黏土矿物含量对 BS+CT 复配修饰黄棕壤吸附苯酚的影响

刘伟[1,3],孟昭福[2*],杨红瑞[1,3],黄蕾[1,3],阿依古丽·买买提[1,3]

(1. 新疆工程学院化学与环境工程学院,新疆　乌鲁木齐　830091;2. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西　杨凌　712100;3. 新疆新能源材料与绿色化工重点实验室,新疆　乌鲁木齐　830091)

摘　要:对黄棕壤添加蒙脱石和高岭土,以提升土壤黏土矿物含量,利用十二烷基二甲基甜菜碱(BS-12)和十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB)复配修饰该黄棕壤得到供试土样,基于 X 射线衍射表征黏土矿物含量对土样结构的影响,用批处理法研究黏土矿物含量对土样吸附苯酚及其热力学特征的影响。结果表明:复配修饰增加了土样有机碳(TOC)含量,并增强了土样对苯酚的吸附能力;土样 TOC 含量和对苯酚的吸附能力及吸附自发性均随土样中蒙脱石含量的增加而增大,随高岭土占比的升高而降低;土样对苯酚吸附均以分配作用为主,与高岭土相比,受蒙脱石含量影响的 TOC 是决定其对苯酚吸附的关键因素。

关键词:苯酚;两性复配修饰;蒙脱石;高岭土;吸附;黄棕壤

中图分类号:X53;TQ424　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0077-06

Effect of Clay Mineral Content on Phenol Adsorption by BS+CT Composite-Modified Yellow Brown Soil

LIU Wei[1,3], MENG Zhaofu[2*], YANG Hongrui[1,3], HUANG Lei[1,3], AYIGULI Maimaiti[1,3]

(1. *College of Chemical and Environmental Engineering*, *Xinjiang Institute of Engineering*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830091, *China*; 2. *Department of Natural Resource and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Xinjiang Key Laboratory of New Energy Materials and Green Chemical Engineering*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830091, *China*)

Abstract: Kaolin was added to montmorillonite-containing yellow brown soil to increase clay mineral content, then the yellow brown soil was composite-modified with dodecyl dimethyl betaine(BS-12) and cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB) to prepared soil test samples. The influence of clay mineral content on soil structure was characterized by X-ray diffraction. The effect of clay mineral content on the adsorption of phenol by soil and its thermodynamic characteristics was studied by batch processing method. The results showed that the composite-modification increased organic carbon(TOC) content in the soil and enhanced the adsorption capacity of soil for phenol. The content of TOC in the soil, as well as the adsorption capacity and spontaneity for phenol increased with the increase of montmorillonite content in the soil, and decreased with the increase of kaolin proportion. The adsorption of phenol by soil was mainly distributive. TOC affected by the content of montmorillonite was the key factor determining its adsorption of phenol.

Key words: Phenol; Composite-modification; Montmorillonite; Kaolinite; Adsorption; Yellow brown soil

收稿日期:2024-08-30;**修订日期**:2025-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22266033);新疆教育厅高校基本科研业务基金资助项目(XJEDU2023P135);新疆自治区创新训练基金资助项目(S202410994013);陕西省自然科学基础研究计划重点基金资助项目(2022JZ-06);新疆工程学院博士科研启动基金资助项目(2023XGYBQJ10);新疆工程学院校级教学改革基金资助项目(XJGCJGB202308);新疆教育厅教改基金资助项目(XJGXPTJG-202265)

作者简介:刘伟(1983—),男,陕西富平人,副教授,博士研究生,研究方向为土壤污染修复。

* **通信作者**:孟昭福,教授 E-mail: zfmeng1996@263.net

日益严峻的有机污染严重影响土壤环境,使得土壤有机污染的修复研究工作变得极为迫切[1-2],而用不同种类的表面活性剂修饰黏土矿物则可增强对有机污染物的吸附能力[3-5]。李婷等[6]发现两性表面修饰剂具有同时吸附有机和重金属污染物的能力,在保持对重金属吸附能力的前提下,采用两性复配修饰可以提高两性单一修饰土对有机物的吸附能力[7];膨润土[7]、高岭土[8]经两性-阳离子复配修饰后,对苯酚吸附效果分别是原土和两性修饰土的 14.54 倍 ~ 31.03 倍和 1.76 倍 ~ 9.47 倍、1.62 倍 ~ 2.57 倍和 1.00 倍 ~ 1.47 倍,且对苯酚均以分配吸附为主。

目前针对两性复配修饰的研究进展中,修饰剂种类、土样类型和吸附效果研究较多,且在黏土矿物对土样吸附能力的影响中,添加的黏土矿物以膨润土为主[9-10]。相较于膨润土,高岭土阳离子交换量(CEC)相对较小,通过添加高岭土,对比研究黏土矿物含量的变化对土样修饰机制和吸附能力的影响,该类研究目前鲜少报道。

今通过一定比例添加蒙脱石和高岭土到黄棕壤中改变其黏土矿物含量,利用十二烷基二甲基甜菜碱(BS-12,简称 BS)和十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB,简称 CT)复配修饰黄棕壤制备试验样品,通过批处理法对比分析两性-阳离子复配修饰黄棕壤对苯酚的吸附特征,为两性复配修饰应用于增强黄棕壤对有机污染物的吸附提供支撑。

1　材料与方法

1.1　主要仪器与试验

UV-1200 型紫外可见分光光度计,上海美谱达;D/max2200PC 型 X 射线衍射仪(XRD),日本理学公司;德国 Elementar Vario Macro 元素分析仪,北京信立方。

两性修饰剂采用 BS(AR),天津兴光助剂厂;阳离子型修饰剂采用 CT(AR),天津市致远化学试剂有限公司;供试黏土矿物为高岭土,预先经水洗提纯,记为 K。

供试土样为黄棕壤,采自陕西安康市石泉县境内,采样深度为 0 cm ~ 40 cm。添加蒙脱石质量分数为 6% 和 43% 的 2 种黄棕壤分别定义为 Y1 和 Y2[11],将高岭土按质量分数 20% 和 40% 加入 Y1 中,分别得到 20%KY1 和 40%KY1 土样,加入 Y2 中,得到 20%KY2 和 40%KY2 土样。土样基本理化性质见表 1。有文献指出,100%CEC 的 BS 和 100%CEC 的 CT(100BS+100CT)复配修饰高岭土对苯酚吸附效果最佳[8]。100BS 表示用 100%高岭土 CEC 的 BS 修饰制得的两性修饰高岭土。参考文献[11]将高岭土吸附苯酚的最佳修饰比例分别换算成供试土样中高岭土的两性复配修饰比例,20%KY1、40%KY1、20%KY2 和 40%KY2 依次记为 44BS+44CT、49BS+49CT、228BS+228CT 和 214BS+214CT。BS 修饰黄棕壤和 BS+CTMAB 复配修饰黄棕壤均采用湿法制备[12]。

表 1　土样基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of soil samples

土样	pH 值	w_{TOC}/(g·kg^{-1})	CEC /(mmol·kg^{-1})	主要黏土矿物质量分数 φ/%		
				蒙脱石	高岭	石英
Y1	5.46	9.30	184.70	6	0	61
20%KY1	4.77	8.79	146.14	5	17	51
40%KY1	4.45	8.28	133.29	4	29	44
Y2	5.05	11.50	201.08	43	0	15
20%KY2	4.62	10.34	165.41	36	17	13
40%KY2	4.30	9.99	152.03	30	29	11

1.2　试验设计

等温吸附采用批量平衡法进行,将苯酚配制成 5.00 mg/L、10.0 mg/L、20.0 mg/L、50.0 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、300 mg/L、400 mg/L、500 mg/L 的标准系列。20%KY1、40%KY1、20%KY2 和 40%KY2 的原土(CK),单一 BS、CT 修饰土样,以及 BS+CT 复配修饰土样均为供试土样。设置试验温度为 30 ℃,调节 pH 值为 7,加入 0.1 mol/L 的 KNO_3 溶液,每个处理设 3 个重复。

采用批量法进行苯酚吸附试验[13]。取 9 支 50 mL 玻璃离心管,准确称取 0.500 0 g 供试土样置于离心管中,加入 20.00 mL 上述浓度梯度溶液。

将离心管恒温振荡 24 h,经 4 800 r/min 离心 10 min,测定上清液中苯酚,以差减法确定各供试土样对苯酚的平衡吸附量。

1.3 测定与数据处理

用 4-氨基安替比林法测定苯酚,XRD 测定晶体结构,用元素分析仪测定总有机碳(TOC)。

吸附等温线采用 Henry 模型[14]拟合,模型拟合采用 CurveExpert 1.4 拟合软件。土样层间距以 Bragg 方程计算[15]。

2 结果与讨论

2.1 黏土矿物含量对供试土样 XRD 的影响

经 BS、CT 和 BS+CT 复配修饰后,20%KY1、40%KY1 土样蒙脱石衍射峰(2θ 在 2°~8°之间)的位置较 Y1 移动均不明显,蒙脱石层间距(d)均在 Y1[11]的基础上变化不大;同样,20%KY2、40%KY2 土样蒙脱石衍射峰较 Y2 移动均甚微,层间距与 Y2[11]相比变化较小,说明高岭土的添加未影响 BS、CT 修饰和 BS+CT 复配修饰土样的蒙脱石衍射峰位置和层间距大小。而黄棕壤中添加蒙脱石后,BS、CT 修饰和 BS+CT 复配修饰土样的蒙脱石层间距则均随黄棕壤中蒙脱石的增大呈增加趋势,蒙脱石衍射峰整体上向小角度方向移动明显[12]。表明与 Y1 和 Y2 相比,高岭土的添加未影响土样的 BS 和 CT 修饰机制,蒙脱石的添加使土样在 BS 修饰时出现插层现象,且 CT 的插层修饰程度增大[12],可见蒙脱石和高岭土分别添加到黄棕壤中,对土样修饰机制的影响存在不同。

2.2 黏土矿物含量对供试土样 TOC 的影响

各供试土样的 TOC 占比和蒙脱石层间距见表 2。由表 2 可知,20%KY1、40%KY1、20%KY2 和 40%KY2 土样中 TOC 占比均呈 BS+CT>CT>BS>CK 趋势,随总修饰比例的增大而升高,与黏土矿物[7-8]、黄棕壤[11]中 TOC 含量的变化相同。BS、CT 修饰和 BS+CT 复配修饰土样中 TOC 占比变化均呈 Y1[11]>20%KY1>40%KY1 和 Y2[11]>20%KY2>40%KY2 趋势。结合黄棕壤中添加蒙脱石对 TOC 含量的影响结果可知[12],各修饰土样中 TOC 随黄棕壤中蒙脱石含量的增大而升高,随高岭土占比的增大而降低,可见二者分别添加到黄棕壤中,对修饰土样 TOC 占比的影响不同。

2.3 黏土矿物含量对苯酚吸附的影响

30 ℃下各供试土样对苯酚的吸附量均随苯酚平衡浓度的增大而增加,且吸附等温线均为直线,苯酚吸附的 Henry 模型拟合结果见表 3。

表 2 供试土样 TOC 占比和层间距

Table 2 Proportion of TOC content in soil samples and interlayer spacing of soil samples

土样	修饰	φ_{TOC}/%	蒙脱石层间距 d/nm
20%KY1	CK	0.51	1.42
	44BS	1.38	1.44
	44CT	1.76	1.43
	44BS+44CT	2.52	1.42
40%KY1	CK	0.48	1.41
	49BS	1.25	1.44
	49CT	1.56	1.45
	49BS+49CT	2.28	1.43
20%KY2	CK	0.60	1.45
	228BS	3.33	1.44
	228CT	4.51	1.86
	228BS+228CT	6.37	1.80
40%KY2	CK	0.58	1.44
	214BS	3.02	1.43
	214CT	4.20	1.88
	214BS+214CT	5.64	1.77

表 3 苯酚吸附的 Henry 模型拟合结果

Table 3 Henry model fitting results for phenol adsorption

土样	处理	r	K
20%KY1	CK	0.999 3①	2.70
	44BS	0.998 9①	4.45
	44CT	0.999 5①	5.83
	44BS+44CT	0.999 0①	13.44
40%KY1	CK	0.997 1①	1.99
	49BS	0.999 6①	3.64
	49CT	0.999 2①	4.89
	49BS+49CT	0.999 1①	11.56
20%KY2	CK	0.998 0①	3.94
	228BS	0.998 6①	11.48
	228CT	0.997 2①	14.92
	228BS+228CT	0.998 2①	31.60
40%KY2	CK	0.998 1①	3.45
	214BS	0.997 1①	8.00
	214CT	0.999 1①	10.63
	214BS+214CT	0.999 4①	21.80

①在 $P=0.01$ 水平相关显著,当自由度 $f=7$,显著性水平 $P=0.01$ 时,$r=0.798$。

由表 3 可知,Henry 模型对吸附等温线拟合的相关系数 r 均达到极显著水平($P<0.01$),表明该模型适合描述土样对苯酚的吸附。由参数 K 值可

见,各供试土样对苯酚的吸附分别表现为 44BS+44CT>44CT>44BS>CK(20% KY1),49BS+49CT>49CT>49BS>CK(40% KY1),228BS+228CT>228CT>228BS>CK(20% KY2)和 214BS+214CT>214CT>214BS>CK(40% KY2),整体均呈现 BS+CT>CT>BS>CK 顺序,同黏土矿物[7-8]、黄棕壤[11]对苯酚吸附的规律一致。而 BS、CT 修饰和 BS+CT 复配修饰土样对苯酚的吸附能力则呈现 Y1[11]>20% KY1>40% KY1 和 Y2[11]>20% KY2>40% KY2 趋势。结合黄棕壤中添加蒙脱石对苯酚吸附的影响程度[12]可知,各修饰土样对苯酚的吸附能力均随黄棕壤中蒙脱石含量的增大而提高,随高岭土含量的增大而降低,说明与高岭土相比,蒙脱石添加到黄棕壤中促进土样对苯酚吸附的效果更为显著。

2.4　黏土矿物含量对供试土样吸附苯酚热力学特征的影响

20 ℃和 40 ℃条件下供试土样对苯酚吸附的 Henry 拟合参数及热力学参数见表 4。其中,Y1 和 Y2 数据参考文献[11]。

表 4　供试土样对苯酚吸附的 Henry 拟合参数及热力学参数

Table 4　Henry fitting parameters and thermodynamic parameters of phenol adsorption by soil samples

土样	处理	20 ℃ Henry 模型 K 值	20 ℃ 表观热力学参数 ΔG/(kJ·mol⁻¹)	20 ℃ ΔH/(kJ·mol⁻¹)	20 ℃ ΔS/[J·(mol·K)⁻¹]	40 ℃ Henry 模型 K 值	40 ℃ 表观热力学参数 ΔG/(kJ·mol⁻¹)	40 ℃ ΔH/(kJ·mol⁻¹)	40 ℃ ΔS/[J·(mol·K)⁻¹]
Y1	CK	2.71	−2.43	6.57	30.72	3.22	−3.04	6.57	30.72
	33BS	6.51	−4.56	−3.56	3.43	5.93	−4.63	−3.56	3.43
	33CT	7.81	−5.01	−2.78	7.59	7.26	−5.16	−2.78	7.59
	33BS+33CT	15.36	−6.65	−2.28	14.95	14.47	−6.95	−2.28	14.95
20%KY1	CK	2.51	−2.24	5.64	26.89	2.91	−2.78	5.64	26.89
	44BS	4.79	−3.82	−6.78	−10.10	4.01	−3.61	−6.78	−10.10
	44CT	6.29	−4.48	−4.98	−1.70	5.52	−4.45	−4.98	−1.70
	44BS+44CT	14.13	−6.45	−4.64	6.17	12.51	−6.57	−4.64	6.17
40%KY1	CK	1.64	−1.21	9.24	35.66	2.09	−1.92	9.24	35.66
	49BS	4.04	−3.40	−9.49	−20.77	3.15	−2.99	−9.49	−20.77
	49CT	5.55	−4.17	−8.77	−15.67	4.41	−3.86	−8.77	−15.67
	49BS+49CT	12.40	−6.13	−4.81	4.51	10.93	−6.22	−4.81	4.51
Y2	CK	3.70	−3.19	10.71	47.42	4.90	−4.14	10.71	47.42
	215BS	17.36	−6.95	−6.19	2.62	14.76	−7.01	−6.19	2.62
	215CT	20.45	−7.35	−4.05	11.28	18.39	−7.58	−4.05	11.28
	215BS+215CT	53.37	−9.69	−3.77	20.19	48.34	−10.09	−3.77	20.19
20%KY2	CK	3.62	−3.13	5.94	30.96	4.23	−3.75	5.94	30.96
	228BS	12.34	−6.12	−7.67	−5.30	10.09	−6.02	−7.67	−5.30
	228CT	15.32	−6.65	−4.48	7.38	13.62	−6.80	−4.48	7.38
	228BS+228CT	33.10	−8.52	−4.40	14.07	29.49	−8.81	−4.40	14.07
40%KY2	CK	3.30	−2.91	3.53	21.97	3.62	−3.35	3.53	21.97
	214BS	8.69	−5.27	−8.52	−11.10	6.95	−5.05	−8.52	−11.10
	214CT	10.82	−5.80	−5.20	2.05	9.44	−5.84	−5.20	2.05
	214BS+214CT	22.35	−7.57	−4.64	10.00	19.79	−7.77	−4.64	10.00

由表 4 可知,20%KY1、40%KY1、20%KY2 和 40%KY2 各供试土样的 Henry 模型对吸附等温线拟合的相关系数 r 均在 0.99 以上,且由模型拟合的参数 K 值可计算对苯酚吸附的表观热力学参数。结合 YB1、YB2、Y1 和 Y2 对苯酚的吸附等温线拟合参数及热力学参数可知[16],2 个温度下各供试土样对苯酚吸附的表观自由能均为 $\Delta G<0$,表明供试土样对苯酚的吸附属自发反应;2 个温度下各修饰土样表观焓变均为 $\Delta H<0$,表明该吸附过程是放热反应,温度降低有利于苯酚吸附过程的进行,即各修饰土样对苯酚的吸附是以物理吸附为主,具有负增温效应。

从单一 BS、CT 修饰再到 BS+CT 复配修饰,修饰土样 $-\Delta H$ 逐渐减小,ΔS 值均逐渐增大,说明修

饰土样黏粒矿物有机相覆盖增多,更易对苯酚进行物理吸附,因而所需热能逐渐减少,呈现出放热焓减的吸附特征。修饰土样的 $-\Delta G$ 和 ΔS 表现为 YB1 > Y1 > 20%KY1 > 40%KY1 和 YB2 > Y2 > 20%KY2 > 40%KY2,$-\Delta H$ 表现为 YB1 < Y1 < 20%KY1 < 40%KY1 和 YB2 < Y2 < 20%KY2 < 40%KY2。结合黄棕壤中添加蒙脱石对苯酚的热力学参数结果可知[16],吸附的自发性和土样表面的混乱度随土样中蒙脱石含量的增加而增大,随高岭土含量的增加而减小;吸附所需热能随土样中蒙脱石含量的提高而降低,随高岭土含量的提高而升高。显然与高岭土添加到黄棕壤中相比,蒙脱石的添加更有利于土样对苯酚的吸附。

2.5　讨论

为了探讨黄棕壤黏土矿物组成与苯酚吸附量和黄棕壤性质之间的相关性,对蒙脱石含量($X1$)、高岭土含量($X2$)、蒙脱石层间距($X3$)、高岭土层间距($X4$)、阳离子交换量($X5$)、总有机碳含量($X6$)、分配系数 K($X7$)进行多重 Pearson 相关性检验,结果见表 5。

表 5　多重 Pearson 相关性检验结果

Table 5　Test results of multiple Pearson correlation

项目	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$	$X6$	$X7$
$X1$	1						
$X2$	-0.450①	1					
$X3$	0.656②	-0.412	1				
$X4$	-0.156	0.311	-0.034	1			
$X5$	0.806①	-0.377	0.642①	0.207	1		
$X6$	0.901①	-0.372	0.716①	0.328	0.942①	1	
$X7$	0.731①	-0.278	0.298	-0.105	0.801①	0.905①	1

①表示 $p < 0.01$;②表示 $p < 0.05$。

随着黄棕壤中高岭土含量的增大,蒙脱石含量呈减小趋势,整体上导致土样 CEC 降低,土样修饰时随 CEC 的降低而减少 BS、CT 的加入量,由于 BS 负电荷与土样蒙脱石层间负电荷斥力的阻力,BS 更易吸附在土壤黏粒矿物的表面或与有机质结合,故 20%KY1、40%KY1 和 20%KY2、40%KY2 的 BS 修饰土样蒙脱石层间距分别在 Y1 和 Y2 的基础上,随黄棕壤中高岭土含量的增大而变化不明显。单一 CT 的正电荷可通过静电引力的形式与蒙脱石层间负电荷结合,使其 CT 修饰及 BS+CT 复配修饰均可通过插层方式进入蒙脱石层间,因 CT 量降低程度较小,导致 CT 的插层修饰降低程度也较小。同样,随着黄棕壤中高岭土含量的增大,CT 修饰和 BS+CT 复配修饰土样的蒙脱石层间距变化均不明显。

结合文献[12]可知,相对应各修饰土样蒙脱石层间距,随着黄棕壤中蒙脱石含量增加而增大,而高岭土含量的增加则对其无明显影响,土样蒙脱石含量和其蒙脱石层间距之间呈正相关性,高岭土含量和土样蒙脱石层间距及高岭土层间距之间相关性均不显著证实了这一点。等温吸附结果表明,各修饰土样对苯酚吸附均以物理吸附为主。由 Henry 模型拟合的线性等温线表明,修饰土样吸附苯酚主要是以分配作用为基础进行,故修饰土样 TOC 含量是决定其对苯酚吸附的主要因素[12]。修饰土样 TOC 含量越高,表面有机相量越多,土样对苯酚的分配吸附能力越强,TOC 含量与分配系数 K 之间呈极显著正相关性也证实了这一点(见表 5)。

Li 等[17]研究表明,分配系数越大,吸附质越易于吸附在吸附剂上,平衡吸附量越大。土样中蒙脱石含量增加,CEC 增大,修饰时按其 CEC 加入的修饰剂的量增多,使土样 TOC 含量升高,相对应各修饰土样对苯酚的分配吸附能力随蒙脱石含量的增大呈增强趋势,且其对苯酚的吸附自发性也逐渐升高,所需热能逐渐降低。由于修饰土样表面吸附点位增多,吸附过程中苯酚分子的排列取向增加,引起土样表面混乱度上升,呈现出熵逐渐变大的趋势。与之相反,随着黄棕壤中高岭土含量的增大,各修饰土样有机相覆盖减少,不易对苯酚进行物理吸附,所需热能逐渐增大,且对苯酚的分配吸附能力(分配系数)均逐渐减小(见表 3),吸附自发性逐渐降低,苯酚与修饰土样表面的吸附点位也逐渐减少。

综上所述,蒙脱石含量主要决定土样 CEC 的大小,与蒙脱石含量、高岭土含量和 CEC 三者之间的相关性结果相一致,并且由蒙脱石含量、CEC、TOC 含量和分配系数之间的相关性可知,蒙脱石含量决定的 TOC 含量是影响对苯酚吸附能力的关键因素。

3　结语

两性复配修饰土样的 TOC 含量和对苯酚的吸附能力及吸附自发性均随着黄棕壤中蒙脱石含量

的增加而增大,随高岭土含量的升高而减小;修饰土样的蒙脱石层间距随土样中蒙脱石含量的上升有不同程度的提高;与高岭土相比,受蒙脱石含量决定的 TOC 含量是影响对苯酚吸附能力的关键因素。通过黏土矿物含量对修饰土样吸附苯酚的影响研究,有助于提高土壤对有机污染物的吸附效果,对于污染土壤的治理有一定的应用前景。

[参考文献]

[1] LEON-FERNANDEZ L F, RODRIGO M, VILLASENOR J, et al. Bio-electrocatalytic dechlorination of 2,4-dichlorophenol. Effect of pH and operational configuration[J]. Electrochimica Acta, 2021, 367(2): 137456.

[2] ALENGEBAWY A, ABDELKHALEK S T, QURESHI S R, et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications[J]. Toxics, 2021, 9(3): 42-54.

[3] WANG G F, SU X, HUA Y Y, et al. Kinetics and thermodynamic analysis of the adsorption of hydroxyl-Al cations by montmorilloni montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2016, 129: 79-87.

[4] LIU W, WANG T T, HUANG L, et al. Adsorption of Cu^{2+} and Cd^{2+} on sierozem compositely modified by zwitterionic and anionic modifier[J]. Desalination and Water Treatment, 2022, 252: 200-209.

[5] XIE C R, WANG Z W, IHU J M, et al. Adsorption of lead and copper from aqueous solutions on biochar produced from walnut green husk[J]. Acta Sci Circum, 2016, 36(4): 1190-1198.

[6] 李婷,孟昭福,张斌,等. 两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1632-1638.

[7] 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.

[8] 杨亚莉. BS-12 与 OTMA 复配修饰膨润土和高岭土的性能表征及其对 Cd^{2+}、苯酚的吸附[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015: 34-50.

[9] 李文斌,孟昭福,刘泽,等. 两性与两性复配修饰膨润土增强塿土吸附 Cr(Ⅵ)的研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3810-3817.

[10] 李文斌,孟昭福,吴琼,等. 添加复合吸附剂对塿土吸附菲和 Cr(Ⅵ)的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4419-4427.

[11] 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.

[12] 刘伟,李文斌,孟昭福,等. 表面活性剂复配修饰添加了不同含量蒙脱石的黄棕壤对苯酚的吸附作用[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 2014-2022.

[13] 郭梦婷,王尹菲,李文斌,等. 不同两性复配修饰半碳化纤维对 Pb^{2+} 的吸附差异[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(3): 59-62.

[14] 李敏,邓红艳,李文斌,等. 均质化莲子草根系分泌物对黏土吸附四环素的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 60-63.

[15] 张梦飞,孟昭福,任爽,等. BS-12 改性不同磁性黏土矿物对苯酚的吸附[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 712-721.

[16] 刘伟. 两性-阴(阳)离子复配修饰在黄棕壤吸附苯酚和 Cd^{2+} 上的应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.

[17] LI W B, LIU Z, MENG Z F, et al. Composite modification mechanism of DTAB to BS-12 modified kaolin and its effects on surface characteristics[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13(11): 2639-2648.

(上接第 71 页)

[4] HONG C, SHACKELFORD C, MALUSIS M. Numerical evaluation of vertical cutoff walls comprising zeolite-amended backfills for enhanced metals containment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 04017028.

[5] FENG Y, DU Y, ZHOU A, et al. Geoenvironmental properties of industrially contaminated site soil solidified/stabilized with a sustainable by-product-based binder[J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142778.

[6] 欧洋洋,冯丽娟,刘安蓉,等. 酸改性污泥基复合陶粒对 Pb^{2+} 的吸附性能研究[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(2): 60-63.

[7] 冯亚松. 镍锌复合重金属污染黏土固化稳定化研究[D]. 南京:东南大学, 2021.

[8] LIU D W, ZHANG Z G, ZHANG X Y, et al. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133364.

[9] ZOU R, REZAEI B, KELLER S S, et al. Additive manufacturing-derived free-standing 3D pyrolytic carbon electrodes for sustainable microbial electrochemical production of H_2O_2[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 467: 133681.

[10] GARG M, RANI R, MEENA V K, et al. Significance of 3D printing for a sustainable environment[J]. Materials Today Sustainability, 2023, 23: 100419.

[11] ZHAO Z F, JI C Y, XIAO J Z, et al. A critical review on reducing the environmental impact of 3D printing concrete: Material preparation, construction process and structure level[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133887.

[12] YE J H, CUI C, YU J T, et al. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122586.

[13] OHAMA Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology[M]. Park Ridge, N. J.: Noyes Publications, 1995.