

# 苯和甲苯在土壤中的吸附行为研究

马月姣, 毕二平, 陈鸿汉

(中国地质大学 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 选取某采油厂不同有机碳含量的表层土壤作为吸附剂, 采用批实验方法对原油中代表性组分苯和甲苯的单组分吸附和双组分竞争吸附行为进行了研究。研究表明, 单组分溶液中, 苯和甲苯在土壤中的吸附符合线性规律, 吸附能力与土壤有机碳含量成正比, 双组分溶液中, 苯和甲苯共存时存在竞争吸附, 土壤对它们的吸附小于单组分时的情况。竞争吸附的结果说明, 除分配吸附以外, 介质表面点位对苯和甲苯的吸附也起着重要的作用。

**关键词:** 苯; 甲苯; 吸附; 竞争吸附; 土壤

中图分类号: P579.X74

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)06-1105-06

## Sorption behaviors of benzene and toluene to soils

MA Yue-jiao, BI Er-ping and CHEN Hong-han

(Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The sorption of components of crude oil to soils affects their transport and transformation. In this study, batch experiments were carried out to investigate the sorption and competitive sorption of benzene and toluene to soils with different amounts of organic carbon. The results of single-solute solution experiments showed that the sorption of single compound to soils could be described by a linear sorption isotherm, and the sorption capacity was proportional to the soil organic carbon content. In bi-solute solution experiments, competitive sorption of solutes was observed, which caused a decrease of sorption capacity of target compound in comparison with single-solute cases. In addition to partition process, the competitive sorption results indicated that the specific sites probably played an important role in the sorption of organic compounds on the solid surface.

**Key words:** benzene; toluene; sorption; competitive sorption; soil

随着石油工业的迅速发展, 由于落地原油、污水和输油管道破裂渗漏等原因(张亮等, 2009), 造成大量的原油组分进入包气带土壤, 对地下水系统的安全造成极大的威胁。包气带是连接地表水和地下水的重要通道, 是众多污染物在环境中迁移转化的载体、归宿和蓄积场所(刘菲等, 2007), 特别是表层土壤对污染物有一定的截留作用。原油组分主要由

难溶于水的直链烃类、多环芳烃类、含氯有机添加剂以及醚类组成(陈余道等, 1997; 孙静, 2006), 代表物是苯系物(BTEX)。BTEX由苯、甲苯、乙苯和二甲苯组成, 对人类和其他生物具有致癌、致畸、致突变危害(Lopez *et al.*, 2008)。原油组分进入土壤环境后发生一系列的物理、化学和生化作用, 对环境造成污染。所以, 研究原油组分在土壤中的吸附行

收稿日期: 2011-05-18; 修订日期: 2011-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972161); 国家国际科技合作项目(2010DFA92800)

作者简介: 马月姣(1987-), 女, 汉族, 硕士研究生, 研究方向为地下水环境, E-mail: mayuejiaotuzi@163.com; 通讯作者: 毕二平(1969-), 男, 汉族, 副研究员, 研究方向为水文地质与水文地球化学, E-mail: bi@cugb.edu.cn。

为显得尤为重要。

对于有机污染物在土壤中的吸附机理已有许多研究(Weber *et al.*, 1992; Pignatello and Xing, 1996),近年来关于有机污染物竞争吸附(Shen *et al.*, 2004; 韦尚正, 2010)方面的研究正在逐步展开。所谓竞争吸附是指共存有机污染物使目标化合物的吸附减弱的现象。目标化合物常被称为主溶质,起竞争作用的化合物常被称为共存溶质。有研究表明,当 BTEX 和甲基叔丁基醚(MTBE)共存时,吸附亲和力较高的 BTEX 会将已发生吸附的 MTBE 从活性炭上置换下来(李影等, 2009); Michael 和 Pignatello(2005)以硝基苯为主溶质、以苯和甲苯分别为共存溶质,对其在木炭上的吸附影响进行的研究表明,共存化合物的初始浓度越高,其竞争吸附效应越明显;陈迪云等(2006)在研究萘和菲在土壤中的吸附时,也发现了竞争吸附的存在。

苯(Benzene)和甲苯(Toluene)是原油组分的重要组成部分,以往已有对它们在活性炭中的单双组分吸附研究(李影等, 2009),但在土壤中的竞争吸附现象鲜有报道。本文以某采油厂表层土壤为吸附剂,实验研究了不同有机碳含量的表层土壤对苯和甲苯的单组分吸附和双组分竞争吸附过程,探讨了它们在土壤中的吸附机理。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验用土为棕黄色粘质土壤(S1)和粉砂质粘土(S2)采自典型大陆性气候影响下的某采油厂,土壤有机碳含量较低,一般在 0.5% 以下。土样自然风干过 0.3 mm 筛备用。苯(分析纯)由北京化工厂生产,甲苯(分析纯)由 J. T. Baker 公司生产。

分别对 S1 和 S2 的土壤浸出液中原油代表组分苯和甲苯含量进行了分析, S1 中苯浓度为 0.34  $\mu\text{g/L}$ , 甲苯为 0.46  $\mu\text{g/L}$ , S2 中苯浓度为 0.30  $\mu\text{g/L}$ , 甲苯为 0.31  $\mu\text{g/L}$ , 它们远低于本次实验最小的平衡液相浓度(苯 38.99  $\mu\text{g/L}$ , 甲苯 777.69  $\mu\text{g/L}$ ), 因此认为土样的有机指标含量很低, 不足以影响实验结果。实验用土理化性质见表 1。

### 1.2 实验方法

本研究采用批实验方法来获取吸附动力学数据和等温吸附数据。由于苯和甲苯的挥发性较强, 实验需在一个密闭的环境下进行, 实验样品密封保存。

表 1 两种土样理化性质

Table 1 Physical-chemical properties and test results of 2 kinds of typical soils

土壤编号	土壤性质	有机碳含量 $f_{oc}/\%$	干容重 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水量/ $\%$
S1	粘土	0.43	0.86	15.45
S2	粉砂质粘土	0.24	0.85	19.5

实验中每组污染物浓度均设有 1 个不加土样的空白控制样以及 2 个平行样。实验用水为超纯水。

吸附动力学实验的主要目的是确定等温吸附平衡所需要的时间。操作步骤:准确称取 5 g 土样 S2 于 40 mL 顶空瓶中,分别加入 4 393  $\mu\text{g/L}$  的苯或 1 733.8  $\mu\text{g/L}$  的甲苯溶液 20 mL 后加盖密封,设置 3 个不加土样仅加污染溶液的空白控制样,置于振荡器(型号为 QYC-2112,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ ,转速为 175 r/min)中恒温振荡。按时间间隔 0.5、1、2、5、8、12、24、48 和 72 h 取出样品,置于 TD5A-WS 台式低速离心机中离心 10 min(2 000 r/min),取上清液迅速注入 10 mL 顶空瓶中,用 GC/MS 测定各组分的浓度,绘制浓度与时间的关系图,确定吸附平衡时间。

单组分等温吸附实验的主要目的是探究土壤对污染物的吸附能力。操作步骤:准确称取 S1 与 S2 土样各 5 g 于 40 mL 顶空瓶中,分别加入不同浓度的苯或甲苯溶液(苯浓度为 200~17 572  $\mu\text{g/L}$ , 甲苯浓度为 2 000~43 345  $\mu\text{g/L}$ ) 20 mL 后加盖密封,实验条件同吸附动力学实验,待到吸附平衡后取出样品,离心取上清液迅速注入 10 mL 顶空瓶中,用 GC/MS 测定,绘制等温吸附曲线。

双组分等温吸附实验的主要目的是固定共存溶质的浓度,改变主溶质的浓度,研究共存溶质对主溶质吸附等温线的影响。操作步骤:改变主溶质苯溶液的浓度(200~17 572  $\mu\text{g/L}$ ),各浓度分别加入 8 669  $\mu\text{g/L}$  的共存溶质甲苯溶液;改变主溶质甲苯溶液的浓度(2 000~43 345  $\mu\text{g/L}$ ),各浓度分别加入 8 786  $\mu\text{g/L}$  的共存溶质苯溶液,其余步骤同单组分,离心取上清液用 GC/FID 测定,绘制等温吸附曲线。

### 1.3 分析方法

S1 和 S2 的土壤浸出液中苯和甲苯含量用 Agilent 6890/5973N 气相色谱-质谱仪(GC/MS)连有吹扫捕集进样器进行测定,吸附动力学实验与单组分等温吸附实验用 GC/MS 连有 Agilent Technologies G1888 顶空自动进样器进行测定,方法检出限为 0.2

$\mu\text{g/L}$ 。吹扫捕集进样器条件:进样量 10 mL。顶空进样器条件:进样量 1  $\mu\text{L}$ 。GC/MS 分析条件:毛细管色谱柱 DB-VRX(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 1.4  $\mu\text{m}$ );程序升温:40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 220 $^{\circ}\text{C}$ ,保持 3 min,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 240 $^{\circ}\text{C}$ ,保持 20 min,进样口温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ ,载气为氦气,恒流模式,质谱接口温度 235 $^{\circ}\text{C}$ ,离子源 EI 温度 230 $^{\circ}\text{C}$ ,四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$ ,采用外标法定量分析。

双组分等温吸附实验用 Agilent 6820 气相色谱-火焰离子检测器(GC/FID)连有 7694E 顶空进样器(美国惠普公司)进行测定,方法检出限为 0.05  $\mu\text{g/L}$ 。GC/FID 分析条件:进样量 1  $\mu\text{L}$ ,毛细管色谱柱 HP-5MS(50 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ ),进样口温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ ,载气为氦气,恒流模式,FID 检测器温度为 240 $^{\circ}\text{C}$ ,采用外标法定量分析。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 吸附动力学实验

从图 1 可以看出,吸附初期溶液中的苯或甲苯浓度( $C_{\text{eq}}$ )快速下降,原因是高浓度时溶剂与溶质的排斥力较强,随着吸附时间的增长吸附量增加缓慢并逐渐趋于吸附平衡(王兆同等,1999),图中可见经过 24~48 h 的吸附,吸附量基本达到了稳定。对于苯系物等的吸附平衡时间的确定也有人进行了实验(童玲等,2007;马文洁等,2010),得出与本实验相同的结果,吸附等温线测定及影响因素实验均采用 48 h 作为吸附平衡时间。

### 2.2 苯和甲苯在土壤中的等温吸附实验

从土壤对苯和甲苯的吸附实验结果及线性方程

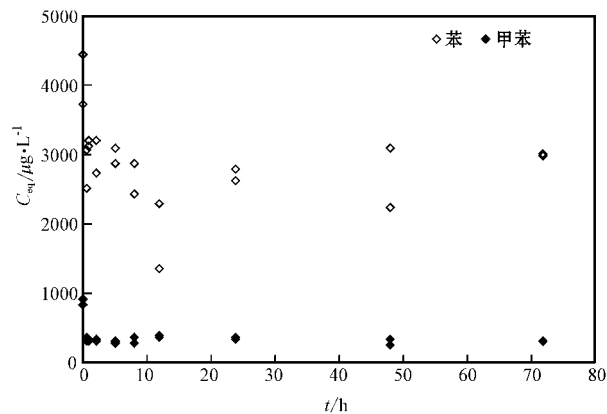


图 1 苯和甲苯在土壤中吸附动力学结果

Fig. 1 Sorption kinetics of benzene and toluene to soils

拟合结果(图 2 与表 2)可知,土壤对苯和甲苯的吸附等温线为直线型,从机理上分析,在吸附过程中以分配作用为主。线性吸附模型表示目标污染物在固液两相的分配系数  $K_d$ (等温吸附线的斜率)为一常数,且与经过土壤有机碳标准化后的分配系数  $K_{\text{oc}}$  有关系,各土样对目标污染物的吸附等温线用线性方程来拟合,计算式为:

$$C_s = K_d C_{\text{eq}} \quad (1)$$

$$K_d = K_{\text{oc}} f_{\text{oc}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{eq}}$ 为平衡时污染物在溶液中的平衡浓度( $\mu\text{g/L}$ ), $C_s$ 为平衡时污染物在吸附剂中的浓度( $\mu\text{g/g}$ ), $K_d$ 为污染物的吸附分配系数( $\text{L/kg}$ ), $K_{\text{oc}}$ 为土壤有机碳/水分分配系数( $\text{L/kg}$ )。

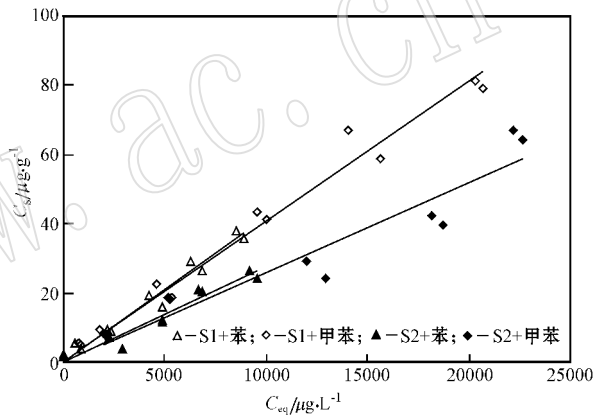


图 2 苯和甲苯单组分的等温吸附线

Fig. 2 Single-solutes adsorption isotherms of benzene and toluene

一般认为只有当  $f_{\text{oc}} > 0.1\%$  时, $K_d$  与  $f_{\text{oc}}$  之间才存在(2)式中的关系(Schwarzenbach and Westall, 1981)。

污染物的  $K_{\text{oc}}$  在 500~2000  $\text{L/kg}$  的范围内时,其迁移性低(王昭等,2009)。本研究中两种土壤吸附苯和甲苯的  $K_{\text{oc}}$  值均在 600~1200  $\text{L/kg}$  的范围内(表 2),因此它们在两种土壤中的迁移性较差。实验用土为粘土和粉砂质粘土,比表面积较大,利于吸附作用的发生。

除  $K_{\text{oc}}$  和土壤组成以外,用于判断吸附能力大小的因素还包括土壤和有机污染物的理化性质等。当  $f_{\text{oc}} > 0.1\%$  时,对吸附作用贡献最大的是土壤有机碳含量  $f_{\text{oc}}$ (娄保锋,2004)。表 1 中 S1 的  $f_{\text{oc}}$  大于 S2,从图 2 及表 2 中拟合结果得 S1 对于苯和甲苯的  $K_d$  大于 S2。 $K_d$  数值越大,说明污染物越容易被吸附

表 2 苯和甲苯的单双组分等温吸附拟合方程

Table 2 Fitting results of single-solutes and bi-solute sorption isotherms of benzene and toluene

土壤编号	参数	苯		甲苯	
		甲苯(0 $\mu\text{g/L}$ )	甲苯(8 669 $\mu\text{g/L}$ )	苯(0 $\mu\text{g/L}$ )	苯(8 786 $\mu\text{g/L}$ )
S1	拟合方程	$C_s = 0.0042C_{eq}$	$C_s = 0.0033C_{eq}$	$C_s = 0.0041C_{eq}$	$C_s = 0.0026C_{eq}$
	$K_d/\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.2	3.3	4.1	2.6
	$K_{oc}/\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	976.74	767.44	953.49	604.65
	$R^2$	0.9714	0.9142	0.9774	0.9463
S2	拟合方程	$C_s = 0.0027C_{eq}$	$C_s = 0.0022C_{eq}$	$C_s = 0.0026C_{eq}$	$C_s = 0.0024C_{eq}$
	$K_d/\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.7	2.2	2.6	2.4
	$K_{oc}/\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	1125	916.67	1083.33	1000
	$R^2$	0.9463	0.9066	0.9042	0.8918

到土壤介质中,土样对污染物的吸附能力越强(刘晓艳等,2007)。 $f_{oc}$ 是影响吸附的一个重要因素,且与吸附能力成正比。

有机污染物的吸附能力与其在水中的溶解度成反比,因为溶解度越小则被水排斥,从而与土壤接触的面积更大有利于吸附在土壤表面。苯的水溶解度是甲苯的3倍左右,理论上甲苯的吸附亲和力要强于苯,但本实验得出的结果为土壤对两种污染物的吸附能力相当。原因可能是实验初期对相同浓度范围的苯和甲苯分别进行了实验,但在低浓度段甲苯全部被土壤吸附,导致实验数据不完整,可靠性差,不利于进行结果分析,因此在后续的实验中,对甲苯的浓度进行了调整,通过提高溶液中甲苯的浓度得出如图2所示的结果,并有研究认为非离子憎水性有机化合物在水中的百分含量增大时(即有机溶质浓度升高时),其在土壤/沉积物上的吸附相应减弱(Nkedikizza *et al.*, 1985, 1987)。水溶液中甲苯的浓度提高较多,在与苯的水溶液体积相同的情况下,甲苯的百分含量较大,也有可能致图2所示的土壤对两种污染物的吸附能力相当的结果。

### 2.3 苯和甲苯在土壤中的竞争吸附

有机污染环境往往是多种有机污染物的共存体系,一种有机污染物的吸附行为不仅受制于土壤的性质和环境因素,而且常常受到共存有机污染物的影响。在石油中苯和甲苯是同时存在的,因此针对供实土壤进行双组分吸附研究是很有必要的,等温竞争吸附实验结果见图3~4。结合表2中的拟合数据双组分体系中各组分的吸附能力都低于相应单组分体系的,表明双组分共存时发生了竞争吸附,这种竞争现象的发生与吸附剂表面的活性位点数量、有机碳含量和污染物质的理化性质有关。

共存溶质的存在,使得主溶质的吸附量和吸附

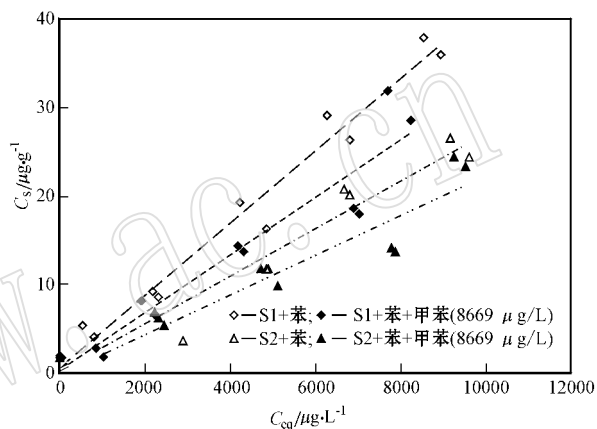


图 3 苯单组分和苯为主溶质时与甲苯的竞争吸附的等温吸附曲线比较

Fig. 3 Competitive adsorption isotherms between benzene and benzene-toluene bi-solute system

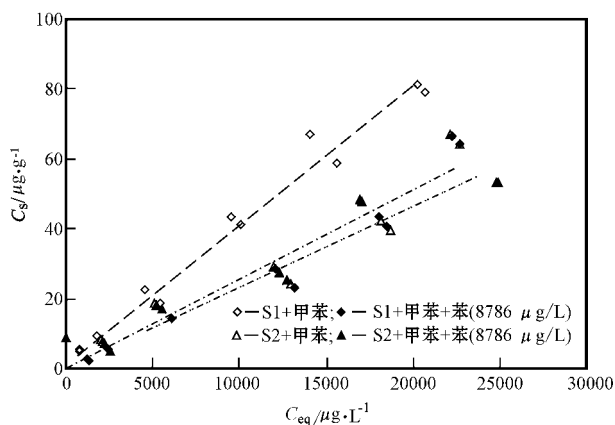


图 4 甲苯单组分和甲苯为主溶质与苯的竞争吸附的等温吸附曲线比较

Fig. 4 Competitive adsorption isotherms between toluene and toluene-benzene bi-solute system

分配系数  $K_d$  较之单组分明显变小(图3~4,表2)。本实验的污染物浓度由低到高范围较广,一般吸附

等温线的低浓度段以表面吸附为主,而高浓度段以分配为主( 娄保锋, 2004)。从吸附机理上看,本实验中污染物的表面吸附和分配作用不是单独存在的,而是共同发生作用,共存溶质与主溶质所能竞争的是表面吸附点位,所以低浓度段主溶质的竞争吸附效应较强。

由实验结果知, S<sub>2</sub> 作为吸附剂时对于苯和甲苯的吸附不管是单组分还是双组分均较为线性,但相关性系数  $R^2$  小于吸附剂为 S<sub>1</sub> 时,相关性相对较差。究其原因可能是,土壤由无机矿物和有机碳组成,从吸附机理上看,无机矿物对于污染物以表面吸附为主,土壤有机碳吸附机理为分配作用,因此在土壤有机碳含量低的 S<sub>2</sub> 中除分配作用以外,其他吸附机理(如表面吸附)的作用可能较显著。

### 3 结论

本研究采用批实验方法,探讨了表层土壤对苯和甲苯单组分的吸附和双组分的竞争吸附现象,得出以下结论:

(1) 当苯和甲苯以单组分形式存在时,它们在表层土壤中的吸附均符合线性规律,分配作用为主要吸附机理。吸附能力与土壤有机碳含量成正比,在有机碳含量较低的土壤中,吸附的线性相关性下降。

(2) 当水溶液中有苯和甲苯共存时,双组分体系中苯和甲苯的吸附能力都低于相应单组分体系的,表明共存组分间发生了竞争吸附。竞争吸附作用的结果说明,吸附作用不是单一的表面吸附过程或分配作用,介质表面点位对苯和甲苯双组分的吸附也起到一定的作用。

### References

Chen Diyun, Xie Wembiao, Ji Li, *et al.* 2006. Competitive sorption of mixed organic pollutants by soils[ J ]. *Environmental Science*, ( 7 ): 1 377~1 382( in Chinese ).

Chen Yudao, Zhu Xueyu and Wu Sansan. 1997. Pollution from of petroleum hydrocarbons in subsurface water sources of Linzi area in Zibo City[ J ]. *Carsoiologica Sinica*, 16( 1 ): 35~40( in Chinese ).

Li Ying, Zhang Wei, Lü Yan, *et al.* 2009. Activated carbon adsorption for removing MTBE and BTEX from water[ J ]. *Journal of East China University of Science and Technology( Natural Science Edition )*, ( 6 ): 866~872( in Chinese ).

Liu Fei, Liu Mingliang and He Jiangtao. 2007. The adsorption of

trichlorinated hydrocarbon in the unsaturated zone[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26( 6 ): 549~552( in Chinese ).

Liu Xiaoyan, Ji Xueyan, Li Xingwei, *et al.* 2007. Research on the mechanism of the adsorption/desorption of petroleum pollutants in soils and its prospectiv[ J ]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, ( 1 ): 82~87( in Chinese ).

Lopez E, Schuhmacher M and Domingo J L. 2008. Human health risks of petroleum-contaminated groundwater[ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 15( 3 ): 278~288.

Lou Baofeng. 2004. Competitive Effects and Influential Factors of Sorption of Organic Pollutants onto Sediments( Doctor Thesis [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University( in Chinese ).

Ma Wenjie, He Jiangtao, Jin Aifang, *et al.* 2010. The sorption kinetics and sorption-desorption characteristics of Naphthalene and p, p'-DDE in the typical media of Vadose Zone[ J ]. *Journal of Agro-Environment Science*, ( 7 ): 1 275~1 282( in Chinese ).

Nkedikizza P, Rao P S C and Hornsby A G. 1985. Influence of organic cosolvents on sorption of hydrophobic organic-chemicals by soils [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 19( 10 ): 975~979.

Nkedikizza P, Rao P S C and Hornsby A G. 1987. Influence of organic cosolvents on leaching of hydrophobic organic-chemicals through soil[ J ]. *Environmental Science & Technology*, 21( 11 ): 1 107~1 111.

Pignatello J J and Xing B S. 1996. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles[ J ]. *Environmental Science & Technology*, 30( 1 ): 1~11.

Sander M and Pignatello J J. 2005. Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: Insights drawn from single-solute and Bi-solute competitive experiment[ J ]. *Environmental Science & Technology*, 39( 6 ): 1 606~1 615.

Schwarzenbach R P and Westall J. 1981. Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater: Laboratory sorption studies[ J ]. *Environmental Science & Technology*, 15: 1 360~1 367.

Sun Jing. 2006. Discussion on Extraction Methods of Total Volatile Organic Compounds in Soil( Master Thesis [ D ]. China University of Geoscience( in Chinese ).

Tong Ling, Zheng Xilai, Li Mei, *et al.* 2007. Adsorptive behavior of BTEX mixtures on soils[ J ]. *Journal of Xi 'an University of Architecture & Technology( Natural Science Edition )*, 39( 6 ): 856~861( in Chinese ).

Wang Zhao, Shi Jiasheng, Zhang Zhaoji, *et al.* 2009. Mobility and pathogenic risks of some organic compounds in groundwater and soils[ J ]. *Geology in China*, 36( 5 ): 1 175~1 178( in Chinese ).

Wang Zhaotong, Wang Yu, Xu Zheng, *et al.* 1999. Modeling of adsorption process for PAHs( phenanthrene ) on sediment in Huangpu River[ J ]. *Journal of East China University of Sciences and Technology*, 25( 2 ): 156~159( in Chinese ).

Weber W J, McGinley P M and Katz L E. 1992. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 1. Conceptual basis and equilibrium assessments[ J ]. *Environmental Science & Tech-*

nology, 26(10): 1955-1962.

Wei Shangzheng. 2010. Study on Competitive Sorption of Nitrobenzene Compounds in Soils and Sandy Materials (Master Thesis [D]). Beijing: North China Electric Power University (in Chinese).

Shen Xueyou, Lu Yingying, Zhu Lizhong, et al. 2004. Sorption of BTEX mixtures to organobenonites [J]. Journal of Environmental Sciences-China, (2): 222-225.

Zhang Liang, Ma Zhenmin, Yu Weiwei, et al. 2009. Mechanism of oil pollution in groundwater system of a refinery [J]. Journal of University of Jinar (Science and Technology), (3): 288-291 (in Chinese).

## 附中文参考文献

陈迪云, 谢文彪, 吉莉, 等. 2006. 混合有机污染物在土壤中的竞争吸附研究 [J]. 环境科学, (7): 1377-1382.

陈余道, 朱学愚, 武三三. 1997. 淄博市临淄地区地下水源地石油烃污染特征 [J]. 中国岩溶, 16(1): 35-40.

李影, 张巍, 吕燕, 等. 2009. 活性炭对水中 MTBE 和 BTEX 的吸附性能 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), (6): 866-872.

刘菲, 刘明亮, 何江涛. 2007. 包气带对三氯乙烯的吸附行为研究

[J]. 岩石矿物学杂志, 26(6): 549-552.

刘晓艳, 李英丽, 朱谦雅, 等. 2007. 石油类污染物在土壤中的吸附/解吸机理研究及展望 [J]. 矿物岩石地球化学通报, (1): 82-87.

娄保锋. 2004. 有机污染物在沉积物上的竞争吸附效应及影响因素 (博士学位论文 [J]). 杭州: 浙江大学.

马文洁, 何江涛, 金爱芳, 等. 2010. 萘和 p,p'-DDE 在典型包气带介质上的吸附动力学及吸附-解吸特征 [J]. 农业环境科学学报, (7): 1275-1282.

孙静. 2006. 土壤中挥发性有机污染物的提取检测方法研究 (硕士学位论文 [J]). 北京: 中国地质大学.

童玲, 郑西来, 李梅, 等. 2007. 土壤对苯系物的吸附行为研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 39(6): 856-861.

王昭, 石建省, 张兆吉, 等. 2009. 建议纳入地下水调查指标体系的有机污染物——基于迁移性和致病风险的分析 [J]. 中国地质, 36(5): 1175-1178.

王兆同, 王郁, 胥峥, 等. 1999. 黄浦江底泥对多环芳烃(菲)的吸附过程模拟 [J]. 华东理工大学学报, 25(2): 156-159.

韦尚正. 2010. 硝基苯类化合物在土壤和砂质上的竞争吸附研究 (博士学位论文 [J]). 北京: 华北电力大学.

张亮, 马振民, 于玮玮, 等. 2009. 某炼油厂地下水系统石油烃污染机制 [J]. 济南大学学报(自然科学版), (3): 288-291.

www.yskw.com.cn