



移动扫码阅读

夏利亚.pH 和有机质对土壤中锌的吸附-解吸特性影响研究[J].能源环境保护,2021,35(3):39-45.

XIA Liya. The effects of pH and organic matter on adsorption and desorption characteristics of zinc in soils[J].

Energy Environmental Protection, 2021, 35(3):39-45.

pH 和有机质对土壤中锌的吸附-解吸特性影响研究

夏利亚

(浙江竞成环境咨询有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要:采用批次平衡法和 Freundlich 模型研究了锌在黑土和潮土中的吸附解吸行为,分析了 pH 和有机质对 Zn 在供试土壤中吸附解吸的影响。结果表明:黑土和潮土对 Zn 都具有较强的吸附能力,吸附-解吸等温线符合 Freundlich 模型,黑土和潮土的吸附-解吸常数(K_f)分别为 1 882.03 和 1 546.66;在 pH 为 4.6~7.4 范围内,土壤对锌的吸附能力随 pH 值的升高而增强;土壤有机质去除后, K_f 变小且经验常数($1/n$)变大,吸附的非线性较强。

关键词:典型土壤;Zn;吸附-解吸;pH;土壤有机质

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)03-0039-07

The effects of pH and organic matter on adsorption and desorption characteristics of zinc in soils

XIA Liya

(Zhejiang Jingcheng Environmental Consulting Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: Batch equilibrium method and Freundlich model were used to study the adsorption and desorption behavior of Zn in black soil and fluvo-aquic soil. The effects of pH and organic matter on the adsorption and desorption of Zn in the tested soils were analyzed. The results showed that both black soil and fluvo-aquic soil had strong adsorption capacity for Zn. The adsorption and desorption isotherms fitted the Freundlich model. The adsorption-desorption constants(K_f) of black soil and fluvo-aquic soil were 1 882.03 and 1 546.66, respectively. The adsorption capacity of zinc increased with the rising of pH when pH is between 4.6 to 7.4. After the removal of soil organic matters, K_f decreased, the empirical constant($1/n$) increased, and the adsorption process showed strong nonlinearity.

Key Words: Typical soil; Zn; Adsorption-desorption; pH; Soil organic matter

0 引言

锌(Zn)是动植物生长发育所必需的微量元素^[1-2],也是重金属元素之一,而 Zn 过量会危害动植物的生长和健康^[3]。近年来,Zn 随着畜禽粪便、化肥农药和污水灌溉等进入到土壤中,并在土壤中积累。土壤被 Zn 污染之后,会导致土壤退化及作物产量和品质的降低,严重时造成作物绝收,失去自然生产力^[4]。Zn 主要以土壤(环境)—植物(动物)—人类所构成的食物链进行积累、迁移

和传递,土壤对 Zn 的吸附-解吸作用控制着土壤供 Zn 和对 Zn 的缓冲能力,决定了植物从土壤中吸收 Zn 的量和土壤可承受的最大外源 Zn 的量^[5-6]。随着农业源重金属污染的加剧,土壤 Zn 的污染问题已经越来越受到关注^[6-10],国内外关于土壤对 Zn 吸附-解吸的研究也比较多。有研究发现,环境因素影响土壤中 Zn 的赋存形态和生物有效性^[11-12],如温度、有机质、pH 值等。因此,本研究采用土壤模拟平衡吸附法,研究 pH 和有机质对不同土壤类型中 Zn 的吸附解吸特性的影响,旨

在从土壤 Zn 的吸附解吸方面探讨不同类型的土壤对 Zn 的供给能力和缓冲能力的影响因素,为优质安全的农业生产提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

实验采用的土壤是黑土和潮土,其中黑土采集自中国科学院东北地理与农业生态研究所生态

实验站(44°0'26" N, 125°24'40" E),潮土采集于河南开封河南大学金明校区(34°49'33" N, 114°18'41" E)。采集耕作层土壤后,除去枯枝落叶、石块等,风干并过 10 目筛备用。供试土壤 pH、有机质和锌含量见表 1,其中土壤 pH 值采用玻璃电极法在水土比为 1:4 的条件下测定,有机质采用重铬酸钾法测定^[13],锌采用 HNO₃-HClO₄-HF 三酸消解法消解,ICP-OES(iCAP-7200)测定^[13]。

表 1 土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤类型	pH	有机质(前)/%	有机质(后)/%	Zn/(mg · kg ⁻¹)
黑土	6.50	1.66	0.45	90.70
潮土	7.40	1.11	0.37	86.26

注:有机质(前)表示为去除有机质前土壤有机质含量,有机质(后)为去除有机质后土壤有机质含量

1.2 实验方法

实验采用间歇平衡震荡法,根据预实验,确定吸附解吸实验采用的水土比为 80:1,吸附、解吸平衡时间为 24 h^[14]。实验中采用 0.01 mol · L⁻¹ NaCl 溶液作为背景溶液,用于模拟溶液离子强度。

根据我国土壤中锌的含量范围^[15-16],吸附解吸实验中,Zn 取 7 个浓度,分别是 80、150、200、250、300、350、400 mg · L⁻¹。实验具体步骤如下^[14,17]:

(1)在 45 mL 离心管中称入 0.25 g 的土样,每个土样设置 3 个平行和 3 个无土空白;

(2)在离心管中依次加入 7 个 20 mL 的不同浓度梯度的 Zn 溶液(采用背景溶液 NaCl 配置),用聚四氟乙烯带封口后旋紧塑料盖,再置于摇床上 140 rpm 震荡 24 h;

(3)震荡完成后,将离心管取出,置于离心机上离心(2 500 rpm, 15 min),取出后测 pH 值,取 10 mL 上清液过 0.22 μm 滤膜,用于 Zn 浓度(原子吸收分光光度计法)分析。

(4)补充 10 mL 新配制的背景溶液,充分混匀后用于解吸实验即封口后振荡 24 h,再重复步骤(3)完成解吸实验。

为分析 pH 对土壤 Zn 吸附解吸的影响,第(3)步中,用 HCl 和 NaOH 调整溶液 pH 后,完成后续实验;为分析有机质的影响,去除有机质后,重新进行实验。

有机质的去除^[18]:分别取上述处理后过 10 目筛的土壤,加入 30%的 H₂O₂ 溶液,充分搅动土壤,使有机质分解,待样品中不再有气泡生成时,再加入少量 H₂O₂ 溶液,重复进行至没有气泡产生

用 0.01 mol · L⁻¹ CaCl₂ 溶液冲洗土样,冲洗后在 4 000 rpm 转速下离心 10 min,整个冲洗过程重复 8 次。最后土壤经过冷冻干燥、研磨过 80 目筛备用。

2 结果与讨论

2.1 数据分析

数据采用 Excel 和 Origin 8.0 进行分析。吸附和解吸实验中 Zn 含量分别通过公式 1 和 2 计算^[17]。

$$C_s = \frac{V}{M_s}(C_i - C_e) \quad (1)$$

$$C_s = C'_s - \frac{C_e V - C'_e V}{M_s} \quad (2)$$

式中:

C_s ——污染物在单位质量土壤上的吸附量(mg · kg⁻¹);

C_i ——污染物初始液相浓度(mg · L⁻¹);

C_e ——污染物液相平衡浓度(mg · L⁻¹);

V ——溶液体积(L);

M_s ——土壤质量(g);

C'_s ——解吸前污染物在单位质量土壤上的吸附量(mg · kg⁻¹);

C'_e ——解吸前污染物液相平衡浓度(mg · L⁻¹);

V' ——倾倒后残留在 EPA 瓶中溶液体积(L);

吸附等温线可以用 Linear 模型、Freundlich 模型和 Langmuir 三种模型描述^[17]。Linear 模型、Langmuir 模型为理论模型,分别基于分配理论和

单层吸附理论;Freundlich 模型则是基于吸附位点不均一旦其吸附能呈指数分布的经验模型。

$$C_s = K_d C_e \quad (3)$$

$$C_s = K_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$C_s = C_{\max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

式中:

K_d ——分配系数($L \cdot kg^{-1}$);

K_f ——Freundlich 的吸附-解吸常数;

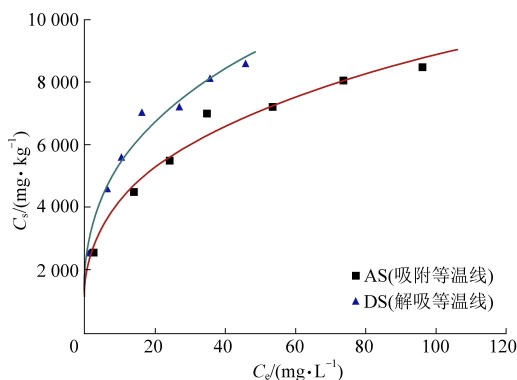
$1/n$ ——吸附的经验常数,表征偏离线性吸附的程度;

C_{\max} ——土壤的饱和吸附量($mg \cdot kg^{-1}$);

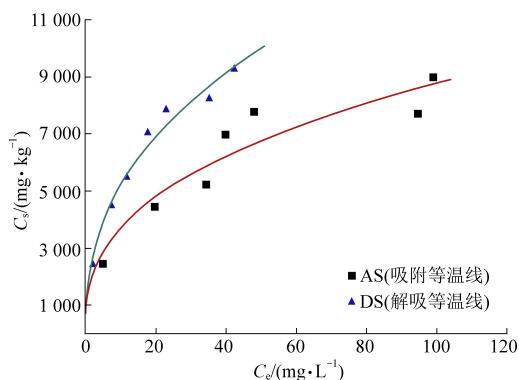
K_L ——Langmuir 的吸附-解吸常数(L/mg);

解吸滞后系数(Hysteresis Index, HI)可以描述污染物解吸可逆性,采用公式 6 计算:

$$HI = \frac{C_{SDS} - C_{SAS}}{C_{SAS}} \bigg|_{C_e} \quad (6)$$



(a) 黑土中吸附-解吸等温线



(b) 潮土中吸附-解吸等温线

图 1 Zn 在不同土壤中的吸附-解吸等温线

Fig.1 Adsorption and desorption isotherms of Zn in different soils

吸附等温线模型的参数如表 2 所示。比较 Linear 模型、Freundlich 模型和 Langmuir 三种模型的 R^2 , Zn 在土壤中的吸附-解吸行为不符合线性拟合($R^2 < 0.80$),符合 Freundlich 和 Langmuir 两个模型($R^2 > 0.95$),这与林玉锁^[20]关于土壤中吸附

式中:

C_{SDS} ——解吸后污染物在单位质量土壤中的吸附量($mg \cdot kg^{-1}$);

C_{SAS} ——解吸前污染物在单位质量土壤中的吸附量($mg \cdot kg^{-1}$)。

2.2 Zn 在土壤中的吸附-解吸特征

Zn 在黑土和潮土中的吸附-解吸等温线分别如图 1 所示。两种土壤对锌都有很强的吸附能力,其吸附-解吸等温线相似。Zn 在两种土壤中的吸附-解吸为非线性吸附,其等温线均为 L-型等温线,Zn 在土壤中的吸附百分比随浓度的升高而降低,即在低浓度下,土壤固相对吸附质的相对亲和力较高,这与窦春英等^[19]研究的农田土壤 Zn 吸附等温线相似。两种土壤对 Zn 的吸附-解吸也有所差异,黑土比潮土的吸附能力略强,但潮土的解吸能力比黑土强。

表 2 Zn 在两种土壤中吸附-解吸模型参数

Table 2 Adsorption-desorption model parameters of Zn in two soils

土壤类型	吸附/解吸	Linear		Freundlich			Langmuir		
		K_d	R^2	K_f	$1/n$	R^2	C_{\max}	K_L	R^2
黑土	吸附	97.92	0.39	1 882.03	0.33	0.97	9 326.12	0.06	0.94
	解吸	205.23	0.42	2 430.79	0.32	0.97	9 357.44	0.14	0.95
潮土	吸附	168.82	0.75	1 546.66	0.38	0.88	10 432.81	0.04	0.89
	解吸	267.48	0.12	2 021.01	0.41	0.96	11 224.87	0.09	0.98

Zn 的解吸过程控制着土壤中吸附的 Zn 向外释放,对其最终归宿有着决定性作用。解吸滞后

系数 HI 可以用来描述污染物解吸的可逆性, HI 越大,可逆性越差。如表 3 所示,黑土中 Zn 解吸的

HI 小于潮土,说明其在黑土中吸附-解吸可逆性较在潮土中好。这可能与黑土本身的性质有关,通过分配作用土壤吸附的 Zn 在解吸过程中有较好的可逆性。解吸过程中,土壤吸附的 Zn 易解吸部分首先从土壤进入溶液,仍吸附在土壤中的 Zn 难解吸,故 HI 随着解吸程度的增加而增大。

表 3 不同土壤中 Zn 的解吸滞后系数 HI
($C_e = 10, 50, 100 \text{ mg/L}$)

Table 3 The desorption hysteresis index of Zn in different soils ($C_e = 10, 50, 100 \text{ mg/L}$)

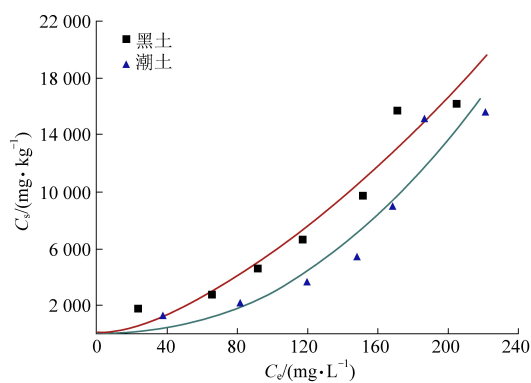
土壤类型	解吸滞后系数 HI		
	$C_e = 10 \text{ mg/L}$	$C_e = 50 \text{ mg/L}$	$C_e = 100 \text{ mg/L}$
黑土	0.28	0.28	0.28
潮土	0.41	0.49	0.53

2.3 pH 对 Zn 吸附-解吸的影响

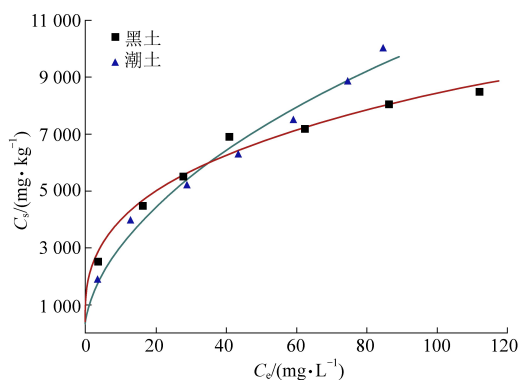
黑土和潮土的 pH 值分别为 6.50 和 7.40。黑土和潮土在相同的 pH 值 4.60、6.50、7.40 情况下其吸附等温线分别如图 2 所示。由图 2 可知,在酸性和碱性条件下,黑土的吸附能力比潮土吸附能力强;在 $pH=6.50$ 条件下, Zn 浓度较低时,黑土对锌的吸附能力大于潮土,但当 C_e 大于 42 时潮土的吸附能超过了黑土的吸附能力。即在 $pH=6.50$ 条件下,黑土的吸附能力略大于潮土,当 C_e 到达一定值时黑土的吸附能力小于潮土。这可能由于在 pH 值相似的情况下,黑土的有机质含量比较高,故对 Zn 的吸附固定量高于潮土^[19]。

吸附等温线模型的参数如表 4 所示。比较 Linear 模型、Langmuir 模型和 Freundlich 模型三种模型的 R^2 可知, Zn 在土壤中的吸附-解吸行为不符合线性拟合,符合 Freundlich 和 Langmuir 两个模型。 Zn 在黑土和潮土中的吸附过程中, $pH=7.40$ 时, $1/n$ 最小,表明 $pH=7.40$ 时,黑土和潮土的 Zn 吸附等温线的非线性程度最高; $pH=4.60$ 时, $1/n$ 最大,表明 $pH=4.60$ 时,黑土和潮土的 Zn 吸附等温线的线性程度较好。分析比较潮土和黑土对 Zn 吸附 K_f 值发现,随着 pH 值的增大, K_f 的值逐渐变大,说明 pH 越大,土壤对 Zn 的吸附能力越强,王静等^[21] 研究 pH 值对宁夏引黄灌区盐碱化土壤重金属吸附-解吸过程影响的结果相似。

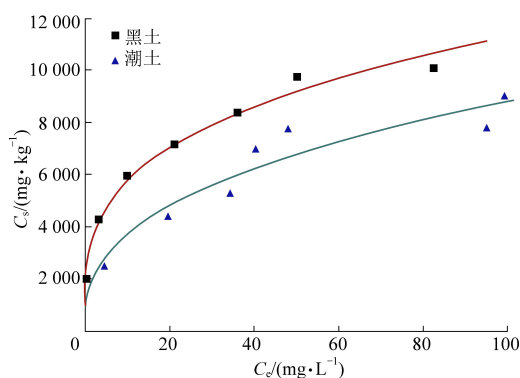
Zn 在不同 pH 条件下 HI 如表 5 所示。当 $pH=7.40$ 时, Zn 的 HI 最小,说明 Zn 在 $pH=7.40$ 时吸附-解吸可逆性最好, $pH=4.60$ 时次之, $pH=6.50$ 时最差。因此, Zn 在不同土壤 pH 条件下可逆性大小为碱性>酸性>中性,这可能与土壤在不



(a) 土壤中 Zn 的吸附等温线($pH=4.60$)



(b) 土壤中 Zn 的吸附等温线($pH=6.50$)



(c) 土壤中 Zn 的吸附等温线($pH=7.40$)

图 2 不同 pH 条件下 Zn 的吸附等温线

Fig.2 Adsorption isotherms of Zn at different pH

同 pH 时吸附解吸的强度有关。可见, pH 对 Zn 在土壤中的吸附-解吸影响较大。

2.4 土壤有机质对 Zn 吸附解吸的影响

去除土壤中有机质后 Zn 的吸附-解吸等温线如图 3 所示。当 C_e 的值比较小时,土壤中的有机质对 Zn 的吸附解吸影响很小,基本可以忽略。但当 C_e 达到一定的值后有机质对土壤对 Zn 的吸附影响较大。而将有机质去除后,土壤对 Zn 的吸附能力增强。比较两种土壤,有机质对黑土的影响大于潮土。

表 4 Zn 在不同土壤 pH 条件下吸附等温模型参数

Table 4 Adsorption-desorption model parameters of Zn at different pH

吸/解	土壤类型	pH	Linear		Freundlich			Langmuir		
			K_d	R^2	K_f	$1/n$	R^2	C_{max}	K_L	R^2
吸附	黑土	4.60	73.22	0.88	4.70	1.54	0.93	3.50×10^8	/	0.85
		6.50	97.92	0.39	1 882.00	0.33	0.97	9 326.00	0.06	0.94
		7.40	165.38	0.35	2908.00	0.29	0.98	10 308.00	0.16	0.94
	潮土	4.60	58.86	0.74	0.10	2.18	0.90	1.60×10^8	/	0.69
		6.50	127.08	0.76	917.50	0.53	0.98	14 033.00	0.02	0.92
		7.40	168.82	0.75	1 546.70	0.38	0.88	10 433.00	0.04	0.89
解吸	黑土	4.60	121.49	0.86	0.70	2.16	0.94	3.53×10^6	/	0.83
		6.50	205.23	0.42	2 431.00	0.32	0.97	9 357.00	0.14	0.95
		7.40	258.93	0.56	3 249.00	0.30	0.94	10 186.00	0.26	0.97
	潮土	4.60	143.01	0.79	13.80	1.51	0.93	1.27×10^6	/	0.61
		6.50	267.48	0.12	2 021.00	0.41	0.96	11 225.00	0.09	0.98
		7.40	331.81	0.82	1 345.00	0.57	0.96	16 488.00	0.04	0.91

表 5 不同 pH 下 Zn 的解吸滞后系数 HI ($C_e = 10, 50, 100$ mg/L)Table 5 The desorption hysteresis index of Zn at different pH ($C_e = 10, 50, 100$ mg/L)

土壤类型	条件	解吸滞后系数 HI		
		$C_e = 10$ mg/L	$C_e = 50$ mg/L	$C_e = 100$ mg/L
黑土	pH=4.60	0.12	0.13	0.13
	pH=6.50	0.28	0.28	0.28
	pH=7.40	-0.35	0.74	1.65
潮土	pH=4.60	0.61	0.73	0.78
	pH=6.50	22.10	6.94	4.01
	pH=7.40	0.41	0.49	0.53

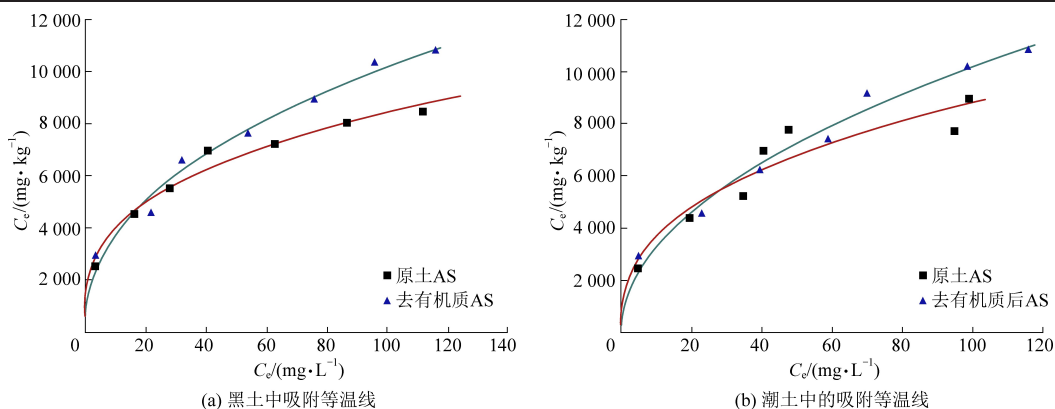


图 3 Zn 在原土和去除有机质的土壤中的吸附等温线

Fig.3 Adsorption isotherms of Zn in original soil and organic matter-removed soil

去除土壤中有有机质后,其吸附等温线模型的参数如表 6 所示。比较 Linear 模型、Freundlich 模型和 Langmuir 三种模型的 R^2 可知,Zn 在土壤中的吸附-解吸行为不符合线性拟合,用 Freundlich 模型模拟其吸附等温线最好。黑土中,Zn 在去有机质前 $1/n$ 是 0.33(表 2),去过有机质后 $1/n=0.43$,

说明去过有机质后 Zn 的吸附等温线非线性程度减弱,在潮土中也具有相似的变化。可知,Zn 在去除有机质后非线性程度减弱。与表 2 相比,去除有机质前黑土和潮土的 K_f 分别为 1 882.03 和 1 546.66,去除有机质后黑土和潮土的 K_f 分别为 1 379.27 和 1 073.79,表明去除有机质后黑土和潮

土的吸附能力都有减弱。这可能与去除有机质后使土壤的吸附位点减少有关。姜延等^[22]也发现

随着土壤有机质含量的降低,土壤对 Zn 的吸附能力逐渐降低。

表 6 去除有机质后的吸附-解吸模型参数

Table 6 Adsorption-desorption model parameters of Zn after removal of organic matter

吸/解	土壤类型	Linear		Freundlich			Langmuir		
		K_d	R^2	K_f	$1/n$	R^2	C_{max}	K_L	R^2
吸附	黑土	111.19	0.461	1 379.27	0.434	0.976	13 985.4	0.026	0.911
	潮土	120.97	0.618	1 073.79	0.489	0.963	14 662.4	0.02	0.886
解吸	黑土	15.62	0.779	70.35	0.571	0.921	864.3	0.047	0.911
	潮土	11.34	0.826	0.35	1.988	0.98	8 049 540	1.408	0.783

去除有机质后 Zn 的 HI 如表 7 所。去除有机质后 Zn 的 HI 减小,说明 Zn 在去除土壤有机质后吸附-解吸可逆性增强,土壤中的有机质在很大程度上影响 Zn 在土壤中的吸附-解吸可逆性。吸附

-解吸是一个动态平衡过程,解吸的驱动力是该污染物在溶液的溶解度和其实际浓度的差值。当去除土壤中的有机质后,解吸驱动力迅速增大,从而导致 HI 减小,吸附-解吸可逆性增强。

表 7 去除有机质后 Zn 的解吸滞后系数 HI ($C_e = 10, 50, 100$ mg/L)

Table 7 The desorption hysteresis coefficient of Zn in organic matter-removed soil ($C_e = 10, 50, 100$ mg/L)

土壤类型	解吸滞后系数 HI		
	$C_e = 10$ mg/L	$C_e = 50$ mg/L	$C_e = 100$ mg/L
黑土	-0.930 0	-0.910 0	-0.904 0
潮土	-0.989 4	-0.880 0	-0.658 7

3 结论

Zn 在黑土和潮土中的吸附能力都较强,而在黑土中的吸附能力强于潮土;Zn 在黑土中的解吸的可逆性优于潮土。随着土壤 pH 增大,土壤对 Zn 的吸附能力增强;土壤有机质可促进土壤对 Zn 的吸附。

(1) Zn 在黑土和潮土中的吸附能力都较强,吸附-解吸等温线符合 Freundlich 模型;黑土 $K_f(1 882.02) >$ 潮土 $K_f(1 546.66)$,黑土的 $1/n$ 小于潮土,表明吸附能力比潮土强,且黑土对锌的吸附等温线非线性程度高于潮土。

(2) pH 对 Zn 在黑土和潮土的影响相似,随着 pH 值增大, K_f 的值逐渐变大,表明碱性条件下,土壤对锌的吸附能力最强,酸性条件下 Zn 的吸附能力最弱。

(3) 土壤去除有机质后, K_f 值变小, $1/n$ 变大,表明土壤有机质在 Zn 的吸附过程中其重要作用,且吸附表现出较强的非线性。

参考文献

[1] 凌婉婷,李学垣,贺纪正,等. 土壤表面电荷特征与重金属吸附-解吸的相互关系 [J]. 土壤通报, 2002 (6): 456-458.

[2] 景爽,陈娜,郝喆,等. 螯合剂修复对尾矿土壤性质和紫穗槐生长影响及其相关性分析 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (2): 30-36.

[3] 陈世宝,林蕾,魏威,等. 基于不同测试终点的土壤锌毒性阈值及预测模型 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (5): 922-930.

[4] 陈玉真. 土壤锌对植物的毒害效应及临界值研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 41-44.

[5] 刘青付. 土壤-蔬菜系统中的锌及其转移规律的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 12-14.

[6] 姜延,马秀兰,郭亚馨,等. 不同分层土壤对锌的吸附解吸特性 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (3): 99-107.

[7] 李钰飞,李吉进,许俊香,等. 铜、锌污染梯度对自然林地和农田土壤线虫群落的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (6): 1492-1503.

[8] 马其雪,孙向阳,李素艳,等. 园林绿化废弃物堆肥对铅、锌污染土壤上小白菜生理特性的影响 [J]. 浙江农业学报, 2020, 32 (11): 2027-2034.

[9] 李晓倩,焦伟,鲁利民,等. 中原油田周边农田重金属含量特征、来源解析与风险评估 [J]. 能源环境保护, 2020, 34 (3): 77-84.

[10] Liu Shichao, Xie Zhonglei, Zhu Yintao, et al. Adsorption characteristics of modified rice straw biochar for Zn and in-situ remediation of Zn contaminated soil [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22: 101388.

[11] 张亦婷. 黑钙土外源锌形态及生物有效性随土壤主要环境因素的变化研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2018: 18

- 24.
- [12] 荣立杰, 赵兰坡, 吕岳, 等. 不同母质黑钙土对锌的吸附-解吸特性 [J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39 (1): 49-54.
- [13] 林大仪. 土壤学实验指导 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 145-166.
- [14] 朱伟刚, 段艳艳, 蒙耿剑, 等. 四环素和土霉素在 Cu 污染土壤中的吸附和解吸特征 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2020, 50 (1): 14-21.
- [15] 王子腾, 耿元波, 梁涛. 中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (6): 55-63.
- [16] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律 [J]. 中国农业科学, 1994 (1): 30-37.
- [17] 聂兆君, 秦世玉, 王媛, 等. 施氮量对石灰性潮土锌吸附和解吸特性的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2019, 53 (1): 135-141.
- [18] Ren Wenjie, Wang Meie, Zhou Qingxing. Adsorption characteristics and influencing factors of chlorimuron-ethyl in two typical Chinese soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75 (4): 1394-1401.
- [19] 窦春英, 徐温新, 叶正钱, 等. 6 种典型农田土壤的锌吸附-解吸特性 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27 (1): 8-14.
- [20] 林玉锁. Langmuir, Temkin 和 Freundlich 方程应用于土壤吸附锌的比较 [J]. 土壤, 1994 (5): 269-272.
- [21] 王静, 肖国举, 毕江涛, 等. pH 对宁夏引黄灌区盐碱化土壤重金属吸附-解吸过程的影响 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (10): 1782-1787.
- [22] 姜延, 马秀兰, 郭亚馨, 等. 不同分层土壤对锌的吸附解吸特性 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (3): 99-107.