

两性-非离子表面修饰剂复配修饰 娄土吸附 Cd^{2+} 的动力学

郑萍英^{1a}, 罗 坤², 孟昭福^{1b}, 秦普学^{1a}, 刘源辉^{1b}, 白俊凤^{1b}, 李 健^{1c}, 钟 秋^{1b}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 理学院, c 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2 郴州市环境监测站, 湖南 郴州 423000)

[摘 要] 【目的】研究两性表面修饰剂和非离子表面修饰剂复配修饰娄土对重金属 Cd^{2+} 的吸附动力学特征, 为两性-非离子表面修饰剂复配修饰娄土对重金属 Cd^{2+} 的吸附特征和机制的研究提供理论依据。【方法】以原土, 即未修饰娄土(CK)为对照, 以十二烷基二甲基甜菜碱(BS)作为两性表面修饰剂, 辛烷基酚聚氧乙烯醚(OP)作为非离子表面修饰剂, 采用批处理方法, 研究 20, 40 °C 时, BS 单一修饰和不同比例 BS 与 OP 复配修饰娄土对 Cd^{2+} 的吸附动力学。【结果】在 20 和 40 °C, BS-OP 复配修饰娄土吸附 Cd^{2+} 的快速吸附阶段平均速度(V_f)分别表现为 100% BS > 50% BS ≈ 50% BS + 50% OP > 100% BS + 100% OP ≈ 100% BS + 50% OP > CK > 50% BS + 100% OP; 100% BS > 100% BS + 50% OP > 100% BS + 100% OP > 50% BS > 50% BS + 50% OP ≈ 50% BS + 100% OP > CK。BS 修饰比例相同时, 修饰娄土的 V_f 总体上随着 OP 修饰比例增大而下降; OP 修饰比例相同时, 随着 BS 修饰比例的增加, 修饰娄土的 V_f 均增大。【结论】在两性-非离子表面修饰剂复配修饰娄土对 Cd^{2+} 的吸附过程中, BS 起促进作用, OP 起抑制作用, 描述修饰娄土吸附 Cd^{2+} 的较佳模型是双常数动力学模型。

[关键词] 娄土; Cd^{2+} ; 复配修饰; 吸附; 动力学

[中图分类号] X131.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)09-0135-06

Adsorption kinetics of Cd^{2+} on amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil

ZHENG Ping-ying^{1a}, LUO Kun², MENG Zhao-fu^{1b}, QIN Pu-xue^{1a},
LIU Yuan-hui^{1b}, BAI Jun-fen^{1b}, LI Jian^{1c}, ZHONG Qiu^{1b}

(1 a College of Resources and Environment, b College of Science, c College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Environmental Monitoring Station of Chenzhou City, Chenzhou, Hunan 423000, China)

Abstract: 【Objective】Investigation on the characteristic of adsorption kinetics of Cd^{2+} on amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil could provide a theoretical foundation for the characteristic and mechanism of adsorption kinetics of Cd^{2+} on amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil. 【Method】The original soil, unmodified soil (CK), was used as the control, Dodecane-Betaine (BS) as amphoteric surface active agent and Octylphenol polyoxyethylene ether (OP) as nonionic surface active agent, to study the kinetics characteristics of Cd^{2+} adsorption by BS single modified and BS-OP co-modified Lou soil by the batch techniques at 20 and 40 °C. 【Result】These outcomes indicated that, at 20 and 40 °C, the fast-adsorption-velocity(V_f) order was 100% BS > 50% BS ≈ 50% BS + 50% OP > 100% BS + 100% OP ≈ 100% BS + 50% OP > CK > 50% BS + 100% OP and 100% BS > 100% BS + 50% OP > 100% BS + 100% OP > 50% BS > 50% BS + 50% OP ≈ 50% BS + 100% OP > CK respectively on all

* [收稿日期] 2010-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40301021)

[作者简介] 郑萍英(1983—), 女, 湖南郴州人, 在读硕士, 主要从事土壤环境化学及污染修复研究。E-mail: huil_001@163.com

[通信作者] 孟昭福(1968—), 男, 辽宁盖州人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤环境化学及污染修复研究。

E-mail: zfmeng1996@263.net

modified Lou soil in general. The V_f of Cd^{2+} on co-modified Lou soil with the same BS proportion modified decreased with the rise of OP modified ratio, meanwhile, the V_f of Cd^{2+} on co-modified Lou soil with the same OP proportion modified increased with the rise of OP modified ratio. 【Conclusion】 BS modification can promote the adsorption-velocity of Cd^{2+} on co-modified Lou soil, however, OP co-modification can inhibit the absorption of Cd^{2+} on BS modified soil. The double constant model is better than other models to describe the absorption kinetic curves of Cd^{2+} on modified soil.

Key words: Lou soil; Cd^{2+} ; co-modification; adsorption; kinetics

随着工业的发展、城市污染的加剧以及农用化学药品种类和数量的增加,我国地下水及土壤的污染日益严重,其中土壤重金属污染已成为制约我国环境可持续发展的限制因子之一,并受到越来越广泛的关注^[1-4]。因此,寻找有效的方法来控制和减轻土壤重金属污染,已经成为当今研究的热点。通常采用有机修饰剂修饰土壤的方法,以增强土壤对重金属的吸附固定能力,目前该方法已成为土壤重金属化学修复的重要方法之一。

土壤中有机物和重金属污染一般同时存在。Meng 等^[5]研究表明,两性表面修饰剂修饰娄土对 Cd^{2+} 、苯酚的吸附能力均显著提高。杨海妮等^[6]研究表明,经两性表面修饰剂修饰的红壤性水稻土对 Cd^{2+} 的吸持能力增强。目前,已有将非离子表面修饰剂应用于土壤修复的研究^[7-9],其中非离子有机膨润土比阳离子有机膨润土更加稳定,且不会产生二次污染^[10]。有研究表明,用非离子表面修饰剂 TX-7、TX-15 修饰黏土^[11]、沉积物^[12]后,均可增加其对有机污染物的吸附量。此外,还有研究表明,选取合适的非离子表面修饰剂进行原位淋洗,可成倍提高 PAHs 的去除率^[13]。目前,关于非离子表面修饰剂在土壤重金属污染中的应用多集中于淋洗和萃取方面。周顺桂等^[14]研究表明,低浓度 Tween80 对粉煤灰中重金属的溶出具有促进作用,而高浓度 Tween80 则起抑制作用;张永等^[15]研究发现, Tween80 和 TritonX-100 两种表面修饰剂对重金属的萃取量都偏低,用于重金属污染土壤淋洗修复不可行。胡随喜等^[16]发现, pH 值对非离子表面修饰剂去除土壤中的 Cd^{2+} 含量有影响。非离子型表面修饰剂在溶液中稳定性高,与其他类型的表面修饰剂的相容性好,因此可以与其他表面修饰剂复配使用^[17]。葛渊数等^[18]研究表明,阳离子-非离子有机膨润土对水中硝基苯的吸附能力比相应的单一阳离子或单一非离子表面修饰剂显著增强。

上述研究结果表明,两性表面修饰剂具有同时吸附固定有机物和重金属的能力^[5],非离子表面修

饰剂对有机、重金属污染物也具有一定的作用,如果将非离子和两性表面修饰剂复配对娄土进行修饰,复配修饰娄土对重金属污染物的吸附固定效果如何,目前尚未见报道。本研究用非离子表面修饰剂和两性表面修饰剂复配修饰娄土,从动力学角度研究其对重金属 Cd^{2+} 吸附的特点,以期两性-非离子表面修饰剂复配修饰娄土对重金属的吸附特征和机制研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 供试土样 陕西关中地区娄土黏化层,采自陕西杨凌西北农林科技大学后河边台地,采样深度 1.5~1.8 m(根据实际采集地点黏化层深度确定),土样风干,过孔径 1 mm 尼龙筛。供试土样基本理化性质: pH=8.57,有机质含量为 5.69 g/kg, CEC 为 188.9 mmol/kg, Cd^{2+} 含量为 0.12 mg/kg, CaCO_3 含量为 3.1 g/kg。

1.1.2 试 剂 两性表面修饰剂采用十二烷基二甲基甜菜碱(BS-12,简称 BS),天津兴光助剂厂生产;非离子表面修饰剂采用辛烷基酚聚氧乙烯醚(OP-10,简称 OP),上海青析化工科技有限公司生产;重金属污染物采用 Cd^{2+} 溶液,用 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 配制,以 0.05 mol/L CaCl_2 作为背景。以上试剂均为分析纯。

1.1.3 主要仪器 全温摇床(HZQ-F160 型),江苏太仓试验设备厂生产;低速大容量多管离心机(LXJ-II B 型),上海安亭科学仪器厂生产;原子吸收分光光度计(日立 Z-5000),日本日立公司生产。

1.2 试验方法

1.2.1 表面修饰娄土的制备 采用湿法制备^[19]。称取一定质量的土样,按土样 CEC 称取一定质量 BS,将 BS 加入去离子水中,加热至 60 °C,搅拌使 BS 溶解。在搅拌过程中,加入土样,恒温水浴反应 3 h,真空抽滤,以去离子水洗涤 3 遍,60 °C 烘干,过孔径 1 mm 尼龙筛,备用。BS-OP 复配修饰娄土制

备与上述方法基本相同,即采用先加入 BS 反应 3 h,以去离子水洗涤 3 遍,再加入 OP 反应 3 h 的制备方法。预试验结果表明,负载在土样上的修饰剂在吸附过程中的脱附率很低。

设 BS 分别以原土 CEC 的 50%和 100%两个比例单一修饰,形成 50% BS、100% BS 修饰娄土;以及 BS 分别以原土 CEC 的 50%和 100%与 OP 分别以原土 CEC 的 50%和 100%复配形成 50% BS+50% OP、50% BS+100% OP、100% BS+50% OP、100% BS+100% OP 复配修饰娄土。

其中一定质量土样所用修饰剂 BS、OP 的质量分别按下式进行计算:

$$W = m \times \text{CEC} \times M \times 10^{-5} \times R / b.$$

式中: W 为修饰剂质量 (g), m 为土样质量 (g), CEC 为修饰娄土的阳离子代换量 (mmol/kg), M 为修饰剂的摩尔质量 (g/mol), R 为修饰比例, b 为修饰剂产品的含量 (BS、OP 的质量分数分别为 30%和 100%)。

1.2.2 吸附动力学试验 以原土,即未修饰娄土 (CK)作为对照,对 BS、OP 修饰娄土进行吸附 Cd²⁺ 动力学试验,每处理设 3 个重复。用万分之一天平分别准确称取 1.000 0 g 修饰娄土及原土 (CK)置于 12 支 50 mL 离心管中,用移液管加入 300 mg/L Cd²⁺ 溶液 10.00 mL,分别在 20 和 40 °C 恒温连续振荡 (140 r/min),分别振荡 0.17,0.33,0.67,1,2,4,8,16,24,36,40,48 h 取样,3 600 r/min 离心 10

min,取上清液测定其中的 Cd²⁺ 含量。

1.3 Cd²⁺ 含量及吸附量的测定

用原子吸收分光光度法测定 Cd²⁺ 的含量,Zee-man 效应校正背景吸收。采用差减法计算 Cd²⁺ 吸附量。

1.4 计算方法

1.4.1 动力学模型 本研究采用双常数动力学模型,对修饰后娄土吸附 Cd²⁺ 的动力学曲线进行拟合,其表达式为 $S=A \cdot t^B$;式中: t 为时间 (h), S 为 t 时刻吸附质在土样中的吸附量 ($\mu\text{g/g}$), A 、 B 为模型的拟合参数。模型均采用软件 CurveExpert 1.3 以逐步逼近法进行非线性拟合。

1.4.2 速度参数 采用孟昭福等^[20]定义的速度参数进行分析。(1)快速吸附阶段平均速度 V_f 。 V_f 为快速吸附阶段吸附平均速度,即快速吸附阶段直线段斜率,单位为 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

(2)转折时间 t_c 。 t_c 为快速吸附阶段与慢速吸附阶段转折点对应的的时间,其值可由快速吸附阶段直线段与慢速吸附阶段直线段的交点求得,单位为 h。

2 结果与分析

2.1 BS-OP 复配修饰娄土对 Cd²⁺ 吸附的动力学特征

不同温度下,不同修饰娄土对 Cd²⁺ 的吸附量随时间变化的动力学曲线见图 1。

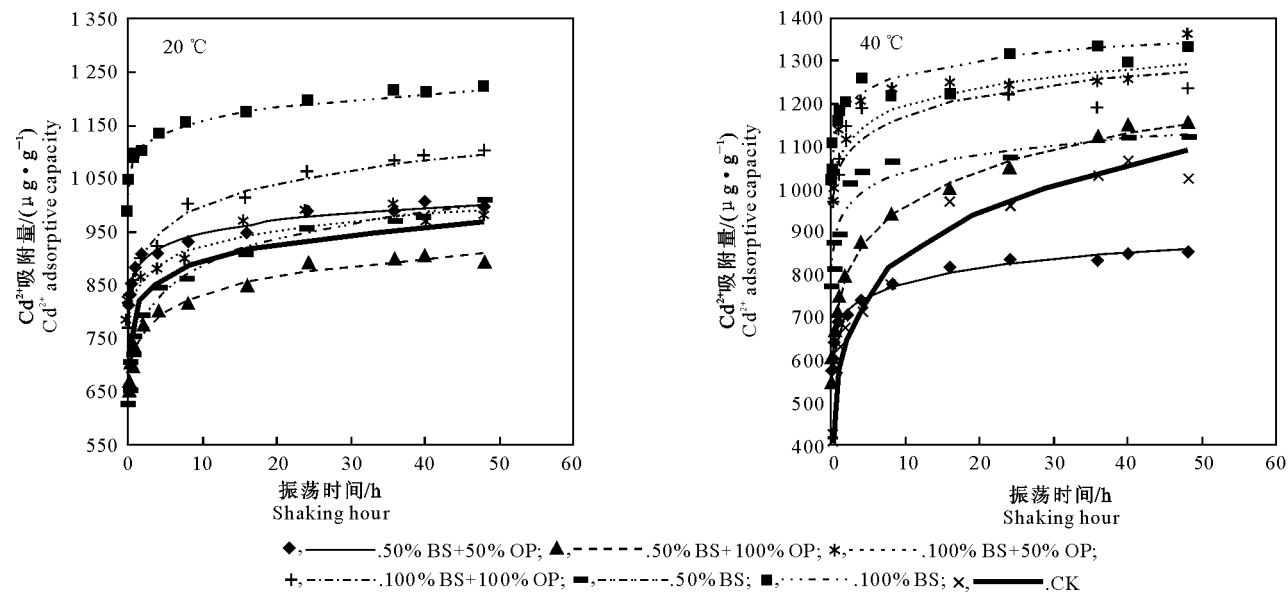


图 1 BS-OP 复配修饰娄土对 Cd²⁺ 的吸附动力学曲线

图中数据点为实测数据,曲线为双常数动力学方程拟合结果

Fig.1 Adsorption kinetic curves of Cd²⁺ on different amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil

The data pionts in the chart are measured datas,the curves in the chart are the fitting results of double contant kinetic equation

图 1 显示,Cd²⁺在各供试土样中的吸附量随着时间的延长具有相似的趋势,即在起始阶段,随着时间的延长,Cd²⁺的吸附量快速上升,之后随着时间的继续延长,Cd²⁺吸附量的增加幅度趋于平缓。在 0.1~0.4 h,供试土样对 Cd²⁺的吸附均出现一个转折点,在转折点两侧分别为快速吸附和慢速吸附 2 个阶段^[20]。在 24 h 左右,除 40 ℃ 原土和 50% BS+50% OP 处理土样外,其他土样对 Cd²⁺的吸附均达到平衡。

2.2 修饰剂比例对 BS-OP 复配修饰 塬土吸附 Cd²⁺ 速度参数 V_f 的影响

根据 1.4 节中的动力学模型及速度参数定义,计算所得各参数的结果见表 1。表 1 表明,除 20 ℃ 50% BS+100% OP 处理土样外,其他土样对 Cd²⁺吸附的 V_f 均大于 CK,表明两性-非离子表面修饰剂复配修饰 塬土吸附 Cd²⁺的速度得到了提高。20 ℃ 时,不同处理土样的 V_f 大小为 100% BS>50% BS≈50% BS+50% OP>100% BS+100% OP≈100% BS+50% OP>CK>50% BS+100% OP; 40 ℃ 时为 100% BS>100% BS+50% OP>100% BS+100% OP>50% BS>50% BS+50% OP≈50% BS+100% OP>CK。

表 1 还表明,当 BS 修饰比例相同时,OP 修饰

比例对 V_f 的影响有差异。20 ℃ 时,50% BS+100% OP 处理土样的 V_f 显著小于 50% BS+50% OP 处理土样;但 100% BS+100% OP 处理土样与 100% BS+50% OP 处理土样的 V_f 差异不显著。在 40 ℃ 时,50% BS+100% OP 处理土样的 V_f 与 50% BS+50% OP 处理土样差异不显著,100% BS+100% OP 处理土样的 V_f 显著小于 100% BS+50% OP 处理土样。可知在一定比例 BS 修饰的基础上,总体上呈现出 V_f 随着 OP 修饰比例的增大而下降的变化趋势。20 ℃ 时,各修饰 塬土的 t_c 无显著差异;40 ℃ 时,各修饰 塬土的 t_c 变化趋势基本上与 V_f 的变化趋势相反,即各修饰 塬土的 t_c 均低于 CK。这主要是由于各修饰 塬土吸附 Cd²⁺的速度得到了提高,故达到快速吸附和慢速吸附转折点的时间相应缩短^[20]。

当 OP 修饰比例相同时,BS 修饰比例对 V_f 的影响也有差异。除 20 ℃ 时 100% BS+50% OP 处理土样的 V_f 与 50% BS+50% OP 处理土样差异不显著外,当 OP 修饰比例相同时,随着 BS 修饰比例的增加,修饰 塬土吸附 Cd²⁺的 V_f 呈增大的趋势。

上述分析说明,BS 对 BS-OP 复配修饰 塬土吸附 Cd²⁺具有促进作用,而 OP 则起阻碍作用。

表 1 BS-OP 复配修饰 塬土对 Cd²⁺ 的吸附动力学参数

Table 1 Kinetics parameters of cadmium adsorption on amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil						
温度/℃ Temperature	处理 Treatment	A	B	r	V _f /(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	t _c /h
20	CK	795.27 fgh	0.05 d	0.893 5**	4 387.5 fg	0.18 cd
	50% BS	877.87 de	0.05 d	0.979 2**	4 847.3 de	0.18 cde
	100% BS	1 297.75 a	0.05 d	0.962 5**	7 170.9 a	0.18 cde
	50% BS+50% OP	876.03 de	0.05 d	0.892 5**	4 846.3 de	0.18 cde
	50% BS+100% OP	754.41 hi	0.05 d	0.831 3**	4 173.3 gh	0.18 cde
	100% BS+50% OP	834.83 efg	0.04 d	0.880 1**	4 626.3 ef	0.18 cde
	100% BS+100% OP	874.44 def	0.06 c	0.985 4**	4 729.2 ef	0.19 c
40	CK	586.61 j	0.16 a	0.982 7**	2 631.3 i	0.31 a
	50% BS	943.72 d	0.05 d	0.896 5**	5 214.5 d	0.17 de
	100% BS	1 371.93 a	0.02 f	0.901 7**	7 559.9 a	0.16 f
	50% BS+50% OP	711.22 i	0.05 d	0.956 6**	3 932.3 h	0.17 de
	50% BS+100% OP	783.42 ghi	0.09 b	0.937 2**	3 929.7 h	0.22 b
	100% BS+50% OP	1 158.36 b	0.03 e	0.847 5**	6 514.2 b	0.17 ef
	100% BS+100% OP	1 059.93 c	0.04 d	0.835 6**	5 873.8 c	0.17 def

注:(1) 多重比较采用 Fisher(LSD)法,同列数据后标不同小写字母者表示差异显著(P<0.05);(2) ** 表示达 1%显著水平相关(f=12, r=0.661 4)。
Note:(1) Multiple comparisons using Fisher (LSD) method,different small letters in the same raw means significant difference at 0.05 level among treatments;(2) ** means significant difference at 0.01 level among treatments (f=12,r=0.661 4).

2.3 温度对 BS-OP 复配修饰 塬土吸附 Cd²⁺ 速度参数的影响

表 1 显示,当温度为 20~40 ℃ 时,随着温度的

升高,未修饰 塬土(CK)的 V_f 呈下降趋势,而 t_c 则显著增加。当 BS 修饰比例相同时,随着温度的升高,OP 修饰比例不同,其对 V_f 的影响也有差异。当

温度为 20~40 ℃ 时,随着温度升高,50% BS、50% BS+100% OP 处理土样的 V_f 无显著变化;50% BS+50% OP 处理土样的 V_f 显著下降;100% BS+50% OP、100% BS+100% OP 处理土样的 V_f 则显著升高。可知随着温度的升高,OP 修饰比例增加对 50% BS 修饰楼土的 V_f 影响不显著,但对 100% BS 修饰楼土的 V_f 影响显著。

表 1 还显示,当 OP 修饰比例相同时,随着温度的升高,BS 修饰比例增加对 V_f 也有影响,其中 50% BS+50% OP 处理土样的 V_f 下降,100% BS+50% OP 处理土样的 V_f 上升;50% BS+100% OP 处理土样的 V_f 变化不显著,100% BS+100% OP 处理土样的 V_f 上升。表明随着温度及 BS 修饰比例的增加,BS-OP 复配修饰楼土的 V_f 明显增大。

上述结果表明,对于 BS-OP 复配修饰楼土,随着温度的升高及 BS 修饰比例的增加,其温度效应由 CK 的负效应转化为正效应。

3 讨 论

3.1 双常数动力学模型的参数意义

预试验中,在 20 和 40 ℃ 下,以常见的 17 种动力学模型对吸附动力学数据进行拟合,结果表明,双常数动力学模型拟合结果较佳,此时 r 值均达到显著水平。对双常数动力学模型表达式 $S=A \cdot t^B$ 两边取对数,线性化后得 $\ln S=\ln A+B \ln t$ 。当 $t=1$ 时,得 $A=S$,即拟合参数的 A 为吸附 1 h 时供试土样对污染物的吸附量 $S_{1h}(\mu\text{g/g})$ 。

将式 $\ln S=\ln A+B \ln t$ 变形可得 $\ln (S/S_{1h})=B \ln t$,式中 S/S_{1h} 为 t 时刻实际吸附量与 1 h 吸附量的比值。当 $S/S_{1h}=0.368$ 时, $\ln (S/S_{1h})=-1$, $B=-1/\ln t$ 。当 $0<t<1$,则 $\ln t<0$,且 t 值越大, B 值越大。由此可见, B 值的物理意义为某一 Cd^{2+} 添加质量浓度下,实际吸附量达到 1 h 吸附量的 36.8% 时所需时间对数的负倒数, B 值越小,需要的时间越短,吸附速度越快。

比较表 1 中双常数动力学模型拟合参数 A 和吸附速度参数 V_f 可知,在 20 和 40 ℃ 时,修饰土样吸附 Cd^{2+} 的拟合参数 A 值分别表现为 100% BS>50% BS≈50% BS+50% OP>100% BS+100% OP≈100% BS+50% OP>CK>50% BS+100% OP;100% BS>100% BS+50% OP>100% BS+100% OP>50% BS>50% BS+100% OP≈50% BS+50% OP>CK,分别与 20 和 40 ℃ 时 V_f 的大小顺序一致,且相关性均达极限显著水平($P^{**}<$

0.000 1)。因此, A 可以作为描述 BS-OP 复配修饰楼土吸附 Cd^{2+} 速度快慢的特征值。

比较本研究中双常数动力学模型拟合参数 B 与 A 可知,在 40 ℃ 且 Cd^{2+} 添加质量浓度相同时,参数 B 与 A 值的变化规律基本相反($P^{**}<0.000 1$),进一步证实了在平衡吸附量相等或相近的前提下, B 值越小,吸附速度越快,反之则吸附速度越慢。此外,经相关性分析,在 40 ℃ 时, B 与 t_e 具有良好的相关性($P^{**}<0.000 1$)。因此,在 40 ℃ 时, B 值可作为描述 BS-OP 复配修饰楼土吸附 Cd^{2+} 速度快慢的特征值。

3.2 影响 BS-OP 复配修饰楼土吸附 Cd^{2+} 速度机制的初探

楼土黏化层主要以粘粒矿物为主,其表面负电荷吸附点位对 Cd^{2+} 有吸附作用,且吸附作用主要是物理吸附,需要能量小,吸附易于发生,温度升高易造成 V_f 下降。

两性表面修饰剂 BS 同时带有疏水碳链以及 2 个分别带正电荷和负电荷的亲水基团,在楼土表面加入 BS 后,BS 的正电荷亲水基团因电性引力与土壤表面的负电荷电位结合,同时其负电荷亲水基团和长碳链向外伸展^[2]。一方面,BS 上的负电荷点位对 Cd^{2+} 存在电性引力;另一方面,BS 长碳链还可能通过形成五元环的方式与 Cd^{2+} 通过螯合键相结合^[21],使 Cd^{2+} 吸附点位明显增加,因此 BS 修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附速度明显大于原土,且随 BS 修饰比例的增大,修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附速度增大。在 BS 修饰的基础上,加入非离子修饰剂 OP 对楼土进行复配修饰,一方面,OP 可通过疏水基团与 BS 长碳链结合^[17];另一方面,OP 的亲水基团聚氧乙烯基略带正电^[22],也会吸附在土样的负电荷点位上,因此增加了土样表面的疏水性,从而对 Cd^{2+} 的亲水性吸附具有阻碍作用。因此,随着 OP 修饰比例的增加,BS-OP 复配修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附速度呈下降趋势。由于 BS-OP 复配修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附速度主要由 BS 决定,OP 阻碍作用相对较小,因此 BS-OP 复配修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附速度仍明显高于原土。

在 BS 修饰楼土对 Cd^{2+} 的吸附作用中,除存在负电荷电性吸附的物理吸附作用外,还存在螯合键相结合的化学吸附作用,且二者温度效应可以相互抵消,故 BS 单一修饰楼土吸附 Cd^{2+} 的温度效应差异不显著;对于 BS-OP 复配修饰楼土,OP 对 Cd^{2+} 吸附速度的抑制作用主要是以电性斥力形式存在,

因此 BS 对 Cd^{2+} 的化学吸附作用被突出,故随 BS 比例增大, Cd^{2+} 吸附速度的温度效应由 CK 的负效应逐渐转变为正效应。

4 结 论

BS-OP 复配修饰娄土对 Cd^{2+} 的吸附分为快速吸附和慢速吸附 2 个阶段。当 BS 修饰比例相同时,修饰娄土吸附 Cd^{2+} 的 V_f 总体上随着 OP 修饰比例增大而下降。当 OP 修饰比例相同时,随着 BS 修饰比例的增加,修饰娄土的 V_f 增大。表明 BS 对 BS-OP 复配修饰娄土吸附 Cd^{2+} 的 V_f 起促进作用,而 OP 则起阻碍作用。双常数动力学模型 $S = A \cdot t^B$ 是描述修饰娄土吸附 Cd^{2+} 的最佳模型,拟合参数 A 、 B 可作为描述两性-非离子表面修饰剂复配修饰娄土对 Cd^{2+} 吸附速度快慢的特征值。

[参考文献]

- [1] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等. 土壤重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境,2002,11(1):79-84.
Zheng X K, Lu A H, Gao X, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(1): 79-84. (in Chinese)
- [2] 贾琳,杨林生,欧阳竹,等. 典型农业区农田土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2270-2276.
Jia L, Yang L S, Ouyang Z, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the farmland soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2270-2276. (in Chinese)
- [3] Kabata Pendias A, Henryk P. Trace elements in soils and plants [M]. New York: CRC Press, 2000.
- [4] 赵雄,李福燕,张冬明,等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2236-2240.
Zhao X, Li F Y, Zhang D M, et al. Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2236-2240. (in Chinese)
- [5] Meng Z F, Zhang Y P, Wang G D. Sorption of heavy metal and organic pollutants on modified soils [J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 235-245.
- [6] 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 H N, Deng J, Meng Z F, et al. Cadmium ion transport in amphoteric modified red-earth-derived-paddy-soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1604-1610. (in Chinese)
- [7] 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.

- Yang C J, Zeng Q R, Zhang J, et al. Sorption model of nonionic surfactant on soil/sediment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(4): 1396-1401. (in Chinese)
- [8] 张天永,扈娟,柴义,等. 非离子表面活性剂存在下光催化降解有机颜料[J]. 分子催化, 2007, 21(2): 149-154.
Zhang T Y, Hu J, Chai Y, et al. Study of photocatalytic degradation of organic pigment in the presence of nonionic surfactant [J]. Journal of Molecular Catalysis, 2007, 21(2): 149-154. (in Chinese)
- [9] Lee J F, Liao P M, Kuo C C, et al. Influence of a nonionic surfactant (TritonX-100) on contaminant distribution between water and several soil solids [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 229(2): 445-452.
- [10] 沈陪友,徐晓燕,马毅杰. 黏土矿物在环境修复中的研究进展[J]. 中国矿业, 2004, 13(1): 47-50.
Shen P Y, Xu X Y, Ma Y J. Progress in research on contaminated environment remediation of clay minerals [J]. China Mining Magazing, 2004, 13(1): 47-50. (in Chinese)
- [11] 张晓昆,张维清,邹惠仙. 非离子表面活性剂改性土壤的制备及其对水中有机污染物的吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 400-403.
Zhang X K, Zhang W Q, Zhou H X. Modification of montmorillonites with non-ionic surfactants and their utilization in adsorption of several organic compounds from aqueous solution [J]. Journal of Agro-environmental Science, 2004, 23(2): 400-403. (in Chinese)
- [12] 杨成建,曾清如,廖柏寒,等. 低浓度非离子表面活性剂对甲基对硫磷在沉积物上吸附行为的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 105-108.
Yang C J, Zeng Q R, Liao B H, et al. Effect of low concentration nonionic surfactants on adsorption behavior of parathion-methyl in sediments [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(4): 105-108. (in Chinese)
- [13] Joshi M J, Lee S. Optimization of surfactant-aided remediation of industrially contaminated soils [J]. Energic Source, 1996, 18(3): 291-301.
- [14] 周顺桂,胡佩,雷发懋. Tween80 对生物淋滤法去除垃圾焚烧飞灰中重金属的影响[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 82-85.
Zhou S G, Hu P, Lei F M. Leaching heavy metals from MSWI fly ash by using acidithiobacillus thiooxidans in the presence of a surfactant agent [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(2): 82-85. (in Chinese)
- [15] 张永,廖柏寒,曾清如,等. 两种表面活性剂对污染土壤中重金属的萃取研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 248-250.
Zhang Y, Liao B H, Zeng Q R, et al. Extraction of heavy metals in contaminated soils with two surfactants [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 25 (Supplement): 248-250. (in Chinese)