

陈春羽, 王定勇. 2009. 水溶性有机质对土壤及底泥中汞吸附行为的影响 [J]. 环境科学学报, 29(2): 312– 317
Chen C Y, Wang D Y. 2009. Effect of dissolved organic matter on adsorption of mercury by soils and sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(2): 312– 317

水溶性有机质对土壤及底泥中汞吸附行为的影响

陈春羽¹, 王定勇^{1 2 *}

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716
2 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716

收稿日期: 2008-02-20 修回日期: 2008-07-21 录用日期: 2008-12-09

摘要: 以重庆市 2 种耕作土 (黄壤和中性紫色土) 及鱼塘底泥为试验材料, 分别添加提取自腐殖土的 DOM (DOM_h), 提取自稻草的 DOM (DOM_r) 和提取自污泥堆肥的 DOM (DOM_s), 研究 DOM 对土壤及底泥中 Hg 的吸附行为的影响. 结果表明, DOM 对土壤及底泥中汞的吸附行为均有一定的抑制作用, 这种抑制作用与 DOM 种类和试验材料的性质有关. 添加不同来源的 DOM, 对 Hg 的抑制作用具体表现为: DOM_h > DOM_r > DOM_s; 添加同一种 DOM 时, 对 Hg 吸附的抑制作用表现为鱼塘底泥 > 紫色土 > 黄壤.
关键词: 土壤; 底泥; 汞; 吸附; 水溶性有机质 (DOM)

文章编号: 0253-2468 (2009) 02-312-06 中图分类号: X53 文献标识码: A

Effect of dissolved organic matter on adsorption of mercury by soils and sediment

CHEN Chunyu¹, WANG Dingyong^{1 2 *}

1 College of Resources and Environment Southwest University Chongqing 400716
2 Chongqing Key Lab of Agricultural Resources and Environment Chongqing 400716

Received 20 February 2008; **received in revised form** 21 July 2008 **accepted** 9 December 2008

Abstract Three types of dissolved organic matter (DOM) were extracted from humus soils (DOM_h), rice straw (DOM_r) and compost of sewage sludge (DOM_s). The effect of these DOM_s on Hg adsorption was investigated using three soil types (yellow soil, neutral purple soil and pond sediment). The results showed the presence of DOM can reduce Hg adsorption in soils and sediment, and the degree of inhibition is dependent on the types of soils and the DOM_s. For the same soil, the inhibition was in the order of DOM_h > DOM_r > DOM_s, while for the same DOM, inhibition was in the order of pond sediment > neutral purple soil > yellow soil.
Keywords soil; pond sediment; mercury; adsorption; dissolved organic matter (DOM)

1 引言 (Introduction)

溶解性有机质 (Dissolved Organic Matter, DOM) 是指在土壤和水体中由一系列大小、结构不同的分子组成的, 且能通过 0.45 μm 滤膜的、能溶于水的有机物的总称 (Ka bitz *et al.* 2000). 它们分子量较小、水溶性很强, 是陆地生态系统和水生生态系统中一种很活跃的组分 (陈同斌等, 2002b). 近年的一些研究结果显示, DOM 对天然水体中重金属和有机污染物的有效性、毒性及其迁移特性等多种环境化学行为都有影响. 因此, DOM 已成为近年来环境化学中

一个较为活跃的前沿研究领域 (陈同斌等, 2002a; Dunnivant *et al.*, 1992).

汞是全球性的污染物, 具有极高的毒性, 易在环境中发生甲基化, 并能在生物体内积累、放大, 对生态系统会造成重大影响. 研究表明, 土壤汞库可通过扩散向大气释放大量汞, 同时, 大气中的汞又能通过干、湿沉降返回到土壤中 (Kin *et al.*, 1995; Gustin *et al.*, 2000). 进入土壤中的汞会通过微生物还原作用、有机质还原作用及光致还原作用等转化为单质汞, 而单质汞是土壤向大气释放汞的主要形态. 汞在土壤中的存在形态不仅与土壤 pH、土壤质

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40673063, 40573065)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (40673063, 40573065)
作者简介: 陈春羽 (1984—), 女, E-mail: yunaoch@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: dywang@swu.edu.cn
Biography: CHEN Chunyu (1984—), female, E-mail: yunaoch@163.com; * **Corresponding author:** E-mail: dywang@swu.edu.cn
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地等有关,还与土壤中有机的种类及含量有关 (Franz *et al* , 2000). 目前,国外学者已开始探讨水环境中 DOM 对汞的还原转化及释放的影响,主要针对富里酸和胡敏酸类 DOM 对汞的影响,而有关 DOM 对土壤环境中汞影响的研究还鲜见报道;国内学者主要研究 DOM 对 Cd Cu等重金属吸附行为的影响,这些研究大部分都停留在过程的描述上,对 DOM 的作用机理及动力学过程还未做出确切阐释. 本研究中通过研究外源 DOM 对土壤中汞的吸附及动力学特征的影响,来分析 DOM 影响汞转化的物理化学作用机理,旨在为土壤汞的释放机制,汞污

染土壤的秸秆还田,施用有机肥、有机废弃物土地的利用和污水灌溉的适宜性以及污染土地的修复等问题提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2 1 试验材料

以重庆市 2 种耕作土 (黄壤和中性紫色土) 及鱼塘底泥为供试材料,黄壤采自重庆北碚槽上,中性紫色土采自西南大学农场,鱼塘底泥取自西南大学鱼塘. 样品经风干、磨碎后,分别过 1mm 筛备用. 供试材料的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 试验材料的基本性质
Table 1 The properties of the tested soils

供试材料	汞含量 / (mg kg ⁻¹)	pH	有机质 / (mg kg ⁻¹)	CEC / (mol kg ⁻¹)	粒径分布		
					> 0.02mm	0.02~0.002mm	< 0.002mm
黄壤	0.071	5.31	12.43	12.02	3%	43%	23%
中性紫色土	0.032	7.05	16.53	13.72	48%	36%	16%
鱼塘底泥	0.057	8.16	47.34	13.67	16%	3%	42%

2 2 供试 DOM 的制备

①腐殖土 DOM (简称 DOM_h): 采集重庆北碚缙云山常绿阔叶林下腐殖土,参考张甲坤等 (2000) 的方法,将新鲜土样作水分校正后与超纯水以 1:2 (质量比) 的比例混合,连续振荡 5h,然后以 4000 r min⁻¹ 离心 10min,上清液过 0.45μm 滤膜,滤液中的有机物即为 DOM_h. ②稻草 DOM (简称 DOM_r): 稻草采自西南大学农场,参考 Barricuso 等 (1992) 的方法,稻草与去离子水按 1:10 (质量比) 的比例混合,在 (25±1)℃ 的恒温条件下发酵 1 周,上清液过 0.45μm 的滤膜,所得滤液即为 DOM_r 溶液. ③污泥堆肥 DOM (简称 DOM_s): 参考 Bahan (1983) 的方法,堆肥风干,过 2mm 筛,用去离子水混合 (肥:水 = 1:5 质量比),在 (25±1)℃ 的恒温条件下发酵 1 周,上清液过 0.45μm 滤膜,所得滤液为 DOM_s 溶液.

所制备的 DOM 溶液在 4℃ 冰箱中低温贮存备用,其浓度采用 ShinadzuTM 70C-5000 分析仪测定. 3 种供试 DOM 的基本性质如表 2 所示.

表 2 供试 DOM 的基本性质
Table 2 Chemical properties of the DOM solutions

DOM 种类	pH	有机碳 / (g L ⁻¹)	电导率 / (mS cm ⁻¹)	Hg / (μg mL ⁻¹)
DOM _h	5.63	1.50	3.13	0.001
DOM _r	5.82	1.48	2.80	0.003
DOM _s	6.62	1.51	3.26	0.005

2 3 等温吸附试验

称取供试土壤及底泥 1.000g 于 50mL 的离心管中,分别加入 10mL Hg²⁺ 的浓度为 2、8、14、24、34、48、62、80、98、116μg mL⁻¹ 的 0.01mol L⁻¹ NaNO₃ 溶液,再分别添加 10mL 不同的 DOM 溶液,恒温 (25±1)℃ 下振荡 4h,取出,以 4000 r min⁻¹ 离心 5min,取上清液用 F732-G 数字显示测汞仪测定 Hg²⁺ 浓度 C,根据 C 计算吸附量 X.

2 4 吸附动力学试验

称取供试土壤及底泥 1.000g 于 50mL 的离心管中,加入 10mL 浓度为 50μg mL⁻¹ 的 0.01mol L⁻¹ NaNO₃ 的 Hg²⁺ 溶液,再分别添加 10mL 不同的 DOM 溶液,恒温 (25±1)℃ 振荡,振荡时间 t 分别为 0.5、1、2、5、10、15、30、60、90、120、240、480、960、1920min,然后离心分离,取上清液测其 Hg²⁺ 浓度,通过上清液的浓度计算出不同时间的吸附量 S.

2 5 数据处理

试验数据采用 SPSS 11.5 统计软件进行处理并进行 F 检验;采用 Sigma Plot 6.0 软件拟合绘制等温吸附曲线和等温吸附动力学曲线.

3 结果 (Results)

3 1 DOM 对土壤及底泥吸附汞的影响

图 1 为黄壤、紫色土和底泥中不添加 DOM (CK) 和添加 DOM_s、DOM_r 和 DOM_h 时 Hg 的等温

吸附曲线.

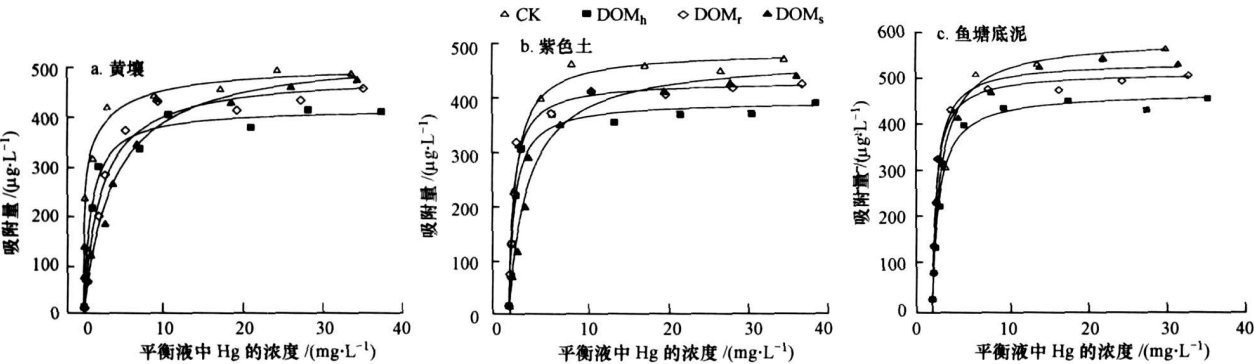


图 1 黄壤、紫色土和鱼塘底泥中 Hg 的等温吸附曲线
Fig 1 Isothermal adsorption curve of mercury in yellow soil, neutral purple soil and pond sediment

从图 1 可以看出,随着上清液中 Hg 浓度的增加,土壤及底泥对 Hg 的吸附量亦相应增加,这种趋势在 Hg 浓度大于 10 mg·mL⁻¹ 后逐渐趋于平缓,达到吸附饱和;在添加 DOM 的处理中,土壤及底泥对 Hg 的吸附量均较 CK 明显降低,说明加入的 DOM 均能抑制土壤及底泥对 Hg 的吸附,其中,DOM_h 的抑制效果最为明显,DOM_s 的抑制效果相对较弱.为了进一步定量分析 DOM 对土壤及底泥吸附 Hg 的影响,用 Langmuir 方程拟合吸附曲线(表 3),拟合均可通过置信度水平为 0.01 的 F 检验.

由表 3 可知,在黄壤、紫色土及鱼塘底泥中分别添加 DOM_h、DOM_r、DOM_s 时,Hg 的最大吸附量 X_m 在黄壤中分别降低了 17.7%、10.3%、6.4%,中性

紫色土中分别降低了 19.9%、10.6%和 7.2%,鱼塘底泥中分别降低了 20.2%、11.2%、7.4%.

另外,通过 Langmuir 方程中的 k 值可以计算吸附反应过程的 Gibbs 自由能变(张增强等,2000).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln k^\circ \tag{1}$$

式中, $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T 为绝对温度.

ΔG_1 和 ΔG_2 分别表示对照和添加 DOM 后 Hg 的吸附自由能变, ΔG 是衡量反应平衡时反应进行程度的有效量度.从表 3 中可以看出,在黄壤、紫色土及底泥中,DOM 的加入均使 $|\Delta G|$ 减小,这进一步说明 DOM 能抑制对 Hg 的吸附反应过程,且抑制作用的强弱表现为鱼塘底泥 > 紫色土 > 黄壤.

表 3 Hg 等温吸附线的 Langmuir 方程拟合结果
Table 3 Isotherms of Hg adsorption simulated with the Langmuir equation

样品	CK			DOM _s		
	X_m $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	k	ΔG_1° $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	X_m $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	k	$\Delta G_2^\circ - \Delta G_1^\circ$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
黄壤	476.19	1.55	-1.09	446.43	0.74	1.83
紫色土	512.82	3.16	-2.85	478.47	1.35	2.11
底泥	568.18	4.75	-3.86	526.32	1.58	2.72

样品	DOM _r			DOM _h		
	X_m $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	k	$\Delta G_2^\circ - \Delta G_1^\circ$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	X_m $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	k	$\Delta G_2^\circ - \Delta G_1^\circ$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
黄壤	427.35	1.44	0.19	392.16	1.25	0.55
紫色土	458.72	1.25	2.30	414.94	1.01	2.82
底泥	505.05	1.33	3.15	454.55	3.12	3.58

3.2 DOM 对土壤及底泥中汞吸附动力学的影响 学曲线.

图 2 为黄壤、紫色土和底泥中不添加 DOM (CK) 和添加 DOM_s、DOM_r 和 DOM_h 时 Hg 的等温吸附动力学曲线.从图 2 可以看出,在添加不同来源的 DOM 时,土壤及底泥中 Hg 的吸附动力学曲线有共同性,吸附开

始阶段 H_g 的吸附量增加得较快, 处于快速反应阶段; 随着反应时间的进行, 土壤及底泥对 H_g 的吸附逐渐趋于平缓, 反应处于慢速阶段. 另外, 还可以看出, 添加 DOM 使土壤及底泥中 H_g 的吸附量都小于对照处理, 说明 DOM 能抑制土壤及底泥对 H_g 的吸附反应速率, 其中 DOM_h 的抑制作用最强.

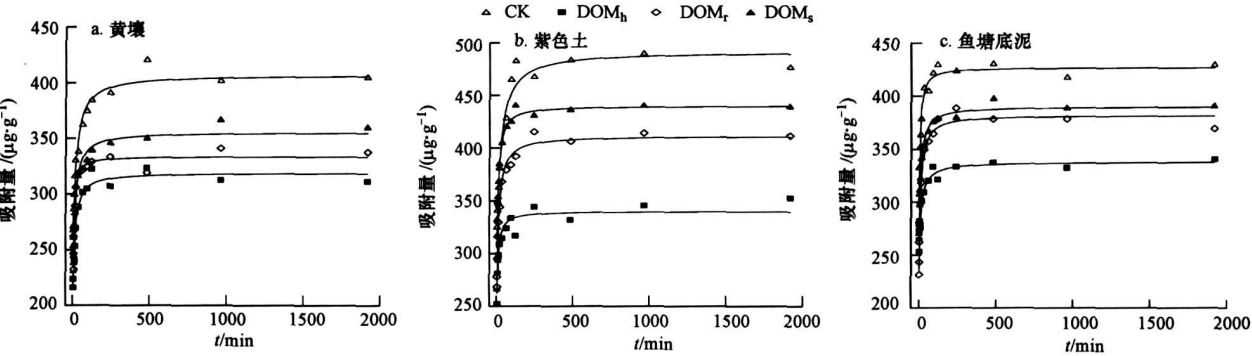


图 2 黄壤、紫色土和鱼塘底泥中 H_g 的等温吸附动力学曲线
Fig 2 Adsorption kinetics of mercury in yellow soil, neutral purple soil and pond sediment

为了定量描述 DOM 对土壤及底泥中 H_g 吸附速率的影响, 分别用双常数方程、Elovich 方程、一级动力学方程和抛物线方程对土壤及底泥中汞的吸附过程进行拟合 (表 4). 从表 4 可以看出, 双常数方程和 Elovich 方程拟合较好, 达显著水平 ($r_{0.01}(1, 12) = 0.661$, $r_{0.05}(1, 12) = 0.532$), 其次是抛物线方程, 也能达显著水平, 一级反应动力学方程拟合较

差. 各动力学方程中 a 值 (斜率) 可以反映吸附反应的速率 (余贵芬等, 2001), 从双常数方程、Elovich 方程拟合的结果可以看出, 添加 DOM_h 、 DOM_r 、 DOM_s 均使土壤及底泥对 H_g 的吸附反应速率降低, 说明 DOM 抑制土壤及底泥吸附 H_g 的速率, 不同 DOM 的抑制作用大小为 $DOM_h > DOM_r > DOM_s$.

表 4 土壤及底泥 H_g 吸附动力学拟合特征值
Table 4 Parameters of the mercury adsorption kinetics equations

样品 及处理		双常数方程			Elovich 方程			一级动力学方程			抛物线方程		
		$\ln S = a \ln t + b$			$S = a \ln t + b$			$\ln(S/S_{\max}) = at + b$			$S/S_{\max} = at^{1/2} + b$		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
黄壤	CK	0.0623	5.612	0.985**	20.777	271.55	0.985**	0.116	0.00003	0.615	1.111	0.002	0.803*
	DOM _s	0.0553	5.531	0.991**	16.562	251.17	0.991**	0.135	0.00002	0.651	1.136	0.0014	0.831**
	DOM _r	0.0551	5.543	0.958**	14.010	255.69	0.957**	0.169	0.00003	0.719	1.174	0.0018	0.884**
	DOM _h	0.0456	5.433	0.949**	13.196	228.49	0.951**	0.203	0.00002	0.563	1.215	0.0017	0.746*
紫色土	CK	0.0495	5.768	0.977**	17.997	320.47	0.976**	0.054	0.00003	0.636	1.044	0.0018	0.825**
	DOM _s	0.0489	5.668	0.922**	16.338	288.69	0.921**	0.079	0.00003	0.595	1.073	0.0015	0.784*
	DOM _r	0.0455	5.549	0.937**	15.244	256.89	0.936**	0.109	0.00003	0.630	1.106	0.0016	0.808*
	DOM _h	0.0378	5.584	0.952**	11.306	265.62	0.951**	0.174	0.00002	0.634	1.181	0.0014	0.826**
底泥	CK	0.0586	5.819	0.947**	23.029	333.86	0.947**	0.001	0.00005	0.491	1.008	0.0003	0.677*
	DOM _s	0.0578	5.784	0.953**	19.863	324.85	0.952**	0.018	0.00002	0.681	1.011	0.0013	0.862**
	DOM _r	0.0505	5.662	0.961**	18.993	287.45	0.961**	0.048	0.00002	0.606	1.043	0.0011	0.795*
	DOM _h	0.0379	5.605	0.968**	11.532	271.33	0.967**	0.146	0.00002	0.578	1.151	0.0010	0.777*

注: S 为吸附量 ($\mu g \cdot g^{-1}$); t 为吸附时间 (min); * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

4 讨论 (Discussion)

4.1 DOM 的酸碱缓冲作用

土壤 pH 是影响重金属汞有效性的最重要的因

子, 它不仅影响重金属汞在土壤溶液中的形态, 而且通过影响土壤颗粒表面交换性能而影响其有效性 (王亚平等, 2003). 在酸性条件下 ($pH = 3 \sim 5$), 随 pH 值的升高, 汞的氢氧化物形式比氯化物形式

更易被吸附,土壤对汞的吸附量增加,但当 pH 增大到一定程度继续增加时(超过 5),吸附量会降低(Kinbough *et al.*, 1976). 本试验结果表明,添加 DOM 能导致土壤及底泥溶液的 pH 发生变化(表 5).

表 5 添加 DOM 后土壤溶液的 pH

Table 5 Effect of DOM s on the soil solution pH

样品	对照 pH	添加 DOM 后土壤溶液 pH		
		DOM _h	DOM _r	DOM _s
黄壤	5.31	6.10	6.35	6.42
紫色土	7.05	6.94	7.09	7.20
底泥	8.16	7.41	7.48	7.69

在黄壤中 DOM 的加入导致土壤溶液 pH 具有不同程度的提高,使得溶液的 pH 达到偏中性,而在底泥中 DOM 的加入导致溶液 pH 具有不同程度的降低(表 5). 从整体上看,添加 DOM 导致土壤及底泥之间 pH 的差异减小. 分析结果表明,添加 DOM 时土壤及底泥中 Hg 吸附量的减少与添加 DOM 所导致溶液 pH 的变化 (ΔpH) 两者的 Pearson 相关系数 $r = -0.682 (p_{(n=9)} < 0.05)$, 说明 DOM 对土壤及底泥吸附 Hg 的抑制作用与添加 DOM 后土壤及底泥溶液 pH 的降低或升高有关. 类似的研究结果也显示, DOM 对土壤中 Cd 吸附的抑制或促进作用跟 DOM 对土壤溶液 pH 的改变有关(陈同斌等, 2002b); 由于 DOM 的酸碱缓冲作用,在强酸性土壤 ($\text{pH} < 4.5$) 中添加污泥 DOM 时,能促进土壤对 Cd 的吸附,而在中性和碱性土壤中 DOM 能抑制土壤对 Cd 的吸附(黄泽春等, 2002).

4.2 DOM 的络合作用

DOM 含有羧基、羟基、羰基和甲基化等活性功能团,与土壤中的氧化物和有机物之间会发生离子交换、吸附、络合等一系列反应,从而影响金属离子在土壤中的形态、迁移转化及生物有效性. 在研究土壤重金属有效态的提取方法时发现,络合剂可以提高土壤中重金属的可溶性,原因是溶解性有机质在土壤和水体中可以充当难溶解性污染物的助溶剂和迁移载体(Chirenje *et al.*, 1999).

溶解性有机质含有大量的功能团,可以与土壤中的重金属通过络合作用,形成有机物-金属配合体,进而提高重金属的溶解性(李延强等, 2004). 由此可知,加入的 3 种外源 DOM 与土壤及底泥中的 Hg 会形成一种 DOM-Hg 的复合体,促进了 Hg 的溶解,从而减少了土壤及底泥对 Hg 的吸附量. 也有类

似的研究表明,提高土柱或砂柱淋溶液的有机质含量能够增加 Zn、Cu 的溶解性(Boyle *et al.*, 1987; Amrhein *et al.*, 1992); 在沙壤土中施入牲畜粪便,溶解性 Zn、Cd 的浓度增加了 30% ~ 100% (Castiño *et al.*, 1993).

另外,不同来源的 DOM 对 Hg 的吸附影响也存在差异,腐殖土 DOM 对 Hg 吸附抑制作用最大,污泥堆肥 DOM 的抑制作用最弱. 这可能与 DOM 的来源和性质有关, DOM 的来源不同,分子大小不同,官能团种类和数量亦有所不同,最终都会影响它与重金属结合的能力. 尽管供试 DOM 的来源和性质不同,对土壤及底泥中 Hg 吸附的影响也存在差异,但其大致趋势基本是一致,这说明不同 DOM 对土壤及底泥中 Hg 吸附影响都存在相同的机理.

从本研究的结果出发,通过施用有机肥可能会带入大量的 DOM,从而提高重金属的活性和迁移能力,即抑制了土壤对重金属的吸附,因此,针对施有机肥固定土壤中重金属,来改良土壤重金属污染需要进一步的探讨.

5 结论 (Conclusions)

1) DOM 对土壤及底泥中 Hg 的吸附具有抑制作用,添加不同来源的 DOM,都会使 Hg 的最大吸附量和吸附率明显降低,其中腐殖土 DOM 的抑制作用最强,在黄壤、紫色土和底泥中汞的最大吸附量分别降低 17.7%、19.9% 和 20.2%.

2) 加入的 DOM 能改变土壤及底泥的酸碱性,使得土壤及底泥溶液中 pH 的差异减小,添加同一种 DOM 时,对 Hg 的抑制作用强弱为鱼塘底泥 > 紫色土 > 黄壤. 不同来源的 DOM 对土壤及底泥中 Hg 吸附的抑制作用不同,表现为 $\text{DOM}_h > \text{DOM}_r > \text{DOM}_s$.

责任作者简介: 王定勇 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境污染化学、污染生态学, Tel: 023-68250484, E-mail: dywang@swu.edu.cn

参考文献 (References):

Amrhein C, Strong J E, Mosher P A. 1992. Effect of deicing salts on metal and organic matter mobilization in roadside soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 26: 703—709

Bahan J, Sposito G. 1983. Chemistry of water-soluble metal-complexing ligands extracted from an anaerobically-digested Sewage Sludge [J]. *Journal of Environmental Quality*, 12(1): 96—100

Barricuso E, Bear U, Calvet R. 1992. Dissolved organic matter and

- adsorption-desorption of D in efuron, A trazine and Carbetan ide by soils[J]. Journal of Environmental Quality, 21: 737—751
- Boyle M, Fuller W H. 1987. Effect of municipal solid waste leachate composition on zinc migration through soil[J]. Journal of Environmental Quality, 16: 357—360
- Castilho P, de l Chardon P W, Sakmons W. 1993. Seasonal variations of cadmium, zinc and copper solubilities in a manured acidic loamysand soil[J]. Journal of Environmental Quality, 22: 689—697
- 陈同斌, 陈志军. 2002a 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 13(2): 183—186
- Chen T B, Chen Z J. 2002a. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 13(2): 183—186 (in Chinese)
- 陈同斌, 黄泽春, 陈煌. 2002b 废弃物中水溶性有机质对土壤吸附 Cd 的影响及其机制[J]. 环境科学学报, 22(2): 150—155
- Chen T B, Huang Z C, Chen H. 2002b. Effect of DOM_s extracted from five solid organic wastes on cadmium adsorption in soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 22(2): 150—155 (in Chinese)
- Chirenje T, Ma L Q. 1999. Effects of acidification on metal mobility in a paper mill-ash amended soil[J]. Journal of Environmental Quality, 28(3): 760—766
- Dunnivant F M, Jardine P M, Taylor D L, *et al*. 1992. Cotransport of cadmium and hexachlorobiphenyl by dissolved organic carbon through columns containing aquifer materials[J]. Environmental Science & Technology, 26: 360—368
- Gustin M S, Lindberg S E, Austin K. 2000. Assessing the contribution of natural sources to regional atmospheric mercury budgets[J]. The Science of Total Environment, 259(1~3): 61—71
- 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 2002 污泥中的 DOM 对中国土壤中 Cd 吸附的影响[J]. 环境科学学报, 22(3): 349—353
- Huang Z C, Chen T B, Lei M. 2002. Effect of DOM derived from sewage sludge on Cd adsorption in different soils in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 22(3): 349—353 (in Chinese)
- Kaiser K, Zech W. 1997. Natural organic matter sorption on different mineral surfaces studied by DRIFT spectroscopy[J]. Sciences of Soils(2): 71—74
- Kalbitz K, Solinger S. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A Review[J]. Soil Science, 65(4): 277—304
- Kin K H, Lindberg S E. 1995. Design and initial test of dynamic enclosure chamber for measurements of vapor phase mercury fluxes over soil[J]. Water, Air and Soil Pollution, 80: 1059—1068
- Kinniburgh-D-G, Jackson-M-L, Syers-J K. 1976. Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metals cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum[J]. Soil Sci, 40: 796—799
- 李延强, 杨尚娥. 2004 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 15(6): 1083—1087
- Li Y Q, Yang X E. 2004. Soil dissolved organic matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(6): 1083—1087 (in Chinese)
- 王亚平, 潘小菲, 岑况, 等. 2003. 汞和镉在土壤中的吸附和运移研究进展[J]. 岩矿测试, 22(4): 277—282
- Wang Y P, Pan X F, Cen K, *et al*. 2003. A Review of the study on adsorption and migration of cadmium and mercury in soils[J]. Rock and Mineral Analysis, 22(4): 277—282 (in Chinese)
- 余贵芬, 青长乐, 牟树森, 等. 2001. 汞在腐殖酸上的吸附与解吸特征[J]. 环境科学学报, 21(5): 601—606
- Yu G F, Qing C L, Mu S S, *et al*. 2001. Characteristics of mercury adsorption and desorption on humic acids[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 21(5): 601—606 (in Chinese)
- Zehetner F, Wenzel W W. 2000. Nickel and copper sorption in acid forest[J]. Soil Science, 6(165): 463—472
- 张甲坤, 陶澍, 曹军. 2000. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存和前处理方法[J]. 土壤通报, 31(4): 174—176
- Zhang J S, Tao S, Cao J, *et al*. 2000. Soil sample preservation and pretreatment for water soluble organic carbon determination[J]. Chinese Journal of Soil Science, 31(4): 174—176 (in Chinese)
- 张增强, 张一平, 朱兆华. 2000. 镉在土壤中吸持的动力学研究[J]. 环境科学学报, 20(3): 370—375
- Zhang Z Q, Zhang Y P, Zhu Z H. 2000. Study on the characteristics of kinetic of cadmium retention on soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 20(3): 370—375 (in Chinese)