

# 模拟土样有机碳和矿物质对 TCE 吸附贡献的实验研究

韩璐, 何江涛, 张晶, 张坤峰

(中国地质大学 水资源与环境学院, 北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为研究均一介质条件下有机碳含量及矿物质对 TCE 吸附行为的影响, 简化了土壤环境的复杂性和异质性, 以固定矿物质(高岭土:石英砂=3:7)作为土壤基体, 添加不同质量分数的腐殖质( $f_{oc}=0.16\% \sim 2.29\%$ )配制成模拟土样, 进行矿物质和模拟土样对 TCE 的吸附批实验。实验结果显示, TCE 的吸附等温线呈非线性。随有机碳含量增加, 表现为线性吸附增强, 矿物质对 TCE 的吸附贡献随有机碳含量增加而减小。 $f_{oc} > 0.82\%$  时, 矿物质对吸附作用的贡献率  $< 5\%$ ;  $f_{oc} > 1\%$  时, 可以基本忽略矿物质对吸附的影响。此外, TCE 初始浓度也会影响有机碳和矿物质的吸附能力。用 Freundlich 模型分别拟合 TCE 吸附等温线的低浓度段和高浓度段(以  $C_e = 500 \mu\text{g/L}$  为浓度高低的分界), Freundlich 指数  $n$  值呈现由大到小的趋势, TCE 初始浓度越高, 有机碳的吸附贡献率相对上升, 而矿物质的贡献率则下降。TCE 初始浓度在  $50 \sim 500 \mu\text{g/L}$  之间,  $f_{oc}$  由  $0.16\%$  增大到  $1\%$  时, 矿物质的吸附贡献率范围由  $28\% \sim 16\%$  缩小到  $3\% \sim 1\%$  之间, 此时 TCE 初始浓度对有机碳和矿物质的吸附贡献率基本没有影响。

**关键词:** 土壤有机碳, 矿物质, 三氯乙烯, 吸附, 贡献率

中图分类号: P579; X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)06-1118-07

## Laboratory study of the impact of model soil organic carbon content and mineral matter on TCE sorption behaviors

HAN Lu, HE Jiang-tao, ZHANG Jing and ZHANG Kun-feng

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

**Abstract:** In this experiment, the authors simplified the complexities and heterogeneities of the soil environment in order to study the impact of soil organic matters and minerals on the TCE sorption behaviors in homogeneous soils. The given minerals, which were mixed kaolin clay and silica sand according to the proportion of 3:7 and served as the soil matrix structure, were added to different amounts of humic substance ( $f_{oc} = 0.16\% \sim 2.29\%$ ) to comprise the model soils. The parallel experiments of the TCE sorption were carried out both in minerals and model soils respectively by using the batch experimental method. It is concluded that the sorption of the TCE was characterized by nonlinear isotherm. The linear sorption reaction was enhanced and the contribution rate of the minerals to the sorption was reduced with the increasing amount of the organic matters. The sorption contribution rate of minerals was less than  $5\%$  when the organic carbon content was more than  $0.82\%$ , and even could be neglected when the organic carbon content was higher than  $1\%$ . Also the original concentration of the TCE could affect the capacity of the sorption and the sorption contribution of the organic carbon and minerals in

收稿日期: 2010-10-03; 修订日期: 2011-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40702060), 国家高技术研究发展计划 863 项目(2006AA100205-3)

作者简介: 韩璐(1985-), 女, 汉, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染评价, E-mail: applelu11@126.com; 通讯作者: 何江涛(1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为土壤地下水污染控制与修复, E-mail: jthe@cugb.edu.cn

some way. The Freundlich sorption model was used to simulate the TCE isotherm sorption patterns in two segments, with  $C_e = 500 \mu\text{g/L}$  as the boundary. The fitting exponential of Freundlich ( $n$ ) decreased with the increasing TCE concentration. Besides, the contribution rate of the organic carbon increased while that of the minerals went down with the increasingly higher TCE concentration. When the TCE concentration varied from 50 to  $500 \mu\text{g/L}$  and  $f_{oc}$  was 0.16%, the sorption contribution rate of minerals fluctuated in the range of 28% ~ 16% and decreased to 3% ~ 1% at  $f_{oc}$  equal to 1%, whereas the TCE concentration almost had nothing to do with their contributions.

**Key words:** soil organic carbon; minerals; trichloroethylene; sorption; contribution

长期以来,人们对土壤吸附疏水性有机污染物的认知主要集中在土壤有机质上,认为有机碳的含量与污染物在土壤和水中的分配直接相关(Lambert, 1967; Lotse and Graetz, 1968; O'Connor and Anderson, 1974; Choi and Chen, 1976)。Schwarzenbach和Westall(1981)认为只有当 $f_{oc} > 0.1\%$ 时,土壤对于疏水性有机污染物的吸附主要取决于有机碳的含量和有机化合物自身的物理化学性质,与土壤介质无关,并提出标准化分配系数 $K_{oc}$ 的概念。然而 $K_{oc}$ 这种说法只有在吸附过程主要发生在天然有机质中时才有意义,对低有机碳含量的吸附剂则成了问题。有研究表明,地表以下的环境,如砂砾海滩沉积物或地表以下富含铝硅酸盐的粘土矿物中,有机质的含量非常低(Schwarzenbach and Westall, 1981; Banerjee *et al.*, 1985; Piwoni and Banerjee, 1989; Schwarzenbach *et al.*, 2004),那么有机污染物在矿物质表面的作用很可能是唯一的吸附行为。土壤/沉积物中还包括粘土等次生矿物,研究表明它们对有机污染物的吸附也有一定的影响,因而矿物质对疏水性有机污染物吸附行为的影响也受到国内外研究的关注(Bachus *et al.*, 1990; Haderlein *et al.*, 1996; 孙卫玲等, 2004; 吴文玲等, 2006),也有文献认为土壤/沉积物对有机污染物的吸附实际上是由土壤/沉积物中的矿物组分和有机质两部分共同作用的结果(Schlautman and Morgan, 1994; Huang *et al.*, 1996; Mader *et al.*, 1997; Onken and Traina, 1997)。为简化研究土壤耕作层以下包气带介质对有机物的吸附行为,不考虑有机质的异质性对吸附行为的影响,本实验采用模拟包气带介质方法研究了有机碳含量范围对吸附作用的贡献以及矿物质在其中的影响,同时也考察了污染物浓度在吸附作用中对二者的影响。

TCE是地下水中最常见的有机污染物之一,已被美国EPA列为优先污染物(Kruithof *et al.*,

1985; Wilmanski and Breemen, 1990),它的物理化学性质参见Schwarzenbach等(2004)。TCE是极性分子,带有毒性,有致癌作用,属于DNAPL类有机污染物,易挥发,且在水中有一定的溶解性,易随地下水迁移,同时它又是难降解物质,吸附是控制其迁移转化及归宿的主要因素。因而选取TCE单种污染物作为吸附质考察其在本实验中的吸附规律。

## 1 实验材料与方法

高岭土和石英砂(3:7)作为混合矿物质,将其加入不同质量分数的腐殖质配制成模拟土样,对加TCE溶液进行静态吸附实验,探讨有机碳含量对TCE吸附行为的影响,单纯混合矿物对TCE进行吸附作为对照实验组,研究单一矿物对TCE的吸附影响。

### 1.1 样品制备

固定高岭土和石英砂配比3:7混合,加入腐殖质,配制成不同有机碳含量的模拟土样( $f_{oc}$ 含量参考北京东南郊区钻孔剖面包气带介质采样分析结果)(表1)。有机碳含量( $f_{oc}$ )采用重铬酸钾外加热-容量法测定(以同样方法测定混合矿物的 $f_{oc}$ 背景值,结果表明 $f_{oc}$ 值均低于检出限),编号依次从S1到S7,单纯混合矿物编号为KW。石英砂为国药集团化学试剂公司出产的分析纯,高岭土为国药集团化学试剂公司提供的分析纯,腐殖质为国药集团化学试剂公司出产的化学纯,三氯乙烯采用北京化工厂出品的分析纯,三氯乙烯标准溶液质量浓度为0.98 mg/mL;甲醇为Burdick & Jackson的色谱纯,其余试剂均为分析纯。

### 1.2 实验方法

TCE易挥发,先将TCE配成高浓度的甲醇储备液(甲醇的体积分数不超过0.1%,以避免共溶效应),背景溶液成分为0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$ 以保持溶液中一定的离子强度(梁重山等, 2004)。将甲醇储备

表1 实际土样和模拟土样参数表  
Table 1 Parameters of actual samples and model samples

实际土样				模拟土样			
编号	取样深度/m	粘土矿物含量/%	$f_{oc}/\%$	编号	$f_{oc}/\%$	高岭土:石英砂	TCE 溶液初始浓度范围/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
1	0~0.5	27.9	0.59	KW	0	3:7	30~500
2	0.5~1	20.7	0.19	S1	0.16	3:7	
3	1~1.5	29.3	0.40	S2	0.29	3:7	
4	1.5~2	52.8	0.78	S3	0.58	3:7	
5	2~2.5	29.8	0.43	S4	0.82	3:7	50~1 300
6	2.5~3	40.5	0.28	S5	1.19	3:7	
7	3~3.5	22.8	0.16	S6	1.55	3:7	
8	3.5~4	20.9	0.12	S7	2.29	3:7	
9	4~4.5	34.0	0.24				
10	4.5~5	33.7	0.10				
11	5~5.5	34.8	0.17				

液稀释成 8 个浓度梯度,范围 50~1 300  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,对照实验组 TCE 溶液 30~500  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,分别存储于棕色下口瓶中,密封保存。采用批实验吸附方法,准确称取样品 4.00 g 于 20 mL 顶空瓶中,加入不同浓度的 TCE 溶液 19 mL,迅速压盖密封,每个浓度梯度设置一个不加土样的空白作为控制样来扣除挥发的影响。样品 25°C 下以 200 r/min 空气振荡 48 h (吸附动力学实验表明,48 h 吸附达到平衡)。平衡后,离心(3 500 r/min,10 min),用玻璃注射器取上清液 3 mL 注入 10 mL 顶空瓶中,压盖密封。在气相色谱仪中测试 TCE 溶液浓度作为液相平衡浓度,控制样平衡时的 TCE 浓度作为液相的初始浓度。

### 1.3 样品测试方法

TCE 分析采用美国安捷伦公司 7694E 顶空进样器和 CertyQA-QC 化学工作站的 Agilent 6820 气相色谱仪,检出限为 0.05  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,使用灵敏度度较高的 HP-624 色谱柱,ECD 检测器,进样口温度 160°C,色谱柱柱流量 1.0 mL/min,炉温 70°C(保持 10 min)检测器 ECD 温度 300°C,顶空进样器条件:Vial 60°C(温度),Loop 70°C(温度),Tr1line 80°C(温度)(Tzoua *et al.*, 2008)。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 模拟矿物质的吸附

实验结果表明,单纯混合矿物质对 TCE 呈非线性吸附,用 Freundlich 和 Langmuir 模型吸附拟合(图 1)较好。这与 Haderlein 等(1996)研究粘土矿物吸附 1,3,5 三硝基苯的非线性吸附行为较一致,他认为

为此类化合物能专门与矿物质表面的点位反应,并且从吸附焓的角度来看,此类化合物与矿物质表面点位作用呈现更强的键合性(Haderlein *et al.*, 1996)。文献表明,一些极性疏水有机物和矿物质有较强亲和性,这类化合物包括硝基芳香化合物(NACs)如炸药,TNT 或除草剂如二硝基甲酚(DNOC)。这些有机物能从矿物质表面取代水,并参与吸附,吸附剂之间具相当强的互相作用,并且它们与固体表面特殊点位的吸附作用具有饱和性(Schwarzenbach *et al.*, 2004)。有研究还发现,有机污染物在无机矿物表面的作用符合线性吸附(Bachus and Gschwend, 1990; 孙卫玲等, 2004; 吴文玲等, 2006),但是污染物浓度都比较低(一般 < 200  $\mu\text{g}/\text{L}$  左右)。在低浓度条件下,有机污染物可以均匀分配到矿物质表面,但是随着污染物浓度升高,而矿物质表面容纳有机分子的点位有限,矿物质表面均匀吸附污染物的能力必然下降;同时有机污染物要接近矿物质表面,还必须要驱替矿物质表面的水分子,也就意味着存在和水分子的竞争,这种使水分子从矿物质表面脱附的能力也取决于有机污染物自身的疏水性和结构性质特点。对有机污染物在极性矿物质表面的吸附机理还有待于进一步研究。

### 2.2 模拟土壤样品的吸附等温线

实验结果表明,模拟土样的吸附等温线用 Freundlich 等温吸附模型拟合较好,相关系数  $R^2$  均在 0.98 以上。各模拟土样的吸附方程如表 2 所示。

模拟土样中  $f_{oc}$  在 0.16%~2.29% 之间。从表中数据可以看出, $f_{oc}$  为 0.16% 时, Freundlich 方程中的  $n$  值和 1 偏差较大,  $\log K_F$  很小,非线性吸附现象

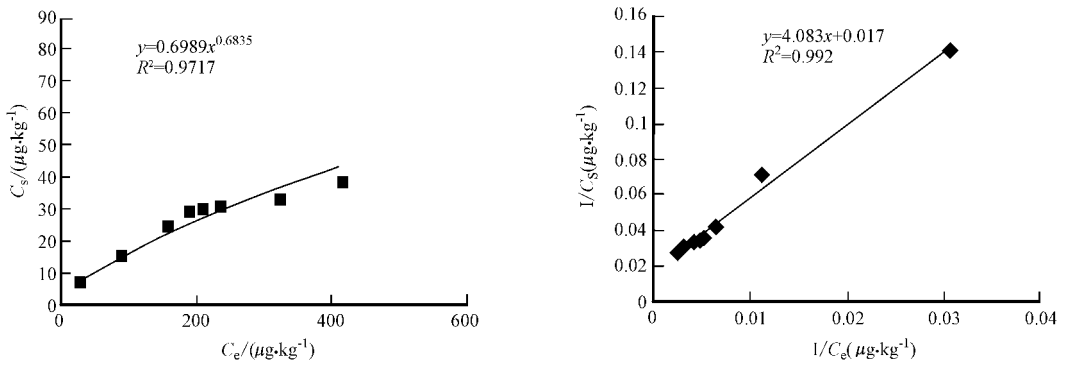


图 1 模拟矿物质的等温吸附线

Fig. 1 Isotherm sorption patterns of model minerals

表 2 模拟土壤样品对 TCE 的等温吸附方程

Table 2 Sorption isotherm functions of TCE to model soil samples

编号	$f_{oc}/\%$	Freundlich 模型吸附方程	$n$	$R^2$	$\log K_F/L \cdot kg^{-1}$	$N^a$
S1	0.16	$y = 0.797x + 0.245$	$0.797 \pm 0.022$	0.996	$0.245 \pm 0.055$	8
S2	0.29	$y = 0.805x + 0.612$	$0.805 \pm 0.018$	0.997	$0.612 \pm 0.045$	8
S3	0.58	$y = 0.834x + 0.730$	$0.834 \pm 0.027$	0.994	$0.730 \pm 0.065$	8
S4	0.82	$y = 0.899x + 0.734$	$0.899 \pm 0.039$	0.989	$0.734 \pm 0.091$	8
S5	1.19	$y = 0.864x + 0.984$	$0.864 \pm 0.038$	0.989	$0.984 \pm 0.085$	8
S6	1.55	$y = 0.899x + 1.060$	$0.899 \pm 0.23$	0.996	$1.060 \pm 0.051$	8
S7	2.29	$y = 1.031x + 0.938$	$1.031 \pm 0.037$	0.992	$0.938 \pm 0.076$	8

<sup>a</sup> 表示实验数据点的数目。

明显；随着吸附剂中  $f_{oc}$  增加， $n$  值越来越接近 1， $\log K_F$  也呈增大趋势，可见随  $f_{oc}$  的增大，TCE 更加趋向于线性吸附平衡曲线。 $n$  值和  $\log K_F$  值的渐变规律说明在  $f_{oc}$  较低时，在矿物质表面发生的吸附行为同样不能忽视，其吸附作用与有机质的分配作用产生吸附竞争，非线性吸附较明显； $f_{oc}$  升高，吸附剂中有机质的“溶剂”特征逐渐凸显，以分配作用为主的吸附作用导致线性吸附趋势增强。

### 2.3 有机碳含量和矿物质对 TCE 吸附行为的影响

由于模拟矿物质吸附实验中，TCE 的浓度范围比模拟土样吸附实验的浓度范围小，故仅比较模拟土样中前 5 个液相浓度梯度。在相同的液相平衡浓度下，比较模拟矿物质和模拟土样的固相吸附浓度，通过差减法，计算出相应有机碳在系统中的固相吸附浓度，进而评价矿物质和有机质在不同比例时的吸附贡献率（图 2）。

$f_{oc}$  很低时（ $< 0.16\%$ ）， $C_0 = 50 \sim 500 \mu g/L$ ，有机碳和矿物质均有一定的贡献率，平均值分别为 78% 和 22%。当  $f_{oc}$  增大，有机碳在吸附作用中的优势明显增强， $f_{oc} > 0.82\%$  以后，有机碳的平均贡献

率  $> 95\%$ ； $f_{oc} > 1\%$  以后，有机碳的贡献率波动不大，基本稳定在 98% 左右，可见此时有机碳已经作为主要吸附剂支配 TCE 在固液相中的分配行为。在本实验条件下， $f_{oc} > 0.82\%$  时，矿物质在土壤/沉积物中的吸附作用才可以被弱化，以往普遍认为  $f_{oc} > 0.1\%$  时对吸附作用的贡献只取决于有机碳含量的说法是不够全面的。

### 2.4 TCE 浓度对自身吸附行为的影响

模拟土样中不仅有有机碳含量和矿物质与 TCE 吸附行为有着密切关系，TCE 溶液初始浓度也影响着吸附行为。从图 3 可以看出，TCE 浓度的高低会影响 Freundlich 模型中  $n$  值的变化。 $f_{oc}$  分别为 0.16% 和 0.29% 时，以液相平衡浓度 450 ~ 500  $\mu g/L$  为分界线，在低浓度段和高浓度段分别用 Freundlich 模型拟合发现，前者的  $n$  值比后者高，也就是说在低浓度段趋向线性吸附作用要比高浓度段更强，而  $f_{oc}$  分别为 1.15% 和 2.29% 时，以液相平衡浓度 150 ~ 200  $\mu g/L$  为分界线，发现上述的结论正好相反。但是  $f_{oc}$  较高时，初始溶液浓度引起的  $n$  值差异小的多。实质上这并不矛盾，有机碳含量低（ $f_{oc}$  为

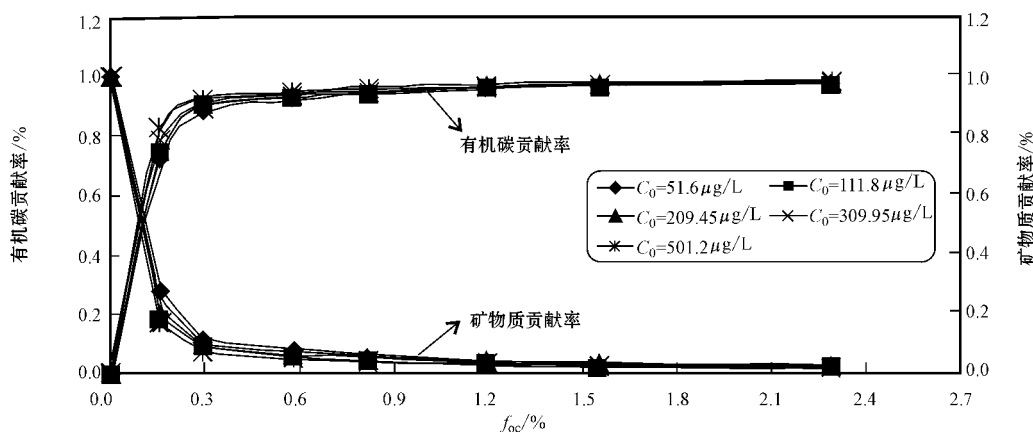


图 2 有机碳含量和矿物质在吸附作用中的贡献率

Fig. 2 The respective contributions of the organic carbon content and the mineral to TCE sorption

0.16%~0.29%) ,液相平衡浓度 < 500  $\mu\text{g/L}$  左右时 ,如图 3a、3b ,溶液中有有机分子的扩散速度加快 ,污染物不仅可以到达吸附剂的外表面 ,还可以进入到孔隙内部 ,以表面吸附为主的分配作用加强 ,因而线性趋势增强 ,初始溶液浓度继续增大 ,但是有机质中可以容纳污染物的空间逐渐减小 ,所以污染物以新的固液分配系数达到平衡 ,但是线性趋势降低。这种随着初始溶液浓度变化的动态平衡在吸附实验中是普遍存在的 ,它会影响土壤吸附有机污染物的能力 ,但并不改变吸附规律的本质。这种影响随着溶液浓度、有机碳含量和污染物自身的结构特点的不同而有不同程度的影响。梁重山等(2004)在研究菲

在土壤/沉积物中的吸附/解吸现象时也提到污染物的浓度会影响到吸附的线性变化 ,但是他区分的浓度范围和本实验的浓度范围不同。有机碳含量高时 (图 3c、3d ,  $f_{oc}$  为 1.15% 和 2.29% ) ,它作为支配吸附作用的主要因素 ,受到污染物浓度的影响较小 ,且基本呈线性吸附。

从图 4 看出 ,  $f_{oc}$  相同而 TCE 浓度不同时 ,有机碳和矿物质的吸附贡献率也不同。初始液相浓度升高 ,有机碳的吸附贡献率相对上升 ,而矿物质则下降。推测其原因 ,矿物质的吸附容量有限 ,随着初始液相浓度的升高 ,矿物质表面上可以和 TCE 作用的点位逐渐被占据 ,溶液中剩余的 TCE 分子将更多的

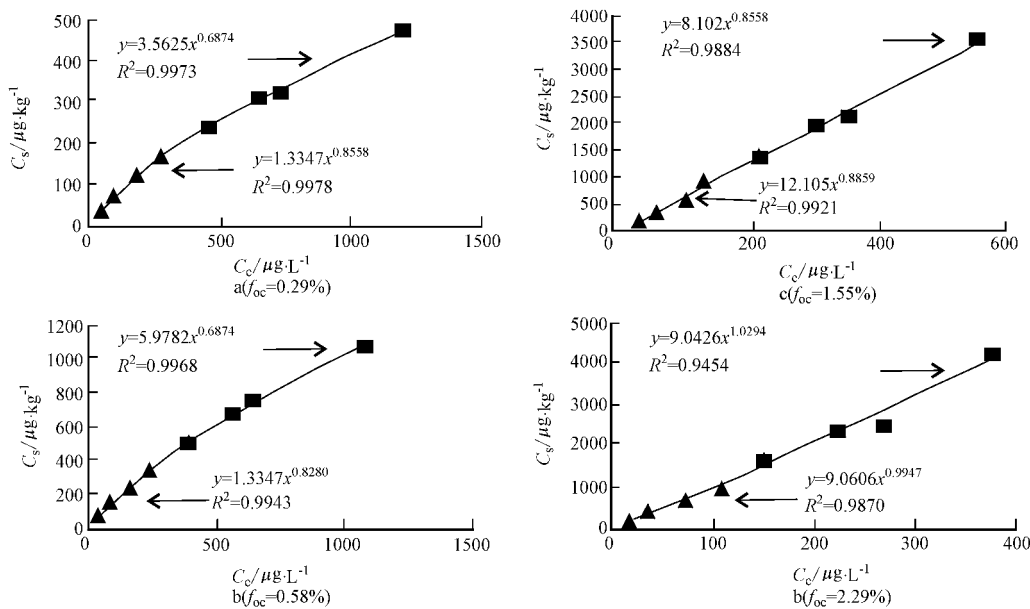


图 3 初始溶液浓度与吸附等温线的关系

Fig. 3 The relationship between the original sorbate concentration and the TCE sorption isotherms

被分配到微量的有机质中,有机碳的吸附能力得以加强,这种现象也间接说明,仅有微量的有机碳存在时,在 TCE 的吸附过程中存在矿物质与有机质的竞争作用,而矿物质的竞争能力在有机碳含量不变的情况下随着 TCE 浓度增加而逐渐减弱。图 4a 所示  $f_{oc}=0.16\%$ ,  $C_0=50\sim 500\ \mu\text{g/L}$ , 矿物质最大贡

献率 28%, 最小 16%;  $f_{oc}$  为 0.29% 时,其范围缩小为 11%~7%,可见溶液初始浓度对有机碳和矿物质吸附贡献的影响随着有机碳含量的增大而逐渐减小。 $f_{oc}>1\%$  时(图 4b),矿物质对吸附的贡献率基本稳定在 3%~1% 范围内,此时可以忽略 TCE 浓度对二者的影响。

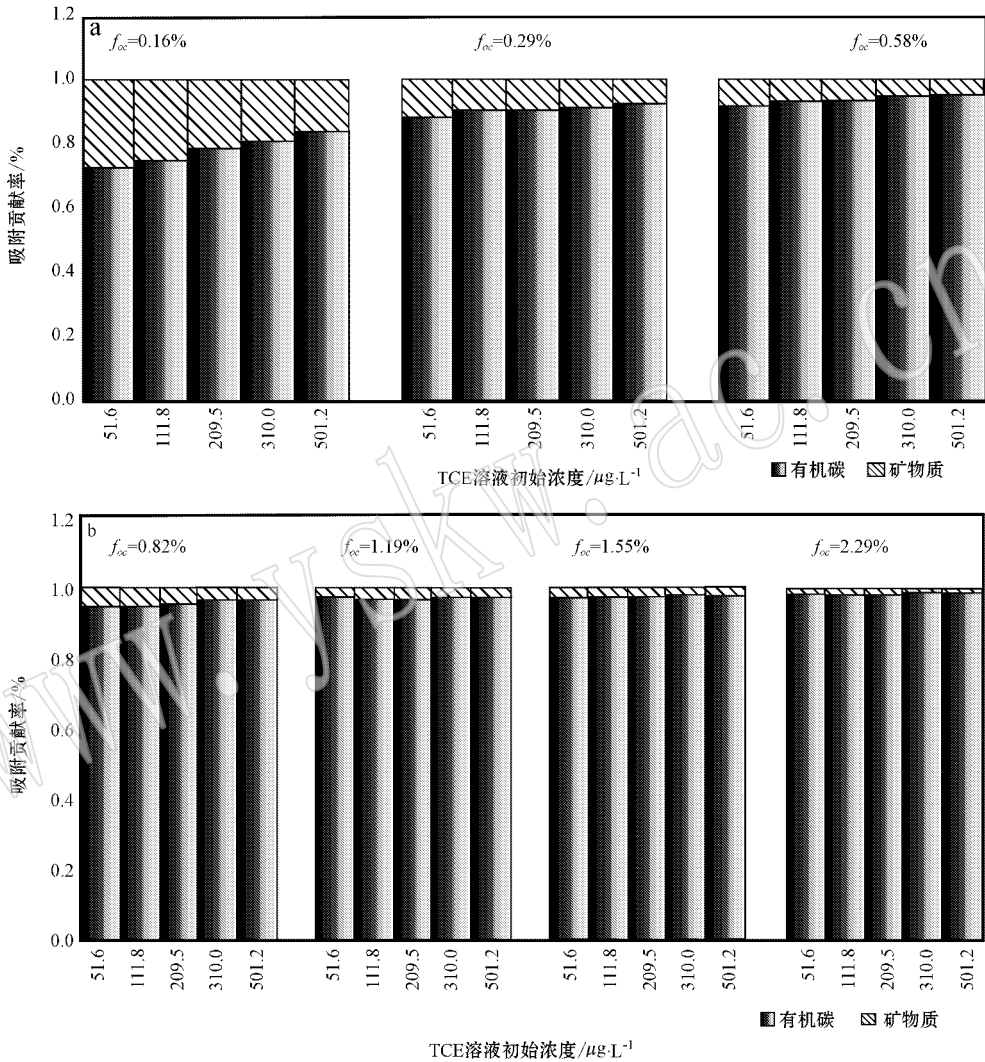


图 4 初始溶液浓度对有机碳和矿物质吸附贡献率的影响

Fig. 4 The effects of the original sorbate concentration on the respective contributions of the organic carbon content and the mineral to TCE sorption

土壤/沉积物环境中,有机碳和矿物质的结合方式非常复杂,简单地将其混合并不能完全代表实际土样中有机质与矿物质的存在形态。本实验模拟均一土壤介质条件下,考察不同有机碳含量对单一特定疏水性有机物 TCE 的吸附规律,发现有机碳是 TCE 吸附行为的主要支配因素,但是矿物质及污染物浓度的影响都不容忽视,并且影响程度随有机碳

含量,矿物质和污染物浓度的变化而变化。这一问题的进一步验证有待于实际土样的实验考查。

### 3 结论

初始浓度为 50~1 300  $\mu\text{g/L}$  的 TCE 在模拟配土中的等温吸附平衡曲线与 Freundlich 吸附模型拟

合较好,而单纯用矿物质吸附较符合 Langmuir 吸附模型(浓度为  $30 \sim 500 \mu\text{g/L}$ ),相关系数  $R^2$  均在 0.98 以上。

模拟土样的吸附中,有机质是 TCE 吸附行为的主要支配因素,但是矿物质吸附作用不容忽视,尤其是含有微量有机碳的土样吸附作用。 $f_{oc}$  较小(0.16%),非线性较明显,矿物质对吸附作用平均贡献率 22%,对 TCE 吸附行为有一定影响。随着有机碳含量升高,线性吸附趋势增强,矿物质的吸附作用明显减弱。有机碳含量  $> 0.82\%$  时,矿物质的吸附贡献率  $< 5\%$ ;  $f_{oc} > 1\%$  时,有机碳的贡献率均 98% 以上,此时可以忽略矿物质对 TCE 的吸附作用。

TCE 溶液浓度也会影响有机碳和矿物质的吸附能力,但具有一定的局限性。它对有机碳含量较低( $f_{oc} 0.16\% \sim 0.29\%$ )的土样吸附影响较大,而随着有机碳含量增高,这种影响微弱。 $f_{oc}$  很小时,TCE 浓度影响吸附等温线的线型,用 Freundlich 模型分别拟合低浓度段和高浓度段的吸附等温线, $n$  值呈现由大到小的趋势。不同的污染物浓度会导致有机碳和矿物质在吸附中的贡献率差距较大,污染物浓度越高,有机碳的吸附贡献率相对上升,而矿物质下降。 $f_{oc} = 0.16\%$ ,  $C_0 = 50 \sim 500 \mu\text{g/L}$ ,矿物质的贡献率波动范围为  $28\% \sim 16\%$ ;  $f_{oc} > 1\%$  时,矿物质的吸附贡献率缩小至  $3\% \sim 1\%$ ,TCE 浓度对有机碳和矿物质的吸附贡献率基本没有影响。

## References

- Bachus D A and Gschwend P M. 1990. Fluorescent polycyclic aromatic hydrocarbons as probes for studying the impact of colloids on pollutant transport in groundwater[J]. Environ. Sci. Technol., 24: 1214~1223.
- Banerjee P, Pivoni M D and Ebeid K. 1985. Sorption of organic contaminants to a low carbon subsurface core[J]. Chemosphere, 8: 1057~1067.
- Choi W W and Chen K Y. 1976. Associations of chlorinated hydrocarbons with fine particles and humic substances in nearshore surficial sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 10(8): 782~786.
- Haderlein S B, Werssmahr K W and Schwarzenbach R P. 1996. Specific adsorption of nitroaromatic explosive and pesticides to clay minerals[J]. Environ. Sci. Technol., 30: 612~622.
- Huang W, Schlutman M A and Weber W J Jr. 1996. A distributed reactivity model for sorption by soil and sediments. 5. The influence of nearsurface characteristics in mineral domains[J]. Environ. Sci. Technol., 30: 2993~3000.
- Kruithof J C, Hess A F, Manwaring J F, et al. 1985. Removal of organic contaminants from drinking water[J]. Aqua, 2: 89~99.
- Lambert S M. 1967. Functional relationship between sorption in soil and chemical structure[J]. J. Agric. Food Chem., 15: 572~576.
- Lotse E G and Graetz D A. 1968. Lindane adsorption by lake sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 2: 353~357.
- Mader B T, Uwe-Goss K and Eisenreich S J. 1997. Sorption of nonionic, hydrophobic organic chemicals to mineral surface[J]. Environ. Sci. Technol., 31: 1079~1086.
- O'Connor G A and Anderson J U. 1974. Soil factors affecting the adsorption of 2,4,5-T[J]. Soil Sci. Amer. Proc., 38: 433~436.
- Onken B M and Traina S J. 1997. The sorption of pyrene and anthracene to humic acid-mineral complexes: effect of fractional organic carbon content[J]. Journal of Environmental Quality, 26: 126~132.
- Pivoni M D and Banerjee P. 1989. Sorption of volatile organic solvents from aqueous solution onto subsurface solids[J]. J. Contam. Hydro., 4: 163~179.
- Schlutman M A and Morgan J J. 1994. Sorption of perylene on a nonporous inorganic silica surface: Effects of aqueous chemistry on sorption rates[J]. Environ. Sci. Technol., 27: 961~969.
- Schwarzenbach R P and Westall J. 1981. Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater: Laboratory sorption studies[J]. Environ. Sci. Technol., 15: 1360~1367.
- Schwarzenbach R P, Gschwend P M and Imboden D M. 2004. Environmental Organic Chemistry[M]. Translated by WANG Lian-sheng. Beijing: Chemical Industry Press (in Chinese).
- Tzoua Y M, Wang S L, Liu J C, et al. 2008. Removal of 2,4,6-trichlorophenol from a solution by humic acids repeatedly extracted from a peat soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 152: 812~819.
- Wilmanski K and Breemen A N V. 1990. Competitive adsorption of trichloroethylene and humic substances from groundwater on activated carbon[J]. Water Research, 24: 773~779.
- Liang Chongshan, Dang Zhi, Liu Congqiang, et al. 2004. Studies on sorption-desorption equilibria and hysteresis of phenanthrene by soil and sediment[J]. Acta Pedologica Sinica, 24(3): 329~335 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weiling, Ni Jinren, Hao Pengpeng, et al. 2004. Sorption of Bisphenol A on sediment[J]. Environmental Science, 24(6): 975~981 (in Chinese with English abstract).
- Wu Wenling and Sun Hongwen. 2006. Sorption characteristics of trichloroethylene on model sorbent[J]. Acta Ecologica Sinica, 15(2): 207~211 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 梁重山, 党志, 刘丛强, 等. 2004. 菲在土壤/沉积物上的吸附-解吸过程及滞后现象的研究[J]. 土壤学报, 24(3): 329~335.
- 孙卫玲, 倪晋仁, 郝鹏鹏, 等. 2004. 泥沙对双酚 A 的吸附及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 24(6): 975~981.
- 吴文玲, 孙红文. 2006. 三氯乙烯在模型吸附剂上的吸附特性[J]. 生态环境, 15(2): 207~211.