

胶体存在时不同质地土壤对锌镉的吸附试验研究^①

王凯丽^{1,2}, 徐绍辉^{1*}, 杨永亮³, 林青¹

(1 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071; 2 河南省环境保护科学研究院, 郑州 450004;

3 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 以重金属离子 Zn 和 Cd 及胶体为对象, 通过等温静态批量平衡吸附试验, 分析了 3 种不同质地土壤对 Zn、Cd 单一吸附和等量竞争吸附特征, 胶体对土壤吸附 Zn、Cd 的影响, 并用 Langmuir 和 Freundlich 方程对试验结果进行了拟合。结果表明, 随着平衡液中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度的增加, 土壤对 Zn、Cd 的吸附量逐渐增大; 3 种质地土壤对 Zn、Cd 吸附量顺序为砂壤>粉壤>壤砂土; Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 共存时, 土壤对这两种离子的吸附量比单一离子存在的情况下明显下降; 胶体存在时抑制了土壤对 Zn 的吸附, 促进了土壤对 Cd 的吸附; 就本试验来说, Freundlich 方程拟合效果优于 Langmuir 方程。

关键词: 锌; 镉; 胶体; 吸附; 土壤

中图分类号: S153.3

近些年来, 重金属在土壤中的化学行为受到人们的广泛关注^[1-3]。重金属离子进入土壤后与固液相发生一系列的物理化学反应, 如吸附-解吸、沉淀-溶解、螯合以及水解等, 在诸多反应中, 吸附反应是重金属在土壤中积累的一个重要过程。土壤对重金属离子单一体系中的吸附已有大量研究^[4-5], 而进入土壤中的重金属污染物往往不止一种, 多种重金属共存时的吸附行为也应进行探讨。胶体是土壤中最活跃的组分, 它在土壤中是普遍存在的, 当土壤环境发生变化, 如土壤溶液离子浓度降低或 pH 值升高, 矿物表面吸附离子或大分子而造成表面电荷电性的改变, 人工抽水或注水实验, 快速降雨入渗等都会促使胶体形成^[6]。胶体对重金属离子的吸附一方面降低了重金属离子在土壤溶液中的浓度和生物活性, 另一方面可促进部分离子在土壤中的积累, 增加某些离子随胶体径流迁移而污染水体的风险^[7]。因此, 研究胶体对土壤吸附重金属的影响也显得尤为重要。胶体对土壤吸附单一重金属离子的影响已有较多报道^[8-9], 但有关胶体及多种重金属

离子共存时的研究较少。本文分析了给定 pH 值和离子强度条件下, 考虑加胶体与不加胶体两种情况, 3 种不同质地的土壤对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的单一吸附和等量竞争吸附行为, 并运用 Langmuir 和 Freundlich 方程对所得数据进行拟合。讨论了质地、胶体对土壤吸附不同重金属离子的影响, 以及多组分共存时土壤对重金属的吸附特征。研究结果将有助于人们更好地理解自然环境中胶体对重金属吸附行为以及胶体对重金属在土壤中运移过程的作用机理。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料

土壤取自辽宁沈阳细河边闲置水稻田, 去除土壤表层 0~10 cm, 在剖面上土壤可分为 3 层, 第一层 10~35 cm, 第二层 35~60 cm, 第三层 60~85 cm。按国际制将土壤质地依次定名为: 砂质壤土、粉壤土、壤质砂土。用常规分析方法测定土壤的理化性质 (表 1)。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771095) 和中国地质科学院基本科研业务费资助。

* 通讯作者 (shhxu@qdu.edu.cn)

作者简介: 王凯丽 (1985—), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事地下环境中水流和溶质迁移的数值模拟方面研究。E-mail: kellywangp@163.com

表 1 供试土壤理化性质

Table1 Physical and chemical properties of the studied soils

土壤质地	pH	体积质量 (g/cm ³)	含水量 (cm ³ /cm ³)	有机 C (g/kg)	Eh (mV)	背景值 (mg/kg)		粒径分布 (g/kg)		
						Zn	Cd	<2 μm	2~50 μm	>50 μm
砂壤	6.33	1.54	0.194	9.6	39.0	165	2.48	45.5	366.8	587.7
粉壤	6.30	1.52	0.133	3.3	43.6	53	0.19	49.3	499.8	450.9
壤砂土	5.84	1.43	0.072	1.9	70.3	60	0.07	11.9	101.2	886.9

试验在中国地质科学院国家地质实验测试中心进行。所用胶体为涿州市鑫誉化工厂生产酸性硅溶胶：SiO₂ 含量为 0.5 g/kg；pH 为 3.22；密度（25℃）为 1.0 g/cm³；外观为透明液体。在不改变胶体参数及稳定性基础上，结合胶体吸附-解吸理论，考虑到介质固定胶体的临界浓度，试验设计胶体浓度为 200 mg/L，根据 pH 值对胶体稳定性影响的“N”型曲线，试验设计 pH 为 4.0^[10]。

1.2 等温静态批量平衡吸附试验

在 45 ml 具塞圆底离心管中加入 2.00 g 风干过筛（2 mm）后的土样，分别加入浓度为 20、60、100、200、300、400、500 mg/L 的 Zn/Cd 溶液 20 ml（所加溶液 pH 值为 4.0，背景溶液 NaNO₃ 浓度为 0.01 mol/L）。加塞密封，在 25℃ 条件下振摇 24 h，以 3 000 r/min 离心分离 10 min，过滤，收集上清液。其中，加胶体部分中，胶体浓度为 200 mg/L；竞争吸附部分中为等量竞争吸附。用德国 Analytik Jena AG 公司 Contra AA300 型连续光源高分辨原子吸收光谱仪测定上清液中重金属的浓度，根据加入液和平衡液的浓度差按下式计算土壤中重金属离子的吸附量：

$$S = \frac{(C_0 - C)V}{m} \quad (1)$$

式中， S 为平衡时土壤对重金属的吸附量（mg/kg）， C_0 为加入液中重金属浓度（mg/L）， C 为平衡液中重金属的浓度（mg/L）， V 为平衡时液体体积（L）， m 为加入的土样质量（kg）。

每个浓度梯度做 3 个重复，并做无土空白试验。试验结果用等温吸附曲线用 Langmuir 和 Freundlich 方程进行拟合。

$$\text{Langmuir 方程: } S = \frac{K_L S_m C}{1 + K_L C} \quad (2)$$

$$\text{Freundlich 方程: } S = K_F C^n \quad (3)$$

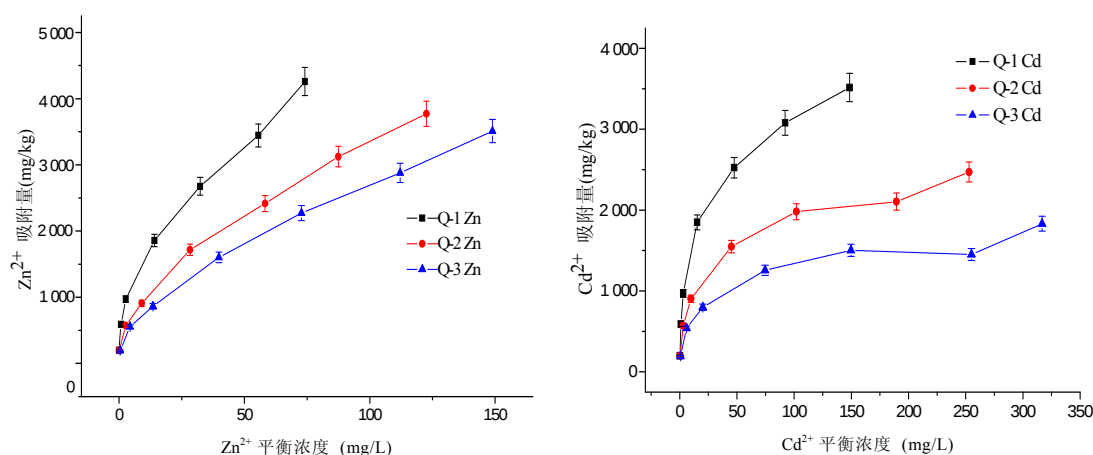
式中， S_m 表示土壤对重金属的最大吸附量（mg/kg），

K_L 表示土壤对重金属吸附亲和力的大小； K_F 为常数， n 为吸附反应级数，通常情况下 <1 。

2 结果与讨论

2.1 土壤质地对重金属吸附的影响

图 1 为 3 种质地土壤对 Zn²⁺、Cd²⁺ 的等温吸附曲线。从图中可以看出，3 种土壤对 Zn²⁺、Cd²⁺ 的吸附均表现为随平衡液浓度的增加，吸附量增大。其中，砂壤土的吸附能力最强，随平衡液中重金属浓度的增大，曲线呈急剧上升趋势，浓度低时表现更为明显。壤砂土的吸附能力最弱，虽然也表现为正相关，但由于吸附电位的有限性，随着平衡液中重金属浓度的不断增大，曲线趋于平缓。粉壤土介于二者之间。这表明土壤对 Zn²⁺、Cd²⁺ 的吸附率与平衡液中 Zn²⁺、Cd²⁺ 的浓度有关。当平衡液中 Zn²⁺ 浓度为 74.122 mg/L 时，砂壤土对 Zn²⁺ 的吸附量高达 4 258.79 mg/kg，而壤砂土对 Zn²⁺ 的吸附量为 2 319.86 mg/kg，前者是后者的 1.84 倍；当平衡液中 Cd²⁺ 浓度为 148.502 mg/L 时，砂壤土对 Cd²⁺ 的吸附量高达 3 514.99 mg/kg，而壤砂土对 Cd²⁺ 的吸附量为 1 411.09 mg/kg，前者是后者的 2.49 倍。砂壤土和壤砂土差异如此明显，一方面是因为砂壤 pH 高，有利于 Zn²⁺、Cd²⁺ 水解反应的进行，而形成的羟基金属化合物比 Zn²⁺、Cd²⁺ 更易被吸附^[9]；另一方面是因为砂壤土有机质含量高，而有机质含有大量的官能团，其中大部分的活性基团能跟溶液中的金属离子在一定条件下通过络合作用形成稳定的络合物^[11-14]，有利于土壤对重金属离子的吸附。此外，砂壤土黏粒含量较高，土壤颗粒的粒级越细，比表面积越大，越能提供更多的可供吸附的点位^[15]，越有利于重金属的吸附。壤砂土 pH、有机碳含量、黏粒含量均最低，因此其吸附力最弱。



(Q-1 代表砂壤、Q-2 代表粉壤、Q-3 代表壤砂土, 下同)

图1 不加胶体时 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 在砂壤、粉壤及壤砂土中的等温吸附曲线

Fig. 1 Adsorption isotherms for zinc and cadmium in sandy loam, silty loam, loamy sand without colloids

2.2 胶体对重金属吸附的影响

图2中a, b, c为土壤对 Zn^{2+} 的吸附等温曲线, 从图中可以看出, 胶体对土壤吸附 Zn^{2+} 的影响是显著的。不加胶体时, 吸附量随平衡液浓度增加而增大, 曲线呈急剧上升趋势; 加胶体时, 吸附量虽随平衡液浓度的增加而增大, 但增大的幅度明显降低, 曲线最终趋于平缓。这表明胶体的存在抑制了土壤对 Zn^{2+} 的吸附, 这可能是因为胶体具有粒径小、比表面积大、表面电荷丰富的特征, 对重金属离子的亲和力高^[16-17], 致使更多的 Zn^{2+} 吸附于胶体表面, 从而减少了土壤对 Zn^{2+} 的吸附。

图2中d, e, f为土壤对 Cd^{2+} 的吸附等温曲线, 从图中可以看出, 当平衡液浓度低于 50 mg/L 时, 加胶体与不加胶体时土壤对 Cd^{2+} 的吸附量差别不大, 当平衡液浓度高于 50 mg/L 时, 加胶体时土壤对 Cd^{2+} 的吸附量高于不加胶体时的吸附量, 表明胶体对土壤吸附 Cd^{2+} 的影响与平衡液中 Cd^{2+} 浓度有很大关系, 平衡液中 Cd^{2+} 浓度较低时土壤表面吸附点位较多, 大部分 Cd^{2+} 以及胶体结合态 Cd 被土壤吸附; 平衡液中 Cd^{2+} 浓度较高时, 降低胶粒的电动电位, 减少粒子的电性, 使其排斥位能减小, 聚集稳定性降低^[18], 因此部分胶体及其吸附的 Cd^{2+} 聚沉于土壤表面, 使得平衡液中 Cd^{2+} 浓度低于不加胶体时平衡液中 Cd^{2+} 的浓度。另一方面, 当 Cd^{2+} 浓度增大时, 胶粒的扩散双电层厚度减小, 胶粒外的水化膜变薄, 水化膜斥力变小, 也

会影响溶胶的稳定性^[18]。

2.3 多组分竞争对重金属吸附的影响

图3给出了加胶体与不加胶体条件下, Zn^{2+} 及 Cd^{2+} 在3种土壤中的竞争吸附情况。从图3a, b, c中可以看出, 不加胶体时, Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 在3种土壤中的吸附顺序均为: 单一吸附时 $\text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$, 竞争吸附时 $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ 。从图3d, e, f可以看出, 加胶体时, Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 在3种土壤中的吸附顺序均为: 单一吸附时 $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$, 竞争吸附时 $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ 。 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 共存时, 土壤对各离子的吸附量比单一离子存在的情况下明显下降, 这是因为二者共存时相互竞争结合点位使吸附受到彼此的牵制。其中, Cd^{2+} 竞争能力高于 Zn^{2+} , 这是因为多种离子共存的土壤溶液中, 离子竞争吸附能力的大小与其本身的性质有关, 如离子半径、原子量、电负性、水解常数、软度系数等。已有研究表明, 离子半径、原子量、电负性、软度系数越大, 该离子越容易被吸附^[19-22]。Zn 的离子半径 (0.74Å)、原子量 (65.38)、电负性 (1.6)、软度系数 (2.34) 分别小于 Cd 的离子半径 (0.97Å)、原子量 (112.41)、电负性 (1.7)、软度系数 (3.04), 由此推断出 Cd 的竞争吸附能力大于 Zn。因此, 二者共存时, 土壤对 Cd^{2+} 的吸附量高于 Zn^{2+} 。不加胶体条件下, 图3a, b, c 中土壤对单一 Zn 的吸附量较大, 竞争时 Zn 的吸附量减少很多, 甚至低于 Cd 的吸附量, 这一现象更加说明 Cd 的竞争能力强于 Zn。

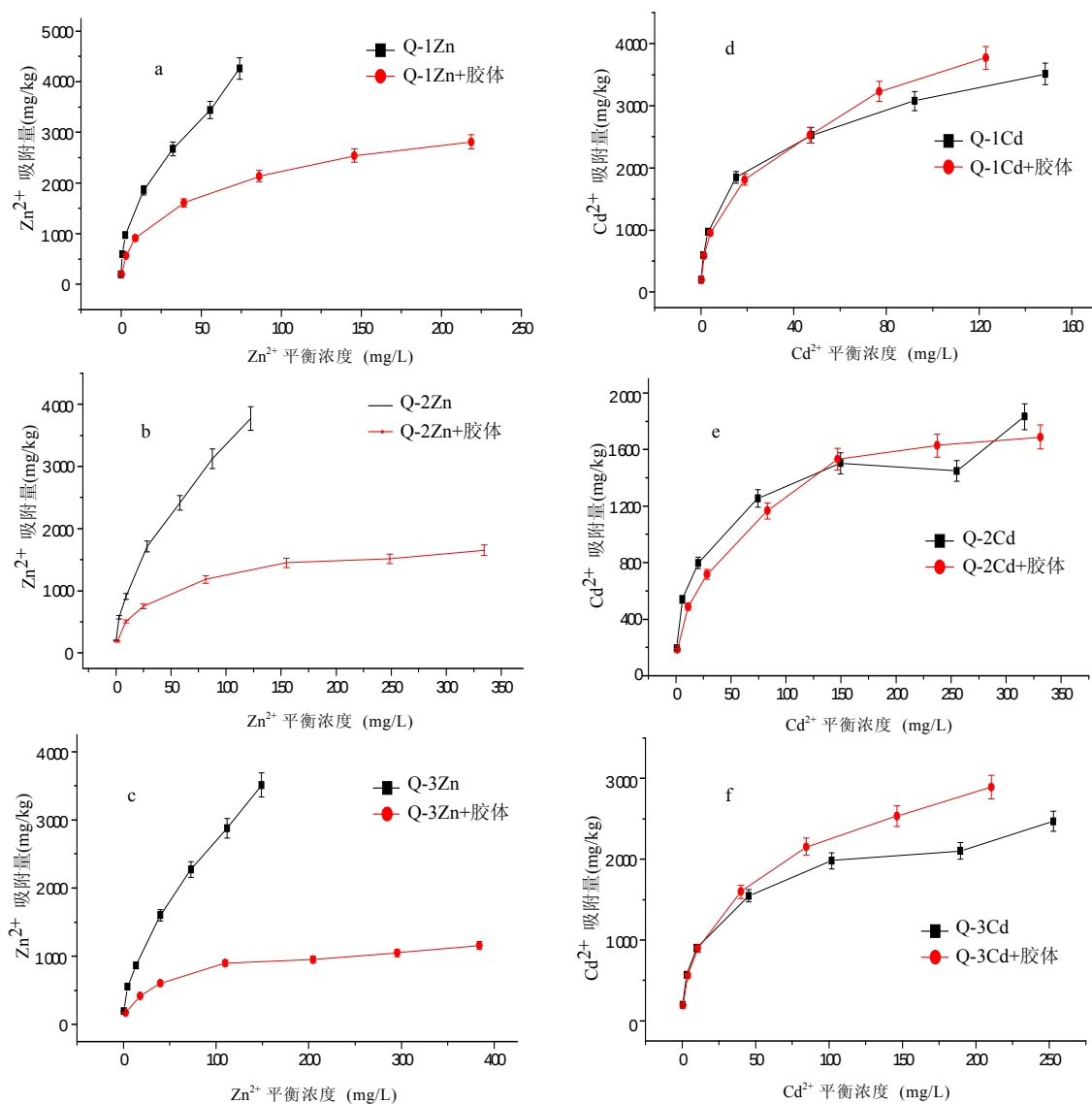


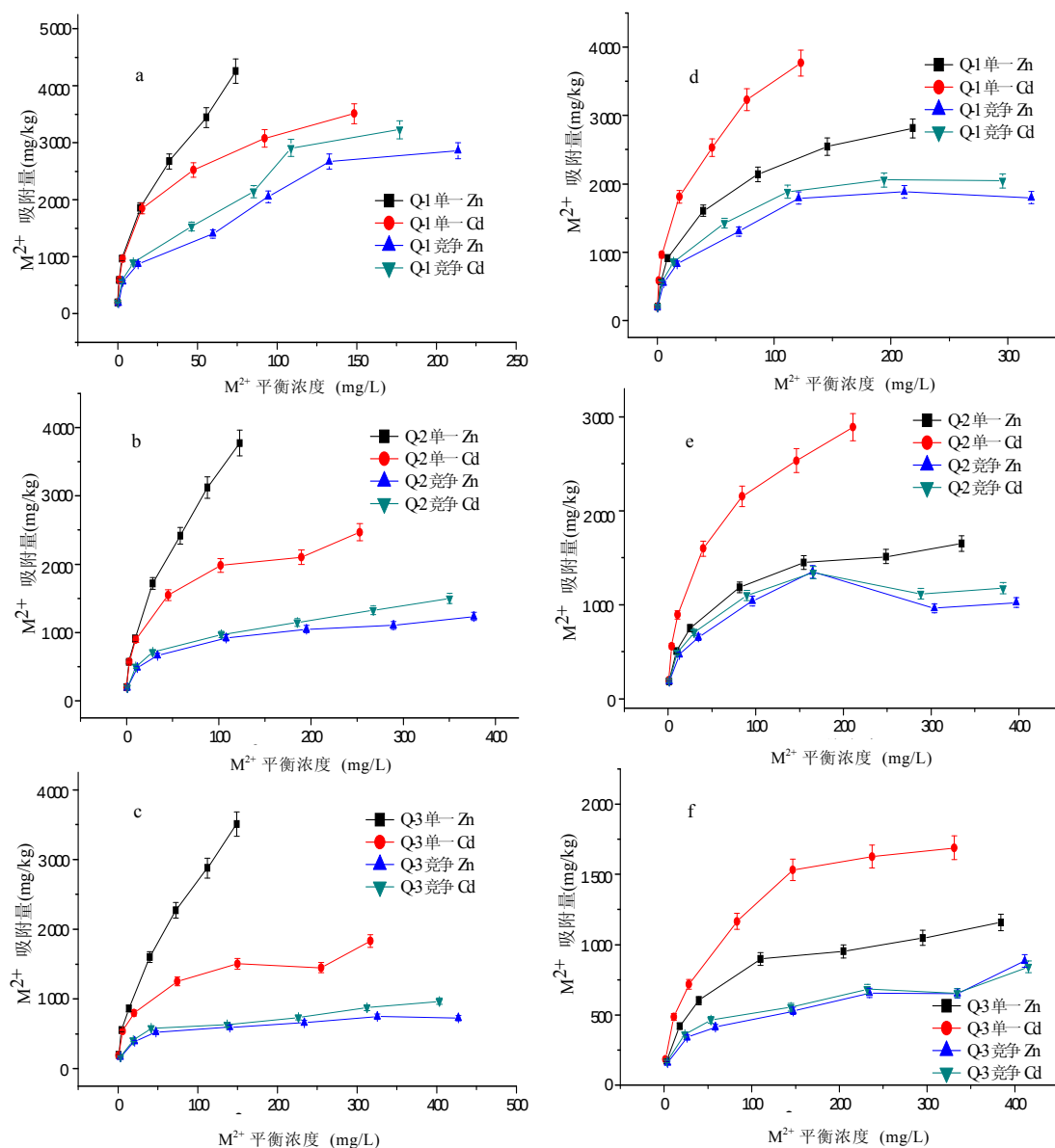
图 2 加胶体与不加胶体时 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 在砂壤、粉壤及壤砂土中的等温吸附曲线

Fig. 2 Adsorption isotherms for zinc and cadmium in sandy loam, silty loam, loamy sand

土壤对单一组分的吸附与多组分时有所不同。不加胶体时,土壤对 Zn^{2+} 的吸附量高于 Cd^{2+} ,这可能是由于金属离子水解反应或者羟基络合物的形成,降低了离子平均电荷(单个重金属离子由 2 个正电荷降低为 1 个正电荷),导致二级溶剂化能的大大下降,这样就降低了能障,从而有利于离子借库仑力和短程引力吸附于固相表面^[23]。离子的水解能力可用水解常数 pK 来表示, $\text{pK}_{\text{Zn}} (9.0) > \text{pK}_{\text{Cd}} (10.1)$, pK 越小,水解能力越强,溶液中就会有更多的羟基存在,形成的羟基金属离子更容易吸附于固相表面。

加胶体时,土壤对 Cd^{2+} 的吸附量高于 Zn^{2+} ,这可能是因为两种阳离子的聚沉能力不同,对胶体稳定性

影响不同。研究表明,电解质中起聚沉作用的是与胶体粒子带相反电荷的异号离子^[24],本试验所用胶体为硅溶胶,是许多 SiO_2 分子的聚集体,胶粒表面上的 SiO_2 分子与水作用生成 H_2SiO_3 ,是弱电解质,在水中电离生成 SiO_3^{2-} ,使硅胶粒子带负电^[25],并且,硅胶等电点约为 $\text{pH } 2 \sim 3$,而所用溶液 $\text{pH } (4.0)$ 大于其等电点,胶粒表面羟基以 $-\text{O}^-$ 形式存在,使其表面带负电^[18]。同价离子的聚沉能力大小与离子水化半径有关^[19, 26]。离子半径越小,水化能力越强,水化半径越大,聚沉能力越小。 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的离子半径顺序为 $\text{Cd } (0.97) > \text{Zn } (0.74)$, Cd^{2+} 半径较大,水化半径相对较小,对胶体的聚沉能力强于 Zn^{2+} ,降低了胶体的稳定性,与胶



(a, b, c 为不加胶体时的等温吸附曲线, d, e, f 为加胶体时的等温吸附曲线)

图3 加胶体与不加胶体时 Zn^{2+} 及 Cd^{2+} 在砂壤、粉壤及壤砂土中的竞争等温吸附曲线

Fig. 3 Competitive adsorption isotherms for zinc and cadmium in sandy loam, silty loam, loamy sand

体通过化学反应结合在一起的 Cd^{2+} 也会随之聚沉在土壤表面,使得平衡液中 Cd^{2+} 浓度偏低。另一方面,硅溶胶的稳定性与 pH 之间的密切关系,在 pH 接近 5~6 的区域范围内,随 pH 的升高硅溶胶的稳定性迅速下降^[26],实验中 Cd 平衡液 pH 值高于 Zn 平衡液 pH (如 Q-2 平衡液浓度为 84 mg/L 时 $pH(Cd) = 5.75$, $pH(Zn) = 5.45$),因此较高的 pH 使 Cd 平衡液中的硅溶胶凝聚、沉降,进而影响平衡液中 Cd^{2+} 的浓度,土壤对 Cd^{2+} 的吸附量增大。

2.4 等温吸附方程的拟合结果

表 2 是 3 种土壤在不加胶体及加胶体条件下对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附曲线进行 Langmuir 和 Freundlich 拟合的相关参数。相关系数 r 值表明,土壤平衡溶液中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度与土壤吸附 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的量之间呈显著的正相关关系。不加胶体情况下,3 种土壤对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附均可用 Langmuir、Freundlich 方程进行描述,两种重金属的平衡浓度与吸附量的相关系数为单一吸附在 0.961 以上,等量竞争吸附在 0.980 以上。

但 Freundlich 方程拟合更佳, 单一及竞争吸附相关系数数均在 0.990 以上。加胶体情况下, 3 种土壤对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附也均可用 Langmuir、Freundlich 方程进行描述, 两种重金属的平衡浓度与吸附量的相关系数为单一吸附在 0.977 以上, 等量竞争在 0.823 以上。除粉壤对等量竞争时 Zn^{2+} 的吸附用 Langmuir 拟合外, 其他用 Freundlich 方程拟合更佳。通过最大吸附量 S_m 的拟合值可以看出, 在加胶体与不加胶体时, 3 种质地土壤对 Cd^{2+} 最大吸附量顺序均为砂壤>粉壤>壤砂土, 并且加胶体时的最大吸附量大于不加胶体的; 对

于 Zn^{2+} , 在加胶体时 3 种土壤吸附量顺序与 Cd^{2+} 相同, 不加胶体时略有出入, 加胶体时的最大吸附量小于不加胶体的; 加胶体与不加胶体两种情况下, 土壤对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 竞争吸附的最大吸附量均小于单一吸附, 其中对 Zn^{2+} 的最大吸附量小于 Cd^{2+} 。 k_L 表示土壤对重金属亲和力的大小, 通过 k_L 值可以看出, 单一吸附时, 土壤对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的亲和力顺序均为砂壤>粉壤>壤砂土; 竞争吸附时, 拟合结果与试验结果有所出入, 这表明 Langmuir 方程在拟合多组分竞争吸附时有一定的局限性^[27]。

表 2 3 种质地土壤中 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的单一及竞争等温吸附参数

Table 2 Calculated parameters of single and competitive adsorption isotherms of zinc and cadmium in soils different in texture

胶体	拟合方程	吸附	参数	Zn^{2+}			Cd^{2+}		
				Q-1	Q-2	Q-3	Q-1	Q-2	Q-3
无	Langmuir	单一	S_m	5 366.7	5 379.9	5 397.2	3 489.5	2 389.9	1 711.4
			k_L	0.038	0.017	0.011	0.087	0.058	0.051
			r	0.961	0.984	0.987	0.978	0.976	0.964
		竞争	S_m	3 820.8	1 198.8	732.3	4 502.5	1 433.6	896.1
			k_L	0.014	0.045	0.056	0.014	0.036	0.041
			r	0.980	0.992	0.993	0.989	0.988	0.982
	Freundlich	单一	n	0.465	0.531	0.566	0.330	0.309	0.292
			r	0.990	0.996	0.997	0.994	0.994	0.991
		竞争	n	0.447	0.272	0.237	0.467	0.309	0.286
			r	0.995	0.998	0.998	0.997	0.997	0.995
有	Langmuir	单一	S_m	2 959.6	1 718.5	1 186.8	4 217.6	3 150.3	1 908
			k_L	0.039	0.034	0.028	0.044	0.031	0.023
			r	0.981	0.989	0.986	0.977	0.986	0.990
		竞争	S_m	1 968.4	1 179.1	832.7	2 181.8	1 290.5	774.1
			k_L	0.047	0.054	0.019	0.049	0.055	0.032
			r	0.975	0.904	0.910	0.981	0.960	0.927
	Freundlich	单一	n	0.362	0.320	0.315	0.408	0.394	0.358
			r	0.997	0.988	0.985	0.999	0.997	0.983
		竞争	n	0.294	0.228	0.343	0.299	0.239	0.287
			r	0.966	0.823	0.969	0.981	0.910	0.974

注: r 为相关系数。

3 结论

(1) 不同质地土壤对重金属离子的吸附量有很大差别, 加胶体与不加胶体时吸附量顺序均为砂壤>粉壤>壤砂土; 随着平衡液中重金属离子浓度的增加, 吸附量均呈增大趋势。主要是由不同质地土壤 pH、有

机质含量以及黏粒含量差异造成的。

(2) 胶体存在与否对土壤吸附 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 影响是不同的, 胶体能够减少 Zn^{2+} 在土壤上的吸附量, 是因为胶体的表面性质更有利于吸附 Zn^{2+} , 使其随胶体进入平衡液; 胶体能增加 Cd^{2+} 在土壤上的吸附量, 尤其

是平衡液中 Cd^{2+} 浓度较高时, 是因为较高浓度的 Cd^{2+} 影响了胶体的稳定性, 使得胶体及其吸附的 Cd^{2+} 聚沉在土壤表面, 降低了平衡液中 Cd^{2+} 浓度, 增加了其吸附量。

(3) Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 共存时, 土壤对每种离子的吸附量小于单一离子存在时的吸附量, 主要是因为土壤表面的吸附点位是有限的, 二者相互竞争吸附点位使吸附受到彼此的牵制。由于 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 对胶体的聚沉能力不同, 对胶体稳定性影响不同, 因此胶体存在与否对二者在土壤中吸附量影响不同。

(4) 用 Langmuir 和 Freundlich 方程对实验数据进行拟合, 通过相关系数 r 可以看出, 除个别情况外, Freundlich 方程拟合效果更佳。单一吸附时拟合结果与实验结果基本相符, 竞争吸附时有所出入说明拟合方程有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 宗良纲, 徐晓炎. 土壤中镉的吸附解吸研究进展. 生态环境, 2003, 12(3): 331-332
- [2] 张增强, 张一平, 朱兆华. 镉在土壤中吸持的动力学特征研究. 环境科学学报, 2000, 20(3): 371-375
- [3] Yu S, He ZL, Huang CY. Adsorption-desorption behavior of copper at contaminated levels in red soils from China. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1130-1134
- [4] 王维君, 邵宗臣, 何群. 红壤粘粒对 Co、Cu、Pb 和 Zn 吸附亲和力的研究. 土壤学报, 1995, 32(2): 167-177
- [5] 胡宁静, 骆永明, 宋静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系. 土壤学报, 2007, 44(3): 437-443
- [6] 郭清海, 王焰新, 郭华明. 地下水系统中胶体的形成机理及其对污染物迁移的影响. 地质科技情报, 2001, 20(3): 69-74
- [7] 熊毅. 土壤胶体. 1 版. 北京: 科学出版社, 1983
- [8] Ilona H, Iso C, Ruben K. Sorption of Cu and Pb to kaolinite-fulvic acid colloids: Assessment of sorbent interactions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69: 1675-1686
- [9] 杨亚提, 张一平. 陪伴离子对土壤胶体吸附 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的影响. 土壤学报, 2003, 40(2): 218-223
- [10] James RO, Healy TW. Adsorption of hydrolyzable metals at the oxide-water interface. III. A thermodynamic model of adsorption. Colloid Interface Sci., 1972, 40: 65-80
- [11] 陈荣三, 毛延. 硅溶胶的制备、性质及其应用. 化工进展, 1985(2): 10-14
- [12] Ephraim JH. Heterogeneity as a concept in the interpretation of metal ion binding by humic substances. The binding of zinc by an aquatic fulvic acid. Anal. Chim. Acta, 1992, 267: 39-45
- [13] Backström M, Dario M, Karlsson S. Effects of fulvic acid on the adsorption of mercury and cadmium on goethite. Sci. Total Environ., 2003, 304: 257-268
- [14] Ephraim JH, Xu H. The binding of cadmium by an aquatic fulvic acid: A comparison of ultrafiltration with ion-exchange distribution and ion-selective electrode techniques. Sci. Total Environ., 1989, 81/82: 625-634
- [15] Kinniburgh DG, Milne CJ, Benndutti MF. Metal ion binding by humic acid: Application of the NICA-Donnan model. Environ. Sci. Technol., 1996, 30(5): 1687-1698
- [16] Amellal N, Portal JM, Berthelin J. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1611-1619
- [17] Jungk AO. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface//Yoav W. Plant Roots-The Hidden Half. Paris: Marcel Dekker Inc., 1996: 529-557
- [18] 王辉. 降雨条件下黄土地养分迁移机理及模拟模型 (硕士学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006
- [19] 沈钟, 赵振国, 王果庭. 胶体与表面化学. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [20] 朱波, 汪涛, 王艳强. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附. 中国环境科学, 2006, 26(增刊): 73-77
- [21] McBride MB. Environmental Chemistry of Soils. New York: Oxford Univ. Press, 1994
- [22] Flogeac K, Guillon E, Aplincourt M. Competitive sorption of metal ions onto a north-eastern France soil: Isotherms and XAFS studies. Geoderma, 2007, 139: 180-189
- [23] 王玉军, 周东美, 孙瑞娟. 土壤中铜、铅离子的竞争吸附动力学. 中国环境科学, 2006, 26(5): 555-559
- [24] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究. 生态环境, 2005, 14(1): 102-107
- [25] 侯万国, 于耀芹, 张春光. pH 值和电解质对氢氧化铝镁溶胶稳定性的影响. 应用化学, 1996, 13(2): 33-36
- [26] 陈宗淇, 戴闽光. 胶体化学. 北京: 高等教育出版社, 1984
- [27] 董耀雄. 离子交换法制备酸性硅溶胶的研究. 化工进展, 1989(3): 45-49
- [28] 林青, 徐绍辉. 土壤中重金属离子竞争吸附的研究进展. 土壤, 2008, 40(5): 706-711

Study on Zn and Cd Colloid-affected Adsorption in Three Different Soils

WANG Kai-li^{1,2}, XU Shao-hui¹, YANG Yong-liang³, LIN Qing¹

(1 *Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China*; 2 *Henan Research Academy of Environmental Science, Zhengzhou 450004, China*; 3 *National Research Center of Geoanalysis, Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: Heavy metal ions of zinc, cadmium and colloid were used through the batch experiment to study the single and competitive adsorption behavior of zinc and cadmium in three soils different in texture and the effects of the colloid on the adsorption amounts. The Langmuir equation and Freundlich equation were used to fit the experiment data. The results indicated that the adsorption amounts of zinc and cadmium in soils increased with the increasing equilibrium concentration; the sequence of the adsorption amounts of three soils was sandy loam > silty loam > loamy sand; the adsorption amounts of the two ions in the competitive experiment were less than those in single system; the colloid increased the adsorption amounts of zinc but decreased the adsorption amounts of cadmium. In this paper, Freundlich equation was more accurately than the Langmuir equation in describing adsorption behavior of two heavy metals.

Key words: Zinc, Cadmium, Colloid, Adsorption, Soil

