

长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响^①

关强¹, 蒲瑶瑶¹, 张欣¹, 王媛媛¹, 李大明², 李辉信¹, 胡锋¹, 焦加国^{1*}, 管晓进^{3*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省有机固体废物资源化协同创新中心, 南京 210095;

2 江西省红壤研究所, 南昌 331717; 3 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 本研究以江西省红壤研究所水稻土长期定位试验田(始于1981年)为对象, 分析了不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、有机无机配施(NPKM)3种施肥措施对水稻根系有机酸分泌速率及土壤有机碳组分的影响。结果表明: NPK和NPKM处理水稻根系分泌有机酸总量均显著高于CK处理($P < 0.05$, 下同), 其中NPKM处理最高, 提高了54.78%; 相对于CK处理, NPK处理水稻根系酒石酸分泌速率显著增加, 提高了82.63%, NPKM处理的草酸与苹果酸分泌速率显著增加, 分别增加了69.93%、110.98%, 而NPK和NPKM处理的柠檬酸分泌速率分别降低了36.57%与40.57%。与CK处理相比, NPKM处理土壤有机碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳与可溶性有机碳均显著增加, 而NPK处理却无显著变化; 可溶性有机碳结构的进一步分析表明, NPKM处理促进了可溶性有机碳中类胡敏酸和类富里酸物质的累积, 在可溶性有机碳中所占比例分别为31%、44%, NPK处理可溶性有机碳结构无明显变化; CK和NPK处理中可溶性有机碳的有机物来源主要是植物与微生物的混合源, 而NPKM处理主要是微生物代谢所分泌的产物。

关键词: 长期施肥; 红壤性水稻土; 有机酸; 有机碳组分; 可溶性有机碳

中图分类号: S153.6+1; S511.4+2 文献标识码: A

我国红壤主要分布于南方地区, 其面积达到 $5.7 \times 10^5 \text{ km}^2$, 该地区资源丰富复种指数较高, 农业生产潜力巨大, 而水稻是红壤地区最主要的种植作物^[1-2]。在农业耕作中大量施用化学肥料虽增加了水稻产量, 却导致土壤板结、酸化等问题^[3-4]。而在农业耕作中有机肥的施用能显著提高土壤有机碳含量, 改善土壤有机碳结构, 使得我国农业健康持续地发展^[5-6]。

不同施肥措施对土壤有机碳的影响存在显著差异, 相对于施用化肥, 长期施用有机肥土壤有机碳含量升高的同时有机碳活性也随之升高^[7], 使得土壤有机碳更易被植物与土壤微生物吸收利用。其中土壤可溶性有机碳受施肥措施影响较强烈, 虽然可溶性有机碳相对于总有机碳含量极低, 却是土壤有机碳中最为活跃与重要的组分, 即可为土壤微生物生长提供充足的能源, 又是各微生物进行物质传递最直接的媒介^[8-9]。

根系分泌物是植物通过根系释放到土壤中有机的总称, 占植物体通过光合作用固定碳的40%~60%。根系分泌中的有机酸, 作为三羧酸循环的中间产物, 是土壤低分子量有机酸的主要来源^[10]。有研

究表明, 有机酸进入土壤中刺激根际区域微生物与酶活性, 增加根际区域养分含量, 促进植物根系对土壤养分吸收^[11-12]。同时其进入土壤中破坏土壤矿物相结构, 降低矿物对土壤有机碳的保护, 促进土壤有机碳转化^[13]。

本研究选取江西红壤所水稻长期定位试验田, 调查分析不施肥、施用氮磷钾肥、施用氮磷钾肥+有机肥处理水稻根系有机酸分泌与土壤有机碳组成, 以研究不同施肥措施对水稻根系分泌有机酸与各组分有机碳的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区与试验设计

试验地位于江西红壤研究所, 地理坐标为 $116^\circ 20' 24'' \text{ E}$ 、 $28^\circ 15' 30'' \text{ N}$, 供试土壤为第四纪红黏土发育的水稻土。施用化肥定位试验始于1981年, 实行“稻-稻-冬闲”耕作制。本研究选取其中3个施肥处理, 分别为: 不施用肥料(CK); 单施氮磷钾化肥(NPK): 每季施用 $\text{N } 90 \text{ kg/hm}^2$, $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 45 \text{ kg/hm}^2$,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201252)和国家重点研发计划课题(2016YFD0200106, 2016YFD0300908)资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn; guanxiaojin@ofdc.org.cn)

作者简介: 关强(1991—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态。E-mail: gqiang199104@163.com

K₂O 75 kg/hm² ; 有机无机肥配施(NPKM) :在单施氮磷钾化肥的基础上,早稻施用紫云英,晚稻施用猪粪,各 22 500 kg/hm²。

各处理小区面积为 46.7 m², 设置 3 个重复。施肥过程中磷肥(含 P₂O₅ 125 g/kg)与有机肥作为基肥施用,尿素(含 N 460 g/kg)与钾肥(含 K₂O 600 g/kg)分别在水稻返青后与分蘖盛期分两次追施。试验地气候与试验前耕层土壤基本理化性质等信息见文献[14]。

1.2 土壤样品采集与根系分泌物的收集

1.2.1 土壤样品的采集

于 2015 年 6 月上旬采集红壤性水稻土耕层(0 ~ 20 cm)土壤,各小区采用 S 形采样并分别混匀,剔除较大的植物残体与石块等。部分土样立即过筛(10 目),测定微生物生物量碳与可溶性有机碳。其余土样室内通风阴干,过 100 目筛,测定土壤有机碳与颗粒有机碳。

1.2.2 根系分泌物的采集

同一时间采集水稻植株(抽穗期)样品,各小区随机采集 5 株水稻植株并保持根系完整,用蒸馏水洗去水稻根系表面吸附的物质,置于 500 ml 烧杯中,保持根部避光,光照培养 4 h,收集溶液,用真空旋转蒸发器 37℃ 浓缩定容至 25 ml,用于有机酸含量测定。

1.3 测定方法

采用高效液相色谱(Agilent 1100)测定有机酸包括草酸、酒石酸、苹果酸、柠檬酸、乙酸、反丁烯二酸的含量,具体测定条件参照谢明吉等^[15]的方法。土壤有机碳与微生物生物量碳采用常规分析方法测定^[16]。土壤颗粒有机碳与矿物结合有机碳的测定参照 Cambardella 和 Elliott^[17]的方法。可溶性有机碳采用超纯水按水土比 5 : 1 浸提,震荡 120 min,TOC 分析仪(Elementar Vario EL III)测定^[18]。可溶性有机碳三维荧光参照 Chen 等^[19]采用荧光光度计(Varian Eclipse)测定。

三维荧光光谱可分成 5 个连续的区域:类酪氨酸蛋白质区(区域 I, Ex/Em : 220 ~ 250/280 ~ 330 nm)、

类色氨酸蛋白质区(区域 II, Ex/Em : 220 ~ 250/330 ~ 380 nm)、类富里酸区(区域 III, Ex/Em : 220 ~ 250/380 ~ 480 nm)、类溶解性微生物代谢产物区(区域 IV, Ex/Em : 250 ~ 360/280 ~ 380 nm)、类胡敏酸区(区域 V, Ex/Em : 250 ~ 420/380 ~ 520 nm)^[19-21]。通过计算各区域积分体积,然后对各积分体积进行标准化后计算各区域标准积分体积所占比例。三维荧光光谱中各区域物质荧光强度用硫酸奎宁进行标准化计算相对荧光强度(QSU)^[22]。将 0.05 mol/L 的硫酸溶液溶解 10 μg/L 硫酸奎宁在 Ex/Em=350/455 nm 处的荧光强度定义为 10 QSU。

1.4 数据处理

试验结果采用 Microsoft Excel 2013 以及 IBM SPSS Statistic 22 进行方差分析,采用 Sigmaplot 12.0 作图。

2 结果与讨论

2.1 长期不同施肥对水稻植株生物量及根系分泌有机酸的影响

长期不同施肥处理水稻生物量与各部位生物量均表现为 NPKM>NPK>CK。相对 CK 处理,NPK 处理单株水稻生物量与地上部生物量显著增加,分别增加 50.86%、68.06%,NPKM 处理单株水稻总生物量与地上、地下生物量均显著增加,分别增加 102.26%、123.02%、73.34%。长期不同施肥对水稻根系有机酸分泌速率的影响如表 1 所示,水稻根系分泌有机酸组成以草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸和乙酸为主,其中草酸分泌速率最高,这与先前报道的结果一致^[23-24]。相对 CK 处理,NPK 与 NPKM 处理水稻根系分泌有机酸总量显著增加,并以 NPKM 处理最高。NPK 处理水稻根系酒石酸、反丁烯二酸分泌速率显著增加,NPKM 处理水稻根系草酸、苹果酸分泌速率显著增加,而 NPK 和 NPKM 处理的柠檬酸分泌速率均显著降低。

表 1 长期施肥对水稻植株生物量及根系有机酸分泌速率的影响

Table 1 Effects of long-term fertilization treatments on rice biomass and secreting rates of root organic acids

指标		CK	NPK	NPKM
植株生物量(g/株)	总生物量	34.08 ± 1.92 c	51.41 ± 2.64 b	68.93 ± 6.73 a
	地上部生物量	19.84 ± 1.11 c	33.33 ± 1.71 b	44.24 ± 3.85 a
	地下部生物量	14.24 ± 0.95 b	18.08 ± 0.99 ab	24.69 ± 4.03 a
有机酸分泌速率(μg/(gDW·h))	有机酸总量	71.32 ± 5.82 b	99.36 ± 2.44 a	110.39 ± 8.34 a
	草酸	26.58 ± 5.23 b	38.63 ± 4.87 ab	45.17 ± 3.27 a
	酒石酸	7.83 ± 1.50 b	14.38 ± 1.61 a	9.64 ± 0.94 ab
	苹果酸	15.39 ± 1.04 b	22.91 ± 2.88 ab	32.47 ± 5.26 a
	柠檬酸	5.25 ± 0.65 a	3.33 ± 0.29 b	3.12 ± 0.20 b
	乙酸	16.12 ± 0.74 a	19.88 ± 4.46 a	19.80 ± 5.06 a
	反丁烯二酸	0.14 ± 0.02 a	0.24 ± 0.02 b	0.19 ± 0.02 ab

注:同行不同小写字母表示处理间差异在 P<0.05 水平显著。

有研究表明,在缺乏营养元素或不施肥条件下水稻根系分泌有机酸总量会降低^[25-26],本试验也得到了相同的结果。NPKM 处理水稻根系分泌有机酸总量最高,说明有机物的施用有利于水稻根系有机酸的分泌^[25]。水稻根系总有机酸分泌速率的增加与植物生物量的增加和根系活力的提高密切相关,施用适量的化肥或有机肥可提高植物生物量和水稻根系活力^[27-28]。对于各有机酸分泌速率,有研究发现施肥可增加根系分泌草酸、酒石酸、苹果酸与反丁烯二酸分泌速率^[25],本试验研究结果与其基本一致。相比 CK 处理,NPK 和 NPKM 处理柠檬酸分泌速率显著降低,分别降低了 36.6% 与 40.6%,而在常二华等^[26]的研究中,缺磷条件下水稻根系分泌草酸、酒石酸与柠檬酸增加,与本试验结果不同,这可能与施肥差异有关。本试验中 CK 处理土壤磷含量较低,而柠檬酸对土壤磷素有持续活化作用^[29],因此水稻根系分泌柠檬酸速率增加刺激土壤磷的活化,促进水稻生长。

2.2 长期不同施肥对土壤有机碳组分的影响

2.2.1 长期不同施肥对土壤有机碳组分的影响

颗粒有机碳(POC)主要以土壤中新鲜的动植物残体与腐化的有机物之间过渡的有机碳的形态存在,易被微生物分解利用,可表征土壤易被利用有机碳的量^[17,30-31];矿物结合有机碳(MOC)主要是土壤中被吸附保护的有机碳,不易被微生物分解利用,可间接表示土壤有机碳被利用的难易程度^[17,32-33]。土壤中颗粒有机碳与矿物结合有机碳的比值(POC/MOC)可

反映土壤有机碳的稳定程度,POC/MOC 值越大说明土壤有机碳活性较高、易矿化,反之则说明有机碳越稳定^[34];微生物生物量碳(MBC)主要存在于土壤微生物体内,属于较为活跃且易变化的有机碳^[35];可溶性有机碳(DOC)是土壤有机碳中最活跃的组分,主要来源于有机碳分解、植物根系分泌、微生物的代谢与凋落,极易被微生物吸收利用^[8,36]。

长期不同施肥对水稻土各组分土壤有机碳的影响见表 2。相较 CK 处理,NPKM 处理 SOC、POC、POC/MOC、MBC 与 DOC 均显著提高,分别增加 23.2%、59.9%、39.6%、75.2% 与 42.8%,而 MOC 变化不显著,而 NPK 处理的各有机碳组分含量虽略有升高但无显著差异。总体来说,NPKM 处理能显著增加 SOC 含量,而 NPK 处理却无显著增加。许多研究表明有机无机配施相对于单施化肥能促进 SOC 的累积及 POC 的增加^[37-38]。陈小云等^[7]研究发现,在施用化肥的基础上增施有机肥增加了水稻土中活性有机碳的含量;孙凤霞等人^[39]的研究发现,有机肥的施入能大幅增加土壤微生物的活性,从而促进土壤有机碳的活化。NPKM 处理显著增加 MBC 含量,因为施用有机肥显著改善土壤环境使其更适宜微生物生长,并为微生物生长繁殖供给了充足的碳源,使 MBC 含量显著增加^[15,35]。有研究表明,有机无机配施处理土壤有机碳在微生物和养分的共同作用下加速分解,释放出大量的活性有机碳,同时土壤微生物活性的提高促进细胞代谢与凋落,从而增加了 DOC 的含量^[20,40]。

表 2 长期施肥对土壤有机碳组分的影响
Table 2 Effects of long-term fertilization treatments on soil organic carbon components

处理	SOC(g/kg)	POC(g/kg)	MOC(g/kg)	POC/MOC	MBC(mg/kg)	DOC(mg/kg)
CK	20.33 ± 0.54 b	3.73 ± 0.16 b	16.60 ± 0.70 a	0.23 ± 0.02 ab	673.71 ± 24.01 b	42.92 ± 4.21 b
NPK	21.39 ± 0.65 b	3.62 ± 0.48 b	17.77 ± 0.74 a	0.21 ± 0.03 b	732.63 ± 51.22 b	48.27 ± 2.18 b
NPKM	25.06 ± 1.07 a	5.97 ± 0.44 a	19.09 ± 1.16 a	0.32 ± 0.04 a	1180.15 ± 37.57 a	61.30 ± 2.27 a

注:表中 SOC 表示土壤有机碳,POC 表示颗粒有机碳,MOC 表示矿物结合有机碳,MBC 表示微生物生物量碳,DOC 表示可溶性有机碳;同列不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。

2.2.2 长期不同施肥对土壤可溶性有机碳组成的影响

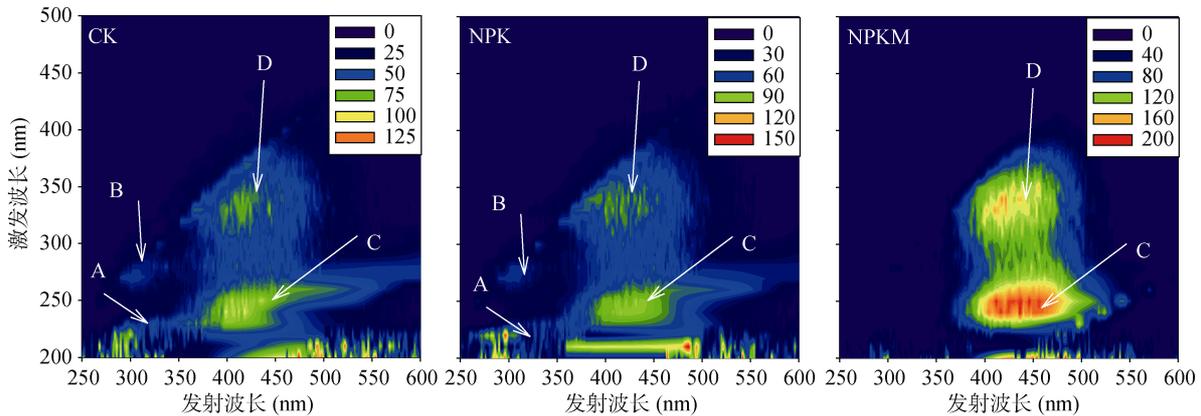
1) 长期不同施肥对土壤可溶性有机碳三维荧光光谱特征的影响。三维荧光(EEM)光谱可通过同时改变激发波长与发射波长获取相关物质所有的荧光特征,是一种快速、灵敏、受化学药品影响小的检测技术,可用于研究土壤可溶性有机碳的物理化学特征^[41]。长期不同施肥处理土壤可溶性有机碳三维荧光光谱如图 1 所示,与 CK、NPK 处理相比,NPKM 处理的三维荧光光谱特征发生变化显著,仅能发现类富里酸(C)与类胡敏酸(D)2 个荧光峰,其中类胡敏酸(D)峰沿着

发射波长轴偏移,CK 与 NPK 处理的三维荧光图谱特征基本一致,均能发现类蛋白质(A)、类溶解性微生物代谢产物(B)、类富里酸(C)与类胡敏酸(D)4 个荧光峰,NPK 处理各荧光峰位置均未发生显著变化。

对于不同施肥处理荧光光谱各区域峰的相对荧光强度 QSU 的分析表明(表 3),各处理中 C、D 峰相对于 A、B 峰有更高的 QSU 值,说明土壤可溶性有机碳中类胡敏酸与类富里酸物质普遍高于类蛋白质物质与类溶解性微生物代谢产物。NPK 处理荧光光谱中 A、B、C、D 峰 QSU 值相对于 CK

处理小幅增加,而 NPKM 处理 C、D 峰 QSU 值相对于 CK 处理大幅增加,分别增加了 123.77% 和 119.45%,而 A、B 峰在图 1 中并未显示,这与 Yu

等^[42]的结果相似,这是由于类胡敏酸与类富里酸物质较高的荧光强度掩蔽了类蛋白质与类溶解性微生物代谢产物的峰。



(A: 类蛋白质荧光峰, B: 类可溶性微生物副产物荧光峰, C: 类富里酸荧光峰, D: 类胡敏酸荧光峰)

图 1 长期不同施肥处理土壤可溶性有机碳三维荧光图谱

Fig. 1 EEM contours of soil DOC under different long-term fertilization treatments

表 3 各施肥处理土壤可溶性有机碳荧光光谱参数

Table 3 Parameters of fluorescence spectra under different long-term fertilization treatments

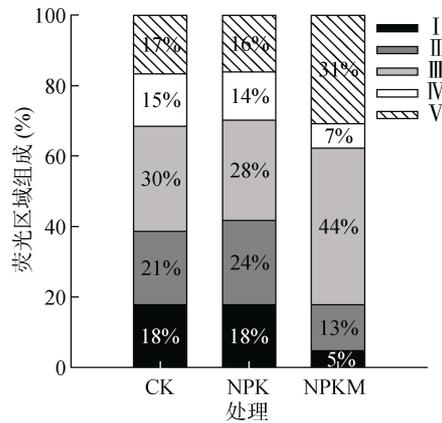
处理	峰 A		峰 B		峰 C		峰 D		荧光指数
	Ex/Em	QSU	Ex/Em	QSU	Ex/Em	QSU	Ex/Em	QSU	
CK	230/360	9.08	270/306	5.98	230/418	13.63	340/416	11.34	1.74
NPK	220/356	9.31	270/310	6.24	230/416	14.28	330/416	11.79	1.71
NPKM	240/370	9.06	290/370	6.95	230/436	29.92	340/421	25.37	2.39

荧光指数(荧光光谱激发波长为 370 nm 时,发射波长在 450 nm 与 500 nm 处的比值)可表征土壤可溶性有机碳中有机物是来源于微生物代谢还是外源植物残体^[43]。荧光指数低于 1.4 时,表明可溶性有机碳中有机物主要来源于外源植物残体,而荧光指数高于 1.9 时,表明可溶性有机碳中有机物主要来源于土壤微生物分泌^[44]。表 3 中 CK 与 NPK 处理荧光指数分别为 1.74 与 1.71,表明其可溶性有机碳中的有机物来源是植物与微生物的混合源。NPKM 处理荧光指数高达 2.39,则说明可溶性有机碳中的有机物主要是微生物代谢所分泌的产物。这可能与土壤微生物活性的差异有关,有研究结果表明有机无机配施能显著提高土壤微生物活性,而单施化肥对土壤微生物量的影响并不显著^[14],表 2 中土壤微生物生物量碳含量的结果也证明了这一结果。石坤等^[45]研究外源有机物料对水稻土可溶性有机碳三维荧光的影响,发现施用有机物料后荧光指数的变化受微生物活动的影响。因此,NPKM 处理荧光指数的增加是由于土壤微生物活性的增加使其消耗更多的外源有机碳,并且土壤微生物代谢与凋落产生的有机碳同时增大。

2) 长期不同施肥对土壤可溶性有机碳三维荧光

各区域积分的影响。不同施肥处理的土壤可溶性有机碳各区域物质组成分析结果显示(图 2),CK 与 NPK 处理中各区域物质所占比例趋势基本一致,由高到低分别为类富里酸物质()>类色氨酸蛋白质物质()>类酪氨酸蛋白质物质()>类胡敏酸物质()>类溶解性微生物代谢产物(),而 NPKM 处理的类富里酸物质和类胡敏酸物质所占比例大幅增加,分别为 31% 和 44%,而类色氨酸蛋白质物质、类溶解性微生物代谢产物、类酪氨酸蛋白质 3 类物质均不同程度降低。这种变化的差异与有机肥施入引起土壤有机碳的激发效应有关,随着有机肥的施入可刺激土壤微生物活性,促进土壤可溶性有机碳中活性蛋白质类物质转化为更稳定的类富里酸与类胡敏酸物质^[42,46],并且此形态的有机物能较长地保存于土壤中,因此 NPKM 处理土壤可溶性有机碳中类富里酸物质与类胡敏酸物质所占比例显著增加,而类色氨酸蛋白质物质与类酪氨酸蛋白质所占比例显著降低。

综上所述,与 CK 相比,长期的 NPKM 处理显著改变了土壤可溶性有机碳的形态结构,可溶性有机碳主要来源于土壤微生物的代谢与凋落,其总量的增加主要源于类富里酸物质与类胡敏酸物质的增加;而



(I: 类酪氨酸蛋白质物质, II: 类色氨酸蛋白质物质, III: 类富里酸物质, IV: 类溶解性微生物代谢产物, V: 类胡敏酸物质)

图 2 长期不同施肥处理土壤可溶性有机碳各区域有机物组成分布的变化

Fig. 2 Changes in FRI distributions of soil DOC under different long-term fertilization treatments

长期 NPK 处理对土壤可溶性有机碳结构的影响并不明显,各区域有机物主要由外源植物残体和土壤微生物分泌代谢共同产生。

3 结论

长期施肥尤其是有机无机配施能显著提高水稻根系分泌有机酸的速率。有机无机配施处理主要促进了草酸、苹果酸的分泌,单施化肥处理则促进了酒石酸的分泌。有机无机配施相较于不施肥或单施化肥处理能显著增加土壤有机碳的含量,降低土壤有机碳的稳定性,使其更易被微生物分解利用,还能显著改变土壤可溶性有机碳结构,促进可溶性有机碳中蛋白类物质转化为类富里酸与类胡敏酸物质,使得类富里酸与类胡敏酸物质荧光强度大幅增加。

参考文献:

[1] Lou Y, Li Z, Zhang T. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of China[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2003, 149(1): 281-293

[2] 李忠芳, 娄翼来, 李慧, 等. 长期施肥下我国南方不同轮作制度水稻的高产稳产性分析[J]. *土壤*, 2015, 47(5): 830-835

[3] 倡国涵, 王毅, 徐大兵, 等. 不同施肥结构对酸性黄棕壤修复效果研究[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 714-719

[4] 章明奎, 徐建民. 亚热带低丘区退化红壤肥力质量恢复性能的研究[J]. *水土保持学报*, 2002 (1): 67-71

[5] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 597-606

[6] 黄庆海. 长期施肥红壤农田地力演变特征[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014

[7] 陈小云, 郭菊花, 刘满强, 等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 125-131

[8] Lützw V M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183-2207

[9] Xiao J, He X, Hao J, et al. New strategies for submicron characterization the carbon binding of reactive minerals in long-term contrasting fertilized soils: implications for soil carbon storage[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(12): 3607-3618

[10] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618

[11] Haichar F Z, Santaella C, Heulin T, et al. Root exudates mediated interactions belowground[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77: 69-80

[12] Jones D L, Hodge A, Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition[J]. *New Phytologist*, 2004, 163(3): 459-480

[13] Nobili M, Contin M, Mondini C, et al. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(9): 1163-1170

[14] 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 697-705

[15] 谢明吉, 严重玲, 叶菁. 菲对黑麦草根系几种低分子量分泌物的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 576-579

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000

[17] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783

[18] 汪太明, 香宝, 孙强, 等. 交替冻融对松花江流域典型土壤可溶性有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 685-689

[19] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701-5710

[20] Xu H, He P, Wang G, et al. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy and gel-permeating chromatography to characterize extracellular polymeric substances in aerobic granulation[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(11): 2931-2942

[21] He X S, Xi B D, Li X, et al. Fluorescence excitation-emission matrix spectra coupled with parallel factor and regional integration analysis to characterize organic matter humification[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 2208-2215

[22] Zhang Y, van Dijk M A, Liu M, et al. The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: Field

- and experimental evidence[J]. *Water Research*, 2009, 43(18): 4685–4697
- [23] Jones D L, Dennis P G, Owen A G, et al. Organic acid behavior in soils—misconceptions and knowledge gaps[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 31–41
- [24] Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P. The rhizosphere: Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface[M]. Boca Raton: CRC press, 2007
- [25] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 140–146
- [26] 常二华, 张耗, 张慎凤, 等. 结末期氮磷营养水平对水稻根系分泌物的影响及其与稻米品质的关系[J]. *作物学报*, 2007, 33(12): 1949–1959
- [27] 肖新, 朱伟, 肖靓, 等. 不同水肥管理对水稻分蘖期根系特征和氮磷钾养分累积的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 903–908
- [28] 宋轩, 曾德慧, 林鹤鸣. 草炭和风化煤对水稻根系活力和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 867–870
- [29] 王艳玲, 何园球, 李成亮. 柠檬酸对红壤磷的持续活化效应及其活化机理的探讨[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 130–136
- [30] Mrabet R, Saber N, El-Brahli A, et al. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 57(4): 225–235
- [31] Conant R T, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(6): 386–392
- [32] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. *Soil Research*, 1994, 32(2): 285–309
- [33] Hassink J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(6): 1631–1635
- [34] 于建光, 李辉信, 胡锋, 等. 施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(3): 606–610
- [35] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367–385
- [36] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3): 211–235
- [37] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 353–360
- [38] 王雪芬. 长期施肥对红壤基本性质, 有机碳库及其化学结构的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012
- [39] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2792–2798
- [40] Adams A B, Harrison R B, Sletten R S, et al. Nitrogen-fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1): 313–325
- [41] Sheng G P, Yu H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Water Research*, 2006, 40(6): 1233–1239
- [42] Yu G H, Wu M J, Wei G R, et al. Binding of organic ligands with Al () in dissolved organic matter from soil: implications for soil organic carbon storage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(11): 6102–6109
- [43] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1): 38–48
- [44] Nam S N, Amy G. Differentiation of wastewater effluent organic matter (EfOM) from natural organic matter (NOM) using multiple analytical techniques[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(7): 1009–1015
- [45] 石坤, 夏昕, 关强, 等. 基于荧光分析的不同有机碳水平水稻土添加外源有机物培养对 DOC 的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 227–233
- [46] 王莹, 阮宏华, 黄亮亮, 等. 围湖造田不同土地利用方式土壤水溶性有机碳的变化[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2010, 34(5): 109–114

Effects of Long-term Fertilization on Organic Acids in Root Exudates and SOC Components of Red Paddy Soils

GUAN Qiang¹, PU Yaoyao¹, ZHANG Xin¹, WANG Yuanyuan¹, LI Daming²,
LI Huixin¹, HU Feng¹, JIAO Jiaguo^{1*}, GUAN Xiaojin^{3*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Red Soil Institute of Jiangxi Province, Nanchang 331717, China; 3 Institute Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: Based on the long-term fertilization experiment conducted since 1981 in red paddy soil in the Red Soil Institute of Jiangxi Province, China, the effects of different fertilization treatments, including no fertilizer (CK), chemical fertilizer only (NPK), chemical fertilizer plus organic manures (NPKM) were studied on the secreting rates of organic acids in rice root exudates and on SOC components. Results showed that NPK and NPKM treatments increased total organic acid contents in the root exudates compared with CK treatment ($P < 0.05$, the below is same). Compared with treatment of CK, NPK treatment significantly increased the secreting rate of tartaric acid by 82.63%, NPKM treatment significantly increased oxalic acid and malic acid by 69.93% and 110.98%, respectively; however, NPK and NPKM treatments significantly decreased citric acid secreting rates by 36.57% and 40.57%, respectively. Compared with CK, NPKM treatment significantly increased the contents of soil organic carbon (SOC), particulate organic carbon (POC), microbial biomass organic carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC), while NPK treatments influenced these components insignificantly. NPKM treatment also promoted the accumulation of humic acid-like and fulvic acid-like materials, which constituted 31% and 44% of DOC, respectively; whereas NPK treatment changed DOC components little. The organic matters of DOC were botanically and microbially derived in CK and NPK treatments, while they were resulted from the processes such as extracellular release and microorganism excretion in NPKM treatment.

Key words: Long-term fertilization; Red paddy soil; Organic acid; Organic carbon fractions; Dissolved organic carbon