

施肥制度与养分循环对稻田土壤微生物 生物量碳氮磷的影响

陈安磊^{1,2}, 王凯荣¹, 谢小立¹

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:以红壤性稻田土壤为对象,采用田间试验方法,研究了在不同化肥配施条件下,有机养分循环利用对土壤微生物量 C(MB-C)、N(MB-N)、P(MB-P)的影响。结果表明:① 稻田土壤能维持较高的土壤微生物生物量。② 化肥 N、P、K 先后引入农田生态系统对土壤 MB-C、MB-N、MB-P 没有显著的影响;有机养分循环利用能显著提高土壤 MB-C;在施化肥 NP 或 NPK 基础上实行有机养分循环利用能显著提高土壤 MB-N 和 MB-P, 而在不施化肥或只施化肥 N 的基础上,有机养分循环利用虽也能提高土壤 MB-N 和 MB-P 含量,但提高的幅度没有达到统计学显著水平。随着 NPK 肥配合程度的提高,有机养分循环利用土壤 MB-C、MB-N、MB-P 的提高幅度有上升的趋势。③ 土壤 MB-C 与有机 C 的年际投入量有极显著的正相关关系,另外土壤微生物生物量 C、N、P 分别与土壤有机 C、土壤全 N、速效 P 有显著的正相关关系。通过有机养分循环利用可大幅度提高微生物对 N 素和 P 素的固持量,提高土壤 MB-C、MB-N、MB-P 占土壤全量 C、N、P 的比例。

关键词:施肥制度; 养分循环; 红壤性水稻土; 微生物生物量 C; 微生物生物量 N; 微生物生物量 P

中图分类号:S154.34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1094-06

Effects of Fertilization Systems and Nutrient Recycling on Microbial Biomass C, N and P in a Reddish Paddy Soil

CHEN An-lei^{1,2}, WANG Kai-rong¹, XIE Xiao-li¹

(1.Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125,China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039,China)

Abstract: Based on a 14-year long term experiment, the effects of fertilization systems and nutrient recycling on microbial biomass C, N and P in a reddish paddy soil were studied. The main results were as followings: (1) The paddy soil has a strong ability on maintaining a high level of microbial biomass. (2) The amounts of microbial biomass C, N and P in the soil were not significantly affected by application of fertilizer N, NP or NPK, while the amount of MB-C was significantly increased by organic nutrient recycling use in the rice ecosystem. Under application of fertilizer NP or NPK, the amount of microbial biomass N and P were significantly improved with the recycling of organic nutrient. However, microbial biomass N and P were not significantly increased by the recycling use of organic nutrient based on zero fertilizer or application of fertilizer N alone. With increasing the combinative degree of fertilizer N, P and K application, the recycling use of organic nutrient had more benefit in increasing microbial biomass C, N and P in the soil. (3) There was a very strong relationship between the amount of organic carbon input and the concentration of soil MB-C. Moreover, the microbial biomass C, N and P had a significant relationship with soil total C and N, and available P, respectively. Therefore, the recycling use of organic nutrient improved the rate of soil MB-C to soil total C, MB-N to total N and MB-P to total P, and also enhanced the fixation of microbial to N and P nutrients.

Keywords: fertilization systems; reddish paddy soil; organic nutrient recycling; MB-C; MB-N; MB-P

收稿日期:2005-02-05

基金项目:中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-441);中科院野外台站研究基金“亚热带区域农田土壤有机质最适含量阈值及其管理研究”;德国 BMZ/GTZ 资助项目“Managing Crop Residues for Healthy Soil in Rice Ecosystems”

作者简介:陈安磊(1977—),男,江苏沛县人,在读硕士生,主要从事土壤环境化学方面的研究。

联系人:王凯荣 E-mail:krwang@isa.ac.cn

土壤微生物不仅是土壤有机质和养分(N、P、S 等)循环转化的动力,而且本身就是土壤养分的储存库,对土壤中养分供应起着重要作用^[1]。国内外有关施肥措施对土壤微生物生物量的影响研究已有许多报道,但大多集中在旱地和草地,并以室内培养试验为主^[2,3],有关施肥制度(模式)演替和进步对土壤微生物生物量碳、氮、磷长期影响的研究尚未见文献报道。最近,刘守龙等^[4]利用湖南省一些稻田施肥试验研究了施化肥和有机肥后稻田土壤微生物生物量的变化情况,由于研究者选用的施肥试验不是按照我国农业施肥制度历史演替过程和有机养分循环利用进行设计的,其研究结果还不能揭示施肥制度(模式)的演变对土壤微生物生物量变化的影响。

从养分利用角度来看,中国农业的发展大致可以分为 2 个阶段。第 1 阶段是 20 世纪 50 年代以前以自然肥料为主的有机农业阶段;第 2 阶段开始于 20 世纪 50 年代中期,以化学氮肥大面积的推广应用为标志,随后是 60 年代磷肥在我国南方各地的应用和 70 年代后期钾肥的推广,这是我国施肥制度的演变过程。氮、磷、钾养分先后进入我国农业生态系统,配合各阶段有机养分循环利用这一施肥传统,形成了不同时期有机-无机相结合的农业施肥模式^[5]。有关施肥制度进步对作物产量增益和土壤肥力变化影响已有系列的报道^[5-7],本文将重点讨论施肥制度(模式)演变与生态系统养分循环利用对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响及土壤微生物生物量碳、氮、磷与土壤肥力质量的关系。

1 材料与方法

1.1 土壤

供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,采自中国科学院桃源农业生态试验站施肥制度长期定位试验田。土壤基本肥力性状为:有机 C15.4 g·kg⁻¹,全 N1.88 g·kg⁻¹,全 P0.60 g·kg⁻¹,全 K12.8 g·kg⁻¹,速效 P 16.2 mg·kg⁻¹,速效钾 74.3 mg·kg⁻¹,pH 5.74。本研究共选用大田试验的 8 个处理:① 不施化肥,收获物全部移出系统(CK);② 不施化肥,收获物中养分循环利用(CK+C)(收获物中养分循环利用以下简称“C”);③ 施化肥 N,收获物移出系统(N);④ 在施化肥 N 的基础上,收获物中养分循环利用(N+C);⑤ 施化肥 NP,收获物移出系统(NP);⑥ 在施化肥 NP 的基础上,收获物中养分循环利用(NP+C);⑦ 施化肥 NPK,收获物移出系统(NPK);⑧ 在施化肥 NPK 的基础上,收获

物中养分循环利用(NPK+C)。其中有“C”处理(②、④、⑥和⑧)冬季种植紫云英,春耕时将紫云英翻压入泥作早稻基肥;早晚稻秸秆全部直接还田;生产稻谷的 50%(1994 年以前为 80%)以及全部空秕谷粉碎后喂猪,猪粪尿作来年早稻的基肥。大田试验详细情况及化肥施用量状况参见文献[7]。

于早稻收割前 15 d,用多点(12 点)取样法取各小区表层 0~20 cm 土壤,混合均匀后取约 1 kg 土样保持新鲜状态,共 24 个样品。制备样品时先风干至土壤含水量大约相当于饱和持水量的 40%,除去动、植物残体,切碎过 2 mm 筛,在标准条件下(25℃,100%空气湿度的容器内)预培养 10 d 备用^[4,14]。部分土壤样品风干用来测定土壤速效 P 和 pH。土壤有机 C、全 N 利用 2002 年 4 月测定的数据,土壤全 P 和速效 P 为 2004 年 3 月测定的数据。各处理土壤基本化学性质见表 1。

表 1 不同施肥处理后土壤基本化学性质
Table 1 Chemical parameters in soil adopted different fertilization models

土壤	pH	全 N /g·kg ⁻¹	有机 C /g·kg ⁻¹	全 P /g·kg ⁻¹	速效 P /g·kg ⁻¹
CK	5.66	1.77 b	15.4 c	0.42 c	4.70 e
CK+C	5.65	2.34 a	18.8 b	0.50 c	6.75 d
N	5.83	1.79 b	15.8 c	0.42 c	4.08 e
N+C	5.63	2.36 a	20.1 ab	0.48 c	6.60 d
NP	5.79	1.98 b	16.9 bc	0.60 b	23.83 b
NP+C	5.70	2.48 a	21.3 ab	0.71 a	29.11 a
NPK	5.81	1.87 b	17.2 bc	0.61 b	16.38 c
NPK+C	5.65	2.43 a	21.7 a	0.71 a	30.33 a

注:表中不同小写字母表示同一列数据在 0.05 水平上的显著差异。其中土壤全 N 和有机 C 是以 1990 年施肥制度试验田耕作层土壤的基础数据为协变量,对 2002 年数据进行协方差分析的结果。

1.2 测试分析方法

土壤微生物生物量 C、N(MB-C、MB-N)的测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取方法^[8,9]。测定时,称取经预培养相当于烘干重 20.0 g 的新鲜土样,在真空干燥器中用氯仿蒸汽熏蒸 24 h,用反复抽真空方法除去残存氯仿后,再用 80 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液振荡提取 30 min,过滤;提取液中的有机 C 用 TOC 自动分析仪(Phoenix-8000)紫外-过硫酸钾氧化法测定^[8]。另取 10 mL 提取液,加 CuSO₄ 和浓硫酸消化后采用流动注射仪(FIAStar-5000)分析提取的 N^[9]。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机 C、N 的差值分别除以转换系数 K_c(0.45)或 K_N(0.45)计算土壤 MB-C、MB-N。

土壤微生物生物量 P (MB-P) 的测定: 采用 Brookes 等^[10]的方法测定。称取 4 份土样(4.0 g 烘干基), 其中 2 份按上述方法熏蒸, 另 2 份不熏蒸; 全部用 80 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH 8.5) 提取(振荡 30 min), 过滤; Murphy 和 Riley (1962) 法^[11]显色, 分光光度计法(UV8500- II 型)测定无机磷。同时用外加无机磷酸盐(KH₂PO₄)的方法测定磷的提取回收率。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取磷的差值并校正提取回收率后, 除以转换系数 K_p(0.4)计算土壤 MB-P。

土壤 pH 的测定: 采用蒸馏水(土水比为 1:2.5), 浸提 15 min, 用 Mettler-toledo320 pH 计测定。土壤有机 C、全 N、全 P、速效磷测定方法参见《土壤理化分析与剖面描述》^[12]。

年际有机碳归还量为多年平均值, 分为根茬、凋落物的自然归还量, 绿肥、稻草和厩肥的人工归还量 2 部分, 其中凋落物为早晚稻生育期各 7 次田间收集量。处理 CK、CK+C、N、N+C、NP、NP+C、NPK 和 NPK+C 的年际有机碳归还量依次为 1 368、6 367、1 702、7 271、1 982、7 846、2 192 和 8 436 kg·hm⁻²。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤 MB-C 对不同施肥制度演替和养分循环利用的反应特点

土壤 MB-C 是土壤有机质中活性较高的部分, 是土壤养分重要的源。本试验结果表明, 在没有化肥投入的情况下, 稻田土壤也能维持较高的 MB-C(811.0 mg·kg⁻¹), 这与前人报道的结论相似^[4]。方差分析显示, 施用化肥与不施肥之间土壤 MB-C 没有显著差异($P<0.05$)。与不施肥(CK)相比, 在施用不同化肥基础上有机养分循环利用(N+C、NP+C 和 NPK+C)及不施用化肥仅有机养分循环利用(CK+C), 土壤 MB-C 都表现出了显著提高, 且随着 NPK 配合程度的提高, 有机养分循环利用使土壤 MB-C 的提高幅度有逐渐上升的趋势, 见图 1。在施 N、NP 和 NPK 肥基础上, 有机养分循环利用土壤 MB-C 提高量分别为 427.4、567.3 和 657.2 mg·kg⁻¹, 其中施 NP 和 NPK 肥基础上的有机养分循环利用土壤 MB-C 的提高量达到了显著水平($P<0.05$)。

不同的地理、气候条件和耕作制度是土壤微生物生物量(一般用土壤 MB-C 来表示)产生差异的主要因素^[2]。本试验自然环境条件和耕作制度相同, 各处理土壤起始理化性质相近, 因而影响土壤微生物生物量的因素只有 2 个, 即施肥制度(模式)与有机养分循环

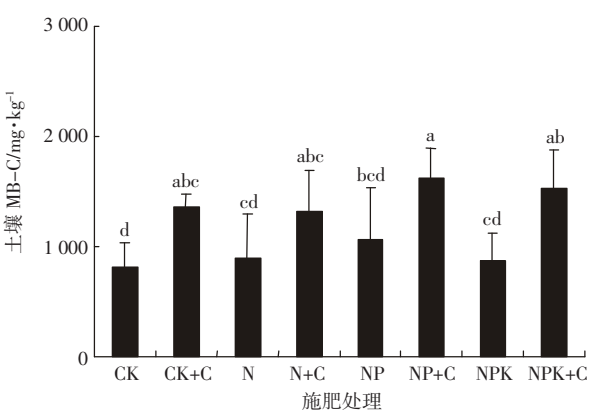


图 1 不同施肥处理土壤 MB-C
Figure 1 Soil MB-C under different treatments

利用的差异。有研究表明, 土壤微生物生物量与新鲜有机物输入量存在显著的正相关关系^[2]。本试验结果表明, 随着 NPK 肥逐步引入农田生态系统, 土壤有机碳的归还量逐渐提高, 但其提高的幅度远小于有机养分循环利用带入的有机 C, 对应着土壤 MB-C 有相似的变化趋势, 且两者之间有极显著的正相关关系, 见图 2。而施肥制度(模式)与有机养分循环利用的差异, 使土壤有机 C 等理化性质向异化方向发展。长期施用化肥虽然提高了水稻根茬等有机 C 的自然归还量, 但由于 N 肥施用, 降低了土壤 C/N 比, 加速了土壤原有有机 C 的分解, 从而导致土壤有机 C 量没有显著提高; 有机养分循环利用, 有机 C 积累量显著提高, 见表 1。国外研究表明^[2], 在同一种土壤中, 土壤 MB-C 的变化与土壤有机碳含量变化密切相关, 本试验结果也表明土壤 MB-C 与土壤有机 C 有显著的正相关关系, 见图 3。

有研究^[2]认为, 在旱作土壤中, 土壤 MB-C 占土壤有机 C 比例的高低变化可以敏感的指示土壤有机 C 含量的高低变化方向。本试验结果显示, 长期不施肥

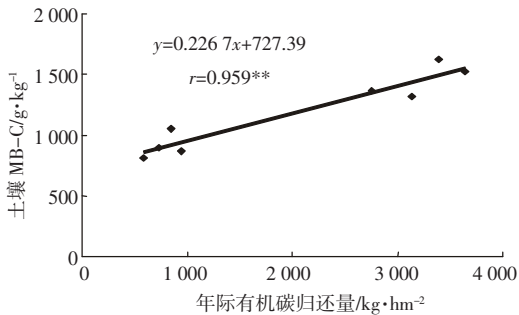


图 2 年际有机碳归还量与土壤 MB-C 的相关关系
Figure 2 Correlation between amount of annual return organic carbon and soil MB-C

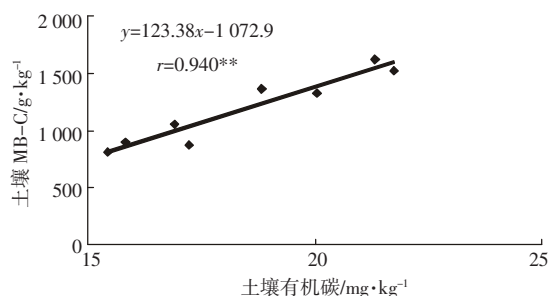


图3 稻田土壤有机碳与土壤 MB-C 的相关关系

Figure 3 Correlation between soil organic carbon and soil MB-C

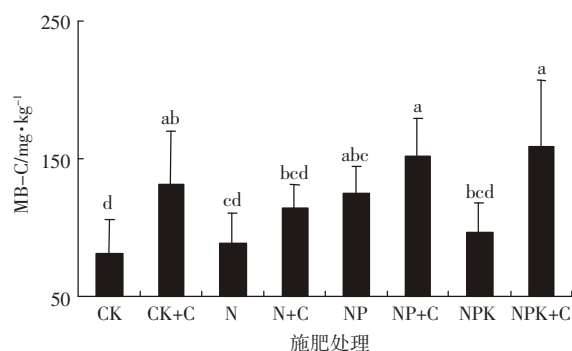


图4 不同施肥处理土壤 MB-N

Figure 4 Soil MB-N under different treatments

N 组分中酸不溶态 N 比土壤有机态 N 的低, 氨基酸态 N、酸解未知态 N 的比例较高, 可见土壤微生物态 N 的活性组分的比例较高^[13], 是土壤 N 素的重要储备库。由分析知, 有机养分循环利用能大幅度提高土壤 MB-N, 在施等量化肥 N(N、NP 和 NPK) 的基础上有机物循环利用与单施化肥(N、NP 和 NPK) 相比, 平均每公顷稻田土壤微生物多固定 85.8 kg 的 N 素, 意味着这些处理中较多的 N 素通过同化作用转入微生物体内暂时固定, 相应地通过 NH_3 挥发、 NO_3^- 淋失和反硝化脱氮等途径造成的 N 素损失减少了, 这对调节土壤 N 素供应、提高 N 肥利用率和减少 N 肥对环境的污染有积极意义。

总体来看, 土壤 MB-N 占土壤全 N 比例为 4.6%~6.4%(平均为 5.5%), 且土壤 MB-N 与土壤全 N 有极显著的正相关关系。其中施用化肥土壤 MB-N 占土壤全 N 的比例平均为 5.5%, 其所占比例小于有机养分循环利用土壤 MB-N 所占比例(平均为 5.8%), 见图 6。另外土壤 MB-N 所占土壤全 N 比例的变化趋势与土壤 MB-N 变化趋势相同。

2.3 稻田土壤 MB-P 对施肥制度演替和养分循环利用的反应特点

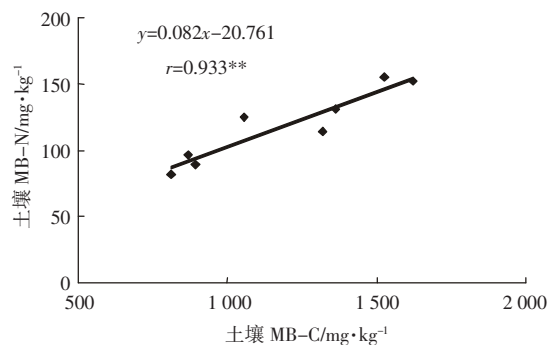


图5 土壤 MB-C 与土壤 MB-N 的相关关系

Figure 5 Correlation between soil MB-C and soil MB-N

(CK) 土壤 MB-C 占土壤有机 C 的比例为 5.3%, 施用化肥土壤 MB-C 所占比例提高量不大 (平均为 5.6%), 而在化肥的基础上有机养分循环利用土壤 MB-C 占土壤有机 C 的比例提高幅度较大 (平均为 7.1%), 而且所占比例与土壤有机 C 有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。与旱作土壤相比, 稻田土壤 MB-C 占土壤有机 C 的比例 (>5.0%) 较大, 这与稻田土壤有较高的微生物生物量有关。

2.2 稻田土壤 MB-N 对施肥制度演替和养分循环利用的反应特点

经过 12 a 的不同施肥处理后土壤全氮发生了显著性分异。连续 12 a 不施肥或施化肥 N 和 NPK, 与试验前相比土壤全 N 平均降低了 $0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施用 NP 肥土壤全 N 提高了 $0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有机养分循环利用, 土壤全 N 提高幅度较大 (平均为 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著高于不施肥或仅施化肥处理的土壤全 N。

各施肥模式土壤 MB-N 也发生了显著性分异。本试验结果表明, 与不施任何肥料相比, 施用化肥虽然提高了土壤 MB-N, 但提高量没达到显著水平 ($P < 0.05$); 在不同化肥基础上有机养分循环利用能较大幅度提高土壤 MB-N, 其中 NP、NPK 基础上有机养分循环利用土壤 MB-N 提高量显著, 且随着 NPK 肥配合程度的提高, 有机养分循环利用土壤 MB-N 提高量有逐渐上升趋势, 见图 4。投入 N、NP 和 NPK 肥之后, 有机养分循环利用土壤 MB-N 提高量分别为 25.1、27.1 和 $62.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中施 NPK 肥基础上的有机养分循环利用土壤 MB-C 的提高量达到了显著水平 ($P < 0.05$)。另外在不施化肥的基础上有机养分循环利用也能显著提高土壤 MB-N。

由上述分析可知, 土壤 MB-N 与土壤 MB-C 变化基本保持同步, 且两者具有极显著的正相关关系, 说明稻田土壤微生物对 N 素的固持作用主要取决于土壤微生物本身的生物量大小^[4], 见图 5。土壤有机态

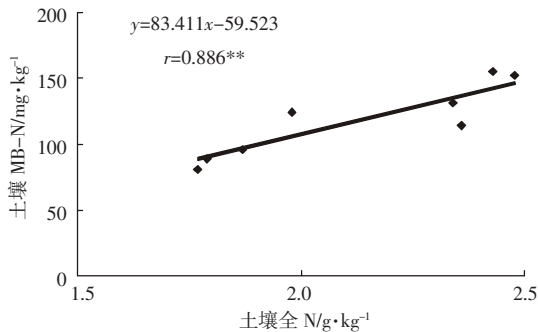


图 6 土壤全 N 与土壤 MB-N 的相关关系

Figure 6 Correlation between soil total N and soil MB-N

本试验土壤 pH 在 5.0~6.0 范围内,加入土壤无机 P 的回收率为 77.5%。仅施用化肥对土壤 MB-P 没有显著影响,见图 7;与不施任何肥(CK)相比,养分循环利用(CK+C)或在施化肥基础上有机养分循环利用都能大幅度提高土壤 MB-P,其中在施 NP 和 NPK 肥基础上有机养分循环土壤 MB-P 的提高量达到了显著水平($P<0.05$);随着 NPK 肥配合程度的提高,有机养分循环利用使土壤 MB-P 提高量呈现出上升趋势,如处理 N+C、NP+C 和 NPK+C 的土壤 MB-P 分别比处理 N、NP 和 NPK 高 6.5、11.3 和 11.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

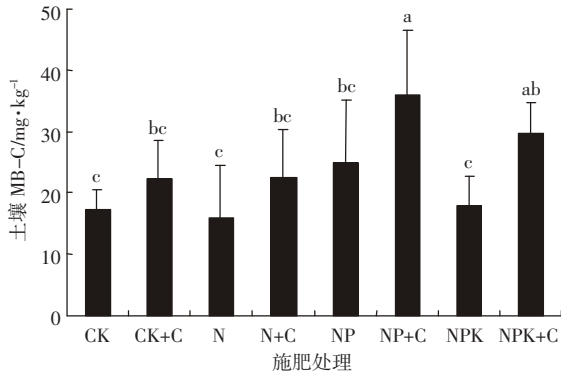


图 7 不同施肥处理土壤 MB-P

Figure 7 Soil MB-P under different treatments

土壤 MB-P 与速效 P 有显著的正相关关系 ($r=0.824^{**}$)。微生物的利用和转化是土壤 P 素转化的主要途径,可能对土壤 P 的有效性有重要的影响^[15]。本试验结果表明,与 CK 相比,不施 P 肥基础上的有机养分循环利用(处理 N+C、CK+C)土壤微生物平均多固定 11.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 P 素;P 肥配合有机养分循环利用(处理 NP+C、NPK+C)每公顷土壤微生物平均多固定 35.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 P 素,高于仅施用 P 肥(处理 NP、NPK),土壤微生物多固定 9.1 kg P 素。与试验前相比,施用磷肥和有机养分循环利用,土壤的全 P 都有

大幅度提高(平均提高量为 0.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由此可见,红壤稻田施用 P 肥和有机养分循环利用能有效提高土壤 P 库和土壤 P 的活性。

另外值得注意的是,与长期不施肥相比施用化肥并没有提高土壤 MB-P 占土壤全 P 的比例 ($\leq\text{CK}$ 处理的 4.1%),有机养分循环利用配合化肥施用提高了土壤 MB-P 占土壤全磷的比例(平均为 4.6%)。总体来看,土壤 MB-P 占全 P 比例为 2.9%~5.1%(平均为 4.2%),这一百分比大于旱作红壤的报道值 1.5%^[14]。

3 小结

适宜的施肥模式对提高土壤微生物生物量 C、N、P 有重要的作用。随着 N、P、K 肥先后进入农田生态系统,土壤微生物生物量 C、N、P 并没有显著的变化,化肥施用配合系统内有机养分循环利用能显著提高土壤微生物生物量,且随着 N、P、K 肥配合程度的提高,有机养分循环利用使土壤微生物生物量 C、N、P 的提高量呈上升趋势。另外土壤微生物生物量的状况与土壤的 C、N、P 含量和有机碳的归还状况密切相关。有机养分循环利用既提高了土壤养分库,又加强了土壤微生物对养分的固持量,有效降低化肥的损失,提高土壤养分有效性,减轻化肥和农田有机废物的环境污染压力,促进生态系统的良性发展。

参考文献:

[1] Wu J, Brookes P C, Jenkinson D S. Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil [J]. *Soil BioI*, 1993, 25(10): 1435-1441.
[2] 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培作物施肥[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 37-46.
[3] 许月蓉. 不同施肥条件下潮土中微生物量及其活性[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 349-352.
[4] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278-283.
[5] 沈善敏, 刘鸿翔, 王凯荣, 等. 农业生态系统养分循环再利用作物产量增益的地理分异[J]. 应用生态学报, 1998 a, 9(4): 379-385.
[6] 沈善敏, 刘鸿翔, 王凯荣, 等. 施肥进步在粮食增产中的贡献及其地理分异[J]. 应用生态学报, 1998 b, 9(4): 386-390.
[7] 王凯荣, 刘鑫, 周卫军, 等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23 (6): 1041-1045.
[8] Wu J, Joergensen R G, Birgit Pommerening, et al. Measurement of soil microbial biomass by fumigation-extraction-an automated procedure [J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22(8): 1167-1169.
[9] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen, a rapid direct extraction method to measure mi-

crobial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985,17 (6): 837–842.

¹⁵N-labelled microbial cells in soil [J].*Soil Biol Biochem*, 1982, 14 (2): 461–467.

[10] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorous in soil [J]. *Soil Boil Biochem*, 1982, 14 (2): 319–329.

[14] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 70–78.

[11] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water[J]. *Anal Chem Acta*, 1962, 27: 31–36.

[15] He Z L, Wu J, O’ Donnel A G, et al. Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture[J]. *Biol Fertil soils*, 1997, 24: 421–428.

[12] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

致谢:感谢肖和艾副研究员、李玲同学、刘守龙和黄敏博士在试验方法和仪器使用上的指导。

[13] Marumoto T, Anderson J P E, Domsch L H. Decomposition of ¹⁴C and