网络出版时间:2015-03-12 14:17 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.04.005
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150312.1417.005.html

BS-12 和 β-环糊精复配修饰膨润土及其对苯酚吸附性能的初步研究

任 爽,马麟莉,孟昭福,赵盼盼
(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究两性表面修饰剂十二烷基甜菜碱(BS-12)和复配修饰剂 β-环糊精(β-CD)复配修饰膨润土对苯酚的吸附性能,为有机物污染土壤的修复提供理论依据。【方法】在 25 ℃下,采用批处理法,研究了膨润土原土对浓度为修饰比例 25% CEC、50% CEC、75% CEC、100% CEC、125% CEC 和 150% CEC 的 BS-12,以及 100% CEC 的 BS-12 修饰膨润土对浓度为修饰比例 25% CEC 至 150% CEC 的 β-CD 的吸附特性;在此基础上,研究了膨润土原土、BS-12 修饰膨润土、BS-12+β-CD 复配修饰膨润土对苯酚的吸附量和吸附率。【结果】在 25 ℃条件下,膨润土原土对 BS-12 的吸附率较高,在修饰比例为 125% CEC 时,BS-12 吸附率达到 96.97%;BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附量随 β-CD 平衡浓度的增加先升高后降低,吸附率在 100% CEC 时最高,为 30.37%。在苯酚平衡浓度相同时,不同修饰膨润土对苯酚的吸附量表现为 BS-12 修饰膨润土>BS-12+β-CD 复配修饰膨润土>膨润土原土。【结论】两性表面修饰剂 BS-12 修饰膨润土对苯酚的吸附能力优于其他膨润土。

[关键词] BS-12;β-环糊精;膨润土;苯酚
[中图分类号] X131.3;X53 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2015)04-0135-06

Preliminary research on bentonite modified by BS-12 and β-cyclodextrin complex and its phenol adsorption properties

REN Shuang, MA Lin-li, MENG Zhao-fu, ZHAO Pan-pan
(*College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This experiment studied the phenol adsorption properties of amphoteric surfactants(BS-12) and BS-12+β-cyclodextrin complex modified bentonite to provided theoretical basis for remediation of organic contaminated soil. 【Method】 At 25 ℃, the adsorption properties and adsorption rates of bentonite original soil, bentonite mixed with BS-12 with concentrations from 25% CEC to 150% CEC and bentonite modified by 100% CEC BS-12 mixed with β-cyclodextrin with concentrations from 25% CEC to 150% CEC were studied based on batch method. Then the adsorption quantities and rates of original soil, bentonite modified by BS-12, and bentonite modified by complex of BS-12 and β-cyclodextrin to phenol were analyzed. 【Result】 At 25 ℃, bentonite original soil had high BS-12 adsorption ability with the adsorption rate of 96.97% at 125% CEC. The adsorption quantity of bentonite modified by BS-12 to β-cyclodextrin increased first and then decreased with the increase of β-cyclodextrin equilibrium concentration. The maximum adsorption rate was 30.37% at 100% CEC. At same equilibrium concentration of phenol, the absorption amounts were in the decreasing order of bentonite modified by BS-12>bentonite modified by complex

[收稿日期] 2013-11-23
[基金项目] 国家自然科学基金项目(41271244);陕西省社会发展攻关项目(2013K13-01-05);陕西省农业科技攻关项目(2012K02-15)
[作者简介] 任 爽(1990-),女,山东平度人,在读硕士,主要从事环境修复研究。E-mail:rsrsfly@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,主要从事土壤污染及修复研究。
E-mail:zfmeng1996@263.net

of BS-12 and β-cyclodextrin>bentonite original soil.【Conclusion】Bentonite modified by amphoteric surfactant BS-12 had the best phenol adsorption ability.

Key words: BS-12; β-cyclodextrin; bentonite; phenol

随着现代工业的发展,越来越多的有机污染物通过农药、化肥以及杀虫剂的施用等途径进入到土壤环境中,造成土壤污染。利用具有吸附作用的物质来固定有机污染物,降低其活性和有效性,对于保护生态环境和人体健康具有重要的意义。黏土矿物具有优良的吸附性能,因此广泛被用于去除水中的有机物。通过对黏土矿物或土壤进行修饰,以增强其吸附能力已成为近年来研究的热点[1-2]。国内外学者对化学修饰黏土矿物进行了广泛研究,发现利用阳离子表面活性剂或复配型表面活性剂修饰黏土矿物或土壤,可以有效地增强土壤吸附有机污染物的能力[3-9],修饰剂的复配能够在一定程度上影响有机修饰黏土矿物对有机污染物的吸附[10-14]。

已有研究表明[15-16],用两性修饰剂修饰土壤得到的两性修饰土可以使土壤表面既保持亲油性以固定有机污染物,又具有负电性以吸附阳离子型的重金属离子,可以达到同步防治有机物、重金属污染的目的。但两性单一修饰土吸附有机污染物的能力会受到有机碳含量的影响。为了进一步提高两性有机修饰土同时吸附有机污染物、重金属的能力,采用其他修饰剂与两性修饰剂复配后修饰土壤是一个较好的方法。已有研究显示,两性-阳离子、两性-阴离子和两性-非离子复配修饰土吸附有机污染物的能力强于两性单一修饰土,但其对重金属的吸附能力与复配修饰形式有关[17-21]。在此基础上,探讨不同复配修饰剂下两性修饰土对有机、重金属同时吸附能力的影响,对于两性复配修饰土类型的拓展及其吸附性能的提高具有重要的实用价值。

本试验选取十二烷基甜菜碱(BS-12)作为两性修饰剂,β-环糊精(β-CD)作为复配修饰剂,研究了膨润土原土对 BS-12 的吸附特性以及 BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的等温吸附特性,在此基础上,研究了膨润土原土、BS-12 修饰膨润土、BS-12+β-CD 复配修饰膨润土对苯酚的吸附性能,旨在为两性/复配修饰剂修饰膨润土的制备及其在有机物污染土壤修复中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

供试土样为钠基膨润土,购自河南信阳,其基本理化性质为:阳离子交换量(CEC)620.6 mmol/kg,pH 8.4,蒙脱石含量 76.1%,SiO_2 含量 72%,Al_2O_3 含量 12%,膨胀容为 29 mL/g。

BS-12(AR 级),天津兴光助剂厂生产;β-环糊精(AR 级),天津博迪化工有限公司生产。

1.2 方 法

1.2.1 修饰膨润土的制备 BS-12 修饰膨润土和 BS-12+β-CD 复配修饰膨润土均采用湿法制备[22]。其中制备 BS-12 修饰膨润土时,BS-12 浓度按膨润土 100% CEC(6.20 mmol/L)设置;制备 BS-12+β-CD 复配修饰膨润土时,以 BS-12 修饰膨润土为基质,β-CD 浓度按照膨润土 50% CEC(3.10 mmol/L)设置。

1.2.2 膨润土对修饰剂的等温吸附试验 等温吸附试验均采用 Batch 法[23]在 25 ℃下进行。准确称取 0.400 0 g 膨润土原土于离心管中,然后加入不同浓度 BS-12 溶液 40.00 mL,BS-12 浓度按膨润土 CEC(也称为修饰比例)设置,分别为 25% CEC(1.55 mmol/L)、50% CEC(3.10 mmol/L)、75% CEC(4.65 mmol/L)、100% CEC(6.20 mmol/L)、125% CEC(7.75 mmol/L)和 150% CEC(9.30 mmol/L)。在恒温条件下,于摇床中连续振荡 6 h(前期动力学试验已证实 6 h 能保证达到吸附平衡),4 800 r/min 离心 15 min,取上清液,测定上清液中 BS-12 浓度(吸附平衡浓度),差减法计算膨润土对 BS-12 的吸附量,并计算吸附率。

$$Q=(c_0-c_e)\times V/m。 \quad (1)$$

式中:Q 为土样对 BS-12 的吸附量(mg/g),c_0 和 c_e 分别为 BS-12 初始浓度和吸附平衡浓度,V 为吸附试验中所加 BS-12 溶液的体积(mL),m 为吸附试验中所加土样的质量(g)。

准确称取 0.400 0 g BS-12 修饰膨润土于离心管中,然后加入不同浓度 β-CD 溶液 40.00 mL,β-CD 浓度按膨润土 CEC 设置,分别为 25% CEC(1.55 mmol/L)、50% CEC(3.10 mmol/L)、75% CEC(4.65 mmol/L)、100% CEC(6.20 mmol/L)、125% CEC(7.75 mmol/L)和 150% CEC(9.30 mmol/L)。于恒温条件下,在摇床中连续振荡 6 h(前期动力学试验证实 6 h 已能保证达到吸附平衡),4 800 r/min 离心 15 min,取上清液,测定上清

液中 β-CD 浓度（吸附平衡浓度），用差减法计算 BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附量，并计算吸附率。土样对 β-CD 吸附量的计算方法同式(1)。

1.2.3　膨润土对苯酚的等温吸附试验　等温吸附试验采用 Batch 法[23]在 25 ℃下进行。分别取膨润土原土（对照，CK）、BS-12 修饰膨润土和 BS-12＋β-CD 复配修饰膨润土 0.500 0 g，加入 20.00 mL 不同质量浓度（5，10，20，50，100，200，300，400 和 500 μg/mL）的苯酚溶液，均以 0.01 mol/L KNO_3 作为背景溶液进行吸附试验，试验步骤同 1.2.2。用差减法计算膨润土原土及修饰膨润土对苯酚的吸附量。土样对苯酚吸附量的计算方法同式(1)。

1.3　测定项目及方法

采用金橙法Ⅱ分光光度法[24]测定 BS-12 浓度；采用酚酞分光光度法[25]测定 β-CD 浓度；采用 4-氨基安替比林分光光度法（GB/T 7490－87）测定苯酚浓度。

1.4　数据处理

用 Henry 模型拟合膨润土对苯酚的等温吸附曲线，Henry 模型的表达式为：$S=Kc$，其中 S 为膨润土对有机污染物的吸附量，mmol/kg；K 为分配系数，在一定程度上可以表示有机污染物在膨润土表面的结合能力；c 为有机污染物在水中的平衡浓度，mmol/L。

2　结果与分析

2.1　膨润土对修饰剂的等温吸附特征

图 1 为膨润土原土对 BS-12 的吸附曲线。由图 1 可见，膨润土原土对 BS-12 的吸附量曲线呈直线（$R^2=0.999^{**}$），随着 BS-12 初始浓度的增加（即修饰比例的增大），膨润土对 BS-12 的吸附量成等比例增加；膨润土原土对 BS-12 的吸附率并不呈直线上升，而是反应开始时上升较快，之后上升趋势变缓，当 BS-12 初始浓度高于 7.75 mmol/L 时，吸附率反而下降。膨润土原土对不同浓度 BS-12 的吸附率均在 80.20% 以上，当 BS-12 初始浓度为 7.75 mmol/L 时，膨润土原土对 BS-12 吸附率最高，为 96.97%。可知膨润土原土对 BS-12 的吸附性能良好。

图 2 为 25 ℃下，BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附曲线。由图 2 可知，BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附量和吸附率均呈先上升而后下降趋势，其中在 β-CD 初始浓度为 7.75 mmol/L 时，吸附量达到最大，为 256.16 mg/g；在 β-CD 初始浓度为 6.20 mmol/L 时，BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附率达到最大，为 30.37%。

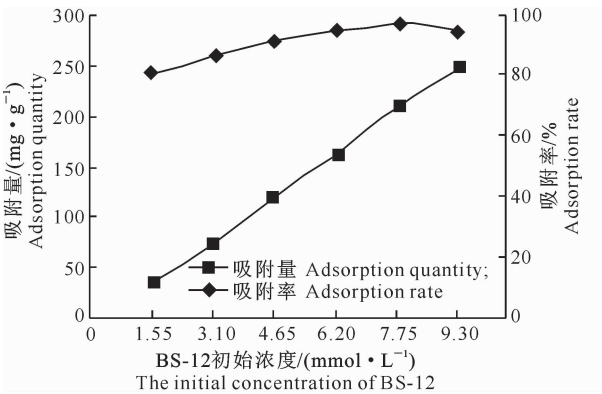

图 1　膨润土原土对修饰剂 BS-12 的吸附曲线

Fig. 1　Adsorption of BS-12 by bentonite

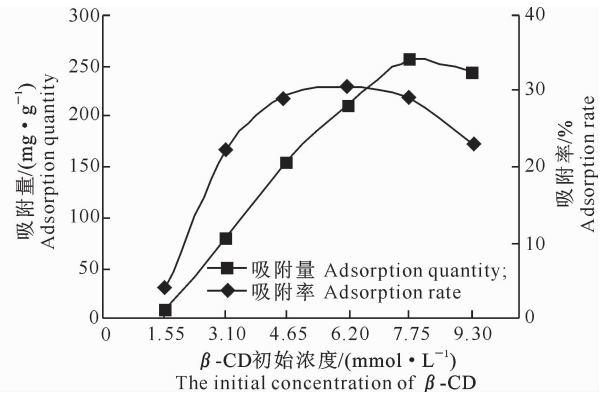

图 2　BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附曲线

Fig. 2　Adsorption of β-cyclodextrin by BS-12 modified bentonites

2.2　膨润土对苯酚的等温吸附特征

膨润土原土（CK）、BS-12 修饰膨润土以及 BS-12＋β-CD 复配修饰膨润土对苯酚的吸附等温线见图 3。从图 3 可以看出，3 种供试土样对苯酚的吸附等温线均近似为直线，表明随着苯酚平衡浓度的增加，供试土样对苯酚的吸附量逐渐增大，且在供试的苯酚质量浓度范围内，各修饰膨润土对苯酚的吸附均未达到饱和。当苯酚平衡浓度相同时，供试土样对苯酚的吸附能力表现为 BS-12 修饰膨润土＞BS-12＋β-CD 复配修饰膨润土＞CK，BS-12 修饰膨润土对苯酚吸附量最大是 CK 的 6.11 倍，BS-12＋β-CD 复配修饰膨润土对苯酚的吸附量最大是 CK 的 4.73 倍。可知在 BS-12 修饰的基础上，采用 β-CD 对膨润土进行复配修饰，未能增强其对有机污染物苯酚的吸附能力，反而使其有所下降。一般而言，土壤吸附有机污染物的能力不仅与总有机碳（TOC）有关，而

且还与修饰土的表面亲水疏水性、荷电性质等表面特性密切相关[8]。

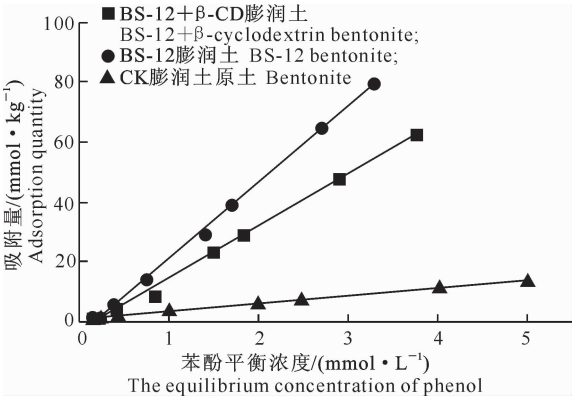

图 3 供试土样对苯酚的吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isotherm of phenol by different bentonite samples

用 Henry 模型拟合膨润土对苯酚的吸附等温曲线,结果见表 1。表 1 显示,采用 Henry 模型拟合的等温吸附曲线的相关系数均达极显著水平,各土样的分配系数 K 表现为 BS-12 修饰膨润土>BS-12+β-CD 复配修饰膨润土>CK,与图 3 中各土样对苯酚的吸附量一致。与 CK 相比,BS-12 和 β-CD 复合修饰土壤的 K 值提高至 16.37 L/kg,BS-12 修饰土样的 K 值提高至 23.72 L/kg。修饰膨润土对苯酚的平衡吸附能力较未修饰原土有明显提高。说明膨润土原土经两性表面修饰剂修饰后确实可以提高其对苯酚的吸附能力;Henry 模型适用于描述两性修饰膨润土样对苯酚的吸附特征。

表 1 修饰膨润土对苯酚吸附的 Henry 模型拟合结果

Table 1 Fitted parameters of phenol adsorption by modified bentonite using Henry model

土样 Soil sample	模型参数 Parameter	
	r	K/(L·kg^{-1})
膨润土原土 Bentonite	0.987**	2.72
BS-12 修饰膨润土 BS-12 bentonite	0.994**	23.72
BS-12+β-CD 复配修饰膨润土 BS-12+β-CD bentonite	0.996**	16.37

注:** 表示在 $P=0.01$ 水平上相关显著,在自由度=7,$P=0.01$时,$r=0.798$。

Note: ** means extremely significant correlation, $f=7$, $P=0.01$, and $r=0.798$.

3 讨论与结论

膨润土属于恒电荷表面土壤,具有吸湿膨胀性及较高的阳离子代换量。在 BS-12 分子结构中,既有疏水基团(含 C12 有机碳链)又有亲水基团(含阴离子和阳离子)。本研究中,膨润土原土对不同浓度 BS-12 的吸附率均在 80%以上,分析其原因:一方面,BS-12 亲水基团中的阳离子的 N 端吸附在膨润土的负电荷表面,而 BS-12 有机碳链疏水基团向外伸展,通过疏水键相互作用在膨润土表面形成一层有机相,使得膨润土性质发生转变,从亲水疏油变为疏水亲油,这种修饰方式主要出现在 BS-12 浓度较低的条件下(<100% CEC);另一方面,BS-12 也可以通过疏水基团与已经修饰在膨润土表面的 BS-12 结合,这种修饰方式与修饰比例有关,主要在 BS-12 浓度较高(>100% CEC)的条件下出现,这种修饰模式都会使土壤表面同时具有正电荷和负电荷。由于 BS-12 能够以多种模式修饰膨润土,因此其易于吸附在膨润土上,从而使得膨润土中的有机碳含量明显提高,对环境中疏水性有机物的吸附能力明显增强。本研究中,BS-12 修饰膨润土对苯酚的等温吸附曲线呈直线进一步证明了该机制,这与朱利中等[8]报道的结论相一致。

本研究中,膨润土原土吸附 BS-12 时,当 BS-12 的浓度为 100% CEC 对应的浓度时,膨润土原土对 BS-12 的实际吸附率为 94%,并没有完全吸附于膨润土上。表明 100% CEC BS-12 修饰后的膨润土表面并没有全部被 BS-12 占据,且可能存在多层吸附。本研究中,BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附率较低(<40%),这可能主要是由于 β-CD 吸附方式不同所致。β-CD 吸附方式有 2 种:一种是 β-CD 外部亲水性负电荷,通过离子交换方式与膨润土表面以疏水键方式修饰在土壤表面上的 BS-12 的正电荷相结合,这种方式会增加土壤表面疏水相成分,利于膨润土对有机污染物苯酚的吸附;另一种方式是 β-CD 以主体-客体疏水复合体的形式与 BS-12 所形成的有机分配介质结合,β-CD 的疏水空洞被 BS-12 占据,而同时 β-CD 外部亲水性负电荷是游离的,这种方式会增加 BS-12+β-CD 复配修饰膨润土表面的亲水性,不利于有机污染物苯酚的吸附。由本试验结果可知,与 BS-12 修饰膨润土相比,BS-12+β-CD 复配修饰膨润土对苯酚的吸附量略低,但高于未修饰膨润土。β-CD 对于 BS-12 修饰膨润土的复配增加了复配修饰膨润土的亲水性,因此 BS-12 修饰膨润土对 β-CD 的吸附方式以第 2 种为主。

[参考文献]

[1] Yapar S, Özbudak V, Dias A, et al. Effect of adsorbent concentration to the adsorption of phenol on hexadecyl trimethyl ammonium [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 121(1/2/3):

135-139.

[2] Rytwo G, Kohavi Y, Botnick I, et al. Use of CV- and TPP-montmorillonite for the removal of priority pollutants from water [J]. Applied Clay Science, 2007, 36(1/2/3): 182-190.

[3] Haggerty G M, Bowman R S. Sorption of chromate and other inorganic anions by organozeolite [J]. Environ Sci Techno, 1994, 28(3): 452-458.

[4] Koh S M, Dixon J B. Preparation and application of organo minerals as sorbents of phenol, benzene and toluene [J]. Applied Clay Science, 2001, 18(3/4): 111-122.

[5] Lo I M C, Lee C H, Liljestrand H M. Tricaprylmethylammonium bentonite complexes as adsorbents for benzene, toluene, ethylbenzene and xylene [J]. Water Sci Tech, 1996, 34(7): 319-325.

[6] Michot L J, Pinnavaia T J. Adsorption of chlorinated phenols from aqueous solution by surfactant modified pillared clays [J]. Clays Clay Miner, 1991, 39(6): 634-641.

[7] Wibulswas R, White D A, Rautiu R. Adsorption of phenolic compounds from water by surfactant modified pillared clays [J]. Process Saf Environ Protect, 1999, 77(2): 88-92.

[8] 朱利中，陈宝梁. 有机膨润土在废水处理中的应用及其进展 [J]. 环境科学进展，1998，6(3)：53-61.
Zhu L Z, Chen B L. Advances in application of organobentonites in wastewater treatment [J]. Advances in Environmental Science, 1998, 6(3): 53-61. (in Chinese)

[9] Zhao H T. Surfactant-templated mesoporous silicate materials as sorbents for organic pollutants in water [J]. Environmental Science&Technology, 2000, 34(22): 4822-4827.

[10] 陈宝梁，朱利中，林　斌，等. 阳离子表面活性剂增强固定土壤中的苯酚和对硝基苯酚 [J]. 土壤学报，2004，41(1)：148-151.
Chen B L, Zhu L Z, Lin B, et al. Enhancement of cationic surfactant on immobilizing p-nitrophenol and phenol in soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 148-151. (in Chinese)

[11] 朱利中，马荻荻，陈宝梁. 双阳离子有机膨润土对菲的吸附性能及机理研究 [J]. 环境化学，2000，19(3)：256-261.
Zhu L Z, Ma D D, Chen B L. Sorption properties and mechanisms of phenanthrene to dual-cation organobentonites [J]. Environmental Chemistry, 2000, 19(3): 256-261. (in Chinese)

[12] 朱利中，王　晴，陈宝梁. 阴-阳离子有机膨润土吸附水中苯胺、苯酚的性能 [J]. 环境科学，2000，21(4)：42-46.
Zhu L Z, Wang Q, Chen B L. Sorption of aniline and phenol to anion-cation organobentonites from water [J]. Environmental Science, 2000, 21(4): 42-46. (in Chinese)

[13] 朱利中，苏玉红，沈学优，等. 阴-阳离子有机膨润土协同吸附作用及其机理研究 [J]. 中国环境科学，2001，21(5)：25-28.
Zhu L Z, Su Y H, Shen X Y, et al. Studies on the synergic sorption and its mechanism of anion-cation organobentonites [J]. China Environmental Science, 2001, 21(5): 25-28. (in Chinese)

[14] 葛渊数，朱利中. 阳-非离子有机膨润土对水中硝基苯的吸附作用 [J]. 中国环境科学，2004，24(2)：65-68.
Ge Y S, Zhu L Z. Sorption of nitrobenzene in water by cation-nonionic organobentonites [J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 65-68. (in Chinese)

[15] 孟昭福，张一平. 有机修饰壤土中铬酸根吸附热力学特征及机理 [J]. 中国环境科学，2006，26(S1)：68-72.
Meng Z F, Zhang Y P. Adsorption thermodynamic characteristics and mechanism of chromate in organic modified Lou soil [J]. China Environmental Science, 2006, 26(S1): 68-72. (in Chinese)

[16] 孟昭福，张一平，李荣华. 有机修饰壤土对苯酚的吸附及其热力学特征 [J]. 环境科学学报，2005，25(10)：1365-1372.
Meng Z F, Zhang Y P, Li R H. Effects of modification of manural loessial soil by adding organic compounds on phenol adsorption and its thermodynamic characteristics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10): 1365-1372. (in Chinese)

[17] 郑萍英，罗　坤，孟昭福，等. 两性-非离子表面修饰剂复配修饰壤土吸附 Cd^{2+} 的动力学 [J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2010，38(9)：135-140，147.
Zheng P Y, Luo K, Meng Z F, et al. Adsorption kinetics of Cd^{2+} on amphoteric-nonionic surface active agent co-modified Lou soil [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2010, 38(9): 135-140, 147. (in Chinese)

[18] 刘源辉，孟昭福，白俊风，等. Cd^{2+} 在两性-阴离子复配修饰壤土上的吸附-解吸行为 [J]. 环境科学学报，2010，30(10)：2011-2016.
Liu Y H, Meng Z F, Bai J F, et al. Adsorption and desorption of Cd^{2+} on Lou soil modified with a mixture of amphoteric and anionic modifiers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2011-2016. (in Chinese)

[19] 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 J F, Meng Z F, Liu Y H, et al. Adsorption of phenol on amphoteric-cationic modified Lou soil [J]. China Environmental Science, 2010, 30(10): 1389-1394. (in Chinese)

[20] 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.

[21] 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 P X. Studies on the adsorption of phenol and Cd^{2+} in soil modified with BS-18 [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)

[22] 孟昭福，张一平. 有机修饰改性土对镉离子的吸附及温度效应 [J]. 土壤学报，2005，42(2)：238-246.
Meng Z F, Zhang Y P. Cd^{2+} adsorption of organic modified soils and its temperature effect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 238-246. (in Chinese)

[23] 李　婷，孟昭福，张　斌. 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.
Li T, Meng Z F, Zhang B. Adsorption of amphoteric modified bentonites to phenol and its thermodynamics [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1632-1638. (in Chinese)

[24] 孙　伟，俞　斌. 长链烷基亚硫酸酯甜菜碱的微量分析 [J].

南京工业大学学报,2004,26(2):88-90.
Sun W, Yu B. Microanalysis of sulfitobetain [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2004, 26(2): 88-90. (in Chinese)

[25] 李文德,周俊侠,张力田. 改进的酚酞分光光度法测定 β-环糊精 [J]. 华南理工大学学报:自然科学版,1995,23(7):35-39.
Li W D, Zhou J X, Zhang L T. Determination of β-cyclodextrin by modified phenolphthalein spectrophotometric methods [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 1995, 23(7): 35-39. (in Chinese)

(上接第 127 页)

[13] Brockhouse A C, Horner H T, Booth T F. Pericardial cell ultrastructure in the tobacco hornworm *Manduca sexta* L. (Lepidoptera: Sphingidae) [J]. International Journal of Insect Morphology & Embryology, 1999, 28(4): 261-271.

[14] Das D, Aradhya R, Ashoka D. Post-embryonic pericardial cells of *Drosophila* are required for overcoming toxic stress but not for cardiac function or adult development [J]. Cell and Tissue Research, 2008, 331(2): 565-570.

[15] 雷 琼,陈建锋,黄 娜. 花绒坚甲成虫人工饲料的筛选研究 [J]. 中国农学通报,2005,21(3):259-271.
Lei Q, Chen J F, Huang N. Aritificial fodder ingredience for *Dastarcus longulus* adults [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3): 259-271. (in Chinese)

[16] Alvarez A D, Shi W Y, Wilson B A. Pannier and pointed P2 act sequentially to regulate *Drosophila* heart development [J]. Development, 2003, 130(13): 3015-3026.

[17] Sellin J, Albrecht S, Kolsch V. *Dynamics* of heart differentiation, visualized utilizing heart enhancer elements of the *Drosophila melanogaster* bHLH transcription factor Hand [J]. Gene Expression Patterns, 2006, 6(4): 360-375.

[18] Togel M, Pass G, Paululat A. The *Drosophila* wing hearts originate from pericardial cells and are essential for wing maturation [J]. Developmental Biology, 2008, 318(1): 29-37.

[19] Das D, Ashoka D, Aradhya R. Gene expression analysis in post-embryonic pericardial cells of *Drosophila* [J]. Gene Expression Patterns, 2008, 8(3): 199-205.

[20] Weavers H, Prieto-Sanchez S, Grawe F. The insect nephrocyte is a podocyte-like cell with a filtration slit diaphragm [J]. Nature, 2009, 457(7227): 322-326.

[21] Shah A P, Nongthomba U, Tanaka K K K. Cardiac remodeling in *Drosophila* arises from changes in actin gene expression and from a contribution of lymph gland-like cells to the heart musculature [J]. Mechanisms of Development, 2011, 128(3/4): 222-233.

[22] Fujioka M, Wessells R J, Han Z. Embryonic even skipped-dependent muscle and heart cell fates are required for normal adult activity, heart function, and lifespan [J]. Circulation Research, 2005, 97(11): 1108-1114.

[23] Ray A, Kumar D, Ramamurty P S. Histological study on the retrocerebral-endocrine complex with special reference to neurohaemal involvement of aorta and pericardial cells in *Coccinella septempunctata* (L.) (Coccinellidae-Coleoptera) [J]. Zeitschrift für Mikroskopisch-anatomische Forschung, 1980, 94(6): 1141-1148.

[24] Martins G F, Ramalho-Ortigão J M, Filemon P. Morphological features of the heart of six mosquito species as revealed by scanning electron microscopy [J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2011, 31(1/2): 98-102.

[25] Fife H G, Palli S R, Locke M. A function for pericardial cells in an insect [J]. Insect Biochemistry, 1987, 17(6): 829-840.