



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳的吸附特征

梁远宇, 王小利, 徐明岗, 蔡岸冬, 孙楠, 吕艳超

引用本文:

梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 72-79.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0769>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810-819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422-430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143-150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1-10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503-510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 72–79.

LIANG Y Y, WANG X L, XU M G, et al. Adsorption characteristics of dissolved organic carbon under different fertilization treatments in typical farmland soils in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 72–79.



开放科学 OSID

不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳的吸附特征

梁远宇^{1,2}, 王小利^{2*}, 徐明岗^{1,3*}, 蔡岸冬^{1,3}, 孙楠¹, 吕艳超²

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:为分析不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳(DOC)的吸附特征及其影响因素,选取黑土、灰漠土、潮土、红壤4种典型农田土壤,在不施肥(CK)、单施氮肥(N)、施氮磷肥(NP)、施化学氮磷钾肥(NPK)、有机肥配施化学氮磷钾肥(NPKM)5种施肥处理下,运用平衡吸附法测定DOC的吸附量。结果表明,不同土壤类型在同一平衡浓度下对DOC的吸附量有较大差异,整体表现为灰漠土、红壤>黑土>潮土。最大吸附量($Q_{\max}$)在各类土壤中表现为红壤>灰漠土>黑土>潮土。其中,各土壤类型的吸附特征在不同施肥处理下具有较大差异:灰漠土和潮土 $Q_{\max}$ 总体表现为NPKM>NPK>NP>N>CK;红壤 $Q_{\max}$ 总体表现为NPKM>N>NPK>NP>CK;黑土表现为NPKM、NPK处理大于其他处理,其中NPKM处理的 $Q_{\max}$ 比CK增加15.2%。4种土壤的吸附亲和力常数(K)在不同施肥处理下均表现为CK处理大于其他处理。4种土壤的解吸势(b)随着初始有机质含量的增加而增加,其中黑土的解吸势远大于其他3类土壤。通过冗余分析发现,土壤性质能解释DOC吸附特征参数全部变异的90.61%。第一冗余因子解释了DOC吸附特征参数全部变异的82.79%,主要与粉粒含量、黏粒含量、pH等有关;第二冗余因子解释了全部变异的7.82%,主要与土壤有机质含量有关。研究表明,不同类型土壤中,黏粉粒含量较高的土壤对DOC的吸附量更大,同一土壤类型下,有机质含量较高的土壤对DOC的吸附量更大。

关键词:典型农田土壤;施肥处理;可溶性有机碳;吸附特征;冗余分析

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0072-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0769

Adsorption characteristics of dissolved organic carbon under different fertilization treatments in typical farmland soils in China

LIANG Yuanyu^{1,2}, WANG Xiaoli^{2*}, XU Minggang^{1,3*}, CAI Andong^{1,3}, SUN Nan¹, LÜ Yanchao²

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, National Engineering Laboratory for Improving of Arable Land, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the evaluation of carbon sequestration potential, we analyzed the adsorption characteristics and influencing factors of dissolved organic carbon (DOC) in typical farmland soils with different fertilization treatments in China. Four typical farmland soils, namely black soil, gray desert soil, fluvo-aquic soil, and red soil, were selected to apply different fertilizer levels of no fertilizer (CK), chemical N fertilizer (N), chemical NP fertilizer (NP), chemical NPK fertilizer (NPK), and NPK plus organic manure (NPKM) to determine the DOC adsorption capacities by the equilibrium adsorption method. The results showed that the DOC adsorption capacities of different types of soils at the same equilibrium concentration were very different, and were generally in the

收稿日期: 2020-12-22 录用日期: 2021-03-02

作者简介: 梁远宇(1995—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 从事土壤碳固持研究。E-mail: lianguanyu163.com

*通信作者: 王小利 E-mail: ls.wangxl@gzu.edu.cn; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41620104006, U1710255)

Project supported: Key Program of the National Natural Science Foundation of China(41620104006, U1710255)

<http://www.aed.org.cn>

order of gray desert soil and red soil>black soil>fluvo-aquic soil. $Q_{\max}$ appeared in the order of red soil>gray desert soil>black soil>fluvo-aquic soil in various soils. Among them, the adsorption characteristics of each soil type were quite different under different fertilization treatments. The general trend of $Q_{\max}$ in the gray desert soil and fluvo-aquic soil under different fertilization treatments were NPKM>NPK>NP>N>CK and in red soil was NPKM>N>NPK>NP<CK. The $Q_{\max}$ values of the NPKM and NPK treatments were significantly higher than those of the other fertilization treatments in black soil, and that of NPKM was increased by 15.2% compared with that of CK. The K values in the four soils under different fertilization treatments showed that CK treatment was higher than other treatments. The desorption potential (b) values in the four soils increased as the soil organic matter (SOM) increased, and the b value of black soil was far higher than those of the other soil types. Redundancy analysis showed that soil properties could explain 90.61% of the total variation of the DOC adsorption characteristic parameters. The first redundancy factor explained 82.79% of the total variation, which was mainly related to the silt content, clay content, and pH, whereas the second redundancy factor explained 7.82% of the DOC adsorption characteristic parameters, which was mainly related to the SOM content. The results of this paper showed that different types of soils with more clay particles have greater adsorption capacity for DOC, and the same type of soil with more organic matter content has greater adsorption capacity for DOC.

Keywords: typical farmland soil; fertilization; dissolved organic carbon; adsorption characteristic; redundancy analysis

可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)是土壤有机碳库中最活跃的部分,虽然含量较少,但由于自身具有高生物活性^[1-2],其在整个土壤碳库循环系统中至关重要,同时 DOC 在土壤中营养元素的有效释放、重金属污染及微生物活动等多个方面也具有重要作用^[3-6]。据报道,土壤胶体及矿物可以通过吸附作用将 DOC 有效地固定到土壤中,增加 DOC 在土壤中的稳定性^[7]。有研究表明,土壤中大部分 DOC 会通过吸附作用固定在土壤中,这也是土壤有机碳的重要来源之一^[8]。然而,DOC 具有易氧化、易矿化分解等不稳定特性,因此,探究不同农田土壤对 DOC 的吸附特性及其差异,对衡量土壤固碳潜力和碳库循环具有重要意义。

国内外学者研究发现,理化性质不同的土壤对 DOC 的吸附有很大差异,黏粒含量较高的土壤可以吸附较多的 DOC^[9-10],因为这类土壤有较大的比表面积,可为 DOC 提供更多的吸附位点。但是粉粒含量对土壤 DOC 吸附影响的相关研究鲜有报道。土壤理化性质对土壤 DOC 的吸附影响因素比较复杂,目前尚未有统一的观点。就 pH 而言,李太魁等^[11]与梁承明等^[12]分别对紫色土与红壤的吸附研究表明,pH 值较低的土壤对 DOC 吸附更强,酸性会促进土壤对 DOC 的吸附;但 KLAUS 等^[13]研究认为,pH 对土壤吸附 DOC 无显著影响。韩成卫等^[14]与吴萌等^[15]的研究认为,土壤有机质(SOM)含量降低,土壤 DOC 的吸附量增加,当土壤中 SOM 含量较高时会包裹在矿物表面,与 DOC 竞争土壤表面的活性吸附位点,抑制土壤对 DOC 的吸附。MAYES 等^[9]的研究表明,土壤对 DOC 的吸附与 SOM 含量呈正相关,主要是由于土壤的 SOM 覆盖层能为 DOC 提供更多的疏水性吸附点位,利于土

壤对 DOC 的固持。

我国幅员辽阔,气候、土壤类型与种植制度多样,造成我国不同地区农田土壤母质成分差异较大,这势必会影响土壤对 DOC 的吸附能力^[16]。而在同一土壤中长期施用不同肥料也会极大地改变土壤理化性质,从而间接影响土壤对 DOC 的吸附^[17],如长期施用有机肥可明显提高土壤有机质含量^[18];长期单施氮肥会显著降低土壤 pH^[19],有机质与 pH 也是土壤吸附 DOC 的重要影响因子。但是,我国对于农田土壤 DOC 的吸附研究尚处在单一的土壤类型研究阶段^[12,15],对不同类型与土壤肥力差异较大的土壤的相关研究较少。因此,本研究依托我国四个典型农田长期定位试验,探讨不同施肥处理土壤对 DOC 的吸附特征,并运用相关性分析、冗余分析等方法探讨土壤理化性质与 DOC 吸附特征参数的相关关系,定性定量评价我国农田土壤对 DOC 吸附特征差异,为土壤固碳潜力计算提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤类型及供试土壤性质

供试土壤样品采自国家土壤肥力与肥料效益长期定位监测的 4 个试验站,分别为东北地区哈尔滨黑土(126°51'E,45°40'N)、西北地区乌鲁木齐灰漠土(87°46'E,43°95'N)、华北地区新乡潮土(113°40'E,34°47'N)、华南地区祁阳红壤(111°51'E,26°45'N)。各试验站基本情况及试验初始的土壤基本性质等详见文献[20]。2014 年从各试验站现有处理中(3 次重复)选择不施肥(CK)、单施氮肥(N)、施氮磷肥(NP)、施化学氮磷钾肥(NPK)、有机肥配施化学氮磷钾肥

(NPKM)5个处理的土壤样品为介质,进行等温吸附实验,采用“S”形布点方法采集0~20 cm土层5~7个点的混合土壤,带回实验室充分混匀后风干,去除其中的作物根系及小石块等异物,过2 mm筛,混匀备用。其土壤主要理化性质见表1。

1.2 DOC母液的提取

从中国农业科学院北京畜牧兽医研究所昌平实验基地采集干猪粪,从中提取实验所需的DOC母液。具体提取方法如下:恒温(25℃)下称取干猪粪30 g置于1 L塑料瓶中,加入450 mL去离子水混合后,于恒温振荡器(IS-RDS3)上振荡(200 r·min⁻¹)1 h;振荡后将塑料瓶内溶液分批转移至100 mL的离心管中,在高速冷冻离心机(GL-21M)内离心15 min,将离心后的上清液过0.45 μm滤膜,收集到的滤液即为DOC母液(DOC浓度约为2 400 mg·L⁻¹),保存在4℃冰箱备用(保存时间不超过一周)。

1.3 等温吸附实验

恒温下将已提取的DOC母液(以TOC分析仪multi N/C 3100实际测量为准)分别稀释成7个不同浓

度(0、50、100、200、400、600、800 mg·L⁻¹)溶液。称取2 g土壤样品于100 mL离心管中,加入50 mL不同浓度的DOC溶液,并添加25 mmol·L⁻¹的叠氮化钠(NaN₃)溶液1 mL用于抑制微生物活动。将离心管密封转至转速为200 r·min⁻¹恒温振荡器上振荡24 h(预实验证明已达到吸附平衡),振荡完成后取出离心管置于高速冷冻离心机内离心15 min,将上清液过0.45 μm滤膜,用TOC分析仪测定滤液浓度。所有处理重复3次,根据公式计算出土壤对DOC的吸附量。

1.4 数据处理与分析方法

土壤对DOC的吸附量(Q)采用公式(1)进行计算:

$$Q=(C_1+C_0-C)\times V/m \quad (1)$$

式中: Q 为土壤对DOC的吸附量,g·kg⁻¹; C_1 为添加的DOC溶液初始浓度,mg·L⁻¹; C_0 为添加的DOC溶液浓度为0 mg·L⁻¹时的平衡浓度,mg·L⁻¹; C 为吸附实验平衡时DOC溶液的浓度,mg·L⁻¹; V 为添加的DOC溶液体积,mL; m 为土壤的质量,g。

根据等温吸附方程的原理,采用非线性的Langmuir等温吸附方程^[21]来拟合试验土壤对DOC的吸附特征,其方程式为:

$$Q=K\times Q_{\max}\times C/(1+K\times C)-b \quad (2)$$

式中: Q 为土壤对DOC的吸附量,g·kg⁻¹; K 为土壤对DOC的亲合力常数; $Q_{\max}$ 为土壤对DOC的最大吸附量,g·kg⁻¹; $Q_{\max}$ 和 K 可以直观反映土壤胶体对DOC的吸附潜力; C 为吸附平衡时的DOC溶液浓度,mg·L⁻¹; b 为解吸势,是土壤自身(DOC添加浓度为0 mg·L⁻¹时)DOC解吸量,g·kg⁻¹。

为比较不同农田土壤对DOC吸附参数的差异显著性,采用SPSS 20对数据进行统计分析。使用Origin 9.0绘制等温吸附趋势图。为深入了解土壤性质对DOC吸附过程的影响,用土壤性质来解释吸附参数变异,采用Canoco 5将DOC吸附特征参数设为自变量,土壤性质设为因变量进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同类型农田土壤对DOC吸附

土壤对DOC的吸附量在不同平衡浓度下具有差异。4种土壤对DOC的吸附量趋势整体表现为随DOC平衡浓度的增加而增大,当土壤平衡溶液中DOC浓度小于300 mg·L⁻¹时,土壤对DOC的吸附量增长速率较大,随着平衡浓度持续增加,土壤对DOC的吸附量增长速率逐渐变小,吸附过程趋于饱和(图1)。同一平

表1 不同施肥处理下典型农田土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of typical farmland soils with different fertilization treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	pH	有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	黏粒 Clay/ %	粉粒 Silt/ %
黑土 Black soil	CK	6.90	25.34	1.23	23.84	30.10
	N	5.90	26.72	1.42	23.89	29.88
	NP	6.00	27.58	1.38	24.01	29.54
	NPK	6.00	27.76	1.36	26.56	29.13
	NPKM	6.10	28.79	1.41	25.96	28.61
灰漠土 Gray desert soil	CK	8.44	14.03	0.94	29.21	44.80
	N	8.42	15.24	0.92	31.99	47.00
	NP	8.37	15.40	0.96	32.11	44.35
	NPK	8.36	15.60	1.01	34.31	40.70
	NPKM	8.24	30.08	1.70	32.03	41.50
潮土 Fluvo- aquic soil	CK	8.07	12.00	0.64	18.28	10.46
	N	8.13	12.27	0.65	18.76	10.44
	NP	8.04	14.34	0.76	18.95	10.40
	NPK	8.04	14.83	0.79	19.78	11.36
	NPKM	7.93	18.96	1.03	18.66	11.42
红壤 Red soil	CK	5.80	14.67	0.88	43.80	27.90
	N	3.99	13.62	0.90	44.25	30.57
	NP	4.28	17.74	1.03	45.36	29.13
	NPK	4.30	18.24	1.08	48.77	27.73
	NPKM	5.90	24.91	1.43	46.66	32.53

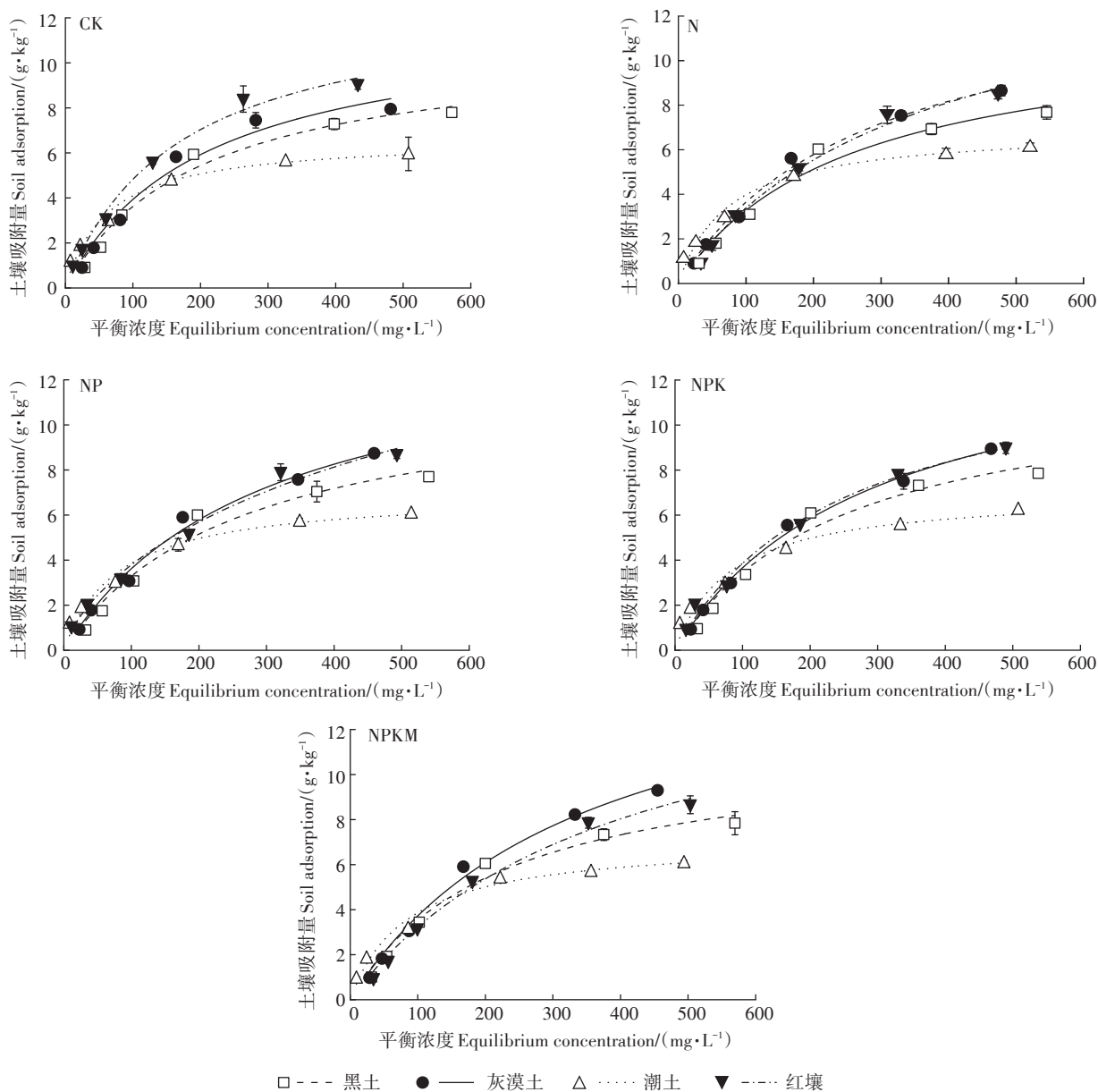


图1 不同类型农田土壤对DOC吸附等温线

Figure 1 Adsorption isotherms of DOC on different farmland soils

衡浓度下不同类型土壤对DOC的吸附量有较大差异。其中CK处理表现为红壤>灰漠土>黑土>潮土,NPKM处理表现为灰漠土>红壤>黑土>潮土。NP、NPK处理表现为灰漠土、红壤>黑土>潮土。

2.2 不同施肥处理下农田土壤对DOC吸附特征差异

Langmuir 方程决定系数均在 0.95 以上 ($P<0.01$) (表2),表明该方程能较好地拟合不同施肥处理下农田土壤对DOC的吸附特征。

黑土在5种施肥处理下, $Q_{\max}$ 为 10.89~12.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 11.79 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。NPKM处理 $Q_{\max}$ 比CK处理增加了 15.2%, $Q_{\max}$ 整体表现为 NPKM>NPK>其他施肥处理。

亲和力常数 K 的平均值为 0.004 3, 整体表现为 CK>NPKM>NPK>NP、N。5种施肥处理下土壤的解吸势 b 平均值为 0.290 1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, NPKM处理与CK处理相比增加了 89.0%, 总体表现为 NPKM、NPK>NP、N>CK。

灰漠土在5种不同施肥处理下, $Q_{\max}$ 为 11.98~16.69 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 14.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同施肥处理差异显著, $Q_{\max}$ 值最大的处理为 NPKM, 其余处理的 $Q_{\max}$ 从大到小依次为 NPK>NP>N>CK。CK处理的 $Q_{\max}$ 值为 11.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, N、NP、NPK、NPKM处理分别增加了 16.3%、18.5%、20.7%、39.3%。亲和力常数 K 平均值为 0.003 6, NPKM和NPK小于其他处理。解吸势 b 的

表2 不同施肥处理下土壤Langmuir方程吸附特征参数

Table 2 The adsorption characteristic parameters of the Langmuir equation of soils with different fertilization treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	$Q_{\max}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	K	$b/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	R^2
黑土 Black soil	CK	10.89±0.34c	0.005 0±0.000 7a	0.186 8±0.001 1c	0.973 6**
	N	11.63±0.27c	0.003 9±0.000 1b	0.289 2±0.001 3b	0.968 3**
	NP	11.84±0.11c	0.003 9±0.001 1b	0.289 2±0.002 2b	0.961 5**
	NPK	12.05±0.10b	0.004 0±0.000 6ab	0.332 5±0.003 2a	0.968 8**
	NPKM	12.55±0.23a	0.004 6±0.001 2ab	0.353 0±0.001 2a	0.973 9**
灰漠土 Gray desert soil	CK	11.98±0.48e	0.004 9±0.000 5a	0.132 5±0.001 2b	0.969 9**
	N	13.93±0.26d	0.003 5±0.000 5a	0.118 3±0.012 8b	0.990 8**
	NP	14.20±0.10c	0.003 4±0.000 7a	0.136 3±0.002 0b	0.986 7**
	NPK	14.46±0.21b	0.003 2±0.000 4b	0.134 9±0.000 4b	0.994 6**
	NPKM	16.69±0.59a	0.002 9±0.000 6b	0.308 5±0.019 7a	0.990 4**
潮土 Fluvo-aquic soil	CK	6.55±0.17b	0.033 4±0.001 3a	0.015 2±0.000 4b	0.975 3**
	N	6.95±0.45b	0.016 0±0.001 8b	0.017 3±0.001 1b	0.977 8**
	NP	6.97±0.16ab	0.013 4±0.001 1b	0.016 8±0.001 6b	0.971 3**
	NPK	7.01±0.02a	0.012 2±0.000 7c	0.019 2±0.000 4a	0.957 3**
	NPKM	7.11±0.06a	0.011 9±0.000 3c	0.022 4±0.001 1a	0.980 6**
红壤 Red soil	CK	12.97±0.21e	0.005 9±0.000 3a	0.046 2±0.002 3d	0.990 0**
	N	15.21±0.37b	0.002 9±0.000 8b	0.027 4±0.002 0e	0.988 0**
	NP	13.31±0.12d	0.004 0±0.000 9ab	0.071 0±0.000 6c	0.977 2**
	NPK	13.91±0.25c	0.004 0±0.000 6ab	0.102 7±0.000 9b	0.987 4**
	NPKM	15.94±0.41a	0.002 5±0.000 5b	0.247 8±0.001 2a	0.989 1**

注:同一土壤不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);**表示 $P<0.01$ ($n=6$)。

Note: Different small letters indicate significant difference among treatment in the same soil type ($P<0.05$); ** indicate $P<0.01$ ($n=6$).

平均值为 $0.166\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, NPKM处理 b ($0.308\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)远高于其余处理,而其余施肥处理间无显著差异。

潮土在5种不同施肥处理下, $Q_{\max}$ 在 $6.55\sim 7.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,平均值为 $6.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。NPKM处理 $Q_{\max}$ 相较于CK处理增加了8.5%,总体表现为 $\text{NPKM}>\text{NPK}>\text{NP}>\text{N}>\text{CK}$ 。潮土不同施肥处理下吸附亲和力常数 K 的平均值为0.017 4,整体趋势为 $\text{CK}>\text{N}>\text{NP}>\text{NPK}>\text{NPKM}$;解吸势 b 平均为 $0.018\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,NPKM处理与NPK处理的解吸势显著大于其余施肥处理。

红壤在5种不同施肥处理的 $Q_{\max}$ 为 $12.97\sim 15.94$

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $14.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同施肥处理的 $Q_{\max}$ 差异显著,总体趋势为 $\text{NPKM}>\text{N}>\text{NPK}>\text{NP}>\text{CK}$ 。亲和力常数 K 的平均值为0.003 9,CK处理的亲和力常数为0.005 9,显著大于其余施肥处理,其余施肥处理间亲和力常数无显著差异。5种施肥处理土壤的解吸势平均为 $0.099\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同施肥处理总体表现为 $\text{NPKM}>\text{NPK}>\text{NP}>\text{CK}>\text{N}$ 。

2.3 土壤DOC吸附特征参数与土壤性质的关系

相关性分析结果(表3)显示, $Q_{\max}$ 与粉粒、黏粒呈极显著正相关($P<0.01$),与SOM呈显著正相关($P<$

表3 土壤理化性质与DOC吸附参数的相关性

Table 3 Correlation between soil physical, chemical properties and DOC adsorption parameters

项目 Item	$Q_{\max}$	K	b	pH	土壤有机质 SOM	黏粒 Clay
K	-0.856**					
b	0.436**	-0.595**				
pH	-0.365**	0.414**	-0.166			
土壤有机质 SOM	0.303*	-0.465**	0.911**	-0.251		
黏粒 Clay	0.679**	-0.576**	-0.135	-0.659**	-0.190	
粉粒 Silt	0.818**	-0.882**	0.449**	-0.057	0.218	0.489**

注:*表示在0.05水平显著;**表示在0.01水平显著($n=60$)。

Note: * means significant difference at $P<0.05$, ** means significant difference at $P<0.01$ ($n=60$).

0.05),与pH呈极显著负相关($P<0.01$); K 与pH呈极显著正相关($P<0.01$),与SOM、粉粒含量、黏粒含量呈极显著负相关($P<0.01$); b 与SOM、粉粒含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

冗余分析(图2)表明,土壤性质能解释DOC吸附特征参数全部变异的90.61%。其中第一冗余因子解释了全部变异的82.79%,主要与粉粒含量、黏粒含量、pH等有关;第二冗余因子解释了DOC吸附特征参数全部变异的7.82%,主要与SOM含量有关。

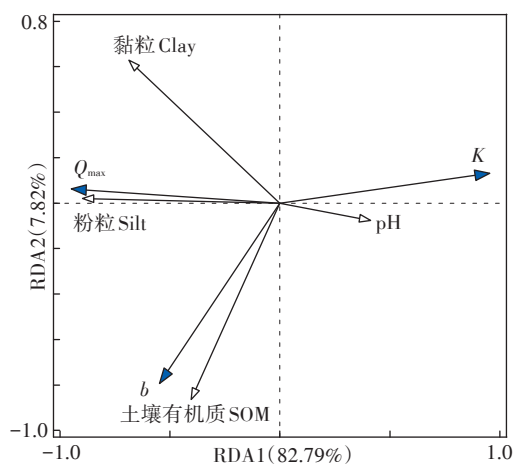


图2 不同土壤理化性质和吸附参数之间的冗余分析

Figure 2 RDA analysis between soil physical and chemical properties and adsorption parameters

3 讨论

本研究发现在吸附过程中随平衡浓度的增加吸附量增长速率先迅速增大随后变缓,且不同类型土壤在同一平衡浓度下对DOC的吸附量有较大差异。通过Langmuir方程拟合得到,灰漠土与红壤的 $Q_{\max}$ 约为潮土的2倍,不同类型土壤的 $Q_{\max}$ 由大到小顺序为红壤>灰漠土>黑土>潮土,且 $Q_{\max}$ 越大的土壤其亲和力常数 K 越小,这一结果与徐基胜等^[22]选取河南地区三种质地的潮土、江苏的黄泥土、江西的红黏土和海南的砖红壤研究土壤吸附DOC的结果一致。这是由于我国横跨几个不同的温度带,不同的气候条件影响了土壤形成发育过程,使土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒)、有机碳含量、pH值等^[3,23]土壤理化性质发生变化,进而导致不同土壤对DOC的吸附能力存在显著差异^[4,14]。本研究的相关性分析结果显示,pH与 $Q_{\max}$ 呈极显著负相关($P<0.01$),与俞元春等^[24]研究的pH值降低会增加土壤对DOC的吸附结果一致。祁阳红

壤较其他土壤pH较低,酸化严重,可能致使土壤的矿物质与有机物表面电荷发生改变,使土壤表面带较多的正电荷,增加了土壤对负电荷DOC的吸附^[25]。据报道,土壤黏粒含量越高,越有利于土壤对有机碳的固持和截获^[26],BORKEN等^[27]的研究表明,黏粒可使土壤具有较大的比表面积,从而暴露出更多的表面电荷,可提供更多的吸附点位,因此使土壤吸附更多DOC。但本研究冗余分析结果表明,粉粒贡献值远大于黏粒及其他因素,粉粒含量较多的灰漠土对DOC吸附的 $Q_{\max}$ 远大于除红壤外的其他土壤,可能是由于本研究选择的土壤多为沙质土和壤土,黏质土较少,导致与李太魁等^[25]研究得到的黏粒含量与土壤吸附量成正比的结果不一致。

本研究结果表明,不同施肥处理土壤中,CK处理的 $Q_{\max}$ 值最小,其他不同施肥处理下 $Q_{\max}$ 的值均显著大于CK处理($P<0.05$),这与李森等^[28]和吕艳超等^[29]研究得到的有机无机肥处理下土壤对DOC的固持能力最高、平衡施肥次之、不施肥处理最低的结果一致。研究表明CK处理土壤可通过相应施肥措施提高固碳能力,相对于其他已施肥土壤有更大的固碳潜力,施肥可以有效提高土壤对DOC的吸附能力。而在本研究中不同施肥处理下 $Q_{\max}$ 的值从大到小依次为NPKM>NPK>NP>N(除红壤外),表明多种元素肥料的混合使用可以有效提高土壤对DOC的吸附。不同施肥处理会引起土壤SOM含量改变^[15],而SOM本身可作为一种吸附剂^[11],增大土壤颗粒表面积,促进土壤团聚体形成发育,为DOC吸附提供较大表面积,增加土壤对DOC的吸附。在本研究中不同施肥处理下土壤的SOM含量从大到小依次为NPKM>NPK>NP>N>CK,如灰漠土SOM含量依次为30.08、15.60、15.40、15.24、14.03 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明在同一土壤类型的不同施肥处理下,土壤对DOC吸附的 $Q_{\max}$ 值可能与土壤的SOM含量关。

本研究设置了高达 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的初始添加浓度,但吸附过程仍未完全达到饱和状态,表明农田土壤对DOC的吸附潜力巨大,通过改变某些吸附条件,可提高土壤对DOC的吸附能力。农田土壤是由黏土矿物、有机质、有机无机复合体组成的复杂系统^[16],不同土壤之间的颗粒组成、表面积大小、有机碳含量和pH值均有一定差异,且施肥、耕作、轮作等农业管理措施也不尽相同,这些因素会影响DOC在土壤中的吸附行为,因此更细致地量化每种影响因子对DOC吸附的作用还需要开展更深入的研究。

4 结论

(1)不同土壤类型下,灰漠土、红壤对DOC吸附能力较强,黑土次之,潮土最弱。同一类型土壤中,不同施肥处理土壤对DOC吸附量存在显著差异,总体表现为有机肥配施氮磷钾肥处理最高,施氮磷钾肥、施氮磷肥、单施氮肥处理次之,不施肥处理最低;而土壤亲和力常数在不同施肥处理中差异不大。

(2)土壤对DOC的吸附能力与土壤性质之间存在显著相关关系,粉粒、黏粒、SOM含量和pH值是主要影响因子。不同类型土壤中,黏粉粒含量较高的土壤对DOC的吸附量更大,同一土壤类型下,有机质含量较高的土壤对DOC的吸附量更大。

参考文献:

- [1] 李玲,仇少君,刘京涛,等.土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J].应用生态学报,2012,23(5):1407-1414. LI L, QIU S J, LIU J T, et al. Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5):1407-1414.
- [2] RASHAD M, DULTZ S, GUGGENBERGER G, et al. Dissolved organic matter release and retention in an alkaline soil from the Nile River Delta in relation to surface charge and electrolyte type[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4):385-391.
- [3] 于维水,王碧胜,王士超,等.长期不同施肥下我国4种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J].中国土壤与肥料,2018(2):29-34. YU W S, WANG B S, WANG S C, et al. Characteristics of soil labile organic carbon and carbon management index under different long-term fertilization systems in four typical soils of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(2):29-34.
- [4] 赵满兴,王文强,周建斌.温度对土壤吸附有机肥中可溶性有机碳、氮的影响[J].土壤学报,2013,50(4):842-846. ZHAO M X, WANG W Q, ZHOU J B. Effects of temperature on adsorption of soluble organic carbon and nitrogen from manure on arable soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4):842-846.
- [5] WIEDER W R, ALLISON S D, DAVIDSON E A, et al. Explicitly representing soil microbial processes in earth system models[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(10):1782-1800.
- [6] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4):277-304.
- [7] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报,2011,27(24):207-213. GAO H Y, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24):207-213.
- [8] OREN A, CHEFETZ B. Sorptive and desorptive fractionation of dissolved organic matter by mineral soil matrices[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(2):526-533.
- [9] MAYES M A, HEAL K R, BRANOT C C, et al. Relation between soil order and sorption of dissolved organic carbon in temperate subsoils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3):1027-1037.
- [10] DOSSKEY M G, BERTSCH P M. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(3):920-927.
- [11] 李太魁,王小国,朱波.紫色土可溶性有机碳的吸附-解吸特征[J].农业环境科学学报,2012,31(4):721-727. LI T K, WANG X G, ZHU B. Adsorption and desorption characteristics of dissolved organic carbon (DOC) on the purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):721-727.
- [12] 梁承明,郑小东,徐学池,等.旱地和水田土壤DOC吸附-解吸对pH的响应[J].农业现代化研究,2017,38(3):536-543. LIANG C M, ZHENG X D, XU X C, et al. Response of adsorption and desorption between upland and paddy soils and dissolved organic carbon to pH[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(3):536-543.
- [13] KLAUS 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.
- [14] 韩成卫,李忠佩,刘丽,等.溶解性有机碳在红壤水稻土中的吸附及其影响因素[J].生态学报,2008,28(1):445-451. HAN C W, LI Z P, LIU L, et al. Adsorption of dissolved organic carbon on paddy soils of subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1):445-451.
- [15] 吴萌,李忠佩,冯有智,等.长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J].中国农业科学,2016,49(9):1705-1714. WU M, LI Z P, FENG Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9):1705-1714.
- [16] 徐明岗,张旭博,孙楠,等.农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1441-1449. XU M G, ZHANG X B, SUN N, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6):1441-1449.
- [17] 王庆峰,姜听,马鸣超,等.长期施用氮肥和磷肥对东北黑土丛枝菌根真菌群落组成的影响[J].中国农业科学,2018,51(17):3315-3324. WANG Q F, JIANG X, MA M C, et al. Influence of long-term nitrogen and phosphorus fertilization on arbuscular mycorrhizal fungi community in mollisols of northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17):3315-3324.
- [18] 张淑香,张文菊,徐明岗.土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J].中国农业科学,2020,53(6):1178-1179. ZHANG S X, ZHANG W J, XU M G. Influencing factors and comprehensive analysis of soil active organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6):1178-1179.
- [19] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.几种施肥模式对红壤氮素形态转化和pH的影响[J].中国农业科学,2012,45(14):2877-2885. CAI Z J, SUN N, WANG B R, et al. Experimental research on effects of differ-

- ent fertilization on nitrogen transformation and pH of red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14):2877-2885.
- [20] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变[M]. 二版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. XU M G, ZHANG W J, HUANG S M. Fertility evolution of China's soil[M]. 2nd Edition. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 2015.
- [21] KOTHAWALA D N, MOORE T R, HENDERSHOT W H. Soil properties controlling the adsorption of dissolved organic carbon to mineral soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6):1831-1842.
- [22] 徐基胜, 赵炳梓. 可溶性有机碳在典型土壤上的吸附行为及机理[J]. 土壤, 2017, 49(2):314-320. XU J S, ZHAO B Z. Mechanisms of dissolved organic carbon adsorption on different typical soils in China[J]. *Soils*, 2017, 49(2):314-320.
- [23] 郭利娜, 贾羽旋, 李彤, 等. 森林溶解性有机碳淋溶驱动机制及模拟研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5):1723-1733. GUO L N, JIA Y X, LI T, et al. Research advances in underlying mechanism and modeling of dissolved organic carbon leaching in forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5):1723-1733.
- [24] 俞元春, 何晟, 李炳凯, 等. 杉林土壤溶解有机碳吸附及影响因素分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(2):15-18. YU Y C, HE S, LI B K, et al. The dissolved organic carbon (DOC) adsorption and its influence factor on the soil of Chinese fir plantation [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 29(2):15-18.
- [25] 李太魁, 杨小林, 寇长林, 等. 可溶性有机碳在紫色土中的吸附及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11):1836-1841. LI T K, YANG X L, KOU C L, et al. Adsorption of dissolved organic carbon and its influence factor on purple soils[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, 25(11):1836-1841.
- [26] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3):446-452. HUANG Q, WU J T, CHEN J, et al. Adsorption of dissolved organic carbon (DOC) on soil: A Review[J]. *Soils*, 2015, 47(3):446-452.
- [27] BORKEN W, AHRENS B, SCHULZ C, et al. Site-to-site variability and temporal trends of DOC concentrations and fluxes in temperate forest soils[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7):2428-2443.
- [28] 李森, 张世熔, 罗洪华, 等. 不同施肥处理土壤水溶性有机碳含量特征及动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2):314-319. LI S, ZHANG S R, LUO H H, et al. Concentration characteristics and dynamic changes of water soluble organic carbon in soil under different fertilization treatments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2):314-319.
- [29] 吕艳超, 詹志杰, 王小利. 长期施肥下黄壤水稻土对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 耕作与栽培, 2016(3):4-7. LÜ Y C, ZHAN Z J, WANG X L, et al. Adsorption characteristics of dissolved organic carbon on yellow paddy soil under long-term fertilization[J]. *Tillage and Cultivation*, 2016(3):4-7.