

重金属铜在黑土和棕壤中解吸行为的比较

于颖, 周启星

(中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; E-Mail: yyuhelen@hotmail.com)

摘要: 采用一次平衡法研究吸附态 Cu^{2+} 在黑土和棕壤上的解吸行为并进行了比较。结果表明, 与棕壤相比, 黑土吸附态 Cu^{2+} 解吸有更长的滞后阶段, 黑土在 Cu^{2+} 的吸附量低于 $729.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} 处理浓度小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 棕壤在 Cu^{2+} 的吸附量低于 $393.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} 处理浓度小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 土壤吸附态 Cu^{2+} 几乎不发生解吸。2 种土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸率均较低, 尤其是黑土。在试验所采用的 Cu^{2+} 处理浓度范围内, 黑土与棕壤吸附态 Cu^{2+} 的最高解吸率分别为 6.60% 和 13.56%。Freundlich 方程为描述 2 种土壤 Cu^{2+} 等温解吸过程的最佳方程。黑土和棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率均较快, 在 40 min 左右基本达到平衡。描述黑土和棕壤解吸动力学过程的最优模型为双常数速率方程, 其次为 Elovich 方程。

关键词: Cu^{2+} ; 解吸; 热力学; 动力学; 黑土; 棕壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)01-0128-05

Comparison on Desorptive Behavior of Copper in Phaeozem and Burozem

YU Ying, ZHOU Qi-xing

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Desorptive behavior of Cu^{2+} from phaeozem and burozem was studied and compared using the batch method. The results indicated that Cu^{2+} desorbed from phaeozem tested had a longer lag period than that from burozem. When adsorbed Cu^{2+} for phaeozem was lower than $729.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} concentration was lower than $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and on burozem was lower than $393.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} concentration was lower than $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), adsorbed Cu^{2+} was hardly desorbed. Meanwhile, the desorption ratio of Cu^{2+} from the two soils were both low, especially for phaeozem. In the range of Cu^{2+} concentration used in the experiments, the desorption rate maximums of Cu^{2+} for phaeozem and burozem were respectively 6.60% and 13.56%. Freundlich equation could best describe desorption isotherm processes of Cu^{2+} from the two soils. Adsorbed Cu^{2+} on soils was desorbed so fast from phaeozem and burozem that the desorption equilibrium could be reached only after 40 min desorption. The best model to describe Cu^{2+} desorption kinetics was two-constant equations, followed by the Elovich equation.

Key words: Cu^{2+} ; desorption; thermodynamic process; kinetic process; phaeozem; burozem

关于土壤 Cu 的吸附-解吸研究已经很多^[1~4], 据报道, 土壤 Cu 的解吸经常被看作是土壤吸附态 Cu 的释放过程, 然而土壤 Cu 的解吸过程并不是土壤 Cu 吸附的简单可逆过程^[5]。土壤 Cu 的解吸滞后于吸附, 并且热力学性质有很大差异^[3]。一些研究指出, 对于已被污染的土壤, 了解 Cu 的解吸过程是很重要的, 因为通过研究 Cu 的解吸行为, 可以预测土壤环境中 Cu 的迁移转化和归宿, 为 Cu 污染土壤的修复治理提供有价值的参考或指导^[6,7]。因此, 本文在对黑土中 Cu 解吸行为进行研究的基础上, 进一步与我国东北另一典型地带性土壤——棕壤 Cu 的解吸行为进行比较, 为该地区 Cu 污染的防治提供基础资料和科学依据^[8]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黑土和棕壤分别采于黑龙江省海伦农业生

态试验站和沈阳十里河农业生态试验站未被污染地块, 采样深度均为 0~20cm, 其基本理化性质见表 1。

1.2 测定方法

(1) 土壤基本理化性质测定 土壤 pH 用电位法(水/土=2.5:1), 有机质用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法, 阳离子交换量用 NH_4OAc 交换法, 土壤全 Cu 用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮, 火焰原子吸收分光光度计法, 土壤有效 Cu 用 1 mol/L HCl 浸提(土/液=1:10), 火焰原子吸收分光光度计法, 土壤机械组成用比重计法测定^[9]。

(2) 土壤解吸测定 准确称取过 40 目筛的风干土 1.0000g(W) 于 100 mL 塑料离心管, 加 20 mL 含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Ca}^{2+}$ (支持电解质) 的 CuCl_2 溶液

收稿日期: 2003-03-14; 修订日期: 2003-05-26

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(20225722); 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011808); 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-SW-416)

作者简介: 于颖(1975~), 女, 博士生, 主要从事污染物化学环境过程及复合污染研究。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

土壤类型	采样地点	pH	有机质/ %	阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	全铜/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效铜/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	组成/ %	
							0.05 ~ 0.001 mm	< 0.001 mm
黑土	黑龙江海伦	6.48	3.98	32.92	12.67	3.14	67.09	29.02
棕壤	辽宁沈阳	6.09	2.31	19.23	13.37	7.79	75.59	17.10

(Cu^{2+} 处理浓度 c_0 为 10、20、40、80、120、240、400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 于恒温 (25 $^{\circ}\text{C}$) 下振荡 2h, 在恒温培养箱 (25 ± 1 $^{\circ}\text{C}$) 中静置 22h 后取出, 5000r/min 离心, 火焰原子吸收分光光度计法测定吸附平衡液中 Cu^{2+} 浓度 (c_1), 并由称重法求得残液重 (M). 由 (1) 式计算 Cu^{2+} 吸附量 X_a ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$):

$$X_a = 20(c_0 - c_1) / W \quad (1)$$

然后, 将吸附平衡液从离心管中倒尽, 再加入 10 mL 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液, 振荡 2h 后迅速取出, 5000r/min 离心, 测定解吸平衡液中 Cu^{2+} 浓度 (c_2). 同时, 选取 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 240 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cu^{2+} 溶液, 采取如上步骤进行 Cu^{2+} 的吸附后, 观察 Cu^{2+} 解吸随时间的变化. 在解吸阶段中, 分别振荡 1、2、5、10、15、20、40、80、120、240 min 后离心, 测定上清液中 Cu^{2+} 浓度 (c_2). 由 (2) 式计算得出各浓度不同时间的 Cu^{2+} 在不同土壤上的解吸量 Y_d ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$):

$$Y_d = (10c_2 - M \times c_1) / W \quad (2)$$

以上各试验处理均重复 3 次.

2 结果与分析

2.1 解吸热力学过程

重金属 Cu^{2+} 在土壤中的解吸行为不可避免地要联系到其吸附行为. 为定量了解黑土和棕壤 Cu^{2+} 解吸量与解吸前 Cu^{2+} 的吸附量的关系, 笔者对 2 种土壤 Cu^{2+} 解吸量随解吸前 Cu^{2+} 吸附量的变化进行最适模拟, 发现二次幂函数为最适模拟方程, 其模拟值与实测值均达到 99.9% 水平相关. 模拟方程如下.

黑土:

$$Y_d = 1E - 05 X_a^2 + 0.0018 X_a - 5.0723$$

$$(n = 8, R^2 = 0.9858, p = 0.001) \quad (3)$$

棕壤:

$$Y_d = 3E - 05 X_a^2 + 0.0257 X_a - 16.218$$

$$(n = 8, R^2 = 0.9737, p = 0.001) \quad (4)$$

方程 (3) 和 (4) 中, Y_d ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为 Cu^{2+} 解吸量, X_a ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 解吸前 Cu^{2+} 的吸附量. 实测土壤

Cu^{2+} 的解吸量与解吸前 Cu^{2+} 吸附量关系及其模拟曲线见图 1. 从图 1 可见, 吸附态 Cu^{2+} 在黑土和棕壤上的解吸有明显滞后现象, 尤其是黑土. 当黑土 Cu^{2+} 的吸附量低于 729.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} 处理浓度小于 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 棕壤 Cu^{2+} 的吸附量低于 393.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu^{2+} 处理浓度小于 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 土壤吸附态 Cu^{2+} 几乎不发生解吸. 此时, 黑土与棕壤的 Cu^{2+} 解吸量分别低于 1.81 和 0.98 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 吸附态 Cu^{2+} 的解吸率并不随着吸附态 Cu^{2+} 含量增加而明显增加 (表 2). 在解吸滞后阶段之后, 由方程 (3) 和 (4) 求导可知, 在实验所采用的 Cu^{2+} 处理浓度范围内, 黑土与棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸率均随着吸附态 Cu^{2+} 的增加而直线增加, 在相同 Cu^{2+} 吸附量条件下, 黑土 Cu^{2+} 的解吸率低于棕壤. 同时, 由表 2 可见, 黑土与棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸率是很低的. 在试验所采用的 Cu^{2+} 处理浓度范围内, 黑土与棕壤吸附态 Cu^{2+} 的最高解吸率为分别为 6.60% 和 13.56%.

表 2 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 作解吸剂时供试土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸率/ %

Table 2 The desorption ratio of Cu^{2+} on the tested soils in 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 as a desorption solution/ %

土壤类型	Cu^{2+} 处理浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$						
	10	20	40	80	120	240	400
黑土	0.26	0.27	0.25	0.78	1.37	5.37	6.60
棕壤	0.34	0.25	0.46	3.49	4.71	13.11	13.56

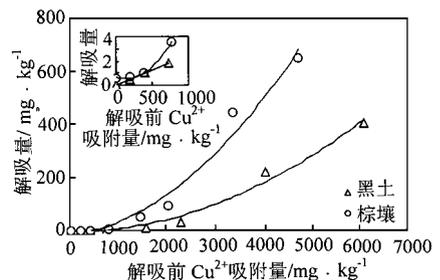


图 1 土壤 Cu^{2+} 的解吸量与解吸前 Cu^{2+} 吸附量之间的关系及其模拟曲线

Fig. 1 Relationships between desorbed Cu^{2+} and adsorbed Cu^{2+} before desorption and their modeling curves

以上分析说明,黑土和棕壤对 Cu^{2+} 有较强的吸附力,2 种土壤与 Cu^{2+} 形成络合物的倾向较强^[10],因此吸附于土壤上的 Cu^{2+} 难以解吸下来,此外,黑土的有机质和粘粒等吸附质较棕壤高(表 1),所以吸附态 Cu^{2+} 在黑土上更难脱附.同时,从以上分析进行推理可知,低剂量的 Cu^{2+} 一旦进入黑土或棕壤,被土壤吸附后便很难被土壤水解吸而再进入到土壤溶液中,因此不会发生大范围的迁移.

用 Temkin 方程、Langmuir 方程和 Freundlich 方程^[11]对 2 种土壤 Cu^{2+} 的等温解吸过程进行模拟发现,除 Temkin 方程拟合 r 值只达 99% 显著水平外,黑土和棕壤对 Cu^{2+} 的解吸与 Langmuir 方程、

Freundlich 方程拟合的 r 值均达 99.9% 显著水平(表 3).但实际上,Langmuir 方程是不适宜于描述 Cu^{2+} 在这 2 种土壤中解吸过程的,这是因为,当 Cu^{2+} 最大处理浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,黑土的实测 X_m 值为 $400.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,棕壤的实测 X_m 值为 $641.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而由 Langmuir 方程所推算的黑土的 X_m 值竟出现了负值,棕壤的推算 X_m 值为 $64.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,也与实际相差较大.因此,排除出现假显著相关的 Langmuir 方程后, Freundlich 方程为描述 Cu^{2+} 在黑土和棕壤中等温解吸过程的最佳方程.

2.2 解吸动力学过程

表 3 供试土壤 Cu^{2+} 解吸等温线拟合的特征值¹⁾

Table 3 The characteristics of Cu^{2+} isothermal desorption equations

土壤类型	Langmuir 方程			Freundlich 方程			Temkin 方程		
	$1/Y=1/X_m+K/X_m \cdot 1/c$			$\log Y=\log K+1/a \cdot \log c$			$Y=a+K \cdot \log c$		
	r	X_m	K	r	a	K	r	K	a
黑土	0.9996***	-666.667	-77.668	0.9999***	1.013	8.515	0.8508**	50.100	78.272
棕壤	0.9978***	64.935	7.286	0.9998***	1.031	7.874	0.8242**	72.721	96.649

1) Y 为解吸量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, c 为平衡液浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, X_m 为最大解吸量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a 、 K 为常数,*** $p < 0.001$,** $p < 0.01$.

由图 2.3 可以看出,黑土与棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸随振荡时间的延长而不断增加.在试验开始 40 min 后,土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸量已经超过了最大解吸量的 90%,吸附态 Cu^{2+} 的解吸基本达到平衡状态.因此,土壤胶体吸附态 Cu^{2+} 的解吸过程可以分为 2 个阶段,0 ~ 40 min 为快速反应阶段,40 min 以后为慢速反应阶段.根据杨亚提等^[3]的报道,解吸动力学曲线的快速阶段对应于静电吸附态 Cu^{2+}

的解吸,慢速阶段主要对应于专性吸附态 Cu^{2+} 解吸.在 40 min 时, Cu^{2+} 处理浓度为 80 和 $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 所对应的黑土吸附态 Cu^{2+} 的解吸百分数分别为 0.79% 和 5.13%,棕壤则分别为 3.42% 和 12.80%,这说明黑土的静电吸附态 Cu^{2+} 较棕壤少,而专性吸附态 Cu^{2+} 所占比例较大,这也是 Cu^{2+} 在黑土上较难解吸的原因之一.

对黑土和棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸动态采用

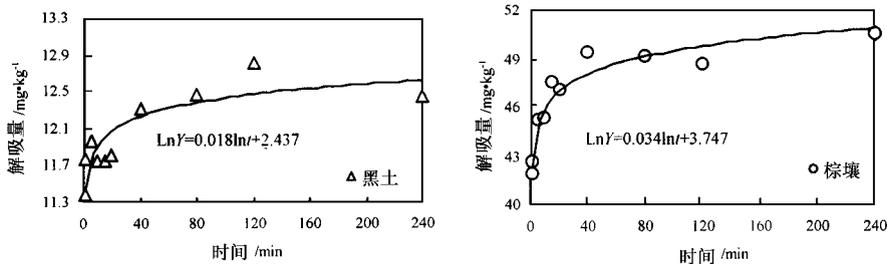


图 2 Cu^{2+} 在黑土和棕壤中随时间的解吸量 (25°C , Cu^{2+} 处理浓度 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组)

Fig.2 Desorption kinetics of Cu^{2+} in phaeozem and burozem with time at the Cu^{2+} concentration of $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (25°C)

Elovich 方程、扩散方程、双常数方程和一级动力学方程^[12]进行拟合发现,吸附态 Cu^{2+} 在黑土和棕壤中的解吸动力学过程基本一致,模型拟合度从优到差排序均为:双常数方程 > Elovich 方程 > 扩散方程

> 一级动力学方程(表 4). Aharoni 和 Sparks^[6]指出,如果试验数据与 Elovich 方程具有较好的拟合性,即具有相对较高的拟合相关指数(r)值,说明解吸过程是非均相扩散过程.在本试验中, Cu^{2+} 解吸

过程与 Elovich 方程的拟合 r 值与双常数方程非常逼近,模型拟合度也较好,说明 Cu^{2+} 在这 2 种土壤

上的解吸过程近似非均相扩散过程,其具体机理和主要影响因子还有待于进一步分析和研究.

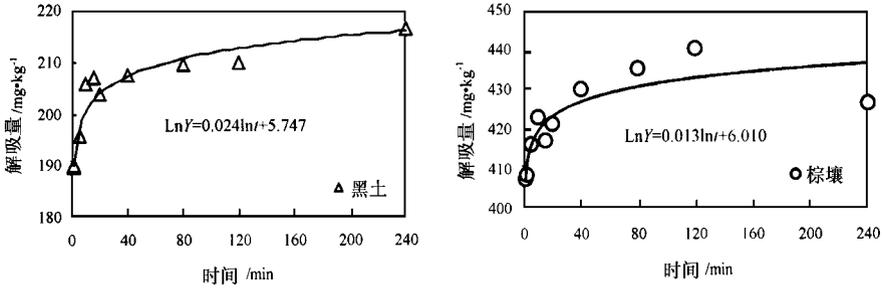


图 3 Cu^{2+} 在黑土和棕壤中随时间的解吸量 (25 °C, Cu^{2+} 处理浓度 $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组)

Fig. 3 Desorption kinetics of Cu^{2+} in phaeozem and burozem with time at the Cu^{2+} concentration of $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (25 °C)

表 4 土壤解吸的 4 种动力学方程相关系数 r 和标准误差 S_e (25 °C)

Table 4 Correlation coefficients r and standard errors S_e of kinetic equations for Cu^{2+} desorption from soils (25 °C)

土壤类型	Cu^{2+} 处理 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Elovich 方程 $Y = A + B \ln t$		扩散方程 $Y/Y_{\max} = A + B \sqrt{t}$		双常数方程 $\ln Y = A + B \ln t$		一级动力学方程 $\ln(Y_{\max} - Y) = A + B \ln t$	
		r	S_e	r	S_e	r	S_e	r	S_e
黑土	80	0.8790***	0.2221	0.8442**	0.0194	0.8814***	0.0182	-0.7226*	0.6758
	240	0.9518***	2.8858	0.8472**	0.0228	0.9499***	0.0430	-0.9065***	0.3174
	平均	0.9154***	1.5540	0.8457**	0.0211	0.9157***	0.0306	-0.8146**	0.4966
棕壤	80	0.9618***	0.8336	0.8415**	0.0310	0.9600***	0.0801	-0.9546***	0.1521
	240	0.8846***	5.3287	0.7524*	0.0170	0.8873***	0.0125	-0.7064*	0.7406
	平均	0.9232***	3.0812	0.7970**	0.0240	0.9237***	0.0463	-0.8305**	0.4464

1) Y 为任一时刻的解吸量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), t 为时间 (min), A, B 为模型参数, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, 模型拟合度常用相关系数 r 和标准误差 S_e 来衡量, r 越大, S_e 越小, 该模型越优.

对 2 种土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸过程的最佳模拟方程双常数方程微分求导, 便可求出土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸速率随时间的变化方程 (方程 5):

$$\ln \frac{dY}{dt} = \ln V = (B - 1) \ln t + \ln B + A \quad (t \geq 1) \quad (5)$$

方程 (5) 中, V [$\text{mg} \cdot (\text{kg}^{-1} \cdot \text{min})^{-1}$] 为土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率; A 和 B 为双常数方程中的 2 个常数 (见图 2 和 3 中的双常数模拟曲线方程); $B - 1$ 为土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸速率对数与时间对数直线方程的斜率, 即解吸下降率; $\ln B + A$ 为 $t = 1$ 时刻吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率的自然对数. 通过方程 (5), 可求出任意时刻土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率.

图 4 中, L_1 和 L_2 为黑土在 Cu^{2+} 处理浓度分别为 $80, 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 $\ln V$ 与 $\ln t$ 的线性方程, 其表达式分别为: $\ln V = -0.982 \ln t - 1.580$ (L_1), $\ln V = -0.976 \ln t + 2.017$ (L_2); L_3 和 L_4 为棕壤在 CuCl_2 处理浓度分别为 $80, 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 $\ln V$ 与 $\ln t$ 的线性方程, 其表达式分别为: $\ln V = -0.966 \ln t + 0.366$ (L_3), $\ln V = -0.987 \ln t + 1.6672$ (L_4). 从图

4 可见, 在土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸反应的不同阶段, 解吸速率是不同的, 呈现出随时间延长, 解吸速率逐渐减小的趋势. 图 4 中 4 条 $\ln V$ 对 $\ln t$ 的直线拟合方程几乎成平行状态, 各条直线的斜率差异很小, 这说明黑土和棕壤吸附态 Cu^{2+} 解吸随时间的下降率几乎是相同的, 且几乎不受土壤 Cu^{2+} 吸附量的影响. 但土壤 Cu^{2+} 吸附量显著影响了吸附态 Cu^{2+} 在土壤中的解吸速率, 随着土壤 Cu^{2+} 吸附量的增高, 土壤 Cu^{2+} 的解吸速率将随之增加.

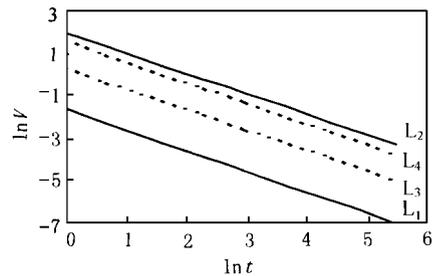


图 4 黑土和棕壤 Cu^{2+} 解吸速率的自然对数 ($\ln V$) 与时间的自然对数 ($\ln t$) 之间的关系

Fig. 4 Relationship between the logarithm of Cu^{2+} desorption rate ($\ln V$) and the logarithm of time ($\ln t$)

3 结论

黑土和棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸有明显滞后现象,且 2 种土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸率均较低. 相比于棕壤,黑土吸附态 Cu^{2+} 的解吸有更长的滞后阶段,且解吸率更低. 这大大减小了进入黑土和棕壤中的 Cu^{2+} 随土壤水迁移的可能性. 2 种土壤 Cu^{2+} 解吸量随解吸前 Cu^{2+} 吸附量的变化符合二次幂方程. Freundlich 方程为描述 Cu^{2+} 在 2 种土壤中等温解吸过程的最佳方程.

黑土和棕壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率均较快,在 40 min 左右基本达到平衡. 2 种土壤吸附态 Cu^{2+} 的解吸速率随土壤 Cu^{2+} 吸附量的增加而增加,但 2 种土壤吸附态 Cu^{2+} 解吸随时间的下降率几乎不受土壤 Cu^{2+} 吸附量和土壤类型的影响. 描述黑土和棕壤解吸动力学过程的最优模型为双常数速率方程,其次为 Elovich 方程.

参考文献:

- [1] 王建林,刘芷宇. 重金属在根际中的化学行为 II 土壤中吸附态铜解吸的根际效应[J]. 应用生态学报,1990,1(4): 338 ~ 343.
- [2] 龙新宪,倪吾钟,杨肖娥. 菜园土壤铜吸附-解吸特性的研究[J]. 农村生态环境,2000,16(3):39 ~ 41.
- [3] 杨亚提,张一平. 土壤胶体表面吸附态铜的解吸动力学特征[J]. 土壤与环境,2001,13(3):181 ~ 184.
- [4] Impellitteri C A, Lu Y, Saxe J K, Allen H E, Peijnenburg W J G M. Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils[J]. Environment International, 2002, 28(5): 401 ~ 410.
- [5] Scheidegger A M, Sparks D L. A critical assessment of sorption-desorption mechanisms at the soil mineral/ water interface[J]. Soil Science, 1996, 161(12): 813 ~ 827.
- [6] Aharoni C, Sparks D L, Levinson S. Kinetics of soil chemical reactions: Relationships between empirical equations and diffusion models[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 1307 ~ 1313.
- [7] Undabeytia T, Morillo E, Ramos A B, Maqueda C. Mutual influence of Cu and a cationic herbicide on their adsorption-desorption processes on two selected soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 137(1 ~ 4): 81 ~ 94.
- [8] 周启星,孙铁珩. 污染生态学研究与发展[A]. 见:李文华,王如松. 生态安全与生态建设[C]. 北京:气象出版社,2002. 188 ~ 193.
- [9] 李酉开. 土壤农化常规分析方法[M]. 北京:科学出版社,1983. 42 ~ 54.
- [10] 何振立,周启星,谢正苗. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998. 209 ~ 221.
- [11] 邵宗臣,陈家坊. 土壤和氧化铁对氯化物的吸附和解吸[J]. 土壤学报,1986,23(3):236 ~ 242.
- [12] 李韵珠,李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京:科学出版社,1998. 62 ~ 65.