 修饰比例为 50%CEC 时,DT 复配不同修饰比例对苯酚吸附表现为 100DT>50DT>150DT>25DT;当 BS-12 修饰比例为 100%CEC 时,复配不同修饰比例 DT 对苯酚吸附表现为 50DT>100DT>150DT>25DT。表现出当 BS+DT 总的修饰比例低于 150%CEC 时,修饰红壤土样对苯酚的吸附量随着 DT 修饰比例增加而增大的规律。经过各修饰比例的 DT 复配修饰后,对苯酚的吸附效果比 CK 和 BS 单一修饰分别提高了 4.56~8.05 倍和 1.29~2.87 倍,其中 100BS+50DT 修饰土样吸附苯酚的效果最好,分别是 50BS、100BS 单一两性修饰土样的 3.75、1.73 倍。

当 Cd²⁺ 共存时,由图 1(b)及表 2 拟合参数可得出,供试红壤对苯酚的吸附随修饰比例的变化规律与单一苯酚规律一致。CK、BS 修饰红壤以及 BS+DT 修饰红壤对苯酚的吸附量较单一苯酚处理均有增加,分别为单一苯酚处理时的 2.72 倍、1.44~1.67 倍、1.01~1.33 倍,说明 Cd²⁺ 的存在改变了苯酚在固液两相上的分配,对苯酚的吸附起到促进作用。

2.2 温度的影响

图 2(限于篇幅,仅给出 CK、50BS、100BS、50BS+100DT、100BS+100DT 结果)为 10~40 ℃ 范围内供试土样对苯酚吸附的温度效应(纵坐标 K 为 Henry 拟合参数,表示吸附能力)。苯酚单一及 Cd²⁺ 复合处理时,随温度的升高,供试土样对苯酚吸附量下降,总体呈现出增温负效应,说明各供试土样主要是通过范德华力

表 2 苯酚吸附的 Henry 模型拟合结果(温度:25 ℃)

Table 2 Results fitting Henry model of phenol adsorption (Temperature: 25 ℃)

土样	单一苯酚			苯酚+Cd ²⁺		
	r	K	Kr	r	K	Kr
CK	0.988 7**	1.23	—	0.989 4**	3.35	
50BS	0.967 9**	2.63	2.15	0.991 2**	4.39	1.31
100BS	0.980 3**	5.71	4.66	0.993 7**	8.25	2.46
50BS+25DT	0.989 1**	5.59	4.56	0.997 7**	6.45	1.92
50BS+50DT	0.988 0**	7.02	5.73	0.997 6**	7.16	2.13
50BS+100DT	0.995 1**	7.55	6.16	0.998 7**	7.62	2.27
50BS+150DT	0.990 8**	6.74	5.50	0.998 2**	7.78	2.32
100BS+25DT	0.996 4**	7.35	5.99	0.998 8**	9.47	2.82
100BS+50DT	0.997 9**	9.86	8.05	0.995 6**	11.34	3.38
100BS+100DT	0.997 5**	9.80	8.00	0.991 5**	13.02	3.88
100BS+150DT	0.989 1**	9.14	7.46	0.987 0**	10.02	2.99

注:**表示在 P=0.01 水平相关显著,当自由度 f=8,显著性水平 P=0.01 时,r=0.765。

Note: **indicates significance at P=0.01 level (r=0.765 at P=0.01 when the degree of freedom f=8).

以及疏水分配吸附的方式对苯酚产生物理吸附。

单一苯酚处理和苯酚与 Cd²⁺ 复合处理时,温度增大到 40 ℃,所选供试土样对苯酚吸附量分别较 10 ℃ 时下降了 32.84%、40.16%、24.70%、37.51%、36.04% 和 20.45%、19.55%、20.85%、21.54%、23.39%。苯酚与 Cd²⁺ 复合处理与单一苯酚处理规律一致。

2.3 pH 的影响

pH 对供试土样吸附苯酚的影响如图 3 所示,结果显示各供试土样对苯酚的吸附量均随着 pH 的增大而减小。

单一处理时,当 pH 增大到 8 时,CK、50BS、

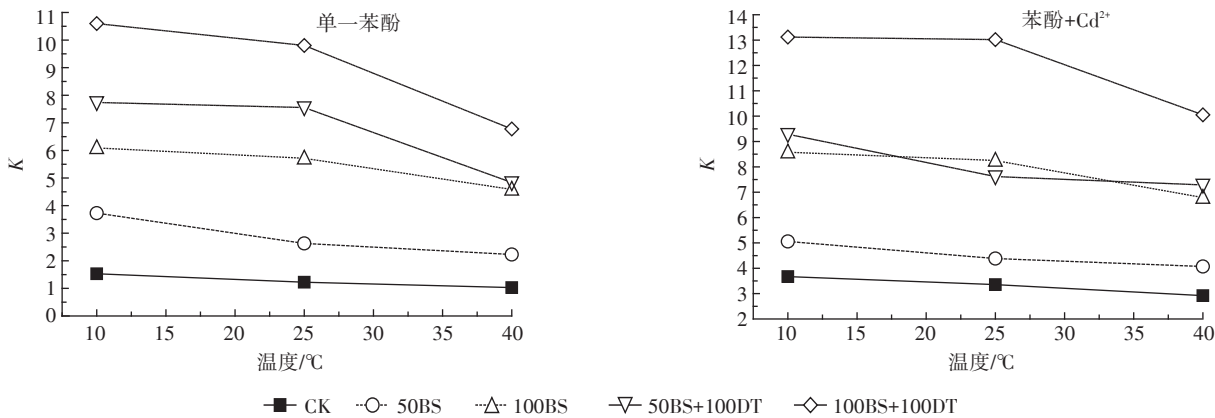


图 2 温度对苯酚吸附的影响

Figure 2 Effect of temperature on phenol adsorption

100BS、50BS+100DT、100BS+100DT 5种供试土样对苯酚的吸附量分别较pH 4时下降了44.78%、16.65%、17.11%、19.75%、2.11%。

Cd^{2+} 复合处理时pH值3~5范围内,苯酚吸附量随pH增大而下降,当pH值增大到6时,吸附量较pH 5时又略有上升。

2.4 离子强度的影响

离子强度对各供试土样吸附苯酚的影响见图4。结果显示,单一苯酚处理时,各供试土样对苯酚的吸附量随着溶液中离子强度的增大而减小。当离子强度增大到 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,CK、50BS、100BS、50BS+100DT、100BS+100DT 5种供试土样的吸附量分别较 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时下降了84%、49%、13.95%、9.59%、10.98%。

与 Cd^{2+} 复合处理时,在 $0.01 \sim 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 离子强度范围内,苯酚的吸附量随KCl浓度增大而降低,与单一苯酚处理时趋势相同;在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 离子强度范围内,苯酚的吸附量随KCl浓度增大而升高,与

苯酚单一处理存在明显不同的变化趋势。

3 讨论

红壤与壤土^[20]、黄棕壤^[21]对于苯酚的吸附在吸附量、离子强度的影响上存在差异。单一苯酚处理下,复配修饰红壤对苯酚的吸附与白俊凤等^[20]的壤土结果相比具有一致性,均有随着修饰剂修饰比例增加,吸附量升高的趋势,但在吸附量方面,红壤显著低于壤土,二者存在差异,CK、BS修饰红壤、BS+DT修饰红壤的苯酚吸附量分别为同等条件下壤土的22.00%、37.68%~56.99%、49.73%~78.25%,证实两性及其复配修饰有助于减少红壤与壤土吸附苯酚的差异(壤土^[20] CK、50BS、100BS、50BS+25CT、50BS+50CT、100BS+25CT、100BS+50CT的K值分别为5.59、6.98、10.02、11.24、12.42、11.94、12.60)。

前期研究结果表明,恒电荷土壤类型的黏化层壤土、黄棕壤所含的黏土矿物成分以2:1型伊利石和蒙脱石为主,具有较高的比表面积和CEC,未修饰壤土

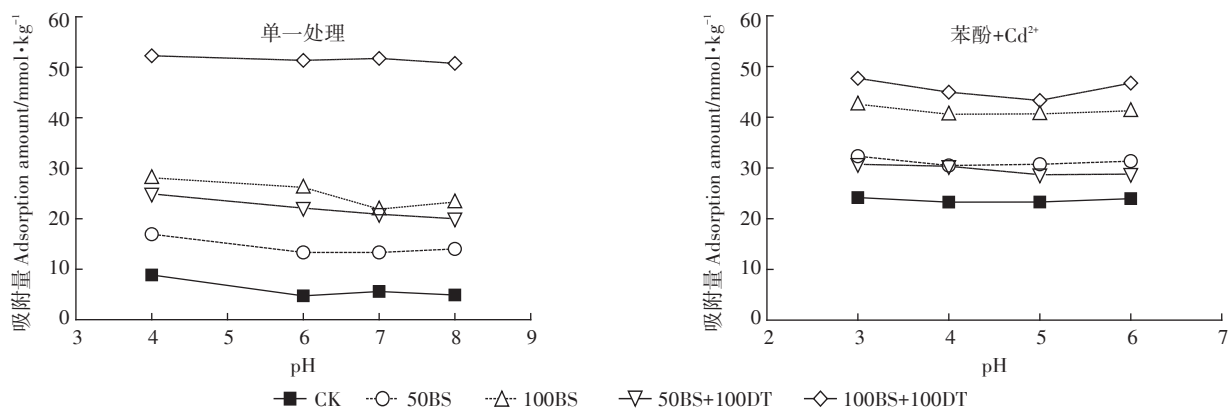


图3 pH对苯酚吸附的影响

Figure 3 Effect of pH on phenol adsorption

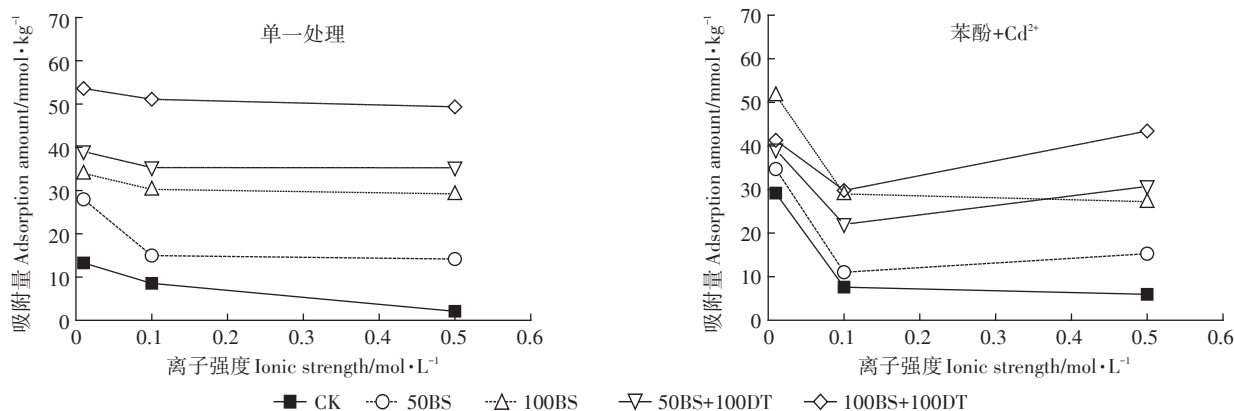


图4 离子强度对苯酚吸附的影响

Figure 4 Effect of ionic strength on phenol adsorption

和黄棕壤对苯酚的吸附既存在范德华力和有机质的疏水分配作用,即对苯酚的物理性吸附^[28],也存在少量矿物黏粒与苯酚间的化学吸附过程^[21]。两性修饰剂BS-12和阳离子型复配修饰剂CTMAB对壤土和黄棕壤的修饰在低于转折点^[27,29]时主要是通过负电荷点位的电性引力为主^[20-21],进而在土壤表面形成疏水相。但对于可膨胀性的蒙脱石组分而言,是否存在插层修饰机制与其含量有关,土壤中低蒙脱石成分会使得BS-12难以进入其蒙脱石层间,而易于吸附到其他相对较易的外表面、有机质吸附点位上,但对于阳离子复配修饰剂CTMAB而言修饰机制则不受蒙脱石含量影响^[21]。具有一致性的是,超出转折点的修饰比例,即负电荷点位结合达到饱和时,两性修饰剂BS-12和阳离子型复配修饰剂CTMAB在恒电荷土壤中均以疏水键修饰为主,具有共性。对于苯酚的吸附,BS-12和CTMAB修饰壤土和黄棕壤均以修饰剂形成的有机相的疏水相分配吸附为主。

对于红壤,其有机质含量与壤土和黄棕壤相比差异不大,但其主要黏土矿物组成为高岭石、三水铝石、石英及赤铁矿,不具有膨胀性,负电荷数量少,CEC低,比表面积小,因此通过范德华力吸附的能力比较弱,这也就解释了本文中未修饰红壤对苯酚的吸附能力弱于恒电荷土壤的原因。进一步比较不同BS-12修饰比例和DTAB修饰比例变化,结果均表现出在总体上红壤随修饰比例增大对苯酚吸附量增加的规律,与壤土、黄棕壤的结果一致,证实两性及DTAB复配修饰红壤对苯酚吸附的机制,与两性及阳离子复配修饰壤土、黄棕壤具有一致性,即均以疏水相分配吸附为主。但两性及DTAB复配修饰红壤对苯酚的吸附量均低于相应的壤土、黄棕壤,这显然与红壤的主要黏土矿物组成导致的低CEC的性质直接相关。已有结果证实,以分配作用为苯酚吸附的主导机制主要取决于修饰土壤或黏土矿物的有机碳含量^[21],红壤由于黏土矿物组成的低CEC,在相同修饰比例下,修饰剂添加量小,因此TOC含量低,进而吸附苯酚的量也相对减小,这一点也为两性及阳离子复配黄棕壤吸附苯酚的量远低于两性及其阳离子复配膨润土的结果所支持^[21]。当然,由于DTAB的疏水碳链长度低于CTMAB,因此相同修饰比例下其TOC含量低于CTMAB也具有一定的影响作用。

此外我们前期研究中证实,两性及其复配修饰剂在膨润土中的修饰率随修饰比例增加而下降,也就是说,土壤由于修饰比例增加而造成TOC之间的差异

减小^[29],这恰好支持了本文得到的结果,即两性及其复配修饰有助于减少红壤与壤土吸附苯酚的差异,二者相互印证。因此,黏土矿物组成决定的低CEC是影响两性及其阳离子复配修饰红壤吸附苯酚能力的主要因素。

Cd^{2+} 存在时,土样对苯酚吸附量有所增加,这是由于溶液中存在的 Cd^{2+} 中和了由铁铝氧化物产生的负电荷,降低排斥作用,增加了苯酚分子与有机相的结合,造成吸附量的上升,也不排除可能是 Cd^{2+} 与苯酚形成复合物,造成共吸附的缘故^[30]。

与黄棕壤不同的是,红壤修饰土土样表面疏水性较弱,因而在单一处理时盐析效应^[18]不及压缩双电层效应^[7,31],随着KCl浓度的增大,土样胶体颗粒表面的双电层被压缩,使供试土样表面的电荷密度增大,增加了其亲水性,从而抑制了对具有疏水性的苯酚的吸附作用,因而降低了各供试土样对苯酚的吸附能力。

4 结论

(1)在BS-12修饰的基础上,复配DTAB能显著提高可变电荷红壤对苯酚的吸附能力。单一苯酚处理时,表现出在总修饰比例小于150%CEC时吸附量随修饰比例递增的规律。对苯酚吸附在所有处理下的等温线均适合用Henry模型描述。

(2)两性复配修饰红壤对苯酚的吸附具有增温负效应。pH升高不利于苯酚吸附。单一处理时,在 $0.01\sim 0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl浓度范围内,修饰红壤对苯酚的吸附量随着离子强度的升高而下降; Cd^{2+} 复合处理时,由于影响机制不同,表现为先降低后升高的趋势。

(3)由于黏土矿物组成导致的低CEC,是决定红壤对苯酚吸附能力的决定因素。

参考文献:

- [1] Nourmoradi H, Nikaeen M, Khiadani M. Removal of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) from aqueous solutions by montmorillonite modified with nonionic surfactant: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 191 (19): 341-348.
- [2] 吴大清,刁桂仪,彭金莲.高岭石等粘土矿物对五氯苯酚的吸附及其与矿物表面化合态关系[J]. *地球化学*, 2003, 32(5): 501-505.
WU Da-qing, DIAO Gui-yi, PENG Jin-lian. Adsorption of pentachlorophenol onto clay minerals and relationship with their surface speciation [J]. *Geochimica*, 2003, 32(5): 501-505.
- [3] Divincenzo J P, Sparks D L. Sorption of the neutral and charged forms of pentachlorophenol on soil evidence for different mechanisms[J]. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2001, 40 (4):

- 445-500.
- [4] Liu B, Lu J, Xie Y, et al. Microwave-assisted modification on montmorillonite with ester-containing Gemini surfactant and its adsorption behavior for triclosan[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2014, 418:311-316.
 - [5] Dutta A, Singh N. Surfactant-modified bentonite clays: Preparation, characterization, and atrazine removal[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(5):3876-3885.
 - [6] Yang S F, Gao M L, Luo Z X. Adsorption of 2-Naphthol on the organo-montmorillonites modified by Gemini surfactants with different spacers [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 256:39-50.
 - [7] Anirudhan T S, Ramachandran M. Removal of 2, 4, 6-trichlorophenol from water and petroleum refinery industry effluents by surfactant-modified bentonite[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2014, 1: 46-53.
 - [8] Park Y, Sun Z, Ayoko G A, et al. Removal of herbicides from aqueous solutions by modified forms of montmorillonite[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2014, 415(2):127-132.
 - [9] 杨盛春, 王周理, 何丽仙, 等. 双离子有机膨润土的微波辅助合成及吸附性能研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21):6189-6192.
YANG Sheng-chun, WANG Zhou-li, HE Li-xian, et al. Synthesis of dual-cation organo-bentonites by microwave-assisted method and adsorption performance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(21):6189-6192.
 - [10] Zhu L Z, Chen B L, Shen X Y. Sorption of phenol, p-Nitrophenol, and aniline to dual-cation organobentonites from water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(3):468-475.
 - [11] Li L, Zhu L Z. Effect of soil components on the surfactant-enhanced soil sorption of PAHs[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2012, 12(2):161-168.
 - [12] Chen D, Deng Y, Zhu Q, et al. Characterization of cationic-nonionic surfactants modified montmorillonite and its application for the removal of p-nitrophenol[J]. *Science of Advanced Materials*, 2013, 5(8):1041-1051.
 - [13] 刘玲, 麦倩文. 阴-阳离子表面活性剂复合改性膨润土治理苯酚废水的研究[J]. 日用化学工业, 2013, 43(2):85-89.
LIU Ling, MAI Qian-wen. Treatment of phenol containing waste water with bentonite jointly modified by anionic and cationic surfactant[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2013, 43(2):85-89.
 - [14] Chen D M, Chen J, Luan X L, et al. Characterization of anion-cationic surfactants modified montmorillonite and its application for the removal of methyl orange[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(3):1150-1158.
 - [15] 邵红, 刘相龙, 李云姣, 等. 阴阳离子复合改性膨润土的制备及其对染料废水的吸附[J]. 水处理技术, 2015, 41(1):29-34.
SHAO Hong, LIU Xiang-long, LI Yun-jiao, et al. Preparation of anion-cationic composite modified bentonite and its adsorption of dye wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(1):29-34.
 - [16] 李文斌, 孟昭福, 吴琼, 等. 添加复合吸附剂对壤土吸附菲和Cr(VI)的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11):4419-4427.
LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, et al. Effect of adding compound adsorbent on phenanthrene and Cr(VI) adsorption by Lou soil [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11):4419-4427.
 - [17] Huang R H, Zheng D S, Yang B C, et al. Preparation and characterization of CTAB-HACC bentonite and its ability to adsorb phenol from aqueous solution[J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(1):286-292.
 - [18] 李婷. 两性修饰膨润土对苯酚和Cd(II)的平衡吸附特征[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
LI Ting. Equilibrium adsorption characteristics of amphoteric modified bentonites to Cd(II) and phenol[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
 - [19] Meng Z F, Zhang Y P, Zhang Z Q. Simultaneous adsorption of phenol and cadmium on amphoteric modified soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2):492-498.
 - [20] 白俊风, 孟昭福, 刘源辉, 等. 两性-阳离子复配修饰壤土对苯酚的吸附[J]. 中国环境科学, 2010, 30(10):1389-1394.
BAI Jun-feng, MENG Zhao-fu, LIU Yuan-hui, et al. Adsorption of phenol on amphoteric-cationic modified Lou Soil[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(10):1389-1394.
 - [21] 刘伟, 孟昭福, 任爽, 等. BS+CTMAB复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用[J]. 环境科学, 2017, 38(7):3036-3044.
LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, et al. Application of amphoteric-cationic combined modification on phenol adsorption of Yellow Brown Soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7):3036-3044.
 - [22] 杨海妮, 邓晶, 孟昭福, 等. 镉离子在两性修饰红壤性水稻土中运移研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1604-1610.
YANG Hai-ni, DENG Jing, MENG Zhao-fu, et al. Cadmium ion transport in amphoteric modified red-earth-derived-paddy-soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1604-1610.
 - [23] 杨芳, 孟昭福, 杨海妮, 等. 两性修饰剂修饰红壤对镉离子吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):462-466.
YANG Fang, MENG Zhao-fu, YANG Hai-ni, et al. Cadmium adsorption characteristics in red soil modified with amphoteric modifier[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):462-466.
 - [24] 刘雅巍, 池勇志, 费学宁, 等. 紫外分光光度法对苯酚、苯胺和苯甲酸的同时测定方法的研究[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2):72-74.
LIU Ya-wei, CHI Yong-zhi, FEI Xue-ning, et al. On simultaneous determination of phenol aniline and benzoic acid by ultraviolet absorption spectrometry[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2):72-74.
 - [25] Guo J, Chen S, Liu L, et al. Adsorption of dye from wastewater using chitosan-CTAB modified bentonites[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2012, 382(1):61-66.
 - [26] 孟昭福, 李荣华, 张一平, 等. 有机修饰壤土对苯胺的吸附[J]. 土壤通报, 2008, 39(1):143-149.
MENG Zhao-fu, LI Rong-hua, ZHANG Yi-ping, et al. Adsorption of aniline on an organic modified Lou Soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):143-149.
 - [27] 李彬, 孟昭福, 王建涛, 等. BS-CTMAB复配修饰膨润土对苯酚的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6):1131-1138.
LI Bin, MENG Zhao-fu, WANG Jian-tao, et al. Adsorption of phenol

- on amphoteric-cationic modified bentonites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6):1131-1138.
- [28] 秦普学. BS-18两性修饰土对苯酚、 Cd^{2+} 复合污染吸附的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- QIN Pu-xue. Studies on the Adsorption of phenol and Cd^{2+} in soil modified with BS-18[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [29] 崔晓波, 孟昭福, 杨亚莉, 等. 苯酚在BS-Tw80复配修饰膨润土和高岭土上吸附的比较[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10):1905-1913.
- CUI Xiao-bo, MENG Zhao-fu, YANG Ya-li, et al. Comparison of phenol adsorption on bentonite and kaolinite co-modified by BS-12 and Tween-80[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10):1905-1913.
- [30] 刘源辉. 两性一阴离子复配修饰壤土对 Cd^{2+} 和苯酚的吸附特征[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- LIU Yuan-hui. Adsorption characteristic for Cd^{2+} and phenol on Lou Soil modified with mixtuyre of amphoteric and anionic surfactant[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [31] 李素珍, 徐仁扣. 可变电荷土壤中胶粒双电层的相互作用与阴离子同时吸附[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5):948-952.
- LI Su-zhen, XU Ren-kou. Interaction of colloidal electrical double layers and simultaneous adsorption of cations and anions in variable charge soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):948-952.
- [32] 龚道新, 汪传刚, 胡湘望, 等. 噻吩磺隆在土壤中的吸附及表面活性剂对吸附的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5):1689-1693.
- GONG Dao-xin, WANG Chuan-gang, HU Xiang-wang, et al. Adsorption of thifensulfuron in soils and influence of surfactants to adsorption[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1689-1693.
- [33] 陈 铭, 刘更另. 可变电荷土壤的表面化学性质[J]. *土壤通报*, 1993(5):238-240.
- CHEN Ming, LIU Geng-ling. Surface chemical properties of variable charge soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993(5):238-240.