

土壤有机碳含量及异质性的三氯乙烯的吸附影响实验

何江涛, 刘明亮, 张坤峰, 刘菲

(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: 采取北京城区表土样品和土壤标准参考样共 7 件, 对原土样以及经 H_2O_2 氧化处理去除低聚有机碳后的土样分别采用静态批实验方法, 研究其对三氯乙烯 (TCE) 的等温吸附方程。实验结果表明 7 种土样对 TCE 的吸附模式均符合线性等温吸附方程, 采用 H_2O_2 氧化去除土壤样品中的低聚碳, 并没改变等温吸附线型, 只是方程的参数发生了变化。剩余有机碳的含量仍都大于 0.1%, 仍然以有机碳的吸附为主, 原土样、高聚碳、低聚碳对 TCE 吸附均表明, 有机碳的含量与样品吸附 TCE 的能力没有明显的关系, 证实不管是总有机碳、低聚碳还是高聚碳都有明显的异质性, 它们所表现出来的吸附能力并不相同, 有机碳结构组成的差异往往是影响其吸附的关键因素。而土壤有机碳经历矿化和腐殖化程度的差异是造成土壤有机碳结构组成差异的主要原因。

关键词: 土壤有机碳; 三氯乙烯; 吸附行为; 异质性

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0325-06

A laboratory study of the impact of the soil organic carbon content and heterogeneity on the TCE sorption behavior

HE Jiang-tao, LIU Ming-liang, ZHANG Kun-feng and LIU Fei

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

Abstract: In order to study the impact of the soil organic carbon content and soil organic carbon heterogeneity on the sorption behavior of trichloroethylene (TCE), the authors collected 7 soil samples including 3 surface soil samples of Beijing urban area and 4 soil standard reference samples. These 7 samples were treated by using H_2O_2 to remove the lower aggregate carbons (LAC). Both treated and untreated soil samples were used to carry out statistic batch tests on the TCE isotherm sorption patterns. The results show that the isotherm adsorption patterns fit the liner sorption model very well both for the treated and untreated soil samples. The removal of LAC did not change the sorption model type, and only changed the parameters of the liner formulae. The residual organic carbon content of all the samples remained higher than 0.1%, and the organic carbons still played the main role during the sorption. The results also show that there exist no apparent relationships between the soil sample sorption capabilities and different kinds of organic carbon content, i. e., the total organic carbon (TOC) content and the higher aggregate carbon (HAC) content and LAC content, and the total sorption capabilities of 7 original soil samples used in these tests are mainly determined by the LAC sorption capabilities. These data have confirmed the fact that TOC, LAC and HAC all have obvious heterogeneities, i. e., the same soil organic carbon content will have different sorption capabilities. The difference in organic carbon construction and components is the key factor affecting the

收稿日期: 2009-10-25; 修订日期: 2010-03-12

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

作者简介: 何江涛(1974-), 男, 副教授, 从事土壤地下水污染与控制教学、研究, E-mail: jthe@cugb.edu.cn.

sorption behavior. Unless the difference in organic carbon construction and components is negligible, the organic carbon content will play an important role in affecting the TCE sorption behavior. However, the heterogeneities of soil organic carbons are mainly caused by the difference in mineralization and humification.

Key words: soil organic carbon; trichloroethylene(TCE); sorption behavior; heterogeneity

有机污染物在土壤/沉积物中的吸附行为,直接影响着有机污染物在环境中的迁移、转化等过程。有关有机污染物的吸附行为研究,国外自上个世纪 60 年代就已经开始。早期的观点认为,有机污染物在土壤和水之间的分配系数 K_d 直接与土壤有机碳含量 f_{oc} 有关,有机污染物主要吸附在土壤有机碳中(Lambert, 1967; Lotse *et al.*, 1968; O'Connor and Anderson, 1974; Choi and Chen, 1976)。人们根据 f_{oc} 对 K_d 进行标准化提出了 K_{oc} 的概念: K_{oc} 是有机物在有机碳和水中的分配系数,它与有机化合物自身的物理化学性质有关,与土壤介质无关(Karickhoff, 1979, 1981)。90 年代 Weber 和 Huang 等提出土壤/沉积物吸附有机污染物的三端员模式,将吸附有机污染物的组分分成无机矿物表面、无定型的有机质(软碳, soft carbon)和凝聚态的有机质(硬碳, hard carbon) 3 个部分(Weber *et al.*, 1992; Carroll *et al.*, 1994; Weber and Huang, 1996; Huang *et al.*, 1997; LeBoeuf and Weber, 1997; Huang and Weber, 1998)。此外, Xing 等(1996, 1997)也提出了双模式吸附模型,将土壤有机质分为溶解相(dissolution or partition domain)和孔隙填充相(hole-filling domain)两部分。事实上,两种模型的本质是相同的,它们在肯定土壤有机碳是影响有机污染物吸附的关键的同时,也都肯定了土壤有机碳的异质性(Heterogeneity)是引起有机污染物非线性吸附过程的主要原因。

在张坤峰等(2009)一文中,重点研究了不同有机碳含量的实际土壤样品对三氯乙烯(TCE)的吸附行为。探讨了土壤样品由于有机碳含量不同,存在有机碳含量的阈值区间(f_{oc}^*)的问题。实验结果表明:当 $f_{oc} < 0.702\%$ 时, TCE 吸附量随土壤样品的有机碳含量变化较小,基本不随 f_{oc} 变化而发生较大变化;在 $0.702\% < f_{oc} < 1.831\%$ 时, TCE 吸附量随 f_{oc} 的升高而升高明显;当 $f_{oc} > 1.831\%$ 时, TCE 吸附量随土壤样品的有机碳含量变化又变得平缓,基本上又不随 f_{oc} 升高而发生较大的变化。这一现象表明:土壤样品有机碳的含量和样品对 TCE 的吸附能力没有明显的相关关系,揭示出土壤样品中的有机碳

存在明显的异质性。

为进一步揭示土壤有机碳结构组成的异质性对 TCE 的吸附行为影响,本文采用 7 种有机碳含量不同的土壤样品,通过批实验方法,对比研究了 TCE 在土壤样品原样以及经过去除有机碳后的二级样品中的吸附规律,探讨了有机碳含量以及有机碳的组成及其异质性对 TCE 吸附的影响。

1 土样采集与制备

实验用的 7 种土样包括 3 个采自北京城区绿化地的表土,以及 4 种土壤标准参考样,土样编号依次为 ZY、XY、JS、GSS-1、GSS-4、GSS-8、GSD-9。其中 ZY、XY、JS 是采自地面 0~10 cm 的表土样品。土样采集后去除碎石、败叶等杂质,自然风干 10 天以上,用研钵捣碎研细,过 2 mm 筛后装于棕色广口瓶中备用;4 种土壤标准参考样 GSS-1、GSS-4、GSS-8、GSD-9 是由中国地质科学院结合我国实际情况,在全国范围选择典型区域取样制备而成的,分别为:采自黑龙江伊春西林的暗棕壤、采自广西宜山的黄色石灰岩土壤、采自山西洛川秦家寨的黄土、采自长江武汉段白沙舟江心沙的长江底沉积物。

将以上 7 种土壤样品原样称为一级土样。为研究和对比一级土样在实验室去除有机碳后的吸附行为,对上述 7 种土样用 H_2O_2 在 40℃ 恒温水浴条件下反复处理,直到再加入 H_2O_2 无明显气泡产生为止,自然风干后装于棕色广口瓶中备用,称其为二级土样,样品编号依次为 XYC、ZYC、JSC、GSS-1C、GSS-4C、GSS-8C、GSD-9C。

2 实验材料与方法

土壤理化性质主要有 pH 值、含水量、总有机碳含量(f_{oc})、阳离子交换容量(CEC)。分析方法分别为:pH 值采用玻璃电极法,土样:水 = 1:5;含水量用烘干法测定;总有机碳含量(f_{oc})采用重铬酸钾外加热-容量法测定;阳离子交换容量(CEC)采用乙酸铵-EDTA 法测定。此外,为了研究土壤有机碳聚合

形式对吸附行为的影响,分别测定了总有机碳中“低聚碳”和“高聚碳”的含量。土壤中有有机碳一般由胡敏酸、富里酸等相对小分子碳以及胡敏素等相对大分子碳组成,本文用“低聚碳”代表相对小分子有机碳,用“高聚碳”代表相对大分子有机碳。实验过程中,采用焦磷酸钠提取-重铬酸钾法测定土壤中胡敏酸和富里酸的含量,把这部分认为是“低聚碳”。经测定,二级土样中基本不含低聚碳,这就可以证实用 H_2O_2 处理能够有效去除“低聚碳”。土样中的高聚碳含量可直接由测定二级土样中的有机碳含量而得,测定方法同 f_{oc} 。低聚碳含量则由总有机碳含量减去高聚碳含量计算获得。

采取批实验的方法研究 TCE 在土壤样品中的等温吸附方程,准确称取一系列实验土样 1.000 g 于 20 mL 顶空瓶中,分别加入配置好的不同浓度的 TCE 溶液 10 mL 后压盖密封。每一 TCE 浓度组设置一个不加土样的空白控制样。置于恒温水浴振荡器,设定温度 22 °C,振荡速度 180 r/min。待到吸附平衡时间 48 h 后将全部样品同时取出,以 3 200 r/min 离心 20 min,用玻璃注射器取上清液 5 mL,迅速注入 10 mL 顶空瓶中压盖密封。在气相色谱仪中测试溶液中 TCE 的浓度。

TCE 分析采用美国惠普公司出产的带有 7694 E 顶空进样器和 HP-0601 化学工作站的 HP-6890 气相色谱仪分析,采用灵敏度较高的 HP-624 色谱柱和 ECD 检测器,气相条件为:进样口温度 160 °C,色谱柱流量 1.0 mL/min,炉温 50 °C(保持 1 min),以 10 °C/min 升温至 70 °C(保持 6 min),检测器 ECD 温度 300 °C,顶空进样器条件:Vial 温度 50 °C,Loop 温度 60 °C,Triline 温度 70 °C。

3 实验结果与讨论

3.1 土壤理化参数

7 种土壤样品的基本理化性质见表 1,土壤样品的有机碳组成含量见表 2。

3.2 土壤样品的吸附等温线

采用批实验方法,分别对 7 种一级土样和 7 种二级土样进行等温吸附实验。对实验数据分别采用线性吸附模型、Langmuir 模型和 Freundlich 模型进行拟合,发现 7 组土样处理前后对 TCE 的吸附均符合线性吸附模型,相关系数 R^2 均在 0.9 以上。低聚碳的氧化去除,并没改变土壤样品对 TCE 的等温吸

表 1 土壤样品的基本理化性质

Table 1 Some basic physical-chemical properties of soil samples

土样	pH 值	含水量/%	CEC /cmol·(100g) ⁻¹	f_{oc} /g·(100g) ⁻¹
ZY	7.99	1.8	23.60	2.57
XY	7.86	2.4	14.16	1.27
JS	7.67	1.6	19.40	3.22
GSS-1	6.15	0.6	21.30	1.83
GSS-4	6.24	0.4	7.88	0.70
GSS-8	8.95	0.3	6.60	0.32
GSD-9	8.99	0.5	17.51	1.22

表 2 土壤样品中有机碳的组成含量 %

Table 2 Organic carbon content of soil samples

土样	XY	ZY	JS	GSS-1	GSS-4	GSS-8	GSD-9
低聚碳含量	0.64	2.08	2.74	1.52	0.55	0.06	0.81
高聚碳含量	0.63	0.49	0.47	0.31	0.15	0.26	0.41
总有机碳含量	1.27	2.57	3.21	1.83	0.70	0.32	1.22

附线性,只是方程的参数发生了变化。剩余有机碳的含量仍都大于无机矿物吸附和有机碳吸附的阈值 0.1%(Schwarzenbach *et al.*, 1981),仍然以有机碳的吸附为主。7 组土样的吸附等温线见图 1、图 2,等温线性拟合方程见表 3。

线性等温吸附方程的斜率反映的是单位溶液平衡浓度对应的单位固相吸附量,即 K_d ,单位为 L/kg。 K_d 数值越大说明 TCE 越容易被吸附到土壤介质中,土样对 TCE 的吸附能力越强。根据线性等温吸附方程获得的分配系数,结合有机碳含量(表 2)可以分别计算出 7 种土样对应的 K_{oc} 值。表 4 分别列出了对应全土样的 K_{oc} 值、对应高聚碳 K_{ocH} 值和对应低聚碳的 K_{ocL} 值。

3.3 讨论

从表 3 中一级土样的等温吸附方程斜率可以看出,7 种土样对 TCE 的吸附能力由大到小顺序为 GSD-9>GSS-1>JS>ZY>GSS-8>GSS-4>XY,从表 1 中得出的土壤总有机碳含量顺序却是 JS>ZY>GSS-1>XY>GSD-9>GSS-4>GSS-8。由此判断,尽管土壤有机碳含量是影响 TCE 在土壤介质中吸附的重要因素,但不同地区,不同类型的土壤介质中单位质量有机碳含量所表现出的吸附能力并不相同。标准化后得出 K_{oc} 值范围为 98.1~594.0 L/kg,最大的 GSD-9 是最小值 XY 的 6 倍,充分说明不同地区、不同类型的土壤介质中有机碳结构组成上存在明显差异。

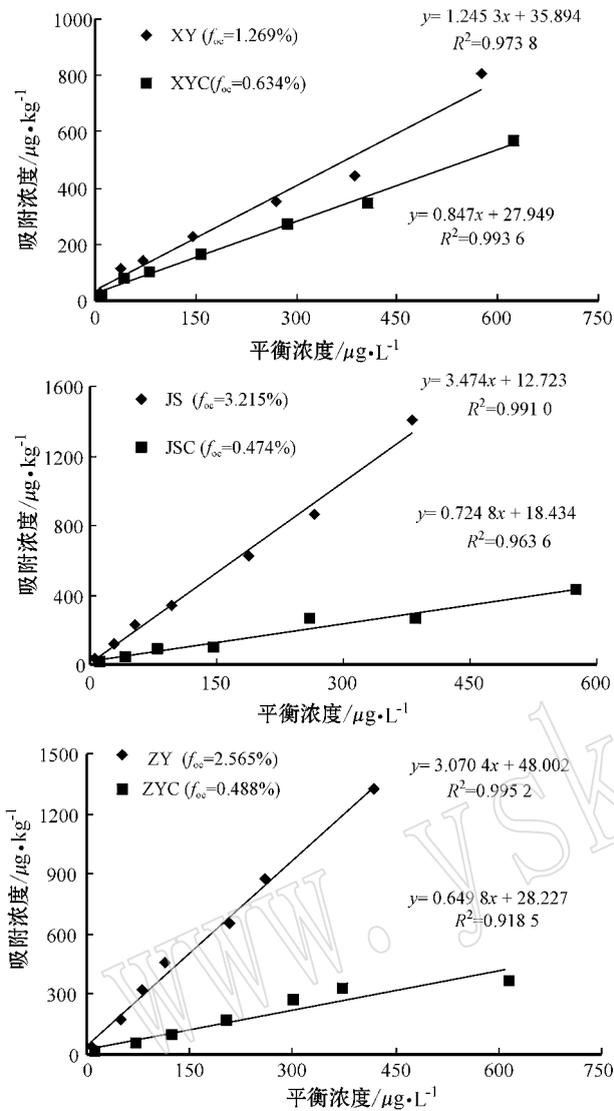


图 1 3 种表土及其二级土样的等温吸附线

Fig. 1 Isotherm sorption patterns of 3 surface soil samples and their second-class soil samples

进一步考察有机碳含量及有机碳的组成对 TCE 吸附特征的影响,对比 7 种土样在采用 H_2O_2 去除有机碳后的二级土样吸附规律。从图 1 和图 2 中可以明显看出,在同一平衡浓度下,一级土样对 TCE 的吸附量总是高于二级土样的吸附量,去除低聚碳后的二级土样对 TCE 的吸附能力都有不同程度的下降。其中 XY 和 GSS-8 2 个土样有机碳通过 H_2O_2 氧化去除率分别占总有机碳的 50% 和 19.5%,其他样品有机碳去除率均占总有机碳的 60% 以上。

从表 3 中二级土样的等温吸附方程斜率可以看出,7 种土样对 TCE 的吸附能力由大到小顺序为 GSD-9C>GSS-1C>GSS-8C>XYC>JSC>ZYC>

表 3 TCE 等温吸附线拟合方程

Table 3 Isotherm sorption fitting formulae of TCE			
	土样	拟合方程	相关系数 R^2
处理前	XY	$q = 1.2453C_e + 35.894$	0.9738
	JS	$q = 3.4740C_e + 12.723$	0.9910
	ZY	$q = 3.0704C_e + 48.002$	0.9952
	GSS-1	$q = 4.0245C_e - 49.568$	0.9969
	GSS-4	$q = 1.6253C_e + 75.067$	0.9807
	GSS-8	$q = 1.6404C_e + 39.918$	0.9967
	GSD-9	$q = 7.2229C_e - 104.320$	0.9954
	XYC	$q = 0.8470C_e + 27.949$	0.9936
	JSC	$q = 0.7248C_e + 18.434$	0.9636
处理后	ZYC	$q = 0.6498C_e + 28.227$	0.9185
	GSS-1C	$q = 1.2898C_e + 114.530$	0.9854
	GSS-4C	$q = 0.4627C_e + 33.106$	0.9871
	GSS-8C	$q = 1.0804C_e + 79.857$	0.9878
	GSD-9C	$q = 2.9111C_e + 22.675$	0.9994

GSS-4C,但是从表 2 中得出的土壤高聚碳含量顺序却是 $XYC > ZYC > JSC > GSD-9C > GSS-1C > GSS-8C > GSS-4C$ 。可见用 H_2O_2 处理后,不同土样剩余的高聚碳的含量与样品吸附 TCE 的能力没有明显的关系,对应高聚碳 K_{ocH} 值范围为 133.2~715.3 L/kg,变化也很大,也充分说明剩余高聚碳的性质也不相同。同样,也可以得出采用 H_2O_2 去除掉的低聚碳也存在明显差异。因此,可以认为:尽管土壤有机碳含量是影响 TCE 在土壤介质中吸附的关键,但不同地区,不同类型的土壤介质中不管是高聚碳还是低聚碳,它们的结构、组成均存在明显差异,单位质量有机碳含量所表现出的吸附能力并不相同。

如果考察一级土样和二级土样线性等温吸附方程斜率之差,可以发现一级土样的斜率与一、二级土样斜率之差有较好的对应关系,见图 3。图 3 由高聚碳引起的吸附分配系数 K_{dH} 与由低聚碳引起的吸附分配系统 K_{dL} 相加和,反映的是土样的总斜率 K_{d0} 。从图 3 中可以比较明显的看出,7 种土样 K_d 增高趋势和 K_{dL} 的增高趋势是一致的。这实际上说明,本次实验所采取的 7 种一级土样对 TCE 的吸附能力主要取决于低聚碳的吸附能力。从与之相对应的图 4 中可以看出,高聚碳吸附贡献率低的样品总吸附能力较大,而高聚碳吸附贡献率高的样品则总吸附能力较低。但是,一级土样对 TCE 的吸附能力与低聚碳的含量并没有明显的关系,这点可以从图 3 中看出。进一步说明通过 H_2O_2 去除的低聚碳并不相同,不管是从含量上,还是它们对 TCE 的吸附能力上都不同。显然,低聚碳在其形成过程中,有机碳的来源不同,所经历的矿化和腐殖化程度不同是造成不同

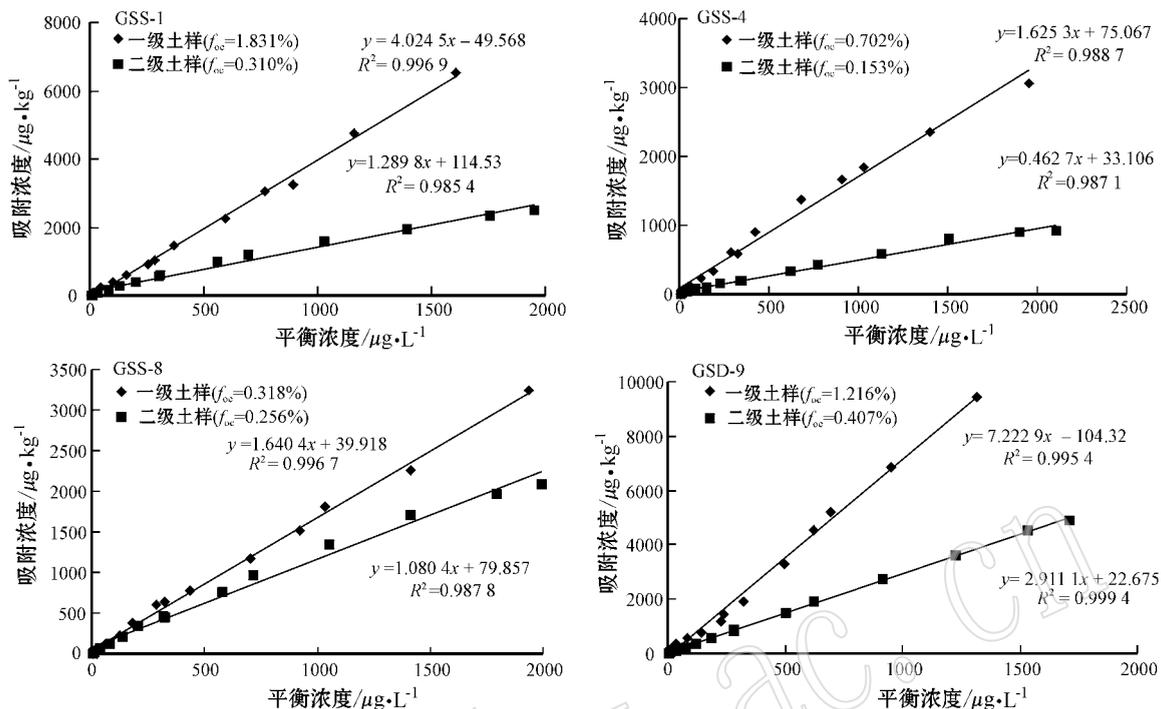


图 2 4 种标准土样及其二级土样的等温吸附线

Fig. 2 Isotherm sorption patterns of 4 soil standard reference samples and their second-class soil samples

表 4 依据吸附等温线拟合方程计算的 K_{oc} $L \cdot kg^{-1}$

Table 4 K_{oc} values calculated from the isotherm sorption fitting formulae

土样	K_{oc}	K_{ocH}	K_{ocL}
XY	98.1	133.6	62.7
JS	108.1	152.9	100.3
ZY	119.7	133.2	116.5
GSS-1	219.8	416.1	179.8
GSS-4	231.5	302.4	211.8
GSS-8	515.8	422.0	903.2
GSD-9	594.0	715.3	533.0
平均值	269.6	325.1	301.0

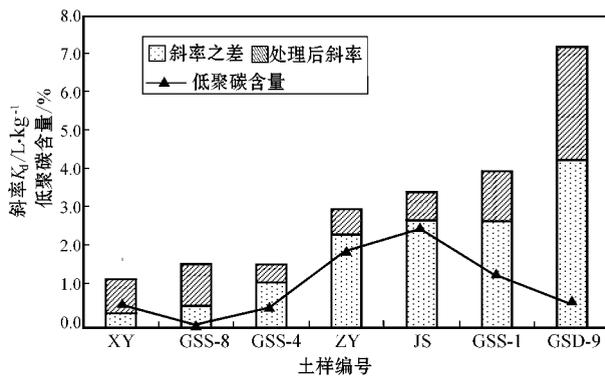


图 3 线性等温吸附方程斜率及低聚碳含量对比图

Fig. 3 Comparison of slopes of liner sorption formulae and lower aggregate carbon content

土壤样品低聚碳含量和吸附性能差异的主要原因。

从表 3 数据还可以看出 4 个土壤标准参考样的 K_{oc} 值均比 3 个北京城区绿化地表土样的要高,这可能是土壤标准参考样中有机碳经历矿化和腐殖化作用时间长、程度高所致。此外,除 GSS-8 以外其余 6 个土样高聚碳的 K_{oc} 值均比低聚碳的 K_{oc} 值高,说明高聚碳经历矿化和腐殖化程度高,单位质量有机碳的吸附能力较强,这与国外文献报道的相一致(Celis *et al.*, 2006; Ahangar *et al.*, 2008a, 2008b)。

从上面讨论可以看出,土壤对有机物的吸附不仅取决于土壤有机碳的含量,有机碳结构组成的差

异往往更是影响其吸附的关键因素,只有当有机碳结构组成差异较小时,有机碳的含量才可能成为影响其吸附作用的主要因素。

4 结论

(1) 3 种表土和 4 种标准土对 TCE 的静态吸附批实验结果表明,它们的吸附模式均符合线性等温吸附方程,采用 H_2O_2 氧化去除土壤样品中的低聚

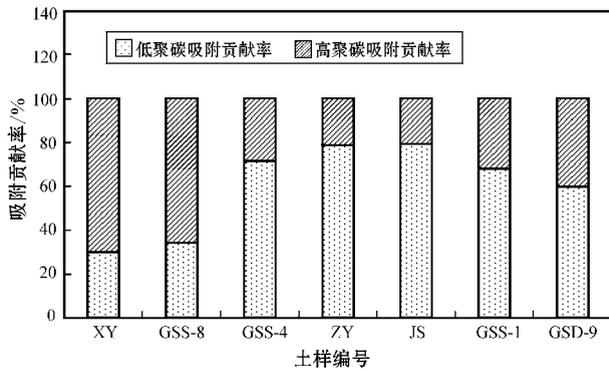


图 4 低聚碳和高聚碳吸附能力贡献率

Fig. 4 Contributions of lower and higher aggregate carbons to the sorption capabilities

碳,并没改变样品对 TCE 的等温吸附线型,只是方程的参数发生了变化。剩余有机碳的含量仍都大于 0.1%,仍然以有机碳的吸附为主。

(2) 原土样、高聚碳、低聚碳对 TCE 吸附均表明,有机碳的含量与样品吸附 TCE 的能力没有明显的关系,证实不管是总有机碳、低聚碳还是高聚碳都有明显的异质性,它们所表现出来的吸附能力并不相同,有机碳结构组成的差异往往是影响其吸附的关键因素。

(3) 本次实验所采集的 7 种一级土样对 TCE 的吸附能力主要取决于低聚碳的吸附能力。土壤有机碳经历矿化和腐殖化程度的差异是造成土壤有机碳结构组成差异的主要原因。

References

- Ahangar A G, Smernik R J, Kookana R S, *et al.* 2008a. Clear effects of soil organic matter chemistry, as determined by NMR spectroscopy, on the sorption of diuron[J]. *Chemosphere*, 70: 1153~1160.
- Ahangar A G, Smernik R J, Kookana R S, *et al.* 2008b. Separating the effects of organic matter-mineral interactions and organic matter chemistry on the sorption of diuron and phenanthrene[J]. *Chemosphere*, 70: 886~890.
- Carroll K M, Harkness M R, Bracco A A, *et al.* 1994. Application of a permeant/polymer diffusional model to the desorption of polychlorinated biphenyls from Hudson River sediments[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 28(2): 253~258.
- Celis R, De Jonge H, De Jonge L W, *et al.* 2006. The role of mineral and organic components in phenanthrene and dibenzofuran sorption by soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 57: 308~319.
- 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. Tech.*, 10: 782~786.

- Huang W and Weber W J Jr. 1998. A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments. 11. Slow Concentration-Dependent Sorption Rates[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 32(22): 3549~3555.
- Huang W, Young T M, Schlautman M A, *et al.* 1997. A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments. 9. General Isotherm Nonlinearity and Applicability of the Dual Reactive Domain Model[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 31(6): 1703~1710.
- Karickhoff S W. 1979. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediment[J]. *Water Res.*, 13: 241~248.
- Karickhoff S W. 1981. Semiempirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils[J]. *Chemosphere*, 10: 833~849.
- Lambert S M. 1967. Functional relationship between sorption in soil and chemical structure[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 15: 572~576.
- LeBoeuf E J and Weber W J Jr. 1997. A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments. 8. Sorbent Organic Domains: Discovery of a Humic Acid Glass Transition and an Argument for a Polymer-Based Model[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 31(6): 1697~1702.
- Lotse E G, Graetz D A, Chesters G, *et al.* 1968. Lindane adsorption by lake sediment[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2: 353~357.
- 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.
- Schwarzenbach R P, Gschwend P M and Imboden D M. 1981. Transport of nonpolar compounds from surface water to groundwater. Laboratory sorption studies[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 11: 1360~1367.
- Weber W J Jr and Huang W. 1996. A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments. 4. Intraparticle Heterogeneity and Phase-Distribution Relationships under Nonequilibrium Conditions[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 30(3): 881~888.
- Weber W J Jr, McGinley P M and Katz L E. 1992. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 1. Conceptual basis and equilibrium assessment[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 26(10): 1955~1962.
- Xing B, Pignatello J J and Gigliotti B. 1996. Competitive Sorption between Atrazine and Other Organic Compounds in Soils and Model Sorbents[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 30(8): 2432~2440.
- Xing B and Pignatello J J. 1997. Dual mode sorption of low polarity compounds in glassy polyvinylchloride and soil organic matter[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 31: 792~799.
- Zhang Kunfeng, He Jiangtao, Liu Mingliang, *et al.* 2009. The effect of different contents of organic carbon on the adsorption of trichlorinated hydrocarbon in soil[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(6): 649~652 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 张坤峰,何江涛,刘明亮,等. 2009. 土壤中有机碳含量对三氯乙烯的吸附影响实验[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(6): 649~652.