

# 东乌珠穆沁旗草原砂土对汞的吸附特征及其影响因素

王道涵, 李泽龙, 汤家喜

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 以东乌珠穆沁旗的草原砂土为研究对象, 采用正交试验设计的方法, 研究了土壤/溶液(固/液)、初始汞浓度、溶液 pH、腐殖酸、硝酸钠浓度对东乌珠穆沁旗草原砂土吸附  $\text{HgCl}_2$  的影响。结果表明: 固/液越小, 初始汞浓度越大, 土壤吸附能力越强; 土壤对汞的吸附量随溶液 pH, 外源腐殖酸浓度, 硝酸钠浓度的增大而呈现先增大后减小的趋势, 当溶液 pH 为 7.5, 外源腐殖酸浓度为 0.6 mg/g, 硝酸钠浓度为 0.08 mg/L 时, 土壤对汞的吸附量分别达到最大。影响砂土吸附  $\text{HgCl}_2$  的因素大小依次为初始汞浓度 > 固/液 > pH > 硝酸钠浓度 > 腐殖酸浓度。草原地区砂土对汞的吸附动力学过程与 Lagergren 准二级动力学模型拟合有较好的相关性, 表明该吸附过程主要以化学吸附为主, 且吸附过程不可逆。

**关键词:** 氯化汞; 砂土; 吸附

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0301-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.047

## Adsorption Characteristics and Influencing Factors of Mercury in Sandy Soil of Dong Ujimqin Banner Prairie

WANG Daohan, LI Zelong, TANG Jiayi

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

**Abstract:** Taking the grassland sandy soil of East Wuzhumuqi as the research object, and simulating mercury deposition, orthogonal experiment was adopted. The effects of soil/solution ratio, initial mercury concentration, pH, humic acid and concentration of sodium nitrate on the adsorption of grassland sandy soil for  $\text{HgCl}_2$  were studied through the method of orthogonal experimental design. The mercury determination in soil were determined by water bath digestion atomic fluorescence spectrometry. The results showed that the smaller the soil/solution ratio was, the larger the initial mercury concentration and the stronger the soil adsorption capacity. The amount of mercury adsorbed by soil was affected by the amount of humic acid, the concentration of sodium nitrate and solvent pH, and the adsorption amount increased first and then decreased with the increasing of the above three factors. When the solvent pH was 7.5, the concentration of exogenous humic acid was 0.6 mg/g and the concentration of sodium nitrate was 0.08 mg/L, the soil adsorption capacity reached the maximum. The factors affected the adsorption of sand for  $\text{HgCl}_2$  followed the order of initial mercury concentration > soil/solution ratio > pH > sodium nitrate concentration > humic acid content. Fitting experimental data showed that the accumulation behavior of mercury in sandy soil accorded with the adsorption kinetics process and well correlated with Lagergren quasi-second-order kinetic model, which indicated that the adsorption process was mainly chemical adsorption and the adsorption process was irreversible.

**Keywords:** mercuric chloride; sandy soil; adsorption

近些年来土壤重金属汞污染受到了国内外的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。土壤是环境中汞的自然来源,也是流入河流、水库和湖泊沉积物汞的主要来源<sup>[4]</sup>。元素汞及其多种化合物具有挥发性,能够进入大气中,具有长距离迁移能力,大部分沉降于地表,进而使土壤汞进一步累积。因此,土壤是汞的源和汇。有研究<sup>[5]</sup>表明,矿

山开采区域及燃煤电厂周边土壤汞含量普遍较高。Kocman 等<sup>[6]</sup>和 García-sánchez 等<sup>[7]</sup>对汞矿区和混汞冶金区中汞的含量及赋存形态进行了研究,发现混汞采金区中土壤含汞量最高可达 500 mg/kg,汞矿区土壤中汞主要以  $\text{HgS}$  形态存在,比例高达 60%~80%,混汞冶金区近 95%的汞以  $\text{HgO}$  形式存在。邹婷婷等<sup>[8]</sup>研究松

收稿日期: 2018-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501548); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJYL021); 大学生创新训练项目(201710147000014, 201710147000215)

第一作者: 王道涵(1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事污染生态和土壤研究。E-mail: 284437305@qq.com

通信作者: 汤家喜(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业环境与生态研究。E-mail: tangjiayi1986@163.com

花江上游桦甸金矿开采区周边汞的分布规律,发现汞含量大小依次是土壤>植物>水,且距矿区越远,大气汞含量越低。Yuan 等<sup>[9]</sup>对中国北方某燃煤电厂储煤区附近的土壤进行了形态分析,发现元素汞含量最高,  $\text{HgSO}_4$  含量次之,有机结合态汞以及可溶态汞的含量较少,但具有高移动性。

国内外学者<sup>[10-12]</sup>对土壤汞的吸附、迁移和形态转化进行了较多的研究,多集中在汞矿区和混汞冶金区,以及特定土壤中汞的分布和迁移转化规律,对砂质土壤及汞在土壤中吸附特征的影响因素缺乏系统研究,尤其对内蒙古草原地区燃煤电厂周边砂土中的

表 1 土壤基本理化性质

pH	含水率/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机碳/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	黏粒/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	粉粒/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	砂粒 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	汞/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
5.75	41	23.9	142.5	260.2	597.3	$7.40 \times 10^{-3}$

## 1.2 试验设计与分析方法

于 2016 年 10 月在东乌珠穆沁旗草原进行采样。选取对土壤吸附能力影响较大的 3 个参数(有机碳量、黏土含量和土壤质地)<sup>[13]</sup>以及 pH 和含水率来描述土壤特征。土壤 pH 采用电极法测定(水土质量比 2.5:1),含水率(风干土壤)采用烘箱法测定,有机碳含量采用重铬酸钾氧化一分光光度法测定,粒度采用粒度仪分析(采用国际土壤质地分类标准),汞含量采用王水水浴消解—原子荧光光度法(AFS)测定<sup>[14]</sup>。汞进入土壤后的行为受土壤及环境条件等多种因素的影响,已有研究<sup>[15]</sup>表明,土壤对无机汞有吸附作用,影响其吸附的主要因素有土壤固液比、土壤有机质、pH、电解质等。其中固/液可直接影响系统的化学平衡,对土壤的吸附能力影响较大;土壤有机质是土壤的重要组成物质,极易与汞结合,对土壤吸附汞产生重要影响;pH 可影响土壤液相中各种离子的溶解度及其在固相上的吸附程度;硝酸钠可以作为电解质,其离子强度会影响土壤对重金属离子的吸附。本文着重研究固/液、初始汞浓度、pH、腐殖酸浓度,硝酸钠浓度对汞在内蒙古草原地区砂土中吸附结果的影响,其中各因素的浓度设置见表 2。

表 2  $\text{HgCl}_2$  吸附试验设计

试验 编号	固液比/ ( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	初始汞浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH	腐殖酸浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	硝酸钠浓度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	1:1	0.1	5.5	0	0
2	1:5	1.0	6.5	0.3	0.08
3	1:10	10.0	7.5	0.6	0.80
4	1:20	20.0	8.5	0.9	8.00
5	1:25	50.0	9.5	1.2	80.00

由于汞在土壤中的吸附受多种因素同时作用,若使用单因素分析,可能导致因将重要因素固定在不适当的水平上,而使试验得不到应有的效果,故采用正交试验

汞的吸附特征和影响因素的研究鲜见报道。本研究主要研究了固/液、初始汞浓度、pH、腐殖酸以及硝酸钠的含量对内蒙古草原地区砂土吸附  $\text{HgCl}_2$  的影响,为预防和控制燃煤电厂对内蒙古地区造成土壤汞污染提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自相对远离电厂的东乌珠穆沁旗(东经  $116^{\circ}13'$ ,北纬  $44^{\circ}02'$ ),经风干、除杂、研磨过 100 目筛备用,理化性质见表 1。

设计的方法。本试验采用  $L_{25}(5^6)$  正交表(表 3)。

表 3  $\text{HgCl}_2$  吸附试验正交设计  $L_{25}(5^6)$

试验 编号	固液比/ ( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	初始汞浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH	腐殖酸浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	硝酸钠浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	1:1	0.1	5.5	0	0
2	1:1	1.0	6.5	0.3	0.08
3	1:1	10.0	7.5	0.6	0.80
4	1:1	20.0	8.5	0.9	8.00
5	1:1	50.0	9.5	1.2	80.00
6	1:5	0.1	6.5	0.6	8.00
7	1:5	1.0	7.5	0.9	80.00
8	1:5	10.0	8.5	1.2	0
9	1:5	20.0	9.5	0	0.08
10	1:5	50.0	5.5	0.3	0.80
11	1:10	0.1	7.5	1.2	0.08
12	1:10	1.0	8.5	0	0.80
13	1:10	10.0	9.5	0.3	8.00
14	1:10	20.0	5.5	0.6	80.00
15	1:10	50.0	6.5	0.9	0.00
16	1:20	0.1	8.5	0.3	80.00
17	1:20	1.0	9.5	0.6	0
18	1:20	10.0	5.5	0.9	0.08
19	1:20	20.0	6.5	1.2	0.80
20	1:20	50.0	7.5	0	8.00
21	1:25	0.1	9.5	0.9	0.80
22	1:25	1.0	5.5	1.2	8.00
23	1:25	10.0	6.5	0	80.00
24	1:25	20.0	7.5	0.3	0
25	1:25	50.0	8.5	0.6	0.08

吸附试验:根据固/液(质量/体积),准确称取适量土壤于 50 mL 离心管中,加入 19 mL 混合溶液(分别调节至表 2 所设定的 pH、腐殖酸浓度、硝酸钠浓度的 0.01 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液),摇匀放置 12 h 以使体系达到平衡,加入 1 mL 特定汞浓度的  $\text{HgCl}_2$  溶液,摇匀,25 °C 恒温振荡,分别于 0.5,1,2,4,8,12,15,24,36,48 h 取出,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液过 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜,测定汞浓度。

### 1.3 数据处理

采用 Lagergren 二级动力学方程进行拟合,分析比

较不同条件下土壤对  $\text{HgCl}_2$  吸附能力的变化。试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行处理。

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

式中:  $t$  为吸附时间(h);  $q$  为  $t$  时刻单位吸附剂的吸附量( $\mu\text{g/g}$ );  $q_e$  为吸附达到平衡时的吸附量( $\mu\text{g/g}$ );  $K_2$  为准二级吸附速率常数( $\text{g}/(\mu\text{g} \cdot \text{h})$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 固/液对氯化汞吸附的影响

由图 1 可知,汞离子在液一固两相中的迁移是一个快反应过程,1 h 内吸附量迅速增长,2 h 基本全部达到或接近峰值。随着时间的延长,汞离子迁移活动渐趋稳定。随着固/液的减小,单位质量土壤对  $\text{HgCl}_2$  的吸附量明显增加。这可能是由于溶解性有机物(DOM)含有羧基、羟基和甲氧基等多种活性功能团,可作为有机配位体与重金属元素相结合发生络合作用而形成无机复合体,从而影响重金属离子在土壤溶液中的吸附特性。

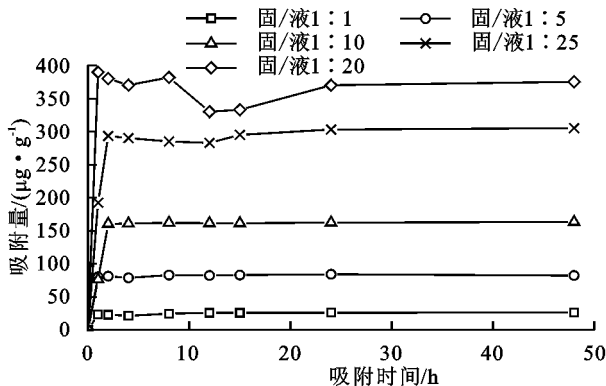


图 1 不同固/液下砂土对  $\text{HgCl}_2$  的等温吸附曲线

### 2.2 初始汞浓度对氯化汞吸附的影响

由图 2 可知,初始汞浓度为 0.1, 1.0 mg/L 时,1 h 基本达到平衡水平,经轻微波动后,基本趋于平稳;初始汞浓度为 10.0, 20.0, 50.0 mg/L 时,反应 2 h 后初步达到平衡吸附量值,经一段时间的小幅波动后稳定到一定值。其中,50.0 mg/L 的波动幅度大于 10.0, 20.0 mg/L。汞的初始浓度越大,单位质量土壤对汞的吸附量越高。初始浓度为 50.0 mg/L 时,其吸附量最大可达 555.555 6  $\mu\text{g/g}$ ;初始浓度为 0.1 mg/L 时,其吸附量最小,仅为 1.658 9  $\mu\text{g/g}$ 。

### 2.3 pH 对氯化汞吸附的影响

由图 3 可知,不同 pH 下,汞离子快速从溶液中迁移到土壤中,2 h 已基本全部达到或接近峰值。表明土壤固相表面的吸附位逐渐被饱和,吸附反应趋于平衡,吸附量由大到小依次为 7.5 > 8.5 > 6.5 > 5.5 > 9.5。

### 2.4 腐殖酸浓度对氯化汞吸附的影响

由图 4 可知,汞离子在短时间内从溶液中迁移到

土壤中,2 h 已全部达到或接近峰值,而 24 h 后汞离子迁移活动趋于平稳,此时土壤固相表面的吸附位逐渐被饱和。腐殖酸浓度为 0 时,吸附量仅低于添加外源腐殖酸浓度为 0.6 mg/g 时的吸附量,但其反应速率最慢。添加外源腐殖酸浓度为 0.6 mg/g,吸附量最大,吸附速率最快。

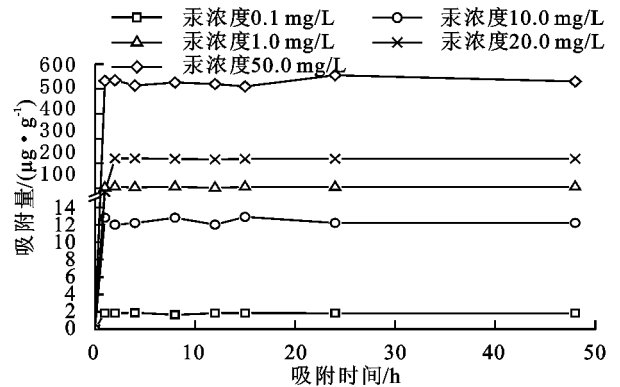


图 2 不同初始汞浓度砂土对  $\text{HgCl}_2$  的等温吸附曲线

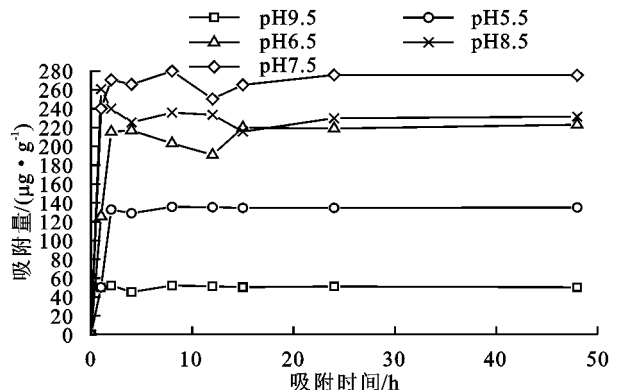


图 3 不同 pH 下砂土对  $\text{HgCl}_2$  的等温吸附曲线

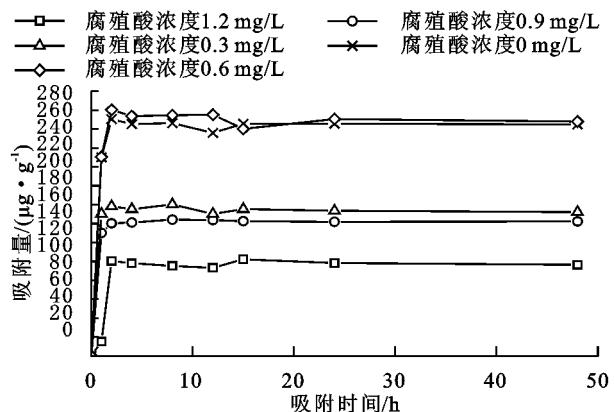


图 4 不同腐殖酸浓度砂土对  $\text{HgCl}_2$  的吸附曲线

### 2.5 硝酸钠浓度对氯化汞吸附的影响

由图 5 可知,不同硝酸钠浓度下土壤对汞的吸附反应进行到 2 h,90% 以上的汞离子已从溶液中迁移到了土壤中。随着时间的延长,吸附量起伏变化,24 h 全部达到平衡,土壤固相表面的吸附位逐渐被饱和。当硝酸钠浓度为 0.08 mg/L 时,吸附量最大。

### 2.6 吸附动力学分析

由表 4 可知,砂土对  $\text{HgCl}_2$  的吸附过程较好地

符合 Lagergren 准二级动力学方程,其相关系数均在 0.99 以上。Lagergren 准二级动力学模型假设吸附速率由吸附剂表面未被占有的吸附空位数的平方值决定,吸附过程受化学吸附机理的控制,这种化学吸附涉及到吸附剂与吸附质之间的电子共用或电子转移。同时,解吸率普遍偏低,吸附几乎不可逆。吸附速率常数  $k_2$  可以反映吸附过程快慢。 $k_2$  值越大,反应速率越慢。因此,当固液比为 1:20,初始汞浓度为 20.0 mg/L,pH 为 6.5,腐殖酸浓度为 0.60 mg/g,硝酸钠浓度为 80.00 mg/L 时,其吸附反应速率最快。

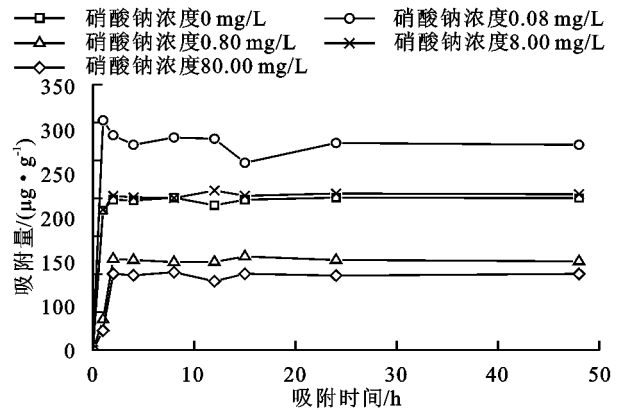


图 5 不同硝酸钠浓度砂土对  $\text{HgCl}_2$  的吸附曲线

表 4  $\text{HgCl}_2$  在土壤中的吸附动力学拟合特征值

拟合模型	准二级动力学模型: $t/q = 1/(k_2 \cdot q_e^2) + t/q_e$					
	固/液	1:1	1:5	1:10	1:20	1:25
$R^2$		0.9970	0.9997	0.9994	0.9995	0.9991
$k_2$		0.1781	0.0904	0.0195	0.0109	0.0131
$q_e$		15.7978	80.6452	156.2500	303.0303	357.1429
初始汞浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		0.1	1.0	10.0	20.0	50.0
$R^2$		0.9961	0.9993	0.9979	0.9965	0.9993
$k_2$		7.9512	0.6667	0.0228	0.0055	0.0324
$q_e$		1.6589	12.5000	119.0476	238.0952	555.5556
pH		5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
$R^2$		0.9982	0.9988	0.9981	0.9981	0.9997
$k_2$		0.0869	0.0096	0.0259	0.0462	0.1426
$q_e$		128.2051	217.3913	277.7778	232.5581	54.0541
腐殖酸浓度( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		0	0.3	0.6	0.9	1.2
$R^2$		0.9908	0.9964	0.9985	0.9993	0.9984
$k_2$		0.0588	0.0413	0.0241	0.0518	0.0278
$q_e$		238.0952	163.9344	263.1579	138.8889	100.0000
硝酸钠浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		0	0.08	0.80	8.00	80.00
$R^2$		0.9991	0.9984	0.9965	0.9982	0.9972
$k_2$		0.0278	0.0324	0.0345	0.0461	0.0196
$q_e$		200.0000	277.7778	123.4568	208.3333	100.0000

注:  $t$  为吸附时间(h);  $q$  为  $t$  时刻单位吸附剂的吸附量( $\mu\text{g}/\text{g}$ );  $q_e$  为吸附达到平衡时的吸附量( $\mu\text{g}/\text{g}$ );  $k_2$  为准二级吸附速率常数( $\text{g}/(\mu\text{g} \cdot \text{h})$ );  $R^2$  为相关系数。

## 2.7 影响土壤吸附氯化汞的主要因素分析

综合分析影响氯化汞累积的主要因素,当影响因素取不同水平时,如果点的散布范围比较大,即值的上升或下降幅度较大,此因素即是影响指标的主要因

素,相反即为次要因素。极差用以反映分散程度的大小,极差大者,为主要因素;极差小者,为次要因素。由表 5 可知,极差由大到小排序为:初始汞浓度>固/液>pH>硝酸钠浓度>腐殖酸浓度。

表 5 各因素平衡吸附量极差

单位:  $\mu\text{g}/\text{g}$

参数	固/液	初始汞浓度	pH	腐殖酸浓度	硝酸钠浓度
平衡吸附量极大值	357.1429	555.5556	277.7778	263.1579	277.7778
平衡吸附量极小值	15.7978	1.6589	54.0541	100.0000	100.0000
平衡吸附量极差	341.3451	553.8928	223.7237	163.1579	177.7778

## 3 讨论

汞的初始浓度越高,土壤对其的吸附量越大<sup>[16]</sup>。浓度过低时,溶剂和土壤中汞离子浓度差距小,传质动力相对较小,导致吸附速率较慢;汞离子首先与溶剂中的有吸附能力的物质结合,到达固-液吸附界面时,会发生竞争吸附,从而会导致土壤吸附量发生变化。

荆延德等<sup>[17]</sup>研究表明,黏土矿物对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附量在 pH 为 8~9 时,随 pH 上升而上升;含水铁氧化

物吸附  $\text{Hg}^{2+}$  量在 pH 6.2~8.5 范围内也随 pH 增大。本文对内蒙古草原面砂土中  $\text{HgCl}_2$  吸附研究发现 pH 5.5~7.5 范围内,汞吸附量随 pH 增大而增加;pH 7.5~9.5 范围内,汞吸附量随 pH 增大而降低。可能的原因有 2 种:(1)碱性强,溶液中形成的强碱性物质较多,不利于解离出与土壤表面  $\text{H}^+$  结合的  $\text{OH}^-$ ,无法使土壤表面负电荷增多,增大阳离子交换量,增强吸附能力;(2)碱性溶液解离出大量的  $\text{OH}^-$ ,

与  $\text{Hg}^{2+}$  结合形成  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  沉淀,随后立即分解成溶解度更低的  $\text{HgO}$ ,降低了溶液中吸附质的浓度,导致吸附量下降。酸性环境中,土壤表面正电荷多,不利于结合汞阳离子,因而吸附能力较弱。

有机质吸附汞有 2 种机制:腐殖质结合氧化物、黏土矿物等无机颗粒,形成有机胶体、有机-无机复合胶体,以此增加土壤表面积,增强土壤表面活性,使土壤吸附能力随有机质含量增加而增强<sup>[18]</sup>;土壤腐殖质含有多种易和汞络合或螯合的含氧功能团。冯新斌等<sup>[19]</sup>研究发现,在特定的土壤条件与时间的限制下,有机质增加 1%,土壤对汞的固定率提高 30%。本研究结果显示,添加外源腐殖酸浓度处于 0.3~1.2 mg/g 时,最大汞吸附量出现在 0.6 mg/g 处,低于或高于 0.6 mg/g 均会导致吸附量降低。本研究供试土壤  $\text{pH} > 5$ ,无机汞离子吸附是土壤中有有机质、黏土矿物、铁氧化物共同作用的结果。外源腐殖酸的添加浓度取 0.6 mg/g 时,腐殖酸与砂土中铁氧化物、黏土矿物结合形成的吸附点位和腐殖酸自身具有的吸附点位总和最大,吸附能力达到最强,因而吸附量最多。

硝酸钠可以作为电解质,其离子强度会影响土壤对重金属离子的吸附<sup>[20]</sup>。李永富等<sup>[18]</sup>研究表明,若电解质溶液的离子强度逐渐增加,则重金属吸附量将会逐渐减小。本研究的结论与其有一定差异,且未体现出硝酸钠浓度与吸附量的线性关系。可能是由于  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{Hg}^{2+}$  络合,形成多种不同的形态,对汞离子在砂土中的吸附产生了影响所致。

## 4 结论

(1)固/液越小,汞的初始浓度越大,土壤对其的吸附能力越强;土壤对汞的吸附量随溶液  $\text{pH}$ 、外源腐殖酸浓度和硝酸钠浓度的增大而呈现先增大后减小的趋势,当溶液  $\text{pH}$  为 7.5,外源腐殖酸浓度为 0.6 mg/g,硝酸钠浓度为 0.08 mg/L 时,土壤对汞的吸附量达到最大。

(2)砂土对  $\text{HgCl}_2$  的吸附过程较好地符合 Lagergren 准二级动力学方程,相关系数均在 0.99 以上,这表明该吸附过程主要以化学吸附为主,且吸附过程不可逆。

(3)综合分析得出影响草原砂土对  $\text{HgCl}_2$  吸附能力的主要因素,其大小依次是初始汞浓度  $>$  固/液  $>$   $\text{pH}$   $>$  硝酸钠浓度  $>$  腐殖酸浓度。

### 参考文献:

[1] Yang Z H, Zhang S J, Li Y P, et al. Remediation of heavy metal contamination in calcareous soil by washing with reagents: A column washing [J]. *Energy Environmental Sciences*, 2012, 16: 778-785.

[2] Soares L, Egreja F, Linhares A, et al. Accumulation and oxidation of elemental mercury in tropical soils [J].

*Chemosphere*, 2015, 134(1): 181-191.

[3] Elsayed E, Mohamed M, Ahmed M, et al. Sorption, release and forms of mercury in contaminated soils stabilized with water treatment residual nanoparticles [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 752-761.

[4] 陈毛华,刘明广,郭斌,等.阜阳市城郊菜地重金属污染调查与评价[J].*地球与环境*,2017,45(3):322-328.

[5] 陈绍杨,王里奥,王惠俊,等.汞矿区周边土壤和溪流底泥对汞的吸附解吸特征[J].*环境工程学报*,2017,11(3):1913-1919.

[6] Kocman D, Horvat M, Kotnik J. Mercury fractionation in contaminated soils from the Idrija mercury mine redi-on [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, 6(8): 696-703.

[7] Garcua-sanchez A, Contreras F, Adams M, et al. Atmospheric mercury emissions from polluted gold mining areas (Venezuela) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28(6): 529-540.

[8] 邹婷婷,王宁,张刚,等.松花江上游金矿开采区环境中汞污染的空间分布特征[J].*环境科学*,2010,31(9):2228-2233.

[9] Yuan C G, Li Q P, Feng Y N, et al. Fractions and leaching characteristics of mercury in coal [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 167(1): 581-586.

[10] 张成,陈宏,王定勇,等.三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J].*环境科学*,2014,35(3):1060-1067.

[11] 王梅,黄标,孙维侠,等.强烈人为作用下城镇周围汞的空间变异及其积累迁移规律[J].*土壤学报*,2011,48(3):506-515.

[12] Chen L, Xu Z, Ding X, et al. Spatial trend and pollution assessment of total mercury and methylmercury pollution in the Pearl River Delta soil, South China [J]. *Chemosphere*, 2012, 88(5): 612-619.

[13] 陈宁,陈艳,田超,等.无机汞和甲基汞在土壤中的吸附-解吸特性研究[J].*农业环境科学学报*,2013,32(6):1159-1165.

[14] 朱霞萍,汪模辉,倪师军.固相微萃取-原子荧光测定鱼样品中痕量甲基汞[J].*分析实验室*,2006,25(9):49-52.

[15] 张杰.重金属汞在典型土壤腐植酸上的吸附解吸特性的研究[D].济南:山东大学,2008:29-35.

[16] 李颜雪.汞在土壤中的吸附-解吸及其非生物甲基化[D].合肥:安徽农业大学,2012.

[17] 荆延德,赵石萍.土壤中汞的吸附-解吸行为研究进展[J].*土壤通报*,2010,41(5):1270-1274.

[18] 李永富,孟范平,杜秀萍,等.负载钨的 EGDE 交联壳聚糖微球对氟离子的吸附平衡与吸附动力学[J].*中国海洋大学学报*,2012,42(6):034-039.

[19] 冯新斌,尹润生,俞奔,等.贵州不同汞污染区表层土壤汞同位素组成变化[J].*科学通报*,2012,57(33):3119-3124.

[20] 王金贵.我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.