



温度及腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中吸附 - 解吸影响研究

李杰颖

抚顺矿业集团有限责任公司生态环境中心 抚顺 113008

摘 要: 以棕壤为供试材料, 探讨不同温度以及添加腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中的吸附 - 解吸影响。结果表明: 不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的等温吸附过程, 以 Freundlich 方程和 Langmuir 方程最优, 其次是 Henry 方程和 Temkin 方程。腐植酸能促进棕壤对 Hg^{2+} 的吸附, 而减弱对 Hg^{2+} 的解吸。随着反应温度的提升, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附能力增强而解吸能力减弱。不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的吸附量与解吸量之间存在很好的相关关系。添加腐植酸前后, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附均为自发的吸热过程, 温度升高有益于吸附反应的进行。该结果可以为研究 Hg^{2+} 在棕壤中的迁移转化和对植物的毒性以及环境风险评估提供理论参考。

关键词: 温度; 腐植酸; Hg^{2+} ; 棕壤; 吸附 - 解吸

中图分类号: TQ314.1, TQ028.1⁺5 文章编号: 1671-9212(2024)04-0047-07

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.04.007

Effects of Temperature and Humic Acid on Adsorption-desorption of Hg^{2+} in Brown Soil

Li Jieying

Center of Ecological and Environment, Fushun Mining Group Co. Ltd., Fushun, 113008

Abstract: The effects of temperature and humic acid on Hg^{2+} sorption-desorption in brown soil were also studied. The results showed that the Freundlich and Langmuir equations were the best for the isothermal adsorption of Hg^{2+} on brown soil at different temperatures, followed by the Henry and Temkin equations. Humic acid promoted the adsorption of Hg^{2+} in brown soil and weakened the desorption of Hg^{2+} . With an increase in reaction temperature, the adsorption capacity of Hg^{2+} in brown soil increased and the desorption capacity decreased. There was a good correlation between Hg^{2+} adsorption and desorption quantity in brown soil at different temperatures. The adsorption of Hg^{2+} by brown soil before and after adding humic acid was a spontaneous endothermic process. Temperature increase was beneficial for conducting the adsorption reaction. This can provide a theoretical reference for the study of Hg^{2+} transport, transformation and plant toxicity in brown soil, as well as for environmental risk assessment.

Key words: temperature; humic acid; Hg^{2+} ; brown soil; adsorption-desorption

腐植酸占土壤有机质的 60% ~ 90%^[1]。因其含有多种活性官能团, 可与土壤中重金属发生交换吸附、络(螯)合吸附、专性吸附等, 改变土壤中重金属的赋存形态, 降低污染物浓度^[2, 3]。腐植酸的存在, 使得土壤共存体系中游离的重金属离子数

量骤减, 向地上植株部分迁移的游离重金属离子数量也随之减少, 使作物免受重金属毒害。而且当共存体系的环境发生变化时, 也会引起腐植酸性质的改变或络(螯)合物的溶解性变化而影响其对重金属离子的吸附^[4]。汞(Hg)是毒性最强的重金属

[收稿日期] 2024-05-06

[作者简介] 李杰颖, 女, 1976 年生, 高级工程师, 主要从事环保管理、污染防治方面的研究, E-mail: lijieying340@126.com。

环境污染物之一，由于具有持久性、长距离迁移性和生物累积性被各国政府和联合国环境规划署（UNEP）、世界卫生组织（WHO）、联合国粮食及农业组织（FAO）等国际组织列为全球性污染物^[5, 6]，Hg 在自然环境中存在形态不同，迁移活性和生物有效性各不相同，形态不同其毒性和环境行为也不同^[7]。土壤中可溶性 Hg 含量很低，但活性很高，容易在土壤颗粒表面发生吸附-解吸，也可与土壤中的其他阴离子发生沉淀-溶解，还可与土壤中的有机质、铁锰氧化物等发生络合^[8]，进入土壤中的 Hg 在发生一系列物理吸附、化学吸附

后活性降低，对植物的毒性减弱^[9]。温度是影响重金属吸附效果的重要因素，对重金属的去除率与在吸附介质上的形态分布均有较显著影响^[10]。综上，研究不同温度下腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中吸附-解吸影响，可以为研究 Hg^{2+} 在土壤中的迁移转化和对植物的毒性，以及环境风险评估提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	CEC [cmol(+)/kg]	有机质 (g/kg)	总汞 (mg/kg)	颗粒组成 (%)		
				>0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	<0.002 mm
6.55	17.01	16.21	0.048	64.55	9.78	25.67

1.2 供试腐植酸

由辽宁富友肥业有限公司提供，总腐植酸含量 472.60 g/kg。

1.3 等温吸附-解吸实验

(1) 吸附实验。

称取上述供试土壤样品及腐植酸，使总腐植酸比例为 0 和 10%，将不同比例总腐植酸含量供试样品 1.0000 g (± 0.0005 g) 置于 50 mL 离心管中，再加入一定量的 Hg^{2+} 标液，以 0.01 mol/L 的 NaNO_3 溶液作为支持电解质，使 Hg^{2+} 的浓度形成梯度：0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0、10.0 mg/L，并使土：液 = 1：20，于 15、25、35 °C 恒温振荡 4 h，离心 10 min，过滤，采用原子荧光光度法测定上清液中 Hg^{2+} 浓度。

(2) 解吸实验。

把上述离心管中的土壤用 95% 的酒精清洗（以去除测定干扰）后，分别加入 0.01 mol/L 的 NaNO_3 溶液 20 mL 进行解吸实验，15、25、35 °C 恒温振荡 4 h，离心 10 min，过滤，采用原子荧光光度法测定上清液中 Hg^{2+} 浓度。

土壤对 Hg^{2+} 的等温吸附解吸过程分别用

Langmuir、Freundlich、Henry 和 Temkin 等温吸附方程拟合。

1.4 等温吸附方程^[11, 12]

Langmuir 方程表达式： $c_1/q_{\text{ad}}=1/q_{\text{adm}}K_1+c_1/q_{\text{adm}}$ 。

式中：

c_1 —吸附平衡液中 Hg^{2+} 浓度 (mg/L)； q_{ad} — Hg^{2+} 吸附量 (mg/kg)； q_{adm} — Hg^{2+} 最大吸附量 (mg/kg)； K_1 —反应土壤颗粒与重金属离子之间吸附强度因子。

Freundlich 方程表达式： $\ln q_{\text{ad}}=\ln K_2+(1/n)\ln c_1$ 。

式中：

q_{ad} — Hg^{2+} 吸附量 (mg/kg)； c_1 —吸附平衡液中 Hg^{2+} 浓度 (mg/L)； K_2 —反应土壤颗粒与重金属离子之间吸附强度因子。

Henry 方程表达式： $q_{\text{ad}}=c_1K_{\text{ad}}+A$ 。

式中：

q_{ad} — Hg^{2+} 吸附量 (mg/kg)； c_1 —吸附平衡液中 Hg^{2+} 浓度 (mg/L)； A 和 K_{ad} 均为常数。

Temkin 方程表达式： $q_{\text{ad}}=A+B\ln c_1$ 。

式中：

q_{ad} — Hg^{2+} 吸附量 (mg/kg)； c_1 —吸附平衡液中 Hg^{2+} 浓度 (mg/L)； A 和 B 均为常数。



1.5 吸附量、解吸量计算

吸附量 $q_{ad} \text{ (mg/kg)} = (c_0 - c) \times V / (1000 \times W)$

解吸量 $q_d \text{ (mg/kg)} = c_d \times V / (1000 \times W)$

式中:

c_0 — Hg^{2+} 初始浓度 (mg/L); c —吸附平衡时 Hg^{2+} 浓度 (mg/L); c_d —解吸平衡时 Hg^{2+} 浓度 (mg/L); W —土壤样品质量 (g); V —平衡液体积 (mL)。

2 结果与讨论

2.1 吸附特征

腐植酸的特殊性质造就了它加入土壤必然对金属离子在土壤中的吸附 - 解吸有巨大的影响。

腐植酸的特殊性质表现为: ①表面带负电荷, 边缘带正电荷; ②有很高的阳离子交换量; ③有比黏土颗粒更大的比表面积; ④是一种聚电解质; ⑤含有大量的活性官能团。这一属性决定了它对重金属离子有很强的吸附能力^[4, 13]。 Hg^{2+} 初始浓度在 0.5 ~ 10 mg/L 范围内进行实验研究, 采用 Langmuir 方程、Freundlich 方程、Henry 方程及 Temkin 方程对不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的等温吸附过程进行拟合, 方程拟合参数见表 2。可以看出, 这 4 种方程均能较好地描述不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的等温吸附过程, 从相关系数 r 可知, 以 Freundlich 方程和 Langmuir 方程最优, 其次是 Henry 方程和 Temkin 方程。

表 2 不同处理吸附等温线拟合特征值
Tab.2 Sorption isotherm fitting eigenvalues under different processing

处理	温度 (°C)	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
		q_{adm}	K_1	r	K_2	n	r
0 HA	15	227.27	1.2941	0.9986	184.19	1.2413	0.9986
	25	312.50	1.3913	0.9983	271.41	1.1463	0.9992
	35	526.32	1.5789	0.9997	307.04	1.1559	0.9999
10% HA	15	294.12	1.5882	0.9993	230.53	1.4010	0.9958
	25	384.62	1.7333	0.9999	365.88	1.2503	0.9944
	35	555.56	2.9446	0.9967	422.06	1.2950	0.9986

表 2 续

处理	温度 (°C)	Henry 方程			Temkin 方程		
		K_{ab}	A	r	A	B	r
0 HA	15	0.1662	15.711	0.9922	144.41	44.708	0.9399
	25	0.2698	10.295	0.9962	168.74	49.382	0.9298
	35	0.3055	11.961	0.9944	177.00	49.522	0.9333
10% HA	15	0.2021	25.968	0.9749	160.57	41.240	0.9535
	25	0.3661	19.448	0.9869	191.04	47.431	0.9507
	35	0.4685	19.493	0.9886	199.01	45.487	0.9387

各方程均有明确的物理意义。Langmuir 方程中参数 q_{adm} 能反映该实验条件下的最大吸附量, 通过比较 q_{adm} 的大小来判断不同吸附剂对同一吸附质的吸附容量。从计算结果可以看出, 随反应温度的

增高, 棕壤对 Hg^{2+} 的最大吸附量增高, 从 15 °C 时的 227.27 mg/kg 到 25 °C 时的 312.50 mg/kg, 当温度升高到 35 °C 时, 棕壤对 Hg^{2+} 的最大吸附量达 526.32 mg/kg; 添加腐植酸后棕壤对 Hg^{2+} 的最大

吸附量的从 15 °C 时的 294.12 mg/kg 到 25 °C 时的 384.62 mg/kg, 当温度升高到 35 °C 时, 对 Hg^{2+} 的最大吸附量达 555.56 mg/kg。表 2 数据明确显示, 同一温度下, 添加腐植酸的处理, 棕壤对 Hg^{2+} 的最大吸附量高于未添加腐植酸的处理, K_2 也表现出相同的趋势。 q_{adm} 值与 K_2 越大, 表示棕壤对 Hg^{2+} 的吸附能力越强, 添加腐植酸提高了棕壤对 Hg^{2+} 的吸附能力。 K_1 与 n 值可以对吸附强弱做出判断。本研究结果发现, K_1 呈现规律性变化, 随温度升高, K_1 增大, 而且在同一反应温度下, 添加腐植酸处理的 K_1 值明显大于未添加腐植酸的处理; 对 n 值来说, 并未表现出一致的规律, 但 n 值变化并不大。这也表明, 在考量土壤对重金属离子的吸附作用时, 不能用单一指标去衡量, 吸附作用力的大小、强弱是多因素综合作用的结果, 重金属含量水平、在土壤中的赋存形态、土壤质

地因素、土壤有机质含量、微生物活性以及反应条件 (温度、pH、离子强度) 等, 均会对实验结果产生影响。

2.2 不同温度下腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中吸附量 - 解吸量的影响

吸附反应包含了物理吸附和化学吸附, 物理吸附一般可以自发进行, 而化学吸附伴随着体系能量的变化, 温度升高, 参与反应的分子获得能量, 活化分子数量和比率增加, 分子间的有效碰撞次数增多, 反应速率加大。在土壤体系的反应中, 微生物参加反应并影响反应酶的活性, 而微生物的生理活性有一定的温度范围, 在适宜的温度范围内, 微生物活性增强, 所以说体系温度对土壤的吸附能力也是有影响的。

表 3 为不同温度下腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中吸附量 - 解吸量的影响。

表 3 不同温度下腐植酸对 Hg^{2+} 在棕壤中的吸附量 - 解吸量的影响

Tab.3 Effects of humic acid on adsorption and desorption quantity of Hg^{2+} in brown soil at different temperatures

处理	Hg^{2+} 浓度 (mg/L)	吸附量 (mg/kg)			解吸量 (mg/kg)		
		15 °C	25 °C	35 °C	15 °C	25 °C	35 °C
0 HA	0.5	9.46	9.56	9.62	0.21	0.22	0.23
	1.0	17.77	18.99	19.19	0.43	0.45	0.49
	2.0	37.72	38.08	38.25	1.10	1.16	1.19
	3.0	56.18	56.68	57.17	1.80	1.89	1.98
	4.0	74.42	75.35	76.13	5.00	5.17	5.28
	5.0	92.79	94.26	95.01	6.48	6.65	6.78
	6.0	111.31	112.75	113.77	7.89	8.04	8.18
	8.0	147.52	149.86	151.11	10.50	10.91	11.12
	10.0	183.08	186.35	187.83	13.30	13.93	14.53
10% HA	0.5	9.72	9.74	9.84	0.19	0.19	0.20
	1.0	19.38	19.48	19.60	0.39	0.41	0.43
	2.0	38.50	38.89	39.13	0.99	1.04	1.10
	3.0	57.44	58.31	58.58	1.70	1.76	1.83
	4.0	76.29	77.53	77.95	3.90	4.35	4.60
	5.0	94.95	96.57	97.09	5.50	5.81	6.12
	6.0	112.45	114.74	116.16	6.82	7.39	7.87
	8.0	148.10	152.50	154.32	9.33	10.26	11.01
	10.0	183.30	190.39	192.15	12.01	13.28	14.33



从表 3 可以看出, 2 种不同处理表现出相同的趋势。在 Hg^{2+} 初始浓度相同的条件下, 在 15 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 随着体系反应温度的升高, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附量 - 解吸量呈上升趋势; 随着 Hg^{2+} 初始浓度的增大, 体系反应温度的升高, 吸附量 - 解吸量也随之增大。温度升高, 有利于热力学化合态趋于稳定, 有利于表层吸附向内层扩散, 也增加了腐植酸和 Hg^{2+} 碰撞的机会, 有利于土壤矿物对有机质的固持^[14, 15]。在温度相同, Hg^{2+} 初始浓度相同的情况下, 添加腐植酸处理对 Hg^{2+} 的吸附能力要强于未添加腐植酸的处理。在同一处理下, 如果用吸附量与解吸量的差值来表示该条件下的净吸附量, 从表 3 还可看出, 在其他条件一定, 随温度的升高, 净吸附量也随之增大。表明添加腐植酸处理, 随着反应温度的提升, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附能力增强而解吸能力减弱。这可能是外源腐植酸的加入, 降低了土壤原有 pH, 也打破了土壤原有的吸附 - 解吸平衡, 从而使各相态 Hg 之间重新分配^[4]; 外源腐植酸的加入增加了土壤中微生物的活性, 改变了重金属的活性所致^[16]。本研究结果与冯素萍等^[17]的研究结果基本一致, 认为升高温度有利于增大反应的驱动力。对 Hg^{2+} 在东北黑土和江西红壤吸附解吸特征研究中发现, 东北黑土对 Hg^{2+} 的吸附明显高于江西红壤, 与黑土较高的有机质含量有关^[18]。本研究表明棕壤对 Hg^{2+} 的吸附是吸热反应, Hg^{2+} 在土壤中的迁移可能会受到季节变化的影响^[19]。

本研究中, 添加腐植酸显著降低了棕壤对 Hg^{2+} 的解吸, 这主要是腐植酸吸附能力强, 可以减缓 Hg 的络 (螯) 物的解吸或隔离, 产生了解吸滞后现象^[20, 21]。

采用线性方程、指数方程、乘幂方程、多项式方程对不同温度下棕壤中 Hg^{2+} 的吸附量 - 解吸量进行拟合^[22], 拟合结果见表 4, 多项式方程、线性方程、乘幂方程的 r 值均大于 0.99, 达极显著相关 ($r>0.798$), 指数方程稍差也达极显著相关, 表明这 4 个方程都能很好地描述不同温度下添加腐植酸前后棕壤中 Hg^{2+} 的吸附量与解吸量之间的关系。表明不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的吸附量与解吸量之间存在很好的相关关系。

2.3 吸附热力学研究

吸附过程包含了吸附过程的标准自由能改变量 (ΔG , kJ/mol)、焓变 (ΔH , kJ/mol)、熵变 [ΔS , kJ/(mol·K)], 可以根据下列方程进行计算, 结果见表 5。

$$\Delta G = -RT \ln K_a$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

式中:

K_a —吸附平衡常数, L/mol; R —气体摩尔常数 8.314 J/(mol·K); T —反应溶液绝对温度, K。 K_a —由 Langmuir 等温式获得, 再以标准自由能改变量和反应溶液绝对温度作 ΔG - T 曲线图, 方程的截距和斜率分别为吸附过程焓变 ΔH 和熵变 ΔS ^[23, 24]。

表 4 不同温度下腐植酸对棕壤中 Hg^{2+} 吸附量和解吸量的关系
Tab.4 Relationship between adsorption and desorption quantity of Hg^{2+} by humic acid in brown soil at different temperatures

处理	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	线性方程			指数方程		
		$y=kx+b$			$y=ae^{bx}$		
		k	b	r	a	b	r
0 HA	15	0.0797	-1.2779	0.9907	0.4034	0.0232	0.9199
	25	0.0818	-1.3614	0.9916	0.4209	0.0228	0.9197
	35	0.0837	-1.4278	0.9919	0.4416	0.0224	0.9215
10% HA	15	0.0715	-1.3416	0.9919	0.3447	0.0233	0.9311
	25	0.0760	-1.4590	0.9919	0.3669	0.0227	0.9269
	35	0.0810	-1.6820	0.9917	0.3832	0.0227	0.9276

表 4 续

处理	温度 (°C)	乘幂方程			多项式方程			
		$y=ax^b$			$y=ax^2+bx+c$			
		a	b	r	a	b	c	r
0 HA	15	0.0063	1.4860	0.9904	4E-05	0.0723	-1.6030	0.9910
	25	0.0063	1.4924	0.9907	5E-05	0.0722	-1.0733	0.9921
	35	0.0067	1.4805	0.9917	7E-05	0.0698	-1.0068	0.9930
10% HA	15	0.0052	1.4973	0.9933	0.0001	0.0525	-0.7769	0.9946
	25	0.0051	1.5097	0.9930	1E-04	0.0576	-0.8763	0.9949
	35	0.0051	1.5201	0.9932	0.0001	0.0578	-0.8914	0.9948

表 5 热力学参数

Tab.5 Thermodynamic parameters

处理	ΔG (kJ/mol)			ΔH (kJ/mol)	ΔS [J/(mol·K)]
	288 K	298 K	308 K		
0 HA	-0.620	-0.82	-1.17	7.36	27.61
10% HA	-1.077	-1.36	-2.77	22.96	82.89

从表 5 可以看出, Hg^{2+} 在棕壤中的吸附自由能变量 $\Delta G < 0$, 说明添加腐植酸前后, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附是自发过程。焓变 $\Delta H > 0$, 说明 Hg^{2+} 在棕壤中的吸附是吸热过程, 根据方程 $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$, 可以看出温度升高有益于吸附反应的进行, 这一结果与 Ren X 等 [25] 的研究结果相一致。 ΔS 是混乱度。一般认为, 化学吸附所需的焓变 $\Delta H > 42$ kJ/mol, 小于这个值反应就以物理吸附为主, 但物理吸附是吸附质和吸附剂靠范德华力的作用完成的, 没有新键的产生, 不需要活化能, 因此被吸附的吸附质脱附速率很快; 而化学吸附伴随着新化学键的生成, 需要活化能, 被吸附的吸附质脱附速率很慢, 显然单单以实验的焓变 ΔH 值的大小来判断是物理吸附还是化学吸附是片面的, 要从反应的历程以及吸附 - 解吸之间的关系, 所参加吸附反应的吸附质、吸附剂的性质综合考虑。

3 结论

(1) Langmuir 方程、Freundlich 方程、Henry 方程及 Temkin 方程均能较好地描述不同温度下棕

壤对 Hg^{2+} 的等温吸附过程, 以 Freundlich 方程和 Langmuir 方程最优, 其次是 Henry 方程和 Temkin 方程。同一温度下, 添加腐植酸增大了棕壤对 Hg^{2+} 的最大吸附量。

(2) 腐植酸能促进棕壤对 Hg^{2+} 的吸附, 减弱对 Hg^{2+} 的解吸, 随着反应温度的提升, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附能力增强而解吸能力减弱。不同温度下棕壤对 Hg^{2+} 的吸附量与解吸量之间存在很好的相关关系。

(3) 添加腐植酸前后, 棕壤对 Hg^{2+} 的吸附均为自发的吸热过程, 温度升高有益于吸附反应的进行。

本实验仅对室内自制 Hg 污染土壤进行了研究, 以环境中 Hg 污染土壤为对象的研究将在后续开展, 具体内容涉及 Hg 污染土壤中汞形态的分析, 腐植酸对 Hg 在棕壤中转化的影响, 腐植酸影响 Hg 在棕壤中吸附的机理等。

参考文献

[1] 陈红凤. 土壤腐殖酸在多组分矿物上的选择吸附特性



- 及作用机制量化[D]. 华中农业大学博士学位论文, 2018.
- [2] Liu Y Y, Xu Y M, Qin X, et al. Effects of water and organic manure coupling on the immobilization of cadmium by sepiolite[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 798 ~ 808.
- [3] 任汉儒, 任珺, 陶玲, 等. 腐殖酸复配凹凸棒石对土壤 Cd 污染的钝化效果[J]. *非金属矿*, 2023, 46(4): 67 ~ 71.
- [4] 李杰颖, 杜立宇, 周晓莹, 等. 褐煤腐植酸对棕壤汞形态的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(8): 214 ~ 219.
- [5] 王晓晨, 代宇楠, 乔显亮, 等. 农田土壤中汞的吸附分配行为研究[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(6): 115 ~ 123.
- [6] She J B, Ip Carman C M, Tang Chole W Y, et al. Spatial and temporal variations of mercury in sediments from Victoria Harbour, Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 5(54): 480 ~ 486.
- [7] Kotnik J, Sprovieri F, Ogrinc N, et al. Mercury in the Mediterranean, part I: spatial and temporal trends[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2014, 21: 4063 ~ 4080.
- [8] Revis N W, Osborne T R, Holdsworth G. Distribution of mercury species in soil from a mercury contaminated[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 45: 105 ~ 113.
- [9] 朱小翠, 青长乐, 皮广洁. 土壤汞形态及其影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(1): 94 ~ 100.
- [10] 王鑫宇, 张曦, 孟海波, 等. 温度对生物炭吸附重金属特性的影响研究[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(2): 150 ~ 158.
- [11] Wang S W, Dong Y H, He M L, et al. Characterization of GMZ bentonite and its application the adsorption of Pb(II) from aqueous solutions[M]. *Applied Clay Science*, 2009, 43: 164 ~ 171.
- [12] 徐振涛, 梁鹏, 吴胜春, 等. 不同生物质炭对土壤中有效态汞的影响及其吸附特征分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 832 ~ 841.
- [13] 李祥平, 张飞, 齐剑英, 等. 土壤有机质对铊在土壤中吸附 - 解吸行为的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 6(11): 4245 ~ 4250.
- [14] Islam M A, Morton D W, Johnson B B, et al. Adsorption of humic and fulvic acids onto a range of adsorbents in aqueous systems, and their effect on the adsorption of other species: a review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 247: 116949.
- [15] 周灿瑶, 戴伟, 栾亚宁, 等. 不同温度条件下赤铁矿对腐殖酸的吸附性能和机制研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(3): 418 ~ 425.
- [16] 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 等. 腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响[J]. *环境科学*, 2017(5): 2036 ~ 2045.
- [17] 冯素萍, 刘慎坦. 土壤中腐殖酸对汞的吸附特性研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 941 ~ 944.
- [18] 刘佳. 重金属汞在中国两种典型土壤中的吸附解吸特性研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2008.
- [19] 夏焜, 李云桂, 龚梦落, 等. 温度和冻融对生物炭增强退化土壤吸附镉的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(7): 53 ~ 60.
- [20] 林婉婷, 夏建国, 肖欣娟, 等. 不同热解温度茶渣生物炭对茶园土壤吸附解吸 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 326 ~ 331.
- [21] 李杰颖, 周晓莹. 腐殖酸对汞在棕壤中吸附 - 解吸的影响[J]. *中国农业文摘 - 农业工程*, 2024, (1): 26 ~ 30.
- [22] 郭令, 王艳娇, 张莹, 等. 融雪剂对 Cd 在土壤中吸附规律及动力学影响[J]. *土壤科学*, 2019, 7(3): 226 ~ 232.
- [23] 杜建军, 张一平, 白锦麟. 陕西几种土壤磷吸附特征及温度效应的研究[J]. *土壤通报*, 1993, 24(6): 241 ~ 243.
- [24] 王金贵, 吕家珑, 曹莹菲. 镉和铅在 2 种典型土壤中的吸附及其与温度的关系[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 254 ~ 259.
- [25] Ren X, Wang S, Yang S, 等著, 任翠领译. 接触时间、pH 值、土壤中腐植酸/富里酸、离子强度和温度对 MX-80 膨润土吸附 U(VI) 的影响[J]. *腐植酸*, 2013(6): 30 ~ 36.