

# 黄土性土壤对 Cr(III) 的吸附特性及转化率研究

易 秀

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 采用室内试验方法研究了黄土性土壤不同土层对 Cr(III) 的吸附特性及 Cr(III) 转化为 Cr(VI) 的趋势。结果表明, 黄土性土壤对 Cr(III) 的吸附平衡时间为 30 min, 其对 Cr(III) 的吸附能力很强, 在研究浓度范围  $1.0 \sim 500.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  内, 不同土层的吸附率都在 89.7% 以上; 黄土性土壤不同土层对 Cr(III) 的吸附能力略有不同, 其中粘化层的吸附量最高, 其次为钙积层; 从黄土性土壤各土层等温吸附规律看, 经统计拟合结果符合 Freundlich 模型; 黄土对 Cr(III) 净化的主要作用为沉淀作用, 吸附作用次之。黄土性土壤中 Cr(III) 被吸附或发生沉淀的 pH 范围为 5.68-8.73; 随着黄土性土壤中 Cr(III) 浓度的增加, pH 的下降, 土壤平衡液中 Cr(VI) 的浓度有增加的趋势, 但其转化率很低, 一般小于 1.9%。

**关键词:** 黄土性土壤; Cr(III); 吸附; 转化率

中图分类号: S151.93 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2004)04-0700-05

## Adsorption Characters and Transformation Rate of Cr(III) in Loessial Soil

YI Xiu

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In this paper adsorption characters of Cr(III) and its trend that Cr(III) translated into Cr(VI) and influence factors were studied by isotherm adsorption and transform rate experiments in different layers of loessial soil that were including cultivated horizon, plow pan, argillic horizon and calcic horizon. The results showed that adsorption equilibrium time of Cr(III) in loessial soil was 30 min. Loessial soil possessed strong ability to adsorb Cr(III), at the scope of study concentration that was  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $500.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , adsorption rate was above 89.7%, and adsorption amount increased with concentration of applying Cr(III). There were differences existing in adsorption ability of different layer soils to Cr(III), in which the amount of adsorption in argillic horizon soil to Cr(III) occupied first place, and calcic horizon second. These were relevant to the contents of clay and calcium carbonate. Freundlich equation was suitable to describe Cr(III) adsorption. Adsorption equilibrium constant K could be calculated by parameter k and  $1/n$  of Freundlich equation, which could clear clarify adsorption behavior of loessial to Cr(III). The principal purifying action of loessial soil to Cr(III) was sedimentation, which was that Cr(III) changed into  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , and adsorption secondly. The range of pH that adsorption or sedimentation of Cr(III) were occurred in loessial soil was 5.68-8.73, in which scope the amounts that Cr(III) was adsorbed or precipitated were increased with concentration of applying Cr(III). The concentration of Cr(VI) in soil equilibrium solution increased with increase of Cr(III) concentration and decrease of pH in soil, but transformation rate was very small, generally smaller than 1.9%. All illustrated that sewage containing Cr(III) irrigation might contaminate surface layer soil, but couldn't convert Cr(VI) to pollute groundwater further. Above-mentioned results provided basis for knowing well pollution scope and degree that were caused by Cr(III) in loessial soil environment and establishing prevention measures from pollution.

**Keywords:** loessial soil; chromium(III); adsorption; transformation rate

过去人们曾认为 Cr(III) 在土壤中是一种稳定

的、不变的形态, 从而将铬对环境的污染集中于对 Cr(VI) 的化学行为研究<sup>[1-4]</sup>。但近几年来这种看法已有改变。James 等人<sup>[5,6]</sup>试验证实, 在通常的条件下, 土壤中的 Cr(III) 能被氧化成 Cr(VI)。土壤对 Cr(III) 的氧化作用没有被发现, 是由于人们没有认识到这种作用的重要性。由于 Cr(III) 会转化为 Cr(VI), 因此必须考虑 Cr(III) 引起的潜在公害问题<sup>[7-9]</sup>。本文就黄土性土

收稿日期: 2003-12-04

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2002BA901A43); 国家自然科学基金项目(40372114)

作者简介: 易 秀(1965—), 女, 青海西宁市人, 副教授, 博士, 主要从事水资源及土壤污染防治等方面的科研及教学工作。

E-mail: xa-yixiu@163.com

壤对 Cr(III) 的吸附特性及其影响因素、黄土性土壤中 Cr(III) 转化为 Cr(VI) 的趋势进行了研究,以了解 Cr(III) 对黄土性土壤环境可能造成的影响范围及程度,从而为制定防治铬污染的措施提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验用土取自西安市雁塔区。土壤为黄土母质发

育的农业土壤——塿土,采样点土壤剖面特征见表 1。其基本理化性状见表 2。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 土壤基本理化性质的测定

取土样风干,研磨,过不同粒径筛孔备用。土壤中 pH 值、有机质、粘粒含量、游离氧化铁等项目的测定均按常规方法<sup>[10,11]</sup>;全铬用  $H_2SO_4 - HNO_3 - H_3PO_4$  消煮-二苯碳酰二肼比色法测定<sup>[12]</sup>。

表 1 供试土壤剖面特征

Table 1 The features of loessial soil profile

土层代号	土层名称	土层深度/cm	土壤剖面特征
I	耕层	0~25	灰棕色,粒状结构,疏松,中壤,有瓦片等侵入体,强石灰反应
II	犁底层+老耕层	25~60	淡灰棕色,块状结构,中壤,稍紧实,少量石灰菌丝,强石灰反应
III	粘化层	60~120	暗褐色,棱柱状结构,重壤,紧实,较多石灰菌丝,中石灰反应
IV	钙积层	120~175	淡黄棕色,块状结构,中壤,稍紧实,少量豆状石灰结核,极强石灰反应

表 2 供试土壤的基本理化性状

Table 2 Some physicochemical properties of loessial soil used in the experiment

项目	机械组成		容重 /g·cm <sup>-3</sup>	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷 /g·kg <sup>-1</sup>	pH	CaCO <sub>3</sub> /g·kg <sup>-1</sup>	游离氧化铁 /g·kg <sup>-1</sup>	总 Cr /mg·kg <sup>-1</sup>
	<0.01mm/%	<0.001mm/%								
耕层	49.3	18.7	1.28	12.6	0.91	0.75	8.26	96.3	11.2	54.2
犁底层+老耕层	53.6	24.1	1.40	6.9	0.53	0.64	8.28	85.6	15.3	51.4
粘化层	60.1	29.5	1.41	9.1	0.66	0.53	8.30	32.7	19.7	48.5
钙积层	51.0	16.3	1.34	5.7	0.41	0.49	8.32	204.9	9.7	51.2

#### 1.2.2 等温吸附试验

分别称取耕层、犁底层+老耕层、粘化层、钙积层的过 20 目筛的土样各 20.0 g,置于 250 mL 三角瓶中,加 100 mL 不同浓度、不同 pH 的 Cr(III) (分析纯 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 配制) 标准溶液,制成一系列不同浓度 Cr(III) 的悬浊液,用康氏振荡器在室温 (24℃) 下振荡 2 h,过滤,弃去最初滤液 20mL,用二苯碳酰二肼比色法测定剩余滤液 Cr(III) 浓度。根据振荡前后溶液中 Cr(III) 浓度差计算吸附量。

#### 1.2.3 Cr(III) 与 Cr(VI) 之间转化率试验

用分析纯 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 配制浓度分别为 1.00、5.00、10.00、20.00、50.00、100.00、200.00、500.00 mg·L<sup>-1</sup> 的 Cr(III) 标准溶液,分别测定上述不同浓度标准液的 pH 值及 Cr(VI) 浓度。称取 20.0 g 耕层土样若干份,置于 250 mL 三角瓶中,加 100 mL 上述不同浓度的 Cr(III) 标准溶液,然后用康氏振荡器在室温 (24℃) 下振荡 2 h,过滤,测定滤液 Cr(VI) 浓度。Cr(III) 标准溶液及滤液中 Cr(VI) 浓度均用二苯碳酰二肼比色法测定<sup>[13]</sup>。根据试验前后 Cr(VI) 的浓度差值与原始 Cr(III) 浓度的比值即可求出转化率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄土性土壤中 Cr(III) 吸附平衡与时间的关系

从不同振荡时间下 Cr(III) 吸附平衡的测定结果可看出,Cr(III) 离子进入土壤后,未经振荡,水相中的 Cr(III) 立刻被吸附 47.14%;随着振荡时间的延长,吸附率迅速增大,30 min 内吸附率增长了 111.4%。30 min 后,随振荡时间的延长,吸附率增加缓慢。从 30 min 到 3 h 之间吸附率只增长了 0.16%,见表 3。从图 1 中也可以发现这种趋势。可以认为在本试验条件下,黄土性土壤对 Cr(III) 的吸附平衡时间为 30 min。因此本实验中均采用 2 h 作为 Cr(III) 吸附平衡时间。

### 2.2 黄土性土壤对 Cr(III) 的等温吸附

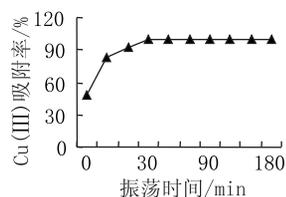


图 1 Cr(III) 吸附率随时间变化曲线

Figure 1 The curve of the rate of chromium(III) adsorbed with time

表3 黄土性土壤 Cr(Ⅲ)吸附平衡与时间关系

Table 3 the relation between adsorption equilibrium of chromium(Ⅲ) with time in loessial soil

配制 Cr(Ⅲ)浓度 /mg · L <sup>-1</sup>	耕层土样重 /g	加标样量 /mL	振荡时间 /min	平衡液 Cr(Ⅲ)浓度 /mg · L <sup>-1</sup>	吸附率 /%
100.00	20.00	100.00	0	52.86	47.14
			10	17.48	82.52
			20	6.93	93.07
			30	0.331	99.67
			45	0.224	99.78
			60	0.242	99.76
			90	0.183	99.82
			120	0.134	99.87
			150	0.211	99.79
			180	0.169	99.83

用振荡平衡法测得黄土性土壤不同土层对 Cr(Ⅲ)的等温吸附试验,结果如表4所示,黄土性土壤对 Cr(Ⅲ)的吸附能力很强,在研究浓度范围内,不同土层的吸附率都在 89.7% 以上;随着污染物浓度的增大,吸附量也迅速增大,吸附量变化曲线几乎为一条上升直线。黄土性土壤不同土层对 Cr(Ⅲ)的吸附

能力也略有不同,其中粘化层的吸附量最高,其次为钙积层,这与各土层的理化性质尤其是粘粒含量有关,同时受土壤中 CaCO<sub>3</sub> 含量影响较大,如钙积层中粘粒含量虽最低,但由于 CaCO<sub>3</sub> 含量很高,因而吸附量在 4 个土层中居于第二位。

用于描述土壤中离子吸附的数学模型很多,通常

表4 黄土性土壤不同土层对 Cr(Ⅲ)的等温吸附试验结果

Table 4 Isotherms adsorption results of different layers in loessial soil

体系 pH	8.73	8.46	8.21	8.07	7.64	7.35	6.78	6.27	
加入 Cr(Ⅲ)浓度/mg · L <sup>-1</sup>	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	100.00	200.00	500.00	
耕层	平衡液浓度/mg · L <sup>-1</sup>	0.082	0.131	0.179	0.182	0.351	0.402	0.801	0.986
	吸附量/μg · g <sup>-1</sup>	4.59	24.3	49.1	99.1	248.2	498.0	996.0	2495.1
	吸附率/%	91.8	97.2	98.2	99.1	99.3	99.6	99.6	99.8
犁底层 + 老耕层	平衡液浓度/mg · L <sup>-1</sup>	0.103	0.185	0.281	0.284	0.452	0.498	0.539	0.617
	吸附量/μg · g <sup>-1</sup>	4.49	24.1	48.6	98.6	247.7	497.5	997.3	2496.9
	吸附率/%	89.7	96.3	97.2	98.6	99.1	99.5	99.7	99.9
粘化层	平衡液浓度/mg · L <sup>-1</sup>	0.060	0.095	0.127	0.143	0.154	0.395	0.439	0.573
	吸附量/μg · g <sup>-1</sup>	4.70	24.5	49.4	99.3	249.2	498.0	997.8	2497.1
	吸附率/%	94.0	98.1	98.7	99.3	99.7	99.6	99.8	99.9
钙积层	平衡液浓度/mg · L <sup>-1</sup>	0.073	0.112	0.111	0.162	0.200	0.496	0.527	0.612
	吸附量/μg · g <sup>-1</sup>	4.63	24.4	49.4	99.2	249.0	497.5	997.4	2496.9
	吸附率/%	92.7	97.8	98.9	99.2	99.6	99.5	99.7	99.9

有 Freundlich 模型、Langmuir 模型、双表面 Langmuir 模型<sup>[111]</sup>、Henry 模型、BET 模型、Tth 模型和 Temkin 模型等<sup>[144]</sup>。但从黄土性土壤各土层等温吸附规律看, Freundlich 模型统计拟合结果较理想,相关系数均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ),见表5。模型中  $Y$  为土壤对 Cr(Ⅲ)的吸附量,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  土;  $C$  为吸附平衡时溶液中 Cr(Ⅲ)浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k$  为系数,  $1/n$  是指数。Van Bladel 等<sup>[151]</sup>定义  $k$  是吸附容量,  $C$  是平衡浓度,  $1/n$  是吸附强度。  $1/n$  越大表示土壤的约束力越弱,也即吸附力越弱。根据 Freundlich 模型的参数  $k$  值和  $1/n$  可计算出吸附平衡常数  $K$  ( $K = k^n$ ) 值<sup>[161]</sup>,其可以较好

地阐明黄土性土壤对 Cr(Ⅲ)的吸附状况。

### 2.3 pH 对黄土性土壤中 Cr(Ⅲ)的吸附沉淀作用的影响

取 土耕层的土样,按不同液土比加入配制好的 Cr(Ⅲ)纯溶液(初始浓度  $C_0 = 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,调 pH = 3.91),在室温下静置平衡 48 h,过滤,用二苯碳酰二肼分光光度法(差减法)测定滤液中 Cr(Ⅲ)浓度。即用不同的水土比例来模拟含 Cr(Ⅲ)废水对水-土体系的污染过程。

从表6的结果可看出,平衡溶液中的 pH 值随液土比的增加而降低,最后接近初始溶液的 pH 值(3.91);当液土比小于 400:1 时,平衡液中 Cr(Ⅲ)的

表 5 黄土性土壤不同土层 Cr(III) 等温吸附线拟合方程

Table 5 Isotherms adsorption simulation model of Cr(III) in loessial soil

土层	Freundlich 模型: $\lg Y = \lg k + \frac{1}{n} \cdot \lg C$		
	$k$	$1/n$	$r$
I(耕层)	2 715	2.477	0.980 3**
II(犁底层+老耕层)	5 821	3.309	0.976 3**
III(粘化层)	8 934	2.325	0.966 9**
IV(钙积层)	6 051	2.419	0.956 9**

浓度较小,说明 Cr(III) 由液相转入固相的量较大。然后,随着液土比的增加,平衡液中 Cr(III) 的浓度逐渐增加,最后接近初始溶液中的 Cr(III) 浓度为  $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,也即 Cr(III) 由液相转入固相的速率减慢。

表 6 不同液土比及 pH 下耕层土壤对 Cr(III) 的吸附量

Table 6 Influences of liquid and soil ratio and pH on cultivated horizon soil adsorption to Cr(III)

液:土 /(mL:g)	pH	平衡液 Cr(III) 浓度 /mg·L <sup>-1</sup>	吸附量 /μg·g <sup>-1</sup>	吸附率 /%
50:1	7.16	0.478	476.1	95.2
100:1	6.67	0.512	948.8	94.5
200:1	6.25	0.634	1 873.2	93.7
400:1	5.68	1.072	3 571.2	89.3
600:1	5.43	2.104	4 737.6	79.0
800:1	5.31	6.731	2 615.2	32.7
1 000:1	4.70	8.105	1 892.0	18.9

通过观察耕层土壤平衡溶液中 Cr(III) 浓度变化曲线,可将 Cr(III) 与黄土性土壤的反应过程分为三个阶段:第一阶段体系 pH 在 5.68~7.16,为沉淀作用为主的过程,Cr(III) 以  $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  形式从液相大量转移到土壤表面,曲线比较平缓且平衡液中 Cr(III) 浓度较低;第二阶段 pH 在 5.31~5.68,为沉淀-阳离子交换吸附共同作用的过程,曲线有一个大的转折,即沉淀作用减弱,而吸附作用逐渐加强,因而液相中 Cr(III) 浓度增大;第三阶段 pH <5.31,为阳离子交换作用为主的过程,并随着溶液中  $\text{H}^+$  的增加,阳离子交换吸附作用逐渐减弱,Cr(III) 绝大多数留在土壤液相中,见图 2。上述结果表明,Cr(III) 在土壤-地下水系统中发生的净化作用主要是沉淀作用和阳离子交换吸附作用,而它们的作用大小主要取决于体系的 pH 值。

由于黄土偏碱性,且含有大量的碳酸盐,而  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  的溶度积极小 ( $K_{sp} = 6.7 \times 10^{-31}$ ),当 Cr(III) 进入土壤后,能使大量的 Cr(III) 以  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  的形式从液相转移到土壤中。同时,土壤中的许多活性组分对水

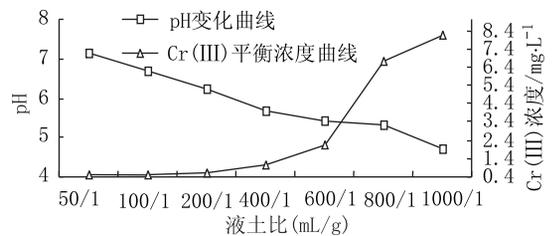


图 2 耕层土壤平衡液中 Cr(III) 浓度及 pH 与液土比的关系图  
Figure 2 The curve of relation between Cr(III) concentration and pH and ratio of liquid and soil

中的 Cr(III) 产生阳离子交换吸附作用,从而形成较大的净化作用,使得难以污染地下水。可以断定黄土对 Cr(III) 净化的主要作用为沉淀作用,吸附作用次之。

由表 4 可以看出,在等温吸附试验的 pH 范围 6.27~8.73,黄土不同土层对 Cr(III) 的吸附率都在 89.7% 以上,即黄土性土壤对 Cr(III) 的吸附率在该 pH 范围内完全随 Cr(III) 浓度的增大而增大。

另据表 6 的结果表明, pH <5.68 时,黄土对 Cr(III) 的吸附率急剧下降,由 89.3% 下降到 18.9%,此时黄土对 Cr(III) 的吸附并未完全受其浓度影响。

综合表 4 和表 6 的结果,可以认定黄土性土壤中 Cr(III) 被吸附或发生沉淀的 pH 范围为 5.68~8.73,在此 pH 范围内,Cr(III) 被吸附或发生沉淀的量随浓度增大而呈上升趋势。因此,Cr(III) 污染物进入黄土中不易迁移,多积累在表层。

## 2.4 Cr(III) 转化为 Cr(VI) 的趋势

从理论上讲,土壤中 Cr(III) 可被二氧化锰等氧化性物质氧化,也可被土壤溶液中的溶解氧缓慢氧化成 Cr(VI),但在常见的土壤 pH 和 Eh 条件下,这种转变是不易的。为此进行了 Cr(III) 氧化为 Cr(VI) 的转化率试验。

从试验结果表 7 来看,Cr(III) 在 pH 偏碱性的黄土性土壤中有转化为 Cr(VI) 的可能,且随着 Cr(III) 浓度的增加,pH 的下降,土壤平衡液中 Cr(VI) 的浓度有增加的趋势,但其转化率很低,一般小于 1.9%。当 Cr(III) 浓度为  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,转化为 Cr(VI) 的浓度仅为  $0.214 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,转化率为 0.043%,仍低于农田灌溉水质二级标准  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。说明黄土接纳含 Cr(III) 的污水,对表层土壤有可能造成污染,但不会转化成 Cr(VI) 对地下水产生进一步的污染。

## 3 结论

(1) 黄土性土壤对 Cr(III) 的吸附平衡时间为 30 min,其对 Cr(III) 的吸附能力很强,在研究浓度范围

表7 黄土性土壤中 Cr(Ⅲ)转化率测定结果表

Table 7 The results of Cr(Ⅲ) transformation rate in loessial soil

耕层土样 /g	配制体积 /mL	Cr(Ⅲ)配制浓度 /mg · L <sup>-1</sup>	体系 pH	Cr(Ⅲ)标准液中 Cr(VI)浓度 /mg · L <sup>-1</sup>	平衡液中 Cr(VI)浓度 /mg · L <sup>-1</sup>	转化率 /%
20	100	1.00	8.73	0.0	0.019	1.9
		5.00	8.46	0.0	0.033	0.66
		10.00	8.21	0.0	0.056	0.56
		20.00	8.07	0.0	0.089	0.45
		50.00	7.64	0.0	0.112	0.22
		100.00	7.35	0.0	0.135	0.14
		200.00	6.78	0.0	0.167	0.084
		500.00	6.27	0.0	0.214	0.043

1.0 ~ 500.0 mg · L<sup>-1</sup> 内, 不同土层的吸附率都在 89.7% 以上; 黄土性土壤不同土层对 Cr(Ⅲ) 的吸附能力略有不同, 其中粘化层的吸附量最高, 其次为钙积层, 这与各土层的粘粒含量有关, 同时受土壤中 CaCO<sub>3</sub> 含量的影响也较大。

(2) 从黄土性土壤各土层等温吸附规律看, 经统计拟合结果符合 Freundlich 模型。根据该模型的参数  $k$  值和  $1/n$  可计算出吸附平衡常数  $K$  值, 其可以较好地阐明黄土性土壤对 Cr(Ⅲ) 的吸附状况。

(3) 黄土对 Cr(Ⅲ) 净化的主要作用为沉淀作用, 吸附作用次之。黄土性土壤中 Cr(Ⅲ) 被吸附或发生沉淀的 pH 范围为 5.68 ~ 8.73, 在此 pH 范围内, Cr(Ⅲ) 被吸附或发生沉淀的量随浓度增大而呈上升趋势。

(4) 随着黄土性土壤中 Cr(Ⅲ) 浓度的增加, pH 的下降, 土壤平衡液中 Cr(VI) 的浓度有增加的趋势, 但其转化率很低, 一般小于 1.9%。说明黄土接纳含 Cr(Ⅲ) 的污水, 对表层土壤有可能造成污染, 但不会转化成 Cr(VI) 对地下水产生进一步的污染。

#### 参考文献:

- [1] 陈英旭, 骆永明, 朱永官, 等. 土壤中铬的化学行为研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 77 - 85.
- [2] 章永良, 何增耀, 吴方正. 红壤吸附 Cr(VI) 的初步研究[J]. 农业环境保护, 1991, 10(1): 15 - 17.
- [3] 刘云惠, 等. 土壤中铬的吸附与形态提取研究[J]. 河北农业大学

学报, 2000, 23 (1): 16 - 20.

- [4] 朱月珍. 土壤中六价铬的吸附与还原[J]. 环境化学, 1982, 1: 359 - 364.
- [5] James B R, Bartlett R J. Behavior of chromium in soils: VI. Interaction between oxidation and organic complex[J]. *J Environ Qual*, 1983, 12: 173 - 176.
- [6] James B R, Bartlett R J. Behavior of chromium in soils: VII. Adsorption and reduction of hexavalent forms [J]. *J Environ Qual*, 1983, 12: 177 - 181.
- [7] 黄佩丽, 田荷珍. 基础元素化学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1994.
- [8] 曾令庆, 刘玉凤, 刘月华. 黄河冲积土壤对三价铬、六价铬的吸附特性[J]. 人民黄河, 1996, (6): 13 - 15.
- [9] 吴敦敦, 鲁文毓. 铬在土壤 - 地下水系统中的污染研究[J]. 环境科学学报, 1991, 11 (3): 276 - 283.
- [10] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [11] 熊毅, 等. 土壤胶体(第二册). 土壤胶体研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [12] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [13] 农业部农业环境监测中心站. 农业环境监测技术规范分析方法[技术规范]. 天津, 1987.
- [14] D. L. 帕斯克斯. 土壤物理化学[M]. 杨凌: 天则出版社, 1990.
- [15] Van R B, Moreale A. Adsorption of herbicidederived p - chloroaniline residues in soil: A predictive equation [J]. *J Soil Sci*, 1977, 28: 93 - 99.
- [16] 张增强, 张一平. 几个吸附等温模型热力学参数的计算方法[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26 (2): 94 - 98.