



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

引用本文:

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810–819.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同施肥制度对南方旱地红壤微生物组结构和功能影响研究进展

荀卫兵, 王伯仁, 冉炜, 沈其荣, 徐明岗, 张瑞福

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 537–544 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0448>

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>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810–819.

LAN X J, LIU Y R, HOU H Q, et al. Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 810–819.



开放科学 OSID

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^{1,2}, 刘益仁^{1,2}, 侯红乾^{1,2}, 吕真真^{1,2}, 冀建华^{1,2}, 冯兆滨^{1,2}, 刘秀梅^{1,2*}

(1. 国家红壤改良工程技术研究中心/江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200; 2. 农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 南昌 330200)

摘要:为研究长期有机无机肥配施对红壤性水稻田作物产量、土壤微生物生物量及有机碳分子结构的影响,以始于1984年的江西红壤性水稻田长期定位试验为平台,选取的试验处理包括:不施肥(CK)、单施化肥(NPK)和等养分条件下70%化肥配施30%有机肥(NPKM1)、50%化肥配施50%有机肥(NPKM2)、30%化肥配施70%有机肥(NPKM3),采用固体¹³C核磁共振测定了土壤有机碳组分含量,分析了土壤化学指标和土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)。结果表明,连续34年的不同施肥处理显著影响了水稻产量、土壤微生物生物量及土壤有机碳(SOC)分子结构。与NPK处理相比,有机肥配施(NPKM1、NPKM2、NPKM3)提高了水稻产量,增幅为6.5%~7.7%($P>0.05$),中低有机肥配施比例(30%和50%)稳产效果更优。长期单施化肥使土壤严重酸化,而配施有机肥可减缓土壤酸化。长期施肥处理MBC和MBN较CK处理分别显著提高17.0%~71.1%和104.1%~267.0%,但MBC/MBN下降,有机无机肥配施处理较NPK处理提高了微生物熵。长期单施化肥主要提高了烷基碳的相对含量,而配施有机肥同时提高烷基碳和烷氧碳(甲氧基/含氮烷基碳)含量,有利于土壤活性有机质累积。Pearson相关性分析表明土壤微生物生物量与SOC、氮磷养分指标及甲氧基/含氮烷基碳呈显著或极显著正相关,与芳基碳和羧基碳呈显著负相关。冗余分析显示SOC、有效磷、速效钾及烷基碳等对水稻产量的影响较大。研究表明,在供试条件下,长期实行中低比例有机肥配施化肥有利于提高土壤养分和土壤微生物生物量,并改善土壤有机质结构,是维持作物高产和提升土壤质量的有效施肥措施。

关键词:长期施肥;红壤;双季稻田;微生物生物量碳;微生物生物量氮;核磁共振

中图分类号:S154.3;S153.621 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)05-0810-10 doi: 10.13254/j.jare.2020.0584

Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy

LAN Xianjin^{1,2}, LIU Yiren^{1,2}, HOU Hongqian^{1,2}, LÜ Zhenzhen^{1,2}, JI Jianhua^{1,2}, FENG Zhaobin^{1,2}, LIU Xiumei^{1,2*}

(1. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation (The Middle Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanchang 330200, China)

Abstract: This study aimed to explore the effects of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on rice yield, soil microbiological properties, and the molecular structure of organic carbon in red paddy under 34-years of long-term fertilization. Five

收稿日期:2020-10-12 录用日期:2020-12-18

作者简介:蓝贤瑾(1989—),男,江西南康人,硕士,助理研究员,从事土壤改良与有机培肥研究。E-mail:1003459056@qq.com

*通信作者:刘秀梅 E-mail:lxm3392@163.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFD0200703, 2017YFD0200702);国家自然科学基金项目(32060725, 31460544);江西省现代农业协同创新项目(JXXTCX202001)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2018YFD0200703, 2017YFD0200702); National Natural Science Foundation of China (32060725, 31460544); Cooperative Innovation Program of Modern Agricultural Scientific Research in the Jiangxi Province (JXXTCX202001)

treatments were selected; no fertilizer (CK), nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers (NPK), 70% NPK fertilizers combined with 30% organic manure (NPKM1), 50% NPK fertilizers combined with 50% organic manure (NPKM2), and 30% NPK fertilizers combined with 70% organic manure (NPKM3). Long-term organic manure fertilization combined with chemical fertilizers increased rice yield from 2008 to 2017, which was higher than NPK treatment with 6.5%~7.7% ($P>0.05$), and the combined application of manure with a low and middle proportion (e.g., 30% and 50%) was optimal. Long-term single application of chemical fertilizers induced severe acidification, but organic manure application alleviated acidification. The soil microbial biomass carbon and nitrogen were raised under long-term fertilization by 17.0%~71.1% and 104.1%~267.0%, respectively, but their ratio was decreased. Meanwhile, the soil microbial quotient was increased in treatments with manure application. ^{13}C nuclear magnetic resonance spectroscopy revealed that long-term single application of chemical fertilizers improved the relative content of alkyl C, whereas combined application of manure further improved O-alkyl C (mainly $\text{OCH}_3/\text{NCH C}$), thus providing more benefit for accumulation of the labile organic matter. Furthermore, Pearson analysis indicated that there was significant positive relationship between soil microbiological properties and soil organic carbon, nitrate and phosphorus and $\text{OCH}_3/\text{NCH C}$; While the soil microbiological properties were negatively related to aromatic and carbonyl C. The redundancy analysis showed that the factors which influence rice yield were in the order of soil organic carbon, available phosphorus, available potassium and alkyl C. Under the experimental conditions, the combined application of chemical fertilizers with organic manure at a low and middle proportion was more beneficial to the maintenance of high rice yield, raised soil microbial biomass and improved the molecular structure of soil organic matter.

Keywords: long-term fertilization; red soil; double cropping paddy field; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen; nuclear magnetic resonance

化肥对促进作物生长具有重要作用,有研究认为我国约45%的粮食产量来自于化肥氮的贡献^[1]。但化肥的大量或过量施用在提高作物单位面积产量的同时,也导致了土壤酸化、土壤生物多样性降低、温室气体过量排放和农业面源污染等一系列的土壤及生态环境问题^[2-3]。以畜禽粪便或农作物秸秆为原料的有机肥富含有机质、腐殖质、微量营养元素和有益微生物等,当其与化肥配施或部分替代化肥施加至土壤后,兼顾了单质化肥的速效性和有机肥养分持久释放的优点,既可合理利用资源,又能有效增加土壤有机碳含量,改善土壤养分平衡,有利于保持作物高产稳产^[4-6]。

红壤作为我国南方主要的土壤类型之一,其总面积约110万 km^2 ,占国土面积的11.8%^[7]。红壤质地黏重,多处于高温高湿气候条件下,这使其成为最脆弱的耕地资源之一^[8]。而施肥被认为是提升红壤作物产量和肥力水平、提高其生产潜力的重要措施^[9]。众多研究表明,有机无机肥配施或有机肥部分替代化肥较单施化肥在改善红壤肥力水平和提高作物产量上具有明显优势。王伯仁等^[10]和蔡泽江等^[11]研究发现,与单施化肥相比,有机无机肥配施可明显提高红壤旱地土壤养分尤其土壤全量养分含量。侯红乾等^[4]、吕真真等^[12]基于长期定位试验的研究发现,与单施化肥相比,有机无机肥配施对红壤水田的培肥作用更明显。刘淑军等^[13]也发现,配施有机肥是提高红壤作物产量和土壤肥力质量指数的有效措施。由红壤发育而成的红壤性水稻土在我国土壤分类系统中占重要

地位,对保障南方乃至全国粮食产量和农业经济发展具有重要作用^[14-15]。此前,有关有机无机肥配施下红壤性水稻土的研究多集中于作物产量^[4]、土壤肥力质量指数^[12-13]和氮肥利用率^[16-17]等方面,缺乏对土壤微生物与土壤有机碳(SOC)分子结构间相互作用的研究。作为陆地生态系统的重要组成部分,土壤微生物不仅是土壤养分物质循环转化的动力^[15,8],同时也是土壤有机质矿化分解、腐殖质形成的关键参与者,对SOC的形成具有重要作用^[14]。近期的研究认为,尽管土壤中活性微生物生物量碳仅占SOC的2%左右,但微生物死亡后所形成的微生物残体中的碳含量却超过80%,是土壤矿物结合态有机碳的主要来源^[18];另一方面,土壤微生物也影响着土壤有机质的结构,如YUAN等^[19]的研究发现当高山草甸土微生物群落由真菌主导转向细菌主导时,能加速SOC中含氧烷基碳的分解。项目组前期的研究显示,长期有机无机肥配施在显著提高红壤性水稻土SOC含量的同时^[4],也大幅提高土壤微生物生物量并改变其群落结构^[5],而微生物性状的变化,可能会对SOC含量及其分子结构产生影响,但目前鲜有这方面的研究。因此,本研究以江西省红壤性水稻田长期定位试验为研究平台,分析了有机无机肥配施对水稻产量、土壤微生物生物量及有机碳分子结构的影响,探讨土壤微生物学特性与土壤理化指标及有机碳分子结构特征之间的相互影响,以期优化红壤稻田施肥方法、提高南方红壤区土壤质量和培育土壤肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

红壤性双季稻田长期定位试验位于江西省南昌县省农科院试验农场内(28°57'N, 115°94'E), 海拔25 m。地处中亚热带, 隶属鄱阳湖气候区, 年平均气温17.6℃, 有效积温5400℃·d, 年降雨量1610 mm, 年蒸发量1800 mm, 无霜期约280 d。试验基地种植制度为一年两熟双季稻(早稻-晚稻), 土壤为第四纪亚红黏土母质发育的中潜黄泥田, 1984年其0~20 cm土层土壤理化性质: 容重1.25 g·cm⁻³, pH 6.50, 有机质25.6 g·kg⁻¹, 全氮1.36 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验始于1984年, 设5个处理, 3次重复, 随机区组排列, 小区独立排灌, 面积为33.3 m², 小区间以0.70 m深、0.30 m宽的水泥田埂隔开。早、晚稻分别在每年7月下旬和10月下旬收获。试验处理组: ①不施肥(CK); ②氮磷钾肥(NPK); ③低比例有机肥配施氮磷钾肥(有机N配施比例30%, NPKM1); ④中比例有机肥配施氮磷钾肥(有机N配施比例50%, NPKM2); ⑤高比例有机肥配施氮磷钾肥(有机N配施比例70%, NPKM3)。NPKM1、NPKM2、NPKM3处理与NPK处理中N的总用量一致, 其有机肥配施比例根据N用量计算, 用相应化肥补足磷和钾。早稻和晚稻分别施纯氮150、180 kg·hm⁻², 早稻和晚稻施磷(P₂O₅)、钾(K₂O)分别为60、150 kg·hm⁻²。氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%), 钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)。早稻所施有机肥为紫云英, 其鲜草养分含量按N 0.030、P₂O₅ 0.008、K₂O 0.023 g·kg⁻¹计; 晚稻所施有机肥为猪粪, 其养分含量按N 0.045、P₂O₅ 0.019、K₂O 0.060 g·kg⁻¹计。磷肥和有机肥全部基施, 氮肥分别作基施肥(50%)、分蘖肥(25%)、幼穗分化肥(25%), 钾肥全部追施(50%作分蘖肥, 50%作幼穗分化肥)。不同处理的养分投入总量如表1所示。每年

早晚稻成熟后按小区进行人工收割, 单打单收, 测定各小区稻谷产量。

1.3 样品采集与处理

试验于2017年晚稻收获后采用土钻钻取深度为0~20 cm土壤鲜样, 各小区随机取5个点, 剔除植物残根和杂物, 混匀后将样品分为两部分带回实验室, 一部分土壤样品于4℃短暂保存, 进行土壤微生物活性测定; 其余土样自然风干后研磨、过筛, 测定土壤养分含量及有机碳组分。

参照《土壤农业化学分析方法》^[20]进行土壤基本理化指标测定: 土壤pH采用酸度计电位法(土水比1:2.5); 有机质用重铬酸钾外加热法; 全氮(TN)用凯氏定氮法; 全磷(TP)用高氯酸/硫酸-钼锑抗比色法; 全钾(TK)用碱熔-火焰光度法; 碱解氮(AN)用1.0 mol·L⁻¹ NaOH碱解扩散法; 速效钾(AK)用1.0 mol·L⁻¹ NH₄OAc浸提-火焰光度法; 有效磷(AP)用Olsen法; 土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)采用氯仿-熏蒸法测定。

固态核磁共振(¹³C-NMR)样品预处理: 称量5.0 g不同处理土壤风干样品置于100 mL塑料离心管中, 加50 mL HF溶液(体积分数10%)并振荡1 h, 离心机上离心(3000 r·min⁻¹)10 min, 弃去上清液, 残余物继续用HF溶液处理。共重复处理8次, 振荡时间分别为4次×1 h、3次×12 h、1次×24 h。HF处理完以后, 用蒸馏水清洗残余物3次以去除HF。方法如下: 加50 mL双蒸水, 振荡10 min, 离心(4500 r·min⁻¹)10 min, 弃去上清液, 重复3次。随后将残余物置于40℃烘箱中烘干, 并用玛瑙研钵研磨, 过0.149 mm筛, 留待¹³C-NMR上机测定。

¹³C-NMR分析所用核磁共振仪为Bruker Avance 400(南京理工大学), 测试条件: 7 mm转子, 光谱频率100 MHz, ¹H 90°脉冲长度4 μs, 接触时间1 ms, 迟滞时间0.5 s。NMR功能基团面积积分用Mest ReNova软件进行, 各类有机碳功能基团的化学位移与积分范

表1 长期定位试验各处理养分投入量(kg·hm⁻²)

Table 1 Annual application rates of net nutrients in the long-term experiment (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	紫云英(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	猪粪(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
CK	0	0	0	0-0-0	0	0	0	0-0-0
NPK	150.0	60.0	150.0	0-0-0	180.0	60.0	150.0	0-0-0
NPKM1	105.8	48.0	116.4	44.3-11.7-33.7	125.8	38.6	87.0	54.2-21.4-63.0
NPKM2	74.8	40.2	93.6	74.9-19.8-56.9	90.1	24.5	45.5	89.9-35.5-104.5
NPKM3	46.0	33.0	71.4	103.9-27.4-78.9	54.0	10.2	3.5	126.0-49.8-146.5

围分别为:烷基碳(Alkyl C) $\delta=0\sim 45$;甲氧基/含氮烷基碳($\text{OCH}_3/\text{NCH}_3$) $\delta=45\sim 65$;含氧烷基碳(O-alkyl C) $\delta=65\sim 90$;异头碳(Anomeric C) $\delta=90\sim 112$;芳基碳(Aromatic C) $\delta=112\sim 145$;酚基碳(Aromatic C-O) $\delta=145\sim 165$;羰基碳(Carbonyl C) $\delta=165\sim 190$ ^[21-23]。

1.4 数据处理

作物产量的可持续性指数(I_{SY})是衡量系统是否能持续生产的一个参数,其值越大,系统的可持续性越好^[24],其计算方法如下:

$$I_{SY} = \frac{Y_{\text{mean}} - \sigma}{Y_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中: Y_{mean} 、 Y_{max} 和 σ 分别为不同处理2008—2017年水稻产量的平均值、最大值和标准差。

用SPSS 19.0软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),Duncan法进行多重比较。采用Canoco 5软件对土壤有机碳组分作主成分分析(PCA),对水稻产量和土壤微生物生物量与各项理化指标作冗余分析(RDA),并基于蒙特卡洛(Monte Carlo)检验的显著性水平($P<0.05$)对土壤因子进行排序和筛选;采用R(3.5.2)的“corrplot”包对各项土壤因子作Pearson相关性分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对水稻产量和土壤基本化学性质的影响

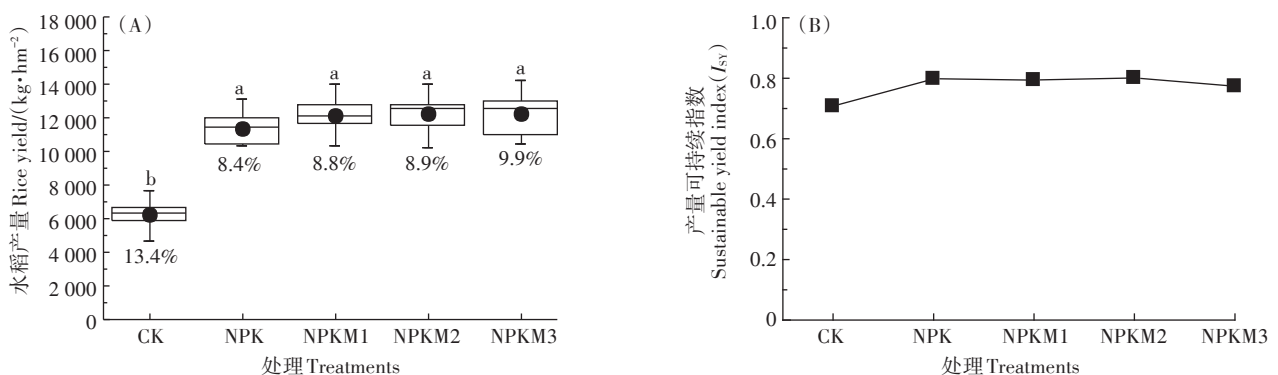
如图1所示,2008—2017年,NPK处理和有机无机肥配施处理(NPKM1、NPKM2和NPKM3)均较CK处理显著提高了水稻产量。其中NPKM2处理产量最高,其次是NPKM3和NPKM1,三者均高于NPK处理,但处理间差异不显著($P>0.05$)。变异系数(CV)可表征

水稻产量的稳定性,NPKM1和NPKM2处理的CV值与NPK处理相近,而NPKM3处理的CV值却略有上升,表明中低比例有机肥配施更有利于维持水稻产量的稳定性。各处理可持续性指数表现为 $\text{NPKM2}>\text{NPK}\approx\text{NPKM1}>\text{NPKM3}>\text{CK}$ 。可见中低比例有机肥配施处理的可持续性指数接近或优于单施化肥处理,而当有机肥配施比例持续提高后,系统的可持续性指数反而可能出现波动甚至下降。

长期施肥对土壤化学性质产生了显著影响(表2)。在定位试验进行到第34年,NPK处理和有机无机肥配施处理(NPKM1、NPKM2和NPKM3)的SOC、TN、TP、AN、AP和AK含量均较CK处理显著增高($P<0.05$),且这些养分含量在有机无机肥配施处理中随有机肥配施比例的升高而增加。与试验初始年($\text{pH}=6.50$)相比,所有处理的土壤pH均出现大幅下降,其中NPK处理的pH平均下降1.4个单位;而NPKM1、NPKM2和NPKM3的pH值均高于NPK处理,说明与单施化肥相比,有机肥配施能在一定程度上减缓土壤酸化。

2.2 长期不同施肥对土壤微生物生物量的影响

长期不同施肥处理的土壤MBC和MBN变化范围分别为 $290.17\sim 496.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.70\sim 24.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图2),各处理土壤MBC和MBN均呈现有机替代处理最大、NPK处理次之、CK处理最小的规律,其中NPKM3处理最高,表明有机物料的施用显著提高了土壤MBC和MBN。微生物生物量碳氮比(MBC/MBN)不仅反映土壤微生物结构,也反映土壤氮素的供应能力^[23]。长期单施化肥处理和有机无机肥配施处理显著降低了MBC/MBN,与NPK处理相比,有机肥配施处理进一步降低了MBC/MBN,其中NPKM3



箱形图显示了中位数(水平线)、均值(实心点)、第25和75百分位数(框)、第5和95百分位数(须线);箱形图下的数字代表产量的变异系数(CV);箱形图上方不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Box plots show median(horizontal line), mean(soild point), 25th and 75th percentiles(box), 5th and 95th percentiles(whisker caps); Numbers under the box plots are the coefficients of variation(CV) in yield; Different letters above the box indicate significant difference among treatments ($P<0.05$)

图1 各施肥处理下水稻产量及其可持续性指数(2008—2017年)

Figure 1 Rice yield and sustainable yield index of different treatments from 2008 to 2017

表2 长期不同施肥条件下各处理土壤化学指标

Table 2 Soil chemical properties under long-term fertilization regimes

处理 Treatments	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	pH	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
CK	14.33±0.64d	5.48±0.44ab	1.55±0.13d	0.44±0.09d	26.63±1.67a	147.08±4.93e	15.68±1.10e	38.91±1.36c
NPK	17.43±0.29c	5.06±0.21b	1.73±0.08c	1.09±0.08c	27.25±0.81a	174.44±1.72d	76.50±1.63d	69.86±1.45a
NPKM1	19.80±0.44b	5.37±0.25ab	2.10±0.11b	1.45±0.09b	25.55±3.02a	211.96±4.80c	84.76±3.90c	60.20±3.26b
NPKM2	22.18±0.52a	5.49±0.26a	2.40±0.07a	2.13±0.35a	27.93±1.60a	225.37±4.15b	138.90±2.26b	61.17±2.54b
NPKM3	23.21±0.41a	5.75±0.14a	2.57±0.17a	2.25±0.11a	26.19±0.71a	258.18±6.51a	158.81±1.54a	62.01±4.21b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

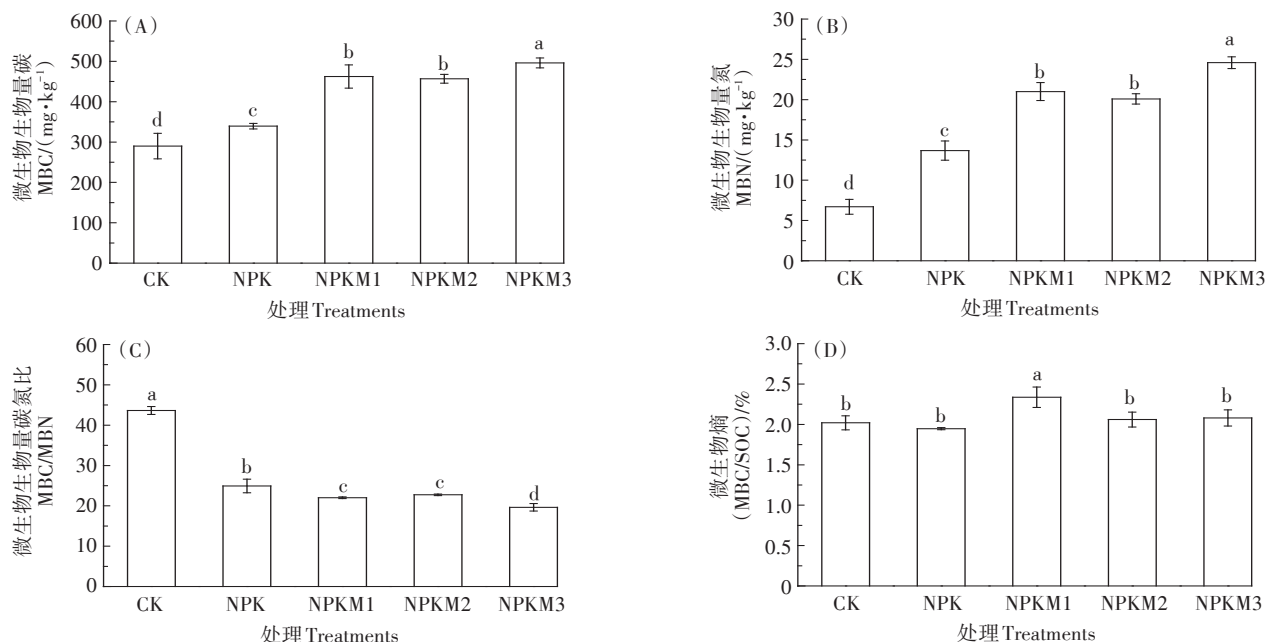
处理最低。而土壤微生物熵(MBC/SOC, qMB)的变化则反映了土壤中输入的SOC向MBC转化的效率、土壤中碳的损失和土壤矿物对有机质的固定,是表征土壤碳动态和土壤质量的有效指标,一般范围在1%~4%^[24]。本研究中,NPK处理的微生物熵(1.95%)较CK处理(2.02%)略有降低,而有机肥配施处理的微生物熵则出现了不同程度的提高,其中NPKM1处理的微生物熵显著高于其他处理($P<0.05$),说明有机肥配施可提高土壤微生物熵。

2.3 长期施肥对土壤有机碳化学结构的影响

由表3可知,试验土壤有机碳以烷氧碳为主(45.7%~48.5%),其次为烷基碳(27.3%~30.6%),再次

为芳香碳(13.1%~14.7%),而羧基碳的比例相对较小(9.4%~12.2%)。长期施肥虽未改变土壤有机碳的化学结构,但对各类碳原子的相对含量产生了较大影响。其中,与CK处理相比,NPK处理提高了烷基碳的相对含量,降低了羧基碳的含量。与NPK处理相比,有机无机肥配施处理提高了烷基碳和烷氧碳(主要是甲氧基/含氮烷基碳)的相对含量,降低芳香碳的相对含量。具体地,有机无机肥配施处理分别较NPK处理提高烷基碳和甲氧基/含氮烷基碳相对含量0.1~2.3个百分点和1.3~2.6个百分点,降低了芳香碳含量(1.0~1.6个百分点)和羧基碳含量(0.9~1.7个百分点)。

土壤有机质各功能基团相对含量的主成分分析



不同小写字母表示处理间显著差异($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level

图2 不同处理土壤MBC、MBN、MBC/MBN和MBC/SOC

Figure 2 MBC, MBN, MBC/MBN and MBC/SOC in response to the different fertilization soil

(PCA)结果(图3)显示,前两个主成分(PC1和PC2)分别解释了SOC结构变化的56.6%和31.5%。各施肥处理中,仅有机无机肥配施处理与CK处理基本分离,其与CK处理的距离由大到小依次为NPKM2>NPKM3>NPKM1。对于各功能基团而言,烷基碳、甲氧基/含氮烷基碳和芳基碳在PC1上有较高荷载,而含氧烷基碳和羧基碳则在PC2上有较高荷载,这五类基团占比较高(>88%),同时也是SOC化学结构变化的主要体现(表3)。

2.4 土壤因子间的相关性分析及其与水稻产量的冗余分析

从图4可以看出,SOC与主要养分指标(除TK外)、MBC、MBN、烷基碳以及甲氧基/含氮烷基碳呈显著正相关,而与MBC/MBN、芳基碳和羧基碳呈显著负相关。MBC和MBN与pH和各养分指标呈正相关,尤其与氮磷养分指标呈极显著正相关;MBC/MBN则与除TK外的养分指标呈极显著负相关。有机碳结构中,烷基碳和甲氧基/含氮烷基碳含量与氮磷养分指标及MBC呈显著正相关,而芳香碳和羧基碳与各养分指标及微生物生物量均呈负相关,与MBC/MBN呈正相关。而对于各有机碳组分之间,烷基碳与甲氧基/含氮烷基碳呈正相关,与含氧烷基碳和芳基碳呈显著负相关;甲氧基/含氮烷基碳则与芳基碳、羧基碳呈极显著负相关。

以不同处理水稻产量及土壤微生物性状为响应变量,以土壤理化因子及有机碳结构为解释变量,作冗余分析(RDA),如图5所示,前两个约束轴分别解释了总变异的88.09%和2.35%。在土壤理化因子中,SOC($F=26.2, P=0.002$)是影响水稻产量及土壤微生物生物量的最关键因子,其次是AP($F=18.8, P=0.002$)和AK($F=17.7, P=0.006$)。而在土壤有机碳结构中,羧基碳($F=6.6, P=0.016$)和烷基碳($F=6.2, P=0.034$)作用最明显。水稻产量与土壤因子之间存在

一定的相关性,水稻产量与SOC、AK、AP及烷基碳等显著正相关,而与羧基碳显著负相关。

3 讨论

3.1 长期施肥对水稻产量和土壤养分的影响

前人研究表明,与单施化肥相比,有机无机肥配施能明显提高土壤养分含量,改善土壤氮素供应和土壤理化性质,达到培肥土壤、保持或提高作物产量的作用^[4,6,25]。如WEI等^[25]通过对我国32个长期定位试验数据进行分析,发现有机无机肥配施处理显著提高我国三大粮食作物(小麦、玉米和水稻)产量及土壤有机质含量。本研究中,在等养分投入条件下,有机无机肥配施处理的主要营养指标(除全钾外)、SOC和水稻产量均高于NPK处理,与前人的研究结果基本一致。冗余分析发现水稻产量与SOC、AP和AK等呈显

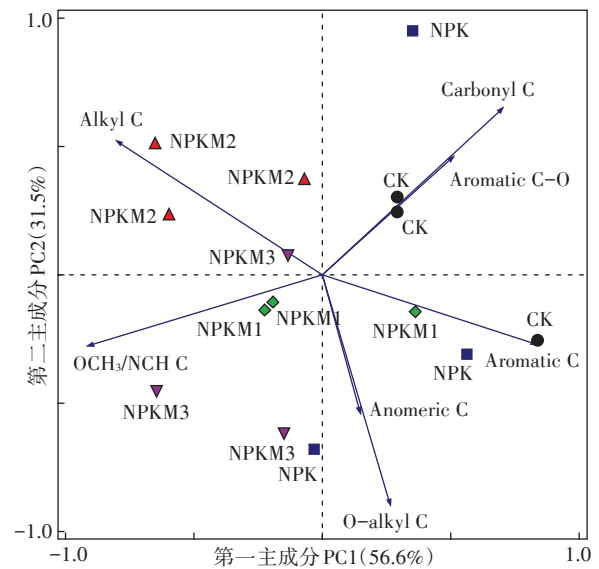
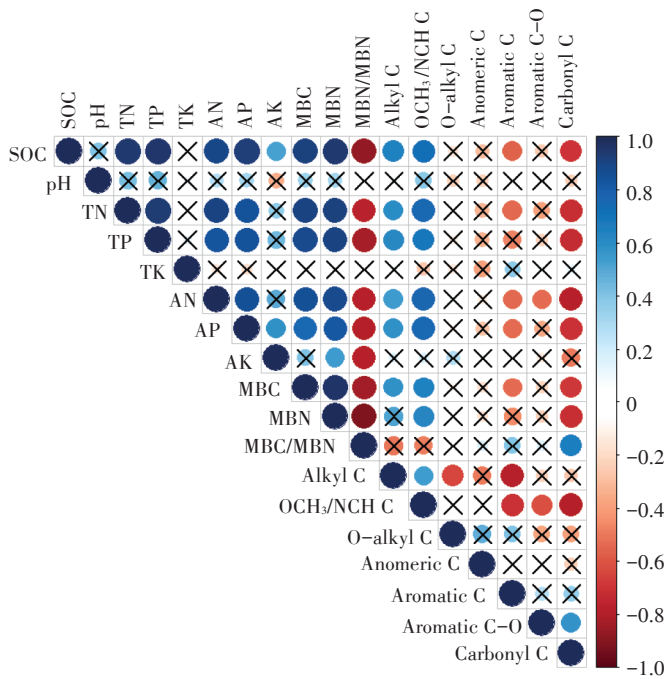


图3 长期不同施肥处理土壤有机碳化学结构组成的主成分分析
Figure 3 Principal component analysis(PCA) of the chemical structural composition of soil organic carbon treated with different fertilization

表3 不同施肥处理下土壤有机质各类型碳的相对含量(%)

Table 3 Relative proportion of the different carbon species of soil organic matter under different treatments(%)

处理 Treatments	烷基碳 Alkyl carbon	烷氧碳 O-alkyl carbon				合计 Total	芳香碳 Aromatic carbon			羧基碳 Carbonyl carbon
		甲氧基/含氮烷基碳 OCH ₃ /NCH C	含氧烷基碳 O-alkyl C	异头碳 Anomeric C	芳基碳 Aromatic C		酚基碳 Aromatic C-O	合计 Total		
CK	27.3±1.4b	13.0±0.7b	25.2±0.9a	7.5±0.3a	45.7±0.1a	11.3±1.3a	3.5±0.3a	14.7±1.6a	12.2±0.2a	
NPK	28.3±1.3b	12.9±1.4b	25.7±1.9a	7.4±0.7a	46.0±3.6a	11.3±0.6a	3.4±0.7a	14.7±1.4a	11.1±2.1a	
NPKM1	28.4±0.5b	14.2±1.2ab	25.5±0.4a	7.9±0.3a	47.5±1.4a	10.3±1.5a	3.6±0.4a	13.9±1.8a	10.2±0.3ab	
NPKM2	30.6±1.1a	15.0±0.8ab	24.0±0.4a	7.1±0.1a	46.1±0.8a	9.7±0.6a	3.5±0.8a	13.1±1.4a	10.2±0.8ab	
NPKM3	29.0±1.0ab	15.5±1.5a	25.9±0.7a	7.2±0.1a	48.5±1.6a	10.3±0.2a	2.8±0.4a	13.1±0.7a	9.4±1.1b	



红色和蓝色圆圈分别表示负相关和正相关;圆圈越大,相关系数的绝对值越大。圆圈中的“X”表示因子间相关性不显著($P>0.05$)
Red and blue circles represent negative and positive correlation, respectively. Circles from small to large indicate low to high correlation. An “X” in the circles indicates no significant correlation($P>0.05$)

图4 不同施肥处理各土壤因子与有机碳组分间的Pearson相关性分析

Figure 4 Pearson's correlation analysis among soil factors and structural composition of SOC

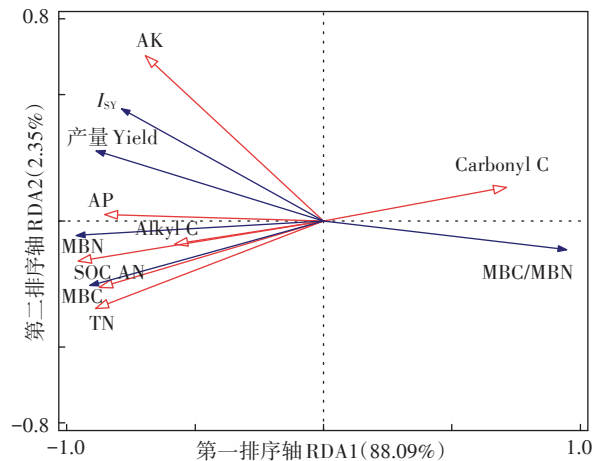


图5 不同施肥处理水稻产量及微生物性状与土壤因子的冗余分析

Figure 5 Redundancy analysis between rice yield and microbial biomass properties and soil indexes under different fertilization treatments

著正相关(图5),证实有机无机肥配施处理主要通过提高SOC、提升土壤有效元素供应来促进水稻增产。另一方面,在有机无机肥配施处理中,随着有机肥配施比例的升高,SOC和主要营养指标(除全钾外)也出

现增高趋势,但增产作用不显著,其产量稳定性及系统可持续性也出现波动,与孟琳等^[24]和韩晓增等^[26]的研究结果一致,可能是因为随着有机物料的累年持续施用,有机肥残效连续叠加,使土壤肥力条件显著改善,土壤供肥能力增强,经过三十余年的肥料投入后,土壤的营养供应已经能够完全满足水稻生长的需求,而作物达到高产时的需肥量是一定的^[17,27],此时土壤肥力可能不再是水稻增产的限制性因子,故而增产效果不显著。此外,施用有机肥还能缓解土壤酸化,甚至提升土壤pH^[28-29],本研究中,NPKM2和NPKM3处理均较NPK处理显著提高了土壤pH(表2)。

3.2 长期施肥对土壤微生物生物量的影响

土壤微生物生物量既是土壤植物有效养分的储备库,同时也是土壤养分循环和有机质转化的动力^[5,30-31]。土壤微生物生物量对土壤环境因子的变化也较为敏感,常作为评价土壤微生物生态系统质量的重要指标^[32-33]。本试验中,长期单施化肥处理和有机无机肥配施处理均提高了MBC和MBN,但有机无机肥配施对MBC和MBN的促进作用更显著。施用化肥对土壤微生物生物量影响的研究结论不尽一致^[31-33],这可能与土地利用方式、施肥方式或年限有关。唐海明等^[33]发现单施化肥可提高双季稻田根际MBC和MBN,与本研究结果一致。而孙凤霞等^[31]对19年长期定位施肥的旱地红壤样品分析结果表明,长期单施化肥导致土壤严重酸化(pH降低约1.5个单位),从而显著降低了红壤MBC^[33],而本研究NPK处理的平均pH仅较CK处理略降低0.4个单位,故而其对土壤微生物生存繁殖影响有限,本研究MBC和MBN虽与pH呈正相关,但相关性不显著(图4),证实pH对受试土壤微生物生物量影响有限。此外,任凤玲等^[34]整合分析了有机肥对我国农田土壤微生物生物量的影响,认为有机肥能显著提升土壤MBC和MBN,但提升效果受气候、土地利用方式及土壤pH等外界条件影响。一方面,Pearson相关性分析中MBC和MBN与SOC及主要养分指标呈显著正相关,与烷基碳和甲氧基/含氮烷基碳呈负相关(图4),说明SOC本身可为微生物提供碳源物质(如易被微生物代谢的甲氧基/含氮烷基碳等),而施肥及有机物料还田也为微生物提供大量的氮磷营养^[35],同时,施肥对作物生物量的提升作用不仅促进水稻植株根系的生长、增加根茬的还田量,还能促进根系分泌物的释放,促进微生物生长繁殖^[36-39]。此外,有机肥(如畜禽粪便等)本身也带入了大量的微生物^[40]。

本研究发现,长期施肥显著降低了MBC/MBN,与李春越等^[39]的研究结果相同。一方面,这可能是由于长期单施化肥或有机无机肥配施能向土壤直接提供大量营养元素,有利于微生物的生长和繁殖;另一方面,外源有机物料输入还能起到调节土壤氮素供应的作用,加强微生物对氮素的固持^[40]。相关性分析及冗余分析中,MBN与TP、AN及AP均呈显著正相关,也证实了这一点(图4、图5)。此外,无机氮的加入也能改变土壤微生物群落结构,进而影响MBC/MBN^[41],本研究中MBC/MBN与TN和AN呈极显著负相关(图4),一定程度上说明了这种影响。BHATNAGAR等^[42]的研究发现施用氮肥可影响土壤微生物群落结构,使那些偏向于利用无机氮和易降解碳的微生物占主导。长期单施化肥未显著影响土壤微生物熵,但有机无机肥配施提高了土壤微生物熵,可能是因为有机肥与化肥配合施用除了能大幅增加土壤微生物生物量外,也有利于改善土壤生态环境,提高土壤微生物和土壤酶活性,从而加快有机碳周转速率,进而影响SOC的结构^[31,36]。

3.3 长期施肥对土壤有机碳化学结构的影响

本研究中,长期单施化肥提高了烷基碳的相对含量,降低了羧基碳的含量,而配施有机肥则同时提高了烷基碳和烷氧碳含量,并降低了芳基碳含量。烷基碳主要代表微生物易代谢的碳水化合物,而烷基碳和芳基碳等则表征难以被利用的木质素、单宁等^[43]。研究表明,单施化肥处理的有机质来源主要是作物根茬残留及其根系分泌物等,其可能影响SOC的结构,但影响程度与土壤性质、气候条件和管理方式有关^[44-46]。如YAN等^[45]的研究中,单施氮肥与不施肥土壤相比,红壤旱地或水田SOC结构组分含量均无明显差异。而ZHANG等^[46]的研究发现,单施化肥使旱地土壤胡敏素组分更加烷基化,与本文的研究结果一致。这可能是由于化肥处理提高土壤微生物生物量(图2),从而促进土壤中易分解有机质的分解,使抗性物质(如烷基碳)相对积累,Pearson相关性分析也显示微生物生物量与芳基碳和羧基碳呈负相关,而与烷基碳呈显著正相关(图4),说明微生物对不同分子结构SOC的分解存在差异。

长期有机无机肥配施进一步提高了烷氧碳(主要是甲氧基/含氮烷基碳)比例,与郭素春等^[44]的研究结果一致,原因主要有:①试验的外源有机物料(如紫云英、猪粪)中烷氧碳的比例本身较高^[41];②有机肥和残留的根茬等主要在大团聚体中聚集,使其不易与微生物

及土壤酶接触^[44,47];③施用有机肥可促进团聚体的形成,进一步强化了团聚体的物理保护作用,在一定程度上降低了有机质的分解程度^[48]。此外,虽然猪粪中含有大量芳香碳类化合物,但长期配施有机肥处理的芳基碳含量却出现了下降,一方面可能是由于烷基碳和烷氧碳等的大幅增加相应地降低了芳香碳比例;另一方面,微生物群落结构的改变,也可能影响或加速微团聚体中芳香碳物质的氧化分解^[44]。Pearson相关性分析中芳基碳与MBC呈显著负相关,提示芳香碳含量的变化可能与微生物数量或群落结构改变有关。此外,SOC含量与烷基碳和甲氧基/含氮烷基碳呈显著正相关,与芳基碳和羧基碳呈负相关,说明长期有机物料还田对SOC含量提升的影响机制可能主要是施肥带来了有机碳输入,以及团聚作用强化了对易降解有机质的保护和累积^[41],而施肥带来的微生物生物性状的变化一定程度上影响了SOC的结构组成。

4 结论

(1)随着有机肥配施比例提高,红壤双季稻田土壤SOC、pH及氮磷养分指标逐渐增加。长期单施化肥使土壤严重酸化,而配施有机肥可在一定程度上减缓土壤酸化。冗余分析的结果表明有机无机肥配施处理主要通过提高SOC、提升土壤有效元素供应来促进水稻增产,中低有机肥配施比例的稳产效果更优。

(2)长期施肥提高了土壤MBC和MBN,降低了MBC/MBN。单施化肥主要提高了SOC结构中烷基碳的相对含量,与不施肥、单施化肥相比,有机无机肥配施处理提高了微生物熵,并进一步提高了烷氧碳(甲氧基/含氮烷基碳)的相对含量,加快了有机碳周转,更有利于活性有机质累积。

(3)土壤微生物生物量与氮磷养分指标及甲氧基/含氮烷基碳具有显著或极显著正相关关系,与芳基碳和羧基碳呈显著负相关。长期有机无机肥配施可为微生物提供大量的氮磷营养元素,促进微生物生长繁殖并加速芳香碳的分解,进而一定程度上影响SOC的结构组成,但长期有机物料还田对SOC含量提升及结构改变的影响机制可能主要是施肥带来了有机碳输入,以及团聚作用强化了对易降解有机质的保护与累积。

参考文献:

- [1] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-521.

- [2] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795. JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [4] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523. HOU H Q, LIU X M, LIU G R, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 516-523.
- [5] CHEN D M, YUAN L, LIU Y R, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90: 34-42.
- [6] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1384-1394. WEI W L, LIU L, QIU H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(8): 1384-1394.
- [7] 赵其国, 吴志东, 那文俊, 等. 综合开发南方红壤丘陵区: 我国农业的出路之一[J]. 土壤, 1990(3): 3-7. ZHAO Q G, WU Z D, NA W J, et al. Comprehensive development of the hilly red soil region of southern China: Way out of Chinese agriculture[J]. *Soils*, 1990(3): 3-7.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 50. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Chinese soil[M]. Beijing: Science Press, 1987: 50.
- [9] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273. ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 259-273.
- [10] 王伯仁, 蔡泽江, 李冬初. 长期不同施肥对红壤旱地肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 85-88. WANG B R, CAI Z J, LI D C. Effect of different long-term fertilization on the fertility of red upland soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 85-88.
- [11] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78. CAI Z J, SUN N, WANG B R, et al. Effect of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen phosphorous and potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(1): 71-78.
- [12] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配比比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 904-913. LÜ Z Z, WU X D, HOU H Q, et al. Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 904-913.
- [13] 刘淑军, 李冬初, 高菊生, 等. 长期施肥红壤稻田肥力与产量的相关性及其验证[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1262-1272. LIU S J, LI D C, GAO J S, et al. Correlation of red paddy soil fertility with rice yield under long-term fertilization and county verification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(7): 1262-1272.
- [14] ZHONG W H, CAI Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from Quaternary red clay[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2/3): 84-91.
- [15] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622. ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its counter measures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [16] 闫鸿媛. 长期施肥下我国典型土壤粮食作物氮肥利用率时空演变特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. YAN H Y. Tempo-spatial variation of nitrogen use efficiency of grain food as affected by long-term fertilization in the typical soil of China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [17] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 758-765. HOU H Q, JI J H, LIU X M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 758-765.
- [18] LIANG C, AMELUNG W, LEHMANN J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578-3590.
- [19] YUAN X, QING W, XU H, et al. Sensitivity of soil carbon dynamics to nitrogen and phosphorus enrichment in an alpine meadow[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 150: 107984.
- [20] 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, 1999. LU R K. Analytical methods for soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [21] MAO J D, SCHMIDT-ROHR K. Accurate quantification of aromaticity and nonprotonated aromatic carbon fraction in natural organic matter by ^{13}C solid-state nuclear magnetic resonance[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(9): 2680-2684.
- [22] XU J S, ZHAO B Z, CHU W Y, et al. Chemical nature of humic substances in two typical Chinese soils (upland vs paddy soil): A comparative advanced solid state NMR study[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 444-452.
- [23] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用 ^{13}C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 796-812. LI N, SHENG M, YOU M Y. Advancement in research on application of ^{13}C NMR techniques to exploration of chemical structure of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 796-812.
- [24] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532-542. MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532-542.
- [25] WEI W L, YAN Y, CAO J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 225: 86-92.
- [26] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物

- 产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):66-71. HAN X Z, WANG F X, WANG F J, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1):66-71.
- [27] 龚海青, 付海美, 徐明岗, 等. 黑土有机氮肥替代率演变及其对土壤有机碳的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1520-1527. GONG H Q, FU H M, XU M G, et al. Potential substitution rate of chemical nitrogen with organic nitrogen in black soil and its correlation with soil organic carbon[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(6):1520-1527.
- [28] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2016, 25(1):175-181.
- [29] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195:104382.
- [30] SPEDDING T A, HAMEL C, MEHUY S G R, et al. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(3):499-512.
- [31] 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. SUN F X, ZHANG W H, XU M G, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2792-2798.
- [32] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5):1168-1174. GUO Z, WANG X L, XU H, et al. A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5):1168-1174.
- [33] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1335-1343. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1335-1343.
- [34] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1):119-128. REN F L, ZHANG X B, SUN N, et al. A Meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1):119-128.
- [35] 徐永刚, 宇万太, 马强, 等. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8):2078-2085. XU Y G, YU W T, MA Q, et al. Effect of long-term fertilizations on microbial biomass C and N and bacterial community structure in an aquic brown soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8):2078-2085.
- [36] 郭乾坤, 梁国庆, 周卫, 等. 长期有机培肥提高红壤性水稻土生物学特性及水稻产量的微生物学机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3):492-501. GUO Q K, LIANG G Q, ZHOU W, et al. Microbiological mechanism of long-term organic fertilization on improving soil biological properties and double rice yields in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(3):492-501.
- [37] LIN Y X, YE G P, KUZYAKOV Y, et al. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134:187-196.
- [38] SUN R B, CHEN Y, HAN W X, et al. Different contribution of species sorting and exogenous species immigration from manure to soil fungal diversity and community assemblage under long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151:108049.
- [39] 李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8):1783-1791. LI C Y, HAO Y H, XUE Y L, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the farmland of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8):1783-1791.
- [40] 刘益仁, 郁洁, 李想, 等. 有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):989-994. LIU Y R, YU J, LI X, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbiological characteristics in a wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):989-994.
- [41] YE G P, LIN Y X, KUZYAKOV Y, et al. Manure over crop residues increases soil organic matter but decreases microbial necromass relative contribution in upland ultisols: Results of a 27-year field experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134:15-24.
- [42] BHATNAGAR J M, PEAY K G, TRESEDER K K. Litter chemistry influences decomposition through activity of specific microbial functional guilds[J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88(3):429-444.
- [43] MATHERS N J, XU Z. Solid-state ^{13}C NMR spectroscopy: Characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia[J]. *Geoderma*, 2003, 114(1/2):19-31.
- [44] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):922-930. GUO S C, YU H Y, ZHU X Z, et al. Effect of long-term fertilization on molecular structure of organic carbon in soil aggregates in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):922-930.
- [45] YAN X, ZHOU H, ZHU Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130:42-51.
- [46] ZHANG J J, DOU S, SONG X Y. Effect of long-term combined nitrogen and phosphorus fertilizer application on ^{13}C CP/MAS NMR spectra of humin in a typical hapludoll of northeast China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(6):966-973.
- [47] GOLCHIN, A, OADES, J M, SKJEMSTAD, J O, et al. Soil structure and carbon cycling[J]. *Soil Research*, 1994, 32(5):1043-1068.
- [48] GUO Z C, ZHANG Z B, ZHOU H, et al. The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a vertisol[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):2505.