

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.06.021

五种土壤胶体对重金属镉的吸附特征研究

牟海燕¹, 蒋茜茜², 吴晨伟¹, 梁 焯¹, 黄家森¹, 陈文清¹, 敖天其³

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川长虹格润环保科技股份有限公司, 成都 610000;
3. 四川大学水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 土壤胶体作为土壤中最细微、最活跃的部分, 在土壤对重金属的累积方面起主要作用. 研究不同土壤胶体对镉的吸附-解吸行为、化学形态转化等的影响, 有利于摸清不同土壤类型中镉的迁移性和生物危害性, 对开展区域农田镉污染修复有重要意义. 本文选取蒙皂石、高岭土、针铁矿、氢氧化铝、腐殖酸五种土壤中常见的胶体, 探究不同土壤胶体对镉的吸附特征. 结果表明: (1) 五种胶体对镉的吸附均属于单分子层吸附, 蒙皂石能快速吸附大量的镉, 但吸附的镉不稳定, 解吸率最高; 腐殖酸和针铁矿吸附的镉解吸率较低. 吸附-解吸实验结果显示, 五种土壤胶体对镉的保留吸附量为: 腐殖酸(41.38 mg/g) > 针铁矿(24.95 mg/g) > 高岭土(19.43 mg/g) > 蒙皂石(15.06 mg/g) > 氢氧化铝(10.84 mg/g). (2) 镉的形态分析结果显示, 蒙皂石和高岭土吸附的镉大多以可交换态存在, 针铁矿和腐殖酸吸附的镉形态较稳定, 除针铁矿外, 残渣态含量均较低, 形态分析结果与吸附-解吸实验结果一致. (3) pH 对于五种胶体吸附镉的影响程度大小为: 腐殖酸 > 针铁矿 > 高岭土 > 蒙皂石 > 氢氧化铝.

关键词: 土壤胶体; 镉; 吸附; 解吸; 形态分布

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)06-1125-06

Study on the adsorption characteristics of cadmium by five soil colloids

MOU Hai-Yan¹, JIANG Qian-Qian², WU Chen-Wei¹, LIANG Xuan¹,
HUANG Jia-Sen¹, CHEN Wen-Qing¹, AO Tian-Qi³

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Changhong Green Environmental Science and Technology Co. Ltd., Chengdu 610000, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering,

College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Soil colloids, as the most subtle and active part of the soil, play a major role in the accumulation of heavy metals in the soil. Study on the effect of different soil colloids on the adsorption-desorption behavior and the transformation of chemical forms of cadmium will help to understand the environmental chemical behavior of cadmium, which has a great significance to the remediation of cadmium pollution in regional farmland. In this study, smectite, kaolin, goethite, aluminum hydroxide and humic acid which colloids are commonly found in soil were collected to explore the adsorption characteristics of cadmium on different soil colloid. The following conclusions were obtained: (1) The adsorption of the five colloids to cadmium belongs to monomolecular adsorption. Smectite can quickly absorb a large amount of cadmium, but the adsorption of cadmium is unstable and the desorption rate is the highest. The cadmi-

收稿日期: 2019-01-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0800604)子项目(川渝丘陵平原区农田镉污染修复技术集成与示范)

作者简介: 牟海燕(1989-), 女, 博士生, 研究方向为土壤重金属污染. E-mail: mouhaiyan@foxmail.com

通讯作者: 陈文清. E-mail: cwq69814@126.com

um desorption rates of humic acid and goethite are lower. Adsorption-desorption experiment results show the retained adsorption capacity: humic acid (41.38 mg/g) > goethite (24.95 mg/g) > kaolin (19.43 mg/g) > smectite (15.06 mg/g) > aluminum hydroxide (10.84 mg/g). (2) The species analysis results show that the cadmium adsorbed by smectite and kaolin mostly exists in exchangeable state, and the cadmium adsorbed by goethite and humic acid is relatively stable. Except for goethite, the residual state content is relatively low. The species analysis results are consistent with the results of adsorption-desorption experiment. (3) The degree of influence of pH on cadmium adsorption by five colloid is: humic acid > goethite > kaolin > smectite > aluminum hydroxide.

Keywords: Soil colloid; Chromium; Adsorption; Desorption; Species distribution

1 引言

近年来,农田重金属污染对农作物的危害引起了广泛的社会关注^[1-2]. 镉的迁移性强,它在农田重金属污染中占最大比例,研究土壤镉的环境化学行为有助于探究土壤镉污染机理,为土壤镉污染治理提供理论依据. 大量研究表明,由于同一元素的不同化学形态具有不同的迁移性、化学活性及生物有效性,重金属对环境及人体的危害性与其形态分布有密切关系^[3-4]. 因此,对土壤镉环境化学行为的研究分为土壤固液界面的化学行为研究以及根际化学行为的研究,归根结底是对镉的化学形态变化的研究.

通常所说的土壤胶体是指土壤中直径 < 2000 nm 的部分,它是土壤中最细微、最活跃、物质组成最复杂的部分. 近代土壤胶体研究表明^[5],土壤胶体主要包括无机胶体和有机胶体,无机胶体主要为黏土矿物,包括晶质层状硅酸盐,晶质和非晶质的铁、铝、锰、硅、钛等的水合氧化物,凝胶类硅酸盐等;有机胶体主要有腐殖质、蛋白质、纤维素、木质素、树脂和其他复杂化合物等. 有机胶体与无机胶体更多时候是以各种力紧密结合在一起,以有机-无机复合胶体的形式存在.

土壤胶体带电,且具有巨大的比表面积和大量的表面反应位点,对污染物具有良好的吸附性,其对土壤环境中的有机农药、重金属、放射性核素等的吸附性成为了研究人员关注的重点. 土壤胶体对重金属的吸附-解吸作用主要受土壤 pH 值、有机质、阳离子交换量等的影响^[6-7]. 基于土壤胶体对污染物的吸附作用,在过去几十年,蒙皂石、高岭石、针铁矿、蛭石等粘土矿物还被广泛应用于去除污染水体中的重金属^[8].

迄今为止,国内外学者就重金属与土壤胶体的相互作用已经做了大量研究,但多数是以天然土壤

胶体为研究对象,且天然土壤胶体与重金属的交互作用机理始终不能详尽解释. 这是由于天然土壤胶体组成复杂,影响因素太复杂,想单独将某一组分分离出来研究又十分困难. 因此,本实验通过人工途径获得五种土壤胶体主要物质组成成分,分别研究其对镉的环境行为的影响,为土壤胶体在土壤重金属修复领域的应用提供了理论基础.

2 实验与材料

本研究中,蒙皂石^[9],针铁矿^[10],氢氧化铝^[11]胶体均为实验室制备;高岭土胶体由上海市奉贤奉城试剂厂的化学纯级高岭土试剂制备,腐殖酸胶体由天津市光复精细化工研究所的分析纯级腐殖酸试剂制备.

动力学吸附实验:以 0.01 mol/L NaNO₃ 溶液为支持电解质,配制 Cd²⁺ 浓度为 200 mg/L 的溶液,使用 HNO₃ 或 NaOH 调节溶液 pH 值至 6.5,按胶体投加量为 0.2% 加入胶体,25 °C 恒温搅拌 24 h,在 10 min、30 min、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h 时分别取样,过 0.45 μm 滤膜,上机测定 Cd²⁺ 浓度,计算胶体吸附量.

等温吸附实验:以 0.01 mol/L NaNO₃ 溶液为支持电解质,配制 Cd²⁺ 浓度分别为 25、50、100、200、400、600、800 mg/L 的溶液,使用 HNO₃ 或 NaOH 调节溶液 pH 值至 6.5,按胶体投加量为 0.2% 加入胶体,25 °C 恒温搅拌 24 h,待胶体吸附饱和后取一定体积溶液,过 0.45 μm 滤膜,上机测定 Cd²⁺ 浓度,计算胶体吸附量.

被胶体吸附后的镉的形态分析采用 Tessier 五步连续提取法^[12].

3 结果与讨论

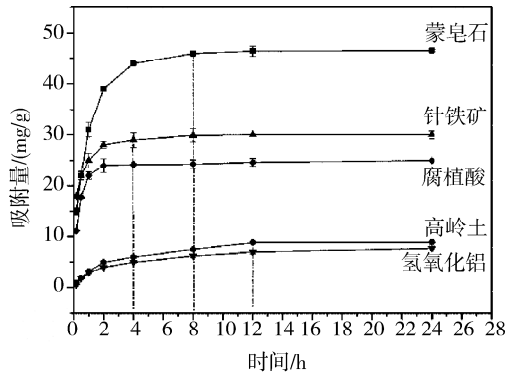
3.1 五种胶体对镉的吸附动力学研究

图 1 显示,五种胶体对镉的吸附量均随时间增

加, 吸附 12 h 之后基本全部达到平衡. 五种胶体达到平衡吸附量 80% 的时间分别为: 针铁矿、腐殖酸 1 h 以内, 蒙皂石需要 2 h, 高岭土、氢氧化铝需要 4~8 h. 研究者^[13]认为高位能吸附位点对吸附质有较高的亲和力, 吸附反应非常迅速, 而低位能吸附位点对吸附质的亲和力相对较低, 反应速度相对较慢. 推测针铁矿、腐殖酸的高位能吸附位点较多, 高岭土、氢氧化铝的低位能吸附位点较多.

表 1 为五种胶体对镉的动力学吸附模型拟合结果. 结果显示, 准二级模型对五种胶体吸附镉的动力学行为的拟合度最佳, R^2 均大于 0.95, 且蒙皂石、高岭土、针铁矿、氢氧化铝、腐殖酸的 S_e 值与实验结果较为接近. 一般认为化学吸附的吸附位点属于高位能吸附位点, 因此, 高位能吸附位点对镉的吸附可能是影响吸附速率的主要因素. 此外, 蒙皂石、高岭土、氢氧化铝、腐殖酸四种胶体与准一级模型也有良好的拟合结果, 这四种胶体的吸附速率

可能还受镉外扩散速率的影响. 除高岭土外, 其它胶体均无法与颗粒间扩散模型拟合, 这可能是由于高岭土的平均孔径较大, 吸附速率会受到镉在孔径中的扩散速率的影响.



Time=24 h, pH=6.5, concentration of colloids=0.2%, initial concentration of Cd²⁺=200 mg/L

图 1 五种胶体对 Cd²⁺ 的动力学吸附曲线
Fig. 1 Kinetic adsorption curves of the five kinds of colloids on Cd²⁺

表 1 五种胶体的动力学吸附拟合结果

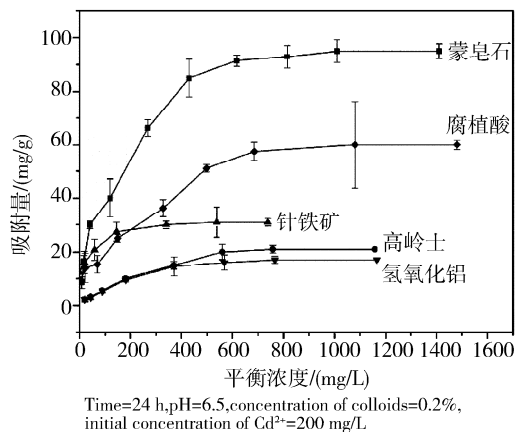
Tab. 1 Results of kinetic adsorption of five kinds of colloids

胶体类型	准一级模型			准二级模型			颗粒间扩散模型		
	$\ln(S_e - S) = \ln S_e - k_1 t$			$t/S = 1/(k_2 S_e^2) + t/S_e$			$S = kt^{0.5} + C$		
	S_e	k_1	R^2	S_e	k_2	R^2	k	C	R^2
蒙皂石	45.20	1.298	0.939	47.64	0.060	0.956	/	/	/
高岭土	8.47	0.403	0.926	9.68	0.053	0.957	1.851	1.419	0.857
针铁矿	/	/	/	30.24	0.215	0.954	/	/	/
氢氧化铝	7.02	0.409	0.905	8.38	0.052	0.958	/	/	/
腐殖酸	24.22	2.969	0.921	25.14	0.215	0.960	/	/	/

注: “/”表示无法拟合或相关系数过低.

3.2 五种胶体对镉的吸附-解吸研究

3.2.1 等温吸附研究 等温吸附反映不同镉浓度下胶体对镉的吸附能力, 是研究不同胶体对重金属离子吸附能力的基础. 图 2 为五种胶体的等温吸附曲线, 随着初始镉浓度的升高, 传质推动力增加, 胶体对镉的吸附能力不断增加, 吸附量也不断增加, 五种胶体的最大吸附量顺序为: 蒙皂石 (95 mg/g) > 腐殖酸 (60 mg/g) > 针铁矿 (31 mg/g) > 高岭土 (21 mg/g) > 氢氧化铝 (17 mg/g). 表 2 是镉的吸附过程与 Langmuir、Freundlich 及 Temkin 等温吸附方程拟合结果. 结果表明, Langmuir 等温吸附曲线比其它两种曲线的拟合结果更好, R^2 均在 0.95 以上. 五种胶体对镉的吸附可能均属于



Time=24 h, pH=6.5, concentration of colloids=0.2%, initial concentration of Cd²⁺=200 mg/L

图 2 五种胶体对 Cd²⁺ 的等温吸附曲线
Fig. 2 Isotherm adsorption curves of five colloids for Cd²⁺

单分子层吸附,由 Langmuir 等温吸附曲线计算的最大吸附量顺序依次为蒙皂石(102.44 mg/g) > 腐殖酸(67.12 mg/g) > 针铁矿(31.75 mg/g) > 高岭土(27.31 mg/g) > 氢氧化铝(20.83 mg/g). 理论最大吸附量稍大于实验结果,这可能是由于实际胶体表面不均匀或者被吸附的镉之间存在相互作用力.

表 2 五种胶体的等温吸附曲线拟合结果

Tab. 2 Results of isothermal adsorption of five kinds of colloids

胶体类型	Langmuir 模型			Freundlich 模型			Temkin 模型		
	$C_e/S=C_e/S_m+1/(k_1S_m)$			$S=k_fC_e^{1/n}$			$S=k_t \log C_e+A$		
	S_m	k_1	R^2	k_f	n	R^2	k_t	A	R^2
蒙皂石	102.44	0.010	0.997	10.025	3.054	0.943	41.864	-31.736	0.983
高岭土	27.31	0.004	0.974	0.407	1.648	0.927	12.482	-16.481	0.940
针铁矿	31.75	0.057	0.959	11.642	6.449	0.945	6.925	10.933	0.898
氢氧化铝	20.83	0.005	0.985	0.957	2.341	0.906	9.969	-12.416	0.953
腐殖酸	67.12	0.008	0.973	4.289	2.659	0.938	24.758	-19.663	0.869

3.2.2 解吸研究 为研究镉被胶体吸附后的稳定性,探究吸附机理,使用高浓度中性盐对吸附饱和后的物质进行解吸,解吸率基本可以代表吸附作用中离子交换吸附所占百分比^[14].

的比表面积较大,属于层状硅酸盐,可能大部分的镉以表面吸附的形式与蒙皂石结合,环境条件改变时,被吸附的镉很容易重新回到土壤溶液中.

针铁矿与腐殖酸的解吸率均较低,未超过 20%. 以初始浓度为 400 mg/L 时的解吸率计算,解吸后五种胶体对镉的保留吸附量为:腐殖酸(41.38 mg/g) > 针铁矿(24.95 mg/g) > 高岭土(19.43 mg/g) > 蒙皂石(15.06 mg/g) > 氢氧化铝(10.84 mg/g). 这表明土壤中有机胶体以及含铁氧化物很可能是降低镉的迁移率的主要因子.

3.3 胶体吸附镉的形态分析研究

在研究农田土壤镉污染时,镉的形态分布与其生物有效性有着非常密切的关系^[15-17]. Tessier 五步提取法是重金属形态分析中最常用的方法之一,它将重金属分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰结合态以及有机结合态、残渣态. 五种形态的镉稳定性递增,迁移性递减. 不同存在形态的镉会因为土壤 pH 值、成岩作用、氧化还原电位、有机质含量、地下水流速、微生物扰动等物理化学条件的改变而相互转化,如果转化成迁移性强的形态,进入地下水或被植物吸收,就会对环境造成严重的影响^[18].

图 4 为五种胶体吸附镉的形态分布图,可以看出,形态分析的结果与解吸实验的结果一致,可交换态镉所占百分比与解吸率基本相同. 蒙皂石和高岭土吸附后的镉大多以可交换态形式存在,而腐殖酸和针铁矿吸附后的镉大多以较为稳定的铁锰

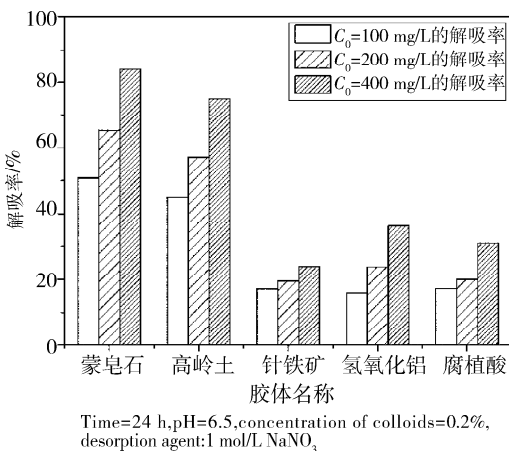


图 3 不同初始浓度下胶体的 Cd²⁺ 解吸率

Fig. 3 Cd²⁺ desorption rates of colloids at different initial concentrations

图 3 是不同初始浓度下,吸附镉饱和后的五种胶体的解吸结果. 可以看出,不同胶体的镉解吸率均随初始浓度、吸附量的升高而增加,变化趋势相同,解吸率大小顺序为:蒙皂石 > 高岭土 > 氢氧化铝 > 腐殖酸 > 针铁矿. 蒙皂石的吸附量虽然最大,但是其解吸率也最大,在初始浓度为 200 mg/L 时,其解吸率达到 65.22%; 蒙皂石虽然对镉的吸附能力强,但吸附在蒙皂石中的镉不稳定; 蒙皂石

氧化态、有机结合态以及残渣态形式存在, 进一步证明蒙皂石和高岭土虽然能快速吸附大量的镉, 但吸附的镉不稳定, 很容易重新回到环境中. 水合金属氧化物胶体针铁矿、氢氧化铝, 有机胶体腐殖酸吸附后的镉的可交换态远小于层状硅酸盐矿物胶体, 含量在 19.10% ~ 24.71% 之间. 除针铁矿外, 其它四种胶体中残渣态镉含量均非常低. 有研究认为在短时间内, 重金属较难进入土壤矿物的晶格中, 因此残渣态镉的含量偏低^[19]. 而针铁矿是一种无定形类晶体结构, 相比较其它几种胶体, 镉可能更容易进入其结构内, 形成残渣态镉, 这与 Ainsworth 的研究结果^[20] 相似.

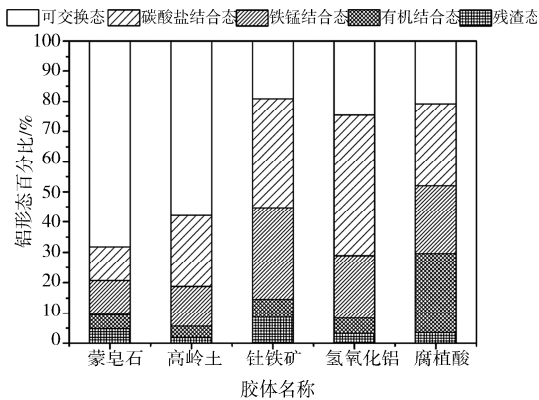


图 4 胶体吸附的镉形态分布

Fig. 4 Distribution of Cd forms on colloids

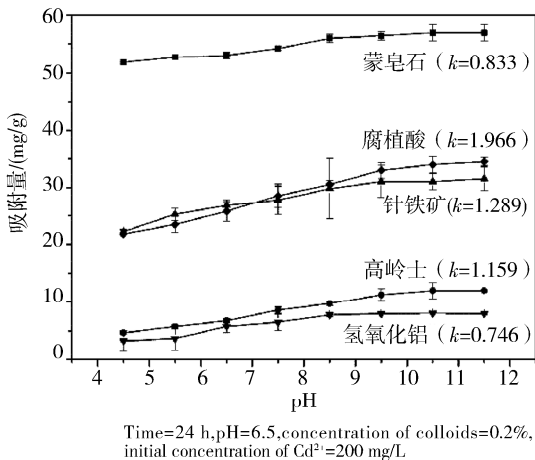


图 5 初始 pH 值对胶体吸附 Cd^{2+} 影响

Fig. 5 Effect of the initial pH on the colloids adsorption of Cd^{2+}

3.4 pH 值对五种胶体吸附镉的效果影响研究

pH 值的变化会影响土壤胶体表面带电荷状态, 引起土壤胶体与重金属离子表面作用力的大小, 使得土壤胶体与重金属离子的碰撞接触效率提高或降低, 从而影响土壤胶体对重金属离子的吸附

效果^[21]. 同时, pH 值也是影响土壤中 Cd 形态的重要因素, 研究表明, 土壤有效态 Cd 与土壤 pH 值呈显著负相关关系^[22], 土壤酸度的增加会促进 Cd 的溶解和活化, 而酸度的减少则会促进 Cd 的固定. 因此研究不同 pH 值条件下土壤胶体对镉的吸附能力, 对胶体吸附理论的实际应用具有一定的指导价值.

图 5 反映了溶液初始 pH 值对胶体吸附镉的影响. 由图可知, 在实验 pH 值 (4.5~11.5) 范围内, 五种胶体对镉的吸附量随 pH 值的升高而变大的趋势是相同的. 胶体的吸附量随 pH 值变化主要受胶体表面带电性质、胶体结构、离子半径、-OH 质子化作用等影响^[23-24]. 对比图 5 中不同胶体吸附量对 pH 值变化的斜率, 变化程度从大到小依次为: 腐植酸 > 针铁矿 > 高岭土 > 蒙皂石 > 氢氧化铝. 由于 pH 值的变化会显著影响腐植酸的结构, 使其吸附位点的数量发生变化, 所以 pH 值的变化对腐植酸吸附量的影响最大. 其次, 对于水合金属氧化物, 其 PZC (零点电位) 较高, 处于实验 pH 值范围内, 当 $\text{pH} < \text{PZC}$ 时, 胶体表面带正电荷, 当 $\text{pH} > \text{PZC}$ 时, 胶体表面带负电荷, 其表面带电性质随 pH 的变化发生了改变, 对其吸附量产生了较大的影响. 但由于氢氧化铝的吸附量最小, 吸附位点最少, pH 的变化对其吸附量的影响有限, 所以针铁矿的变化程度仅次于腐植酸, 而氢氧化铝的变化程度最小.

4 结 论

(1) 五种胶体吸附镉的反应属于单分子层吸附, 高能位点吸附位点对镉的吸附是影响吸附速率的主要因素, 保留吸附量为腐植酸 (41.38 mg/g) > 针铁矿 (24.95 mg/g) > 高岭土 (19.43 mg/g) > 蒙皂石 (15.06 mg/g) > 氢氧化铝 (10.84 mg/g). 层状硅酸盐胶体在土壤胶体中占比较大, 能快速吸附镉, 虽然其吸附的镉稳定性较差, 但可为与其结合的腐植酸、针铁矿中提供反应位点. 因此, 天然环境中, 蒙皂石可能起到初步吸附镉的作用, 而真正能降低镉的迁移性的因素可能是有机胶体和含铁氧化物类胶体.

(2) 蒙皂石和高岭土吸附的镉大多以可交换态形式存在, 其迁移性、生物危害性较大; 针铁矿和腐植酸吸附的镉形态较稳定, 对镉能起到较好的固定作用; 五种胶体吸附的镉除针铁矿外, 残渣态含量均较低. 五种胶体吸附镉受 pH 值的影响变化程

度从大到小依次为:腐殖酸>针铁矿>高岭土>蒙皂石>氢氧化铝。形态分析与 pH 值影响结果进一步证明土壤中腐殖酸和针铁矿在稳定镉方面起到重要最用。

参考文献:

- [1] Habiba U, Ali S, Farid M, *et al.* EDTA enhanced plant growth, antioxidant defense system, and phytoextraction of copper by *Brassica napus* L [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22: 1534.
- [2] Adrees M, Ali S, Rizwan M, *et al.* The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22: 8148.
- [3] Hseu Z Y, Su S W, Lai H Y, *et al.* Remediation techniques and heavy metal uptake by different rice varieties in metal-contaminated soils of Taiwan; new aspects for food safety regulation and sustainable agriculture [J]. *J Soil Sci Plant Nut*, 2010, 56: 31.
- [4] Xian X F. Chemical partitioning of cadmium, zinc, lead, and copper in soils near smelter [J]. *J Environ Sci Heal A*, 1987, 22: 527.
- [5] 熊毅. 土壤胶体. 第一册: 土壤胶体的物质基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [6] 杨亚提, 王旭东, 张一平, 等. 小分子有机酸对恒电荷土壤胶体 Pb^{2+} 吸附-解吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14: 1921.
- [7] Uddin M K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade [J]. *Chem Eng J*, 2017, 308: 438.
- [8] 胡俊栋, 沈亚婷, 王学军. 土壤胶体在不同饱和度土壤介质中的释放与淋溶行为研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28: 1829.
- [9] 张雪萍. 膨润土的改性及其对部分重金属离子的吸附研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [10] 杨明. $FeOOH$ 的生物化学合成及其对重金属的去除[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [11] 王浩杰. 五种土壤矿物胶体的合成及其对镉、铅、锌吸附特征的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals [J]. *Anal Chem*, 1979, 51: 844.
- [13] 杨杰文, 陈爱珠, 钟来元. 砖红壤对 $Cr(VI)$ 吸附-解吸反应动力学研究[J]. *环境化学*, 2010, 29: 200.
- [14] Xu R K. Interaction between heavy metals and variable charge surfaces [M]//Xu J, Sparks D L. *Molecular environmental soil science*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013.
- [15] 杜志敏. 改良剂对铜镉复合污染土壤的原位修复研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [16] 方至萍, 廖敏, 张楠, 等. 施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38: 3028.
- [17] 唐力, 夏静芬, 芦晨, 等. 宁波市浙贝母主产地土壤重金属形态分析及污染评价[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17: 1171.
- [18] 张斌斌. 渭河关中段河床沉积物中重金属赋存形态分析[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [19] Lu A, Zhang S, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils [J]. *Geoderma*, 2005, 125: 225.
- [20] Ainsworth C C, Gassman P L, Pilon J L, *et al.* Cobalt, cadmium, and lead sorption to hydrous iron oxide: residence time effect [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1615.
- [21] 杨亚提, 张一平. 恒电荷土壤胶体对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的静电吸附与专性吸附特征[J]. *土壤学报*, 2003, 40: 102.
- [22] 李永涛, 刘科学, 张池, 等. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 $CuPbZnCd$ 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23: 1110.
- [23] 罗文倩. 镉在腐殖酸、针铁矿及其复合胶体上的吸附特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [24] 黄明, 李绍峰, 鲁秀国, 等. 磁性高岭土的制备及对铅离子的吸附[J]. *环境工程学报*, 2016, 10: 6439.

引用本文格式:

中文: 牟海燕, 蒋茜茜, 吴晨伟, 等. 五种土壤胶体对重金属镉的吸附特征研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 1125.

英文: Mou H Y, Jiang Q Q, Wu C W, *et al.* Study on the adsorption characteristics of cadmium by five soil colloids [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 1125.