

双季稻—绿肥种植系统下长期施肥对赤红壤性状的影响

张成兰^{1,2}, 艾绍英¹, 杨少海¹, 宁建凤¹, 王荣辉¹, 李超^{1,2}

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为阐明双季稻—绿肥种植模式下长期施肥对赤红壤肥力性状的影响, 探讨土壤持续利用的培肥模式。通过长期定位田间试验, 研究了长期不同施肥处理对赤红壤性水稻土土壤养分、酶活性及微生物性状的影响。结果表明: 与不施肥相比, 长期施肥显著增加了土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等养分含量, 提高了土壤蔗糖转化酶、脲酶、磷酸酶活性以及土壤微生物量碳氮含量和土壤微生物群落物种丰富度、优势度、均匀度。其中土壤养分含量增加了 4.5%~117.2%, 酶活性提高了 4.9%~68.1%, 微生物多样性提高了 3.2%~71.9%, 微生物量碳氮的含量分别增加了 7.8%~36.9%, 21.4%~65.7%, 且以单施有机肥 (M) 效果最为显著, 其次为有机无机肥配施处理 (NPKM) 及氮磷钾肥+秸秆还田处理 (NPKS)。土壤养分与土壤酶活性、微生物多样性及微生物量碳氮含量之间存在显著的相关性 ($P<0.05$)。总体上, 长期单施有机肥或有机无机配施对于双季稻—绿肥种植系统土壤具有良好的培肥效果。

关键词: 长期施肥; 土壤养分; 土壤酶活性; 土壤微生物

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0184-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.031

Effects of Long-term Fertilization on Lateritic Red Soil Traits In Cropping-green Manure Planting System

ZHANG Chenglan^{1,2}, AI Shaoying¹, YANG Shaohai¹, NING Jianfeng¹, WANG Ronghui¹, LI Chao^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of

Agricultural Sciences, Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region,

Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation,

Guangzhou 510640; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: The aim of this study was to investigate effects of long-term fertilization on lateritic red soil fertility in cropping-green manure planting system and provided corresponding sustainable management. A long-term field experiment was conducted to study the effects of different fertilization method on soil nutrients, enzyme activities and microbial traits in lateritic red soil. The results showed that: compared to the control treatment, long-term fertilization significantly increased the soil organic matter, alkali solution nitrogen, phosphorus, rapidly-available potassium nutrient, and improved the soil sucrose invertase, urease and phosphatase activities, and increased the content of soil microbial biomass carbon and nitrogen and microbial community species richness, dominance, evenness. The long-term fertilization increased soil nutrient content by 4.5%~117.2%, enzyme activity by 4.9%~68.1% and microbial diversity by 3.2%~71.9%, respectively. The microbial biomass carbon and nitrogen content were increased by 7.8%~36.9% and 21.4%~65.7%, and the most significant effect was observed as following: organic manure (M), organic and inorganic fertilizer treatment (NPKM) and straw with inorganic fertilizer treatment (NPKS). The significant correlations were found between soil nutrient, soil enzyme activity, microbial diversity as well as microbial biomass carbon and nitrogen ($P<0.05$). In summary, the long-term single organic fertilizer or organic combined with inorganic fertilization was a good measure for fertility improvement in soil of cropping-green manure planting system.

Keywords: long-term fertilization; soil nutrients; soil enzyme activities; soil microorganism

收稿日期: 2016-04-18

资助项目: 广东省省级科技计划项目 (2014B020206001); 广东省农业科学院院长基金项目 (201526)

第一作者: 张成兰 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 616704053@qq.com

通信作者: 艾绍英 (1968—), 女, 博士, 研究员, 主要从事农田环境污染检测与治理研究。E-mail: shaoyingai@21cn.com

土壤酶与土壤微生物是土壤的重要组成部分,土壤酶参与土壤中一系列的生化反应和物质代谢过程,是土壤肥力形成与演变的重要动力^[1]。其中,脲酶是土壤中较为活跃的水解酶类之一,与土壤中氮素密切相关^[2];蔗糖转化酶参与土壤中碳水化合物的转化与循环,能表征土壤中碳的转化和土壤生化活性^[2];磷酸酶与土壤中磷的转化密切相关,主要是催化有机的磷酸酯类物质转化成易被植物吸收利用的无机磷酸盐。土壤微生物参与土壤中碳、氮、磷等营养元素一系列转化与循环的过程,所以土壤微生物的数量、结构等与土壤肥力有密切的相关性。土壤的微生物量能表征土壤中物质循环和能量的流动,是养分转化的重要动力^[3]。土壤微生物群落多样性,可直接反映微生物在土壤物质转化和能量循环中的作用。

随着研究者对微生物区系认识的不断深入,国内外针对长期定位施肥下土壤性状的影响开展了大量研究,主要集中在土壤酶活性^[4-5]、土壤微生物量碳、氮含量及其利用^[6-7]以及微生物群落结构与功能多样性^[8-9]等方面。通常,土壤肥力性状受施肥方式、种植模式、区域气候等多种因素的综合影响,目前鲜有针对双季稻—绿肥系统长期定位施肥下赤红壤生物学性状的研究和报道。本研究以广州赤红壤生态环境重点野外科学观测试验站水稻田为研究对象,在等量施氮肥条件下,探讨长期不同施肥处理对土壤养分状况及酶活性、微生物性状的影响,旨在为赤红壤水稻土的肥力评价及合理培肥土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验在广州赤红壤生态环境重点野外科学观测试验站进行。该监测点位于广州市白云区钟落潭基地(113°26′18″E,23°23′47″N),属于亚热带季风气候,年平均气温 22.5℃,温差 15~17℃,雨量充沛,年平均降雨量 1 700 mm,无霜期 340 d。长期定位试验始于 2010 年初,2010 年以前为稻田,长期种植双季稻。整个试验区土地平整,无坡度。试验前耕层土壤主要性质如下:有机质含量 15.92 g/kg,全氮含量 1.09 g/kg,碱解氮含量 112.9 mg/kg,有效磷含量 45.5 mg/kg,速效钾 153.5 mg/kg,pH 6.21。试验初始,各小区土壤理化性状基本一致。试验共设 7 个处理:(1)不施肥,CK;(2)单施氮肥,N(尿素 326 kg/hm²);(3)氮磷化肥,NP(尿素 326 kg/hm²,普钙 375 kg/hm²);(4)氮磷钾化肥,NPK(尿素 326 kg/hm²,普钙 375 kg/hm²,氯化钾 200 kg/hm²);(5)有机肥,M(鸡粪 7 500 kg/hm²);(6)有机无机肥配施(有机 N:无机 N=1:1),NPKM(鸡粪 3 750 kg/hm²,尿素 163 kg/hm²,普钙 100 kg/hm²,

氯化钾 104.7 kg/hm²);(7)氮磷钾肥+早稻秸秆还田,NPKS(尿素 326 kg/hm²,普钙 375 kg/hm²,氯化钾 200 kg/hm²+早稻秸秆),鸡粪氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)比例为 2.00%,0.88%,1.53%。每个处理设 3 个重复,小区面积 56.2 m²,共 21 个小区,随机区组排列,小区边界设置 1 m 宽以上的保护行,采用双季稻轮作制度,水稻品种为黄华占(*Oryza sativa*),冬闲种植紫云英(*Astragalussinicus* L.),不施肥,次年早稻移栽前全部翻压还田。

1.2 样品采集

本次试验于 2015 年 7 月 14 日水稻收获后采样,各小区均取 0—20 cm 耕层土壤,每小区按 S 形随机取 5 个样点混匀,剔除石砾和植物残根等杂物,混合制样,过 2 mm 筛后,放入 4℃冰箱保存,用于测定微生物指标,另取部分土壤风干,过筛,用于酶活性和土壤养分测定。

1.3 测定项目与方法

土壤基本养分指标采用常规分析法测定^[10]。土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法;土壤全氮采用半微量凯氏法;全磷采用碱熔—钼锑抗比色法;有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法。

土壤酶活性测定参照关松荫的方法^[11]。土壤蔗糖转化酶采用 3,5—二硝基水杨酸比色法;土壤脲酶采用靛酚蓝比色法;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法。

土壤微生物量碳氮参照李振高的方法^[11],采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提—仪器分析法(multi N/C 2001/2001s)。

土壤微生物多样性采用 Biolog-Eco 板测定^[12]。

1.4 数据处理

Biolog-Eco 微平板平均每孔颜色变化率(AWCD)计算^[11]: $AWCD = [\sum (C - R)] / N$,式中:C 为 31 孔的吸光值;R 为对照孔吸光值;N 为碳源数。

土壤微生物群落功能多样性指数:Shannon 多样性指数(H)Simpson、优势度指数(D)和 McIntosh 均匀度指数(U)

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

式中: P_i 为第 i 孔相对吸光度值与整个平板相对吸光度值总和的比率

$$D = - \sum \frac{(n_i(n-1))}{(N(N-1))}$$

$$U = \sqrt{\sum n_i^2}$$

式中: n_i 为第 i 孔的相对吸光值;N 为相对吸光度值总和。

各测定数据采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤养分的影响

从表 1 可以看出,单施有机肥处理的土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量最高,与对照相比分别增加了 21.7%,23.8%,117.2%,65.2%。各施肥处理的土壤有机质、碱解氮含量均显著高于 CK,而不同施肥处理间土壤有机质、碱解氮含量差异不显著;

表 1 不同施肥处理对土壤养分的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	19.52±1.12b	1.05±0.04a	75.66±4.88b	29.26±0.68c	21.0±0.86c
N	20.40±0.03a	1.17±0.02a	92.57±5.61a	34.77±7.01c	24.0±1.32b
NP	21.16±1.24a	1.14±0.08a	87.64±2.56a	42.60±4.70bc	25.3±5.83b
NPK	22.08±1.99a	1.27±0.10a	100.74±12.81a	52.20±6.45b	31.3±0.72ab
M	23.75±1.55a	1.30±0.14a	99.90±2.31a	63.54±2.42a	34.7±0.14a
NPKM	22.72±1.27a	1.28±0.05a	97.22±0.87a	53.81±2.75ab	30.3±2.33ab
NPKS	21.40±1.35a	1.29±0.09a	99.76±2.32a	53.53±1.04ab	30.5±2.02ab

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

2.2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

从表 2 可以看出,与 CK 相比,各施肥处理均显著提高土壤蔗糖转化酶、脲酶、磷酸酶的活性且蔗糖转化酶、脲酶及磷酸酶活性分别在 M 处理、NPKS 处理及 NPK 处理达到最大值,增幅分别为 68.0%,28.3%,19.6%,而氮磷配施和单施氮肥处理的酶活性均较低。蔗糖转化酶和磷酸酶活性在各施肥处理间的差异不显著,但均显著高于 CK;土壤脲酶 NPK、M、NPKM、NPKS 处理间差异不显著,但 N、NP 处理与 CK 处理间却存在显著性差异。

表 2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

处理	蔗糖转化酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
CK	1.66±0.21b	2.47±0.14c	1.43±0.11b
N	2.13±0.55a	2.87±0.50b	1.50±0.08a
NP	2.40±0.61a	2.82±0.06b	1.63±0.17a
NPK	2.39±0.36a	2.92±0.10ab	1.71±0.13a
M	2.79±0.45a	3.07±0.13ab	1.69±0.10a
NPKM	2.47±0.20a	3.02±0.04ab	1.61±0.09a
NPKS	2.50±0.33a	3.17±0.07a	1.68±0.22a

2.3 酶活性与土壤养分关系分析

诸多研究显示,土壤养分与土壤酶活性密切相关^[13-14],表 3 相关性分析结果也表明,土壤蔗糖转化酶与土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾之间呈显著或极显著相关,有效磷、全氮、碱解氮、速效钾与脲酶呈显著或极显著相关,有机碳、有效磷、碱解氮、速效钾与磷酸酶显著相关,这与张逸飞等^[15]研究的结果相似,说明土壤酶与土壤养分之间存在显著相关性,使用酶活性作为评价土壤肥力的指标具有一定的可靠性。

2.4 不同施肥处理对土壤微生物量碳氮的影响

土壤微生物量是重要的土壤微生物学指标,能够反

各施肥处理间土壤全氮含量与 CK 相比,并没有显著差异;M、NPKM、NPKS 处理的土壤有效磷含量显著高于其他处理,NP、N、CK 处理间土壤有效磷含量差异不显著;施肥处理的土壤速效钾含量显著高于 CK 处理,且 M、NPKM、NPKS、NPK 处理间土壤速效钾含量差异不显著。结果表明,不同施肥处理显著提高土壤养分含量。

映土壤微生物活性。从表 4 可以看出,施肥能明显提高土壤微生物量碳、氮的含量,其中以 M 处理的土壤微生物量碳氮含量最高,且显著高于其他处理。与 CK 相比,M 处理的土壤微生物量碳、氮含量分别提高了 37.0%和 65.7%,NPKM 和 NPKS 处理的土壤微生物量碳氮含量高于单施化肥处理,不施肥处理含量最低。土壤微生物量碳氮比能反应微生物群落结构信息^[16],本研究中微生物量碳氮比范围是 8.88~10.75,施肥降低了微生物量碳氮比,其中以 M 处理的碳氮比最低。Behera 等^[17]研究发现,当土壤微生物量碳氮比为 3~6 时,微生物群落中更利于细菌生长,比值为 7~12 时,微生物群落中更利于真菌生长。说明施入有机肥,能促进土壤中微生物群落结构由真菌型向细菌型转化。这与张红等^[18]提出的菜田中施入沼液能促进土壤由真菌型向细菌型转化的研究结果相似,同时作者还提出,细菌是土壤中物质转化的动力,许多细菌种群能提高土壤中有效态氮、磷的含量。

表 3 不同施肥处理下土壤酶活性与养分之间的相关性

项目	有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
蔗糖转化酶	0.906**	0.875*	0.858*	0.933**	0.908**
脲酶	0.740	0.940**	0.933*	0.837*	0.843*
磷酸酶	0.777*	0.832*	0.841*	0.876*	0.875*

注:*表示 $P<0.05$ 差异达 5%显著水平;**表示 $P<0.01$ 差异达 1%极显著水平。下同。

2.5 土壤微生物群落平均颜色变化率的动态分析

平均颜色变化率(AWCD)能反映土壤中微生物的代谢活性,AWCD 值能用来表征微生物对碳源的利用程度。AWCD 值越大,表明土壤中微生物密度越大、活性越高^[19]。从图 1 可以看出,AWCD 值随培养时间呈逐渐上升趋势,说明随着培养时间的增加,微生物对碳源利用能力逐渐增加。其中 24~72

h 时间段 AWCD 斜率最大,表明微生物在这段时间内增长最快,活性最大。从整体来看,施肥处理的 AWCD 均高于不施肥处理,施肥处理中 M、NPKM、NPKS 处理的土壤微生物碳源利用程度均高于单施化肥处理。

表 4 不同施肥处理对土壤微生物量碳氮含量的影响

处理	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	微生物 碳氮比
CK	165.60±2.60c	15.40±0.16d	10.75±0.19a
N	178.56±12.60bc	18.69±1.11c	9.56±0.79ab
NP	191.72±4.25bc	19.81±0.68bc	9.69±0.44ab
NPK	190.60±8.77bc	19.55±0.70bc	9.80±1.33ab
M	226.77±10.65a	25.52±0.90a	8.88±0.49b
NPKM	201.84±3.37ab	20.60±0.43bc	9.80±0.06ab
NPKS	203.49±11.22ab	21.80±0.74b	9.39±1.40ab

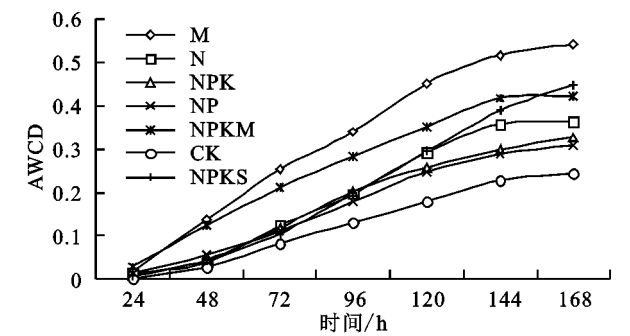


图 1 土壤微生物群落 AWCD 随培养时间的变化

2.6 土壤微生物群落功能多样性

表 5 列出了土壤微生物在培养 72 h 的 Shannon

表 6 不同施肥处理下土壤微生物与养分之间的相关性

项目	有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
Shannon 指数	0.905**	0.811*	0.789*	0.878*	0.885*
Simpson 指数	0.950**	0.929**	0.899**	0.956**	0.940**
McIntos 指数	0.883**	0.730	0.663	0.762*	0.737
微生物量碳	0.927**	0.836*	0.756*	0.950**	0.915**
微生物量氮	0.884**	0.821*	0.772*	0.910**	0.888**

3 讨论

本试验研究结果表明,长期施肥能不同程度的提高土壤养分含量、土壤酶活性、土壤微生物多样性及土壤微生物量碳氮的含量。具体来说,施肥有助于土壤养分含量的提高,其中土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量较不施肥分别提高了 4.7%~21.7%,8.57%~23.8%,15.8%~33.2%,15.5%~117.2%,14.3%~62.5%,以单施有机肥效果最佳,这与王俊华等^[20]提出的研究结果相似。一方面是因为施入有机肥直接提高了土壤有机质的含量;土壤中的有机氮矿化缓慢,不易发生氨的挥发和硝酸盐淋失,从而提高土壤氮素含量;施入的有机肥能降低土壤对磷的吸附,增加土壤有效磷含量;施入的有机肥能减缓土壤速效钾的消耗,提高土壤速效钾含量。另一方面是紫云英属豆

指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数。其中,Shannon 指数可表征微生物群落的丰富度,Simpson 指数可表征微生物群落优势度,McIntosh 指数可表征微生物群落的均匀度。结果表明,M 及 NPKM 处理的丰富度、物种优势度及群落均匀度均高于其他处理,其次是 NPK、NPKS 处理,CK 处理最低,说明施用有机肥能提高土壤微生物的多样性,M 处理的 Shannon 指数与其他处理间存在显著差异,M、NPKM 处理的 McIntosh 指数与其他处理间差异显著,但各处理间 Simpson 指数无显著差异。

表 5 不同施肥处理对土壤微生物多样性指数的影响

处理	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
CK	2.80±0.14c	0.89±0.06a	2.03±0.04c
N	3.09±0.13b	0.92±0.06a	2.73±0.70b
NP	3.03±0.04bc	0.93±0.04a	2.50±0.14bc
NPK	3.14±0.06b	0.94±0.05a	2.65±0.07bc
M	3.51±0.10a	0.96±0.01a	3.49±0.04a
NPKM	3.15±0.07b	0.95±0.04a	3.50±0.71a
NPKS	3.13±0.14b	0.94±0.02a	2.51±0.06bc

2.7 微生物与土壤养分的关系分析

由表 6 可以看出,土壤微生物多样性指数、土壤微生物量碳氮与有机碳呈极显著相关性,与土壤全氮呈显著或极显著相关性,与有效磷呈显著或极显著相关性,与速效钾呈显著或极显著相关性。说明土壤微生物与土壤养分状况之间有较好的相关性,土壤微生物可以作为评价土壤肥力的有效指标。

科绿肥,其根瘤菌具有共生固氮作用,在增加土壤养分氮的同时,也能提高土壤有机质、有效磷、速效钾等养分含量^[21]。各施肥处理间土壤有机质、全氮、碱解氮含量差异并不显著(P<0.05),这可能是紫云英翻压入土后,对土壤养分有激活作用,促进了养分的释放,导致各施肥处理间差异不显著。

不同施肥处理对土壤酶活性有显著的影响,刘妍等^[4]提出长期有机无机配施可提高黑土土壤脲酶、转化酶的活性;焦晓光等^[5]提出长期化肥配施有机肥显著提高黑土、暗棕壤的土壤脲酶、磷酸酶、转化酶活性,且黑土对施肥的反应比暗棕壤敏感。本结果显示,施用有机肥的蔗糖转化酶的活性高于其它施化肥处理,说明土壤碳的转化与土壤有机质密切相关,有机肥的施入,为转化酶提供了更多的酶促基质,提高

了酶活性,这与王俊华等^[20]提出的施入有机肥后蔗糖转化酶显著提高的研究结果相似。本试验中配施秸秆的土壤脲酶活性较为显著,有研究提出,施入秸秆可以激活根际土壤脲酶的活性^[22],本结果与 Mandal 等^[23]研究的秸秆和粪肥能显著提高脲酶活性,而单施化肥效果不显著的结论相似。袁玲等^[24]曾提出,施用化肥会降低磷酸酶的活性,因为土壤在低磷情况下,会刺激作物根系分泌磷酸酶来促进有机磷的矿化;本研究结果却发现施用化肥提高了土壤磷酸酶的活性,可能是因为供试土壤的磷含量不同,土壤类型不同,土壤对施肥的响应也不一样。总体来说,配施处理的土壤酶活性高于单施处理,这是施入肥料后,加快了碳氮元素循环和代谢,改善了土壤质量。

孙凤霞等^[7]提出,长期单施有机肥或有机肥与化肥配施能显著提高红壤的土壤微生物量碳氮含量。刘恩科等^[6]也提出,长期厩肥与化肥配施明显提高了褐潮土土壤微生物量碳氮。本结果表明,施用有机肥能提高土壤微生物量碳氮含量。主要是因为施用有机肥后,大量补充了土壤中的碳源^[25],同时加入的豆科绿肥也能增加土壤中活性有机碳的组分,为微生物活动提供碳源和氮源^[26],从而增加了土壤微生物量碳氮的含量。邬奇峰等^[27]提出,施用秸秆有利于提高土壤微生物量,本研究也发现,早稻秸秆还田处理的微生物量碳氮含量要显著高于单施氮磷钾肥处理。可能是因为秸秆还田有利于土壤有机质的积累,能够调节水分和温度,从而促进微生物的生长代谢。然而郑勇等^[28]通过研究长期施肥下红壤微生物量碳却发现,单施氮磷钾肥的微生物量碳大于氮磷钾肥配施秸秆处理。该结果与本研究不完全一致,这可能与气候条件及土壤类型有关。

从微生物多样性结果来看,施肥能提高土壤微生物物种的丰富度、物种的优势度、物种的均匀度,改变土壤微生物的群落结构^[16],改善土壤微生物的代谢功能。Marschner 等^[29]曾提出,施肥主要是通过改变土壤的理化性质、养分含量等来影响微生物。本研究发现,施用有机肥后,微生物群落结构多样性显著提高。徐万里等^[8]也表明,氮磷钾配施有机肥能提高灰漠土土壤微生物多样性。主要是因为有机肥能为微生物提供更多能源和养分,加快微生物的新陈代谢功能。秸秆还田对微生物多样性的影响存在一定的争议,刘定辉等^[30]提出秸秆还田提高了冲积土土壤微生物多样性,孙凤霞等^[7]却发现秸秆还田对红壤微生物碳源利用有不利影响,而本研究结果显示 NPKS 与 NPK 处理相比微生物多样性并没有很大提升,这可能受气候和土壤类型的影响。

4 结论

(1)长期施肥能不同程度的提高土壤养分的含量。总体上来看,单施有机肥的土壤养分含量最高,NPKM、NPKS、NPK 处理的土壤养分含量高于单施氮肥或氮磷配施处理。

(2)长期施肥显著提高土壤蔗糖转化酶、脲酶、磷酸酶的活性,其中,施用有机肥的蔗糖转化酶的活性最高,而 NPKS 处理的脲酶活性最高,NPKM 处理的磷酸酶活性最高,但均高于单施氮肥或氮磷配施处理。

(3)长期单施有机肥或氮磷钾与有机肥、秸秆配施能明显提高土壤微生物多样性及微生物量碳氮含量,其中微生物多样性指数提高了 6.7%~71.9%,微生物量碳氮含量分别增加了 21.9%~36.9%,33.8%~65.7%。同时,施肥处理的 AWCD 高于不施肥处理,以单施有机肥处理最高,其次为有机无机肥配施处理。

(4)土壤蔗糖转化酶、脲酶、磷酸酶、土壤微生物量碳氮及土壤微生物多样性与土壤养分之间存在显著的相关性($P<0.05$)。将土壤酶及微生物指标与土壤养分指标相结合进行深入研究土壤肥力,对于建立赤红壤土壤肥力评价体系及合理施肥具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:74-106.
- [2] Jimenez M D L P, Horra A D L, Pruzzo L, et al. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(4):302-306.
- [3] 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6):62-68.
- [4] 刘妍, 周连仁, 苗淑杰. 长期施肥对黑土酶活性和微生物呼吸的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(1):7-10.
- [5] 焦晓光, 魏丹, 隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3):698-703.
- [6] 刘恩科, 梅旭荣, 赵秉强, 等. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(3):63-68.
- [7] 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.
- [8] 徐万里, 唐光木, 葛春辉, 等. 长期施肥对新疆灰漠土土壤微生物群落结构与功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(2):468-477.
- [9] Beauregard M S, Hamel C, Atul-Nayyar, et al. Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in alfalfa[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 59(2):379-389.
- [10] 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;146-195.
- [11] 李振高.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008;322-409.
- [12] 贾夏,董岁明,周春娟.微生物生态研究中 Biolog Eco 微平板培养时间对分析结果的影响[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(1):10-19.
- [13] 陈桂芬,刘忠,黄雁飞,等.不同施肥处理对连作蔗田土壤微生物量、土壤酶活性及相关养分的影响[J].南方农业学报,2015,46(12):2123-2128.
- [14] 邱现奎,董元杰,万勇善,等.不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J].土壤,2010,42(2):249-255.
- [15] 张逸飞,钟文辉,李忠佩,等.长期不同施肥处理对红壤水稻土酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):39-44.
- [16] Wen H Z, Ting G, Wei W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. Plant and Soil, 2010, 326(1/2): 523-523.
- [17] Behera N, Sahani U. Soil microbial biomass and activity in response to Eucalyptus plantation and natural regeneration on tropical soil[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1): 1-11.
- [18] 张红,王桂良.沼液和氮肥配施对菜田土壤微生物生物量和活性的影响[J].安徽农业科学,2011,39(27):16601-16603.
- [19] Chen X, Li Z, Liu M, et al. Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20years[J]. Journal of Soils & Sediments, 2015, 15(2): 292-301.
- [20] 王俊华,王睿,张华勇,等.长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J].生态环境,2007,16(1):191-196.
- [21] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.
- [22] 李东坡,武志杰,陈利军.土壤生物学活性对施入有机肥料的响应—I 土壤酶活性的响应[J].土壤通报,2003,34(5):463-468.
- [23] Mandal A, Patra A K, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(18): 3585-3592.
- [24] 袁玲,杨邦俊,郑兰君,等.长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J].植物营养与肥料学报,1997,3(4):300-306.
- [25] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 173-180.
- [26] 颜志雷,方宇,陈济琛,等.连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1151-1160.
- [27] 邬奇峰,陆扣萍,毛霞丽,等.长期不同施肥对农田土壤养分与微生物群落结构的影响[J].中国农学通报,2015,31(5):150-156.
- [28] 郑勇,高勇生,张丽梅,等.长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(2):316-321.
- [29] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 453-461.
- [30] 刘定辉,舒丽,陈强,等.秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J].应用与环境生物学报,2011,17(2):158-162.
- (上接第183页)
- [18] 郑重禄.沼肥对土壤培肥的影响及用于柑桔生产的效果[J].中国南方果树,2013,42(1):34-39,48.
- [19] 李玉臣,张建勇,杨树生.沼气肥在农业生态系统中的应用[J].山东能源,1991(4):25-28.
- [20] 李建军,袁向前,马丽,等.沼肥在果树生产中的综合应用[J].河南林业科技,2009,29(1):61-63.
- [21] 谢勇,王昌全,李冰,等.沼渣连续施用对土壤有机碳组成及剖面分布的影响[J].四川农业大学学报,2009,27(2):208-213.
- [22] 刘飞虎.用沼肥改良红壤土地的试验和效果[J].南方农机,2000(6):18.
- [23] 张玉凤,董亮,李彦,等.沼肥对大豆产量、品质、养分和土壤化学性质的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):135-143.
- [24] 蔡跃台,陈伟祥,徐象华,等.沼肥在芦柑上的施用效果研究[J].中国南方果树,2010,39(2):22-23.
- [25] 胡向军,余东波.沼液对芦柑生长发育、产量和品质的影响[J].中国沼气,2008,26(3):29-33.
- [26] 彭春瑞,罗奇祥,汪泽义.沼肥在南丰蜜桔上的应用效果研究[J].中国沼气,2005,23(3):41-42.