

白浆土对腐殖酸的吸附等温线和动力学研究

孙元宏, 赵兴敏, 赵兰坡, 张晋京

(吉林农业大学资源与环境学院, 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

摘要: 白浆土是吉林省和黑龙江省东部地区的主要农田土壤之一, 研究白浆土对腐殖酸的吸附作用, 可为探究白浆土的固碳潜力提供理论依据。采用批量平衡法, 分析不同有机碳含量的白浆土及其组分(包括去有机质土壤、粉粒、黏粒)对腐殖酸的吸附动力学和等温吸附特性。结果表明: 随吸附时间的延长, 白浆土及其各组分对腐殖酸的吸附量逐渐增加; 整个吸附动力学过程可划分为快速(0~30 min)和慢速(30~480 min)反应阶段, 伪二级动力学方程的拟合效果优于 Elovich、双常数和伪一级动力学方程。白浆土及其各组分对腐殖酸的吸附量随腐殖酸初始浓度的增加逐渐增大, Langmuir 方程的拟合效果通常优于 Freundlich 方程和 Temkin 方程。随白浆土有机碳含量的增加, 其对腐殖酸的最大吸附量分别为 26.9、24.1、15.6 mg/g。而白浆土不同组分相比, 最大吸附量的顺序依次为黏粒>去有机质土壤>粉粒, 黏粒对腐殖酸的吸附量分别是原土的 2.15~3.88 倍, 去有机质土壤的 1.61~2.21 倍, 粉粒土壤的 7.90~8.65 倍。有机碳含量低的白浆土对腐殖酸具有更强的吸附能力, 黏粒含量高的白浆土对腐殖酸的吸附潜力更大。

关键词: 白浆土; 组分; 吸附; 腐殖酸

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0303-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.046

Adsorption Isotherm and Kinetics of Humic Acid in Albic Soil

SUN Yuanhong, ZHAO Xingmin, ZHAO Lanpo, ZHANG Jinjing

(Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases,
College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: Albic soil is one of the main farmland soils in the eastern part of Jilin Province and Heilongjiang Province. Studying the adsorption of humic acid by albic soil can provide a theoretical basis for exploring the carbon sequestration potential of albic soil. Batch balance method was applied to analyze the adsorption kinetics and isothermal adsorption characteristics of albic soil with different organic carbon content and its components (including de-organic soil, silt, clay) to humic acid. The results showed that with the prolongation of adsorption time, the amounts of humic acid adsorbed by albic soil and its components increased gradually; the whole adsorption kinetics process could be divided into fast reaction (0~30 min) and slow reaction (30~480 min) stage. At the reaction stage, the fitting effect of the pseudo second-order kinetic equation was better than that of Elovich, double constant and pseudo first-order kinetic equation. The amount of humic acid adsorbed by albic soil and its components increased with the increasing of the initial concentration of humic acid, and the fitting effect of the Langmuir equation was usually better than that of the Freundlich equation and the Temkin equation. With the increasing of organic carbon content of albic soil, the maximum adsorption amounts for humic acid were 26.9, 24.1 and 15.6 mg/g, respectively. For the different components of the albic soil, the maximum adsorption amount followed the order of clay>de-organic soil>powder, and the adsorption amount of clay was 2.15 to 3.88 times that of the original soil, 1.61 to 2.21 times that of the deorganic soil, 7.90 to 8.65 times that of the powder soil. The above results showed that the albic soil with low organic carbon content had stronger adsorption capacity to humic acid, and the albic soil with high clay content had greater adsorption potential to humic acid.

收稿日期: 2018-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471196, 41403077); 吉林省科技厅科技支撑计划项目(20130204050SF)

第一作者: 孙元宏(1992-), 女, 博士研究生, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: 842615166@qq.com

通信作者: 赵兰坡(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: zhaolanpo12@163.com

张晋京(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhangjinjing@126.com

Keywords: albic soil; component; adsorption; humic acid

白浆土广泛分布在吉林省和黑龙江省的东部地区^[1],是该地区的主要耕作土壤之一。耕作白浆土一直被列为低产土壤^[2],因其有机质和总养分含量低,酸性强,通透性不良,抗逆性差,易旱、易涝等原因造成了白浆土肥力低下^[3]。在生产上,施用有机肥和石灰是培肥和改良白浆土的主要农艺措施^[4]。有研究^[5]表明,有机质是限制白浆土上作物生产力的主要因素之一。将有机物料添加到土壤中,有机物料分解会产生腐殖物质,土壤腐殖质是土壤有机质的重要组成部分,腐殖质约占有机质总量的 50%~80%^[6],是土壤中重要的有机碳库^[7]。而将腐殖酸类肥料施入土壤中不仅能提供多种养分,还能改善土壤的理化性状,对土壤养分循环也有着重要的作用^[8-10]。腐殖酸是一种结构复杂的高分子物质,有多种官能团,由多种元素组成,包含多种碳水化合物、蛋白质和脂质等^[11],在一定条件下腐殖酸能与土壤中许多有机物或无机物发生相互作用^[12],大部分腐殖酸可以与土壤中各种矿物(尤其是黏土矿物)紧密地结合在一起。腐殖酸可促进土壤团聚体的形成,提高土壤的保水保肥能力,增加白浆土的通水透气性,提高土壤养分有效性等优点。

由于人为耕作或其他干扰会导致土壤有机碳含量下降,甚至造成土壤结构和化学组成发生变化。本文通过加入 H₂O₂ 去除部分有机碳,来探究在土壤有机碳含量极低的情况下其对腐殖酸的吸附能力,同时分析黏粒和粉粒对腐殖酸的固定能力。在现有报道中,对白浆土吸附腐殖酸的研究较少,对其固定腐殖酸的机理尚不明晰,尤其是不同有机碳含量的耕层白浆土及其组分(去有机质土壤、黏粒和粉粒)对吸附腐殖酸的对比研究更是鲜见报道。因此本文通过探究

白浆土对腐殖酸的吸附特征,分析白浆土对腐殖酸的固定机理,为白浆土的培肥改良及有机碳的快速提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试白浆土是吉林省分布面积最大的代表性白浆土亚类,于 2015 年 5 月采自吉林省永吉县一拉溪镇(43°49′06″N,126°10′47″E)。按照土壤有机质含量的低、中、高,分别用“蛇”形采样法采集白浆土耕层混合样品,采样深度为 0—20 cm。将上述供试土样经自然风干,过 2 mm 筛,去除筛上的砾石后备用。取部分风干的原土加入 H₂O₂ 处理去除有机碳,将欲处理的土壤称于烧杯中,置于 60 ℃水浴锅内,逐滴加入 30% H₂O₂。若反应剧烈,将烧杯放置室温(或滴加少量异戊醇消泡)后继续逐滴加入 H₂O₂,边滴加边搅拌,直至无气泡反应为止,此时观察土壤呈灰白色状态即为去有机质土壤。将烧杯置于 180 ℃电热板上去除过量的 H₂O₂,风干后测定其剩余有机碳含量。另取部分风干原土采用筛分法和吸管法提取黏粒和粉粒^[13],风干后过 60 目筛备用,其有机碳含量见表 1。供试腐殖酸是由上海瑞永生物科技有限公司生产,产品代码 RQ1017,其有机碳含量为 40.38%。供试土壤基本理化性质见表 2^[14]。

表 1 供试土壤有机碳含量 单位:g/kg

白浆土 有机碳含量	原土	去有机质	黏粒	粉粒
低	8.70	2.64	4.26	0.81
中	10.90	2.58	4.17	0.93
高	15.90	4.42	5.22	0.64

表 2 供试土壤理化性质

白浆土 有机碳 含量	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	pH	机械组成/%				铁铝氧化物含量/(g·kg ⁻¹)			
				>0.2	0.02~0.2	0.02~0.002	<0.002	Fe _o	Al _o	Fe _d	Al _d
				mm	mm	mm	mm				
低	15.60	17.46	4.80	0.33	27.09	34.21	38.37	5.06	2.05	8.09	8.05
中	26.50	15.60	4.56	1.10	36.83	30.66	31.41	4.22	1.89	6.24	7.90
高	30.10	15.38	4.82	0.59	37.11	34.05	28.25	5.24	2.09	6.99	8.07

1.2 试验设计

试验开始于 2016 年 6—12 月,分别用有机碳含量低、中、高的耕层土壤的原土、去有机质土壤、黏粒和粉粒对腐殖酸做吸附试验。腐殖酸储液:称取不同量的腐殖酸溶于 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液中,用盐酸调节 pH 为 7.00±0.05,离心后用 TOC 测定其有机碳浓度。

(1)吸附动力学试验:称取处理好的土壤样品 1.000 0±0.000 5 g,置于 100 mL 的塑料离心管中,加入

含有机碳浓度为 903.1 mg/L 的腐殖酸,离子强度(NaNO₃ 溶液)为 0.01 mol/L,反应时间分别设置为 10, 20,30,60,120,240,360,480 min,温度为 25.0 ℃。

(2)吸附等温试验:称取上述样品,分别加入 20 mL 含有机碳的初始浓度为 470.5,625.6,731.9, 903.1,1 275.6,1 704.3,1 929.7,2 812.5,3 372.6, 4 092.2,5 399.6,5 888.6 mg/L 的腐殖酸溶液,设置离子强度(NaNO₃ 溶液)为 0.01 mol/L,温度为 25.0 ℃。将离心管放入振荡器中匀速振荡,待振荡完成,以

3 500 r/min 离心 10 min,用 TOC 测定其上清液中有有机碳浓度。

1.3 分析方法

土壤基本理化性质采用常规分析方法^[15]测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定;土壤 pH (水:土为 2.5:1)采用电位法测定;土壤电导率采用电导率仪测定;土壤阳离子交换量采用乙酸铵法测定;土壤游离铁铝氧化物采用 DCB 法提取;非无定型铁铝氧化物用酸性草酸铵提取法提取。测试液体样品总有机碳采用德国耶拿分析仪器股份公司生产的 Multi N/C 2100 TOC 仪测定。

1.4 数据处理

1.4.1 等温吸附方程拟合模型 通过 3 种等温吸附方程进行拟合:

Langmuir 方程:

$$C_e/q_e=1/q_m K_a+C_e/q_m \tag{1}$$

Freundlich 方程:

$$\ln q_e=(1/n) \ln C_e+\ln K_L \tag{2}$$

Temkin 吸附模型:

$$q_e=A+B \ln C \tag{3}$$

式中: q_e 为平衡时白浆土对腐殖酸的吸附量(mg/g); q_m 为腐殖酸在白浆土上的最大吸附量(mg/g); C_e 为平衡液中腐殖酸质量浓度(mg/L); n 为曲线斜率; K_a 、 K_L 为相关常数; A 、 B 为常数项。

1.4.2 吸附动力学拟合模型 主要采用伪一级动力学方程、伪二级动力学方程、Elovich 方程和双常数方程的动力学模型。

$$\ln(q_e-q_t)=\ln q_e-kt \tag{4}$$

$$t/q_t=1/kq_e^2+t/q_e \tag{5}$$

$$q_t=A+B \ln t \tag{6}$$

$$\ln q_t=A+B \ln t \tag{7}$$

式中: t 为反应时间(min); q_t 为 t 时刻吸附量(mg/g); q_e 为平衡时白浆土对腐殖酸的吸附量(mg/g); A 、 B 为常数。

文中数据采用 Excel 软件进行数据处理,用 Origin 2018 软件进行图形分析处理。

2 结果与分析

2.1 白浆土对腐殖酸的吸附动力学研究

从图 1 可以看出,在相同的初始浓度(903.1 mg/L),白浆土及其组分土对腐殖酸的吸附动力学曲线整体趋势相近。随吸附时间的延长,白浆土及其各组分对腐殖酸的吸附量逐渐增加而后趋于平稳,吸附动力学过程可划分为快速反应阶段(0~30 min)和慢速反应阶段(30~480 min)。各组分对腐殖酸的吸附量表现为黏粒>去有机质土壤>原土>粉粒。从图

1 还可看出,供试白浆土对腐殖酸的吸附还存在一定的差异。图 1 中曲线从上至下依次为黏粒、去有机质土壤、原土和粉粒,可知黏粒和去有机质土壤对腐殖酸的吸附量远大于原土和粉粒。而随着供试白浆土有机碳的增加,原土与粉粒的差异越来越小。

由以上结果可得到吸附反应在一定的时间内均可以达到平衡。反应初期吸附速率较快,因为反应初期腐殖酸浓度较高,随着溶液中腐殖酸浓度的降低,腐殖酸与土壤可结合的位点也越来越少;另一方面,土壤中的正电荷与腐殖酸中负电荷逐渐结合,使土壤中负电荷空余出来,随着土壤表面负电荷的逐渐增加,带负电荷的土壤与腐殖酸排斥力越来越强,从而降低其吸附速率,此结果与康露等^[16]的研究一致。白浆土各组分对腐殖酸的吸附量表现为黏粒>去有机质>原土>粉粒。黏粒吸附量较高是因为其较大的比表面积和可吸附的空位较多^[17],因此可吸附更多的腐殖酸。供试白浆土在去有机质的过程中,将土壤本身部分有机质去除,剩余较多可与腐殖酸结合的点位最终将腐殖酸固定下来,从而提高其固碳能力。

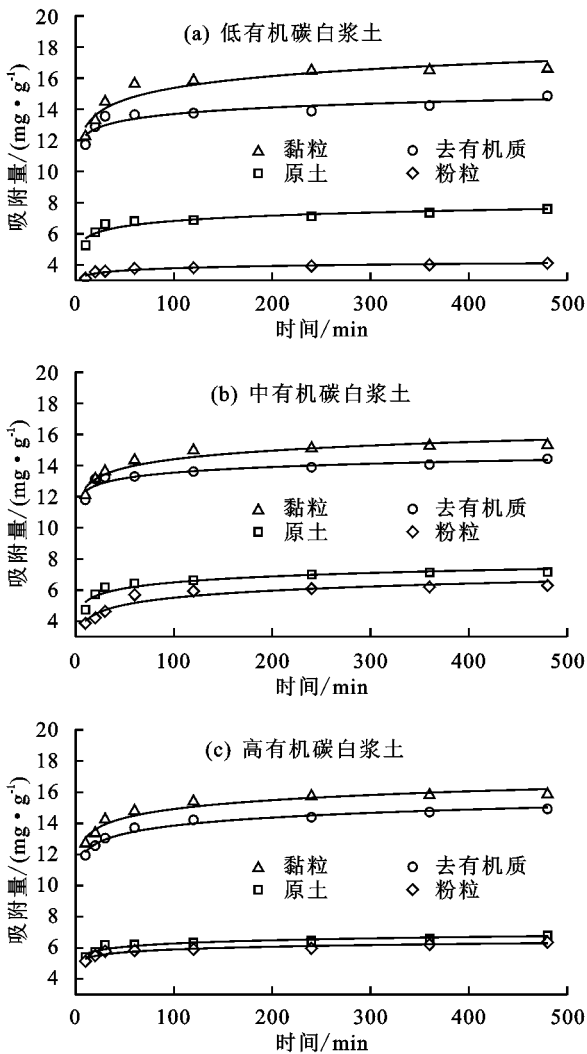


图 1 白浆土对腐殖酸的吸附动力学曲线

本研究通过用伪一级动力学方程、伪二级动力学方程、Elovich 方程和双常数方程对不同有机碳含量的白浆土及其组分吸附腐殖酸得到的吸附量进行拟合,并得到相应的动力学参数(表 3)。通过 4 个方程拟合,发现拟合情况存在一定差异。供试白浆土及其组分吸附拟合的 r^2 值整体表现为伪二级动力学方程>Elovich 方程>双常数方程>伪一级动力学方程。从表 3 可知,用伪二级动力学方程拟合的 r^2 值最高,说明用伪二级动力学方程拟合效果最好。通过伪二级动力学和伪一级方程可拟合出最大吸附量,不同有

机碳含量的白浆土通过拟合得到的最大吸附量均表现为黏粒>去有机质土壤>原土>粉粒,其中伪二级动力学方程拟合的最大吸附量和实际最大吸附量较为接近。通过比较 3 种有机碳含量土壤伪二级动力学方程拟合的最大吸附量,可得到原土对腐殖酸的吸附量分别为 7.64,7.24,6.76 mg/g,去有机质土壤之间差异不大,黏粒吸附量最高分别为 16.8,15.4,16.0 mg/g,粉粒吸附量最低。关于 Elovich 方程曾有的研究^[18],若吸附数据与方程之间有较好的 r^2 值,说明吸附过程可能为非均相扩散,反应过程受多种因素控制。

表 3 白浆土吸附腐殖酸的动力学参数

白浆土 有机碳含量	供试土壤	伪一级动力学方程			伪二级动力学方程			Elovich 方程			双常数方程		
		$q_e/$	$k/$	r^2	$q_e/$	$k/$	r^2	A	B	r^2	A	B/ 10^{-2}	r^2
		($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	10^{-3}		($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	10^{-3}							
低	原土	1.49	5.2	0.860	7.64	17.5	0.999	4.54	0.495	0.892	1.56	7.66	0.861
	去有机质	1.94	3.2	0.702	14.40	13.2	0.999	10.90	0.601	0.838	2.41	4.52	0.824
	黏粒	3.12	11.2	0.924	16.80	12.4	1.000	10.30	1.090	0.909	2.38	7.52	0.891
	粉粒	0.64	5.1	0.887	4.06	44.1	1.000	2.80	0.207	0.919	1.07	5.68	0.898
中	原土	2.09	13.6	0.954	7.24	20.5	1.000	4.00	0.551	0.900	1.45	9.10	0.860
	去有机质	1.64	4.4	0.846	14.40	16.4	1.000	11.10	0.521	0.858	2.42	3.96	0.840
	黏粒	2.38	11.0	0.951	15.40	17.1	1.000	10.70	0.800	0.929	2.40	5.77	0.914
	粉粒	1.79	8.8	0.890	6.39	16.8	1.000	2.50	0.657	0.920	1.10	12.90	0.904
高	原土	0.95	4.4	0.836	6.76	28.4	0.999	4.90	0.302	0.911	1.61	4.95	0.899
	去有机质	2.35	7.0	0.935	15.00	13.4	1.000	10.40	0.746	0.975	2.37	5.53	0.967
	黏粒	2.51	11.2	0.965	16.00	16.2	1.000	11.10	0.821	0.941	2.44	5.69	0.930
	粉粒	0.89	4.8	0.857	6.35	29.0	0.999	4.70	0.259	0.908	1.57	4.50	0.899

2.2 白浆土对腐殖酸的等温吸附研究

白浆土耕层土壤及其组分添加不同初始浓度的腐殖酸,经过恒温振荡处理后吸附等温线见图 2。随着腐殖酸初始浓度的增加,各个组分原土、去有机质土壤、黏粒和粉粒均表现出增加的趋势,且在低浓度时吸附量快速增加,而后随着浓度的增加趋于平缓。由图 2 可知,各组分对腐殖酸的吸附能力表现为黏粒>去有机质土壤>原土>粉粒,黏粒对腐殖酸的吸附量远高于其他 3 个组分,其中粉粒的吸附能力最低。

将不同浓度的腐殖酸添加到白浆土中必然会引引起白浆土中有机碳的变化。随着腐殖酸初始浓度的增加,白浆土及其组分吸附量亦逐渐增加,说明初始浓度影响着土壤对腐殖酸的吸附。黏粒因其有较大的比表面积更容易吸附腐殖酸,因此供试土壤黏粒吸附的腐殖酸量更高,有研究^[19]表明,细颗粒的土壤吸附能力更强,有机碳被固定后也更稳定。通过对白浆土的黏粒矿物进行 XRD 衍射分析,得到供试白浆土的黏粒矿物组成主要以蒙脱石及伊利石等 2:1 和少量 1:1 型高岭石等黏粒矿物为主^[13]。各耕层土壤

去有机质后其吸附腐殖酸的量高于原土,说明去有机质使腐殖酸与土壤矿物所结合的位点增多而增加其吸附量。粉粒在吸附少量腐殖酸其有机碳量即达到平衡,表明其对碳的吸附固定能力较弱。

本试验采用 Langmuir 方程、Freundlich 方程和 Temkin 方程对腐殖酸的等温吸附线进行拟合,参数表征情况见表 4。

通过比较 3 个方程模型的 r^2 可以看出,用 Langmuir 方程对白浆土及其组分对腐殖酸的吸附进行拟合的 r^2 值均大于 0.9,langmuir 方程拟合的整体效果优于 Freundlich 方程和 Temkin 方程。通过 Langmuir 方程计算得到的最大吸附量可以得出,各组分间最大吸附量由大到小表现为黏粒>去有机质土壤>原土>粉粒。不同有机碳含量的供试原土及去有机质土壤对腐殖酸的最大吸附量相比较表现为低有机碳白浆土>中有机碳白浆土>高有机碳白浆土。各黏粒土壤对腐殖酸的吸附量分别为 58.1,60.6,60.6 mg/g,分别是原土吸附量的 2.15,2.51,3.88 倍,是去有机质土壤吸附量的 1.61,1.98,2.21

倍,是粉粒土壤吸附量的 7.90,7.79,8.65 倍。供试白浆土的黏粒含量分别为 38.37%,31.41%和 28.25%,随土壤有机碳的增加黏粒含量越来越低,供试土壤对腐殖酸的吸附能力随土壤有机碳的增加而逐渐降低。低有机碳的白浆土其黏粒含量和阳离子交换量均较高,吸附能力也更强。反之随着土壤本身有机碳含量的增加,其固定腐殖酸的能力越来越弱。Freundlich 方程是反映多层吸附的经典方程,吸附反应不仅仅受吸附点位的影响,还可以通过氢键等相互作用结合在一起。

从以上结果可知,随着腐殖酸初始浓度增加,土壤对腐殖酸的吸附量也越来越大,是因为当腐殖酸浓度较低时,矿物表面的吸附点位相对充足,几乎不发生竞争或取代的现象,此时几乎所有腐殖酸都被吸附,等温吸附线在低浓度时表现为线性变化。而随着添加浓度的升高,大分子中含有多种官能团,且疏水性强,容易被优先吸附^[20],但也可能是先吸附小分子而后被大分子取代^[21]。尽管在 pH 为中性的条件下,腐殖酸(包括胡敏酸和富里酸)与黏土矿物都带负电荷,但它们之间仍可通过 Al^{3+} 等配位交换作用、阳离子键桥和疏水性作用等相互结合形成有机-无机复合体^[22]。带负电荷的有机阴离子和聚阴离子可以通过无机阳离子和解离的羟基与黏粒表面相结合^[23]。除此之外,土壤中的铁铝氧化物含量也是影响其吸附腐殖酸的重要因素,铁铝氧化物对稳定土壤结构、保护有机质有重要作用^[24],铁铝氧化物可与腐殖酸结合形成强烈的化学吸附键^[25],这种有机无机复合体更为稳定。本文中游离铁铝氧化物品质成分总量差异不大。腐殖酸与土壤结合除在土壤矿物表面(如被胶体较大的比表面积吸附)之外,还有一部

分在晶层间,颗粒间通过库伦引力或非专性吸附、氢键或范德华力相互作用。黏粒矿物与有机质的疏水组分与黏粒表面形成范德华力使其相互胶结在一起^[26]。综上,白浆土对腐殖酸吸附过程受多种因素控制。

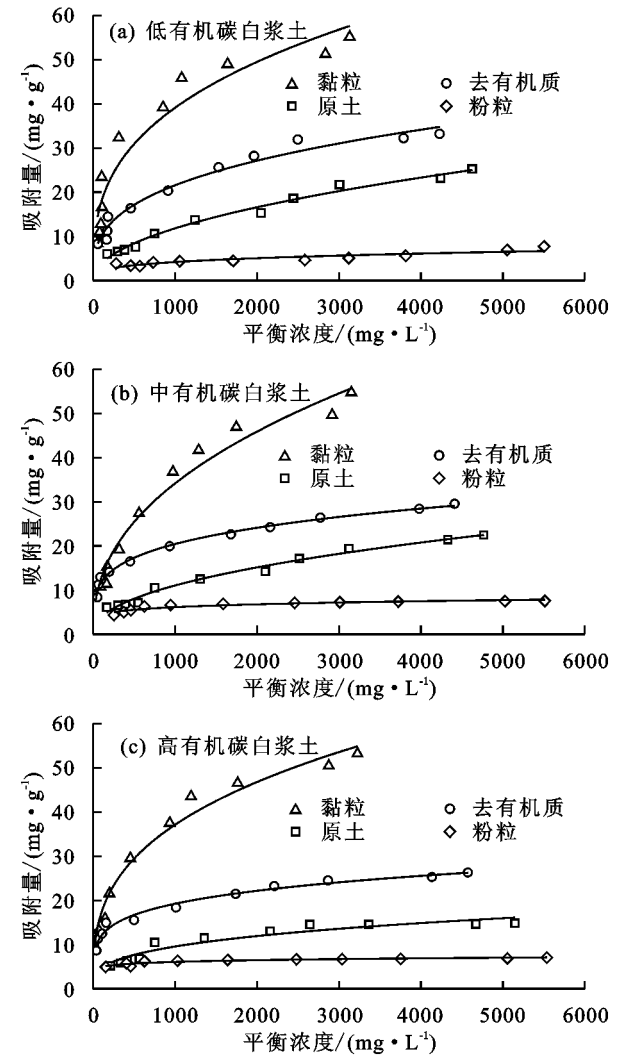


图 2 白浆土对腐殖酸的等温吸附曲线

表 4 白浆土对腐殖酸的等温吸附线参数

白浆土 有机碳含量	供试 土壤	Langmuir 方程			Freundlich 方程			Temkin 方程		
		$q_m /$ ($mg \cdot g^{-1}$)	$K_a /$ 10^{-3}	r^2	n	K_L	r^2	A	B	r^2
低	原土	26.9	1.63	0.967	2.10	0.45	0.978	-28.7	6.12	0.937
	去有机质	36.0	2.29	0.989	2.90	1.98	0.961	-20.6	6.38	0.957
	黏粒	58.1	3.40	0.995	2.39	2.18	0.893	-35.1	11.30	0.972
	粉粒	7.4	2.63	0.944	4.24	0.83	0.804	-3.4	1.18	0.749
中	原土	24.1	2.55	0.980	2.32	0.56	0.964	-23.6	5.23	0.929
	去有机质	30.6	4.37	0.994	4.15	3.87	0.967	-7.6	4.23	0.970
	黏粒	60.6	1.87	0.977	2.31	1.30	0.956	-36.6	10.70	0.914
	粉粒	7.6	20.10	0.999	6.41	2.07	0.870	-0.3	0.94	0.909
高	原土	15.6	6.18	0.980	2.77	0.77	0.930	-13.8	3.45	0.946
	去有机质	27.1	5.58	0.994	4.82	4.59	0.966	-3.7	3.45	0.964
	黏粒	60.6	1.90	0.977	2.92	3.46	0.980	-20.6	8.73	0.937
	粉粒	7.0	27.90	0.999	10.50	3.14	0.854	2.2	0.57	0.862

3 结 论

(1)随吸附时间的延长,白浆土及其各组分对腐殖酸的吸附动力学过程可划分为快速(0~30 min)和慢速(30~480 min)反应阶段,用伪二级动力学方程拟合效果最好。随着腐殖酸初始浓度的增加,白浆土及其组分对腐殖酸的吸附量逐渐增加,Langmiur 方程的拟合效果较好。

(2)随白浆土有机碳含量的增加,白浆土对腐殖酸的吸附量逐渐降低;而白浆土不同组分间相比,最大吸附量的顺序依次为黏粒>去有机质土壤>粉粒。黏粒含量高的白浆土吸附的腐殖酸更多,有机碳含量低的白浆土对腐殖酸具有更强的吸附能力,固定腐殖酸碳的潜力也更大。白浆土对腐殖酸的吸附过程是受到物理和化学综合作用的结果。

参考文献:

- [1] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 90-97.
- [2] 朱宝国, 张春峰, 贾会彬, 等. 白浆土心土间隔改良对土壤理化性状及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 704-710.
- [3] 贾会彬, 刘峰, 赵德林, 等. 白浆土某些理化特性与改良的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 130-137.
- [4] 于德清, 丁庆堂, 关熙铭, 等. 种植牧草在白浆土改良中的作用[J]. 应用生态学报, 1993, 4(1): 37-41.
- [5] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 74-81.
- [6] 梁重山, 党志, 刘丛强, 等. 不可提取态有机质对菲和萘的吸附过程的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 342-346.
- [7] Bruno H M, Cezar F A, Mario, et al. Humic substances and its distribution in coffee crop under cover crops and weed control methods[J]. Scientia Agricola, 2016, 73(4): 371-378.
- [8] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 723-733.
- [9] 党亚爱, 李世清, 王国栋. 黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分剖面分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1820-1829.
- [10] 刘军, 景峰, 李同花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤腐殖质组分含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 293-302.
- [11] Eldor A P. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 109-126.
- [12] 吴春华, 周小飞, 唐文浩. 氟化氢气体对橡胶盆栽幼苗的影响研究初报[J]. 热带农业科学, 2000(3): 6-9.
- [13] Holtzapffel T. Les minéraux argileux: Préparation, analyse diffractométrique et détermination[J]. Soc. Géol. Nord. Publ., 1985, 12: 1-136.
- [14] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 1009-1017.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 116-119.
- [16] 康露, 吴景贵, 张晋京, 等. 土壤及土壤矿物对类胡敏酸的吸附解吸及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1332-1340.
- [17] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 868-875.
- [18] Aharoni C, Sparks D L, Levinson S, et al. Kinetics of soil chemical reactions: Relationships between empirical equations and diffusion models[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1307-1313.
- [19] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 748-752.
- [20] 滕飞, 李福春, 吴志强. 高岭石和蒙脱石吸附胡敏酸的对比研究[J]. 中国地质, 2009, 3(4): 892-898.
- [21] Anne L G, Jens C S, Bjarne W. Adsorption of glucosinolates to metal oxides, clay minerals and humic acid[J]. Applied Clay Science, 2007, 35: 212-217.
- [22] Liu A, Gonzalez R D. Adsorption/desorption in a system consisting of humic acid, heavy metals, and clay minerals[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 218: 225-232.
- [23] 熊毅. 土壤胶体[M]. 1 册. 北京: 科学出版社, 1983: 341.
- [24] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2748-2755.
- [25] Kaiser K, Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 711-725.
- [26] 王磊, 应蓉蓉, 石佳奇, 等. 土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 805-818.