

无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响^①

李 想^{1,2}, 刘艳霞^{1,2}, 刘益仁^{2,3}, 徐阳春^{2*}

(1 贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550000; 2 南京农业大学江苏省固体有机废弃物资源化利用高技术重点实验室, 南京 210095;

3 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

摘 要: 采用盆栽模拟生物试验, 研究等量施磷条件下无机有机肥磷不同配比处理对作物产量及土壤磷形态的影响。结果表明: 无机肥磷: 有机肥磷为 80:20 的处理较 100:0 处理前两季小麦和水稻产量略低, 后两季小麦和大豆产量显著增高; 80:20 处理的土壤活性有机磷和中等活性有机磷含量分别比 100:0 处理增加 60.0% 和 51.7%; 80:20 处理的铁磷和闭蓄态磷含量较 100:0 处理显著降低, 铝磷和钙磷含量变化不大; 80:20 和 70:30 处理的土壤微生物量碳、磷含量均显著高于 100:0 处理。因此, 80:20 处理是本试验条件下无机有机肥磷配施的最佳比例, 可为农业生产上提供借鉴。

关键词: 无机有机磷配施; 产量; 无机有机磷分级; 微生物生物量磷

中图分类号: S143

磷素已经成为世界解决饥饿问题的瓶颈^[1], 粮食的大幅度增产总是伴随着磷肥的大量投入, 磷肥利用率降低, 磷肥的当季利用率仅为 10%~20%, 包括后效在内也超不过 25%^[2-3]。75%~90% 磷肥以磷酸盐的形态积累于土壤中, 累积在土壤中的磷高达 6 000 万 t, 相当于每年施肥量的几倍到几十倍。

2002 年我国畜禽粪便产生磷素总量 948 万 t, 相当于当年化肥投入磷素总量 1 060 万 t 的 89%^[4], 同时大量有机废弃物的产生给其处置带来巨大的压力^[5-6], 但是在有机肥资源量不断增长的情况下, 我国农业生产上有机肥的施用比例却不断下降, 我国丰富的有机肥资源未能充分利用。研究表明, 有机肥不但能通过自身有机磷的矿化改善土壤磷素营养, 而且还能通过还原、酸溶、络合溶解等作用以及促进解磷微生物增殖等过程活化土壤中难溶态磷为可溶性磷, 降低土壤对磷的吸附、增加磷的解吸, 减少土壤对磷的固定, 从而提高磷素利用率^[7-8]。Liu 等^[9]研究表明化肥与有机肥配施的作物产量显著高于长期施化肥的处理。李冬初等^[10]的试验表明, 无论是早稻还是晚稻, 无机有机肥配合施用后产量显著高于纯无机肥处理。康国战等^[11]的研究表明大豆施用无机有机复混肥可以促使植株生长健壮, 增加根瘤数, 促进早熟, 提高大豆产量。在集约化种植体系下, 利用有机肥

部分替代化肥磷, 减少无机磷肥的施用, 能否维持土壤磷素肥力水平, 维持和促进作物生产方面的研究尚少。

目前很多研究是基于施用无机磷肥的基础上增施有机肥能显著改善作物生长^[1,12-13], 但在等磷施入的条件下, 探索无机有机肥磷配施的最佳比例较为鲜见, 该配比用于农业生产, 既能满足当季作物的产量需要, 同时又可提高磷肥利用效率减少磷在土壤中的固定, 对无机磷肥减施增效意义重大。本文通过盆栽模拟生物试验, 研究了无机有机肥磷不同配施比例对麦-稻-麦-豆 4 季作物产量、土壤磷素形态及土壤微生物生物量碳、磷的影响, 旨在探寻无机有机肥磷配施的最佳比例和提高磷肥利用率的机理, 为农业生产上磷肥高效利用和减少环境污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 取自江苏省宜兴市新街镇陆平村水稻田 0~20 cm 表层土, 土壤类型为黄棕壤。土壤经自然风干、剔除石块及杂草, 过 2 mm 筛后装入内径 30 cm, 高 35 cm 的塑料盆钵, 每盆钵装土 20 kg。供试土壤含有机质 24.2 g/kg, 全氮 1.32 g/kg, 碱解氮 143 mg/kg, 速效磷 7.17 mg/kg, 有

①基金项目: 农业部农业公益性行业科研专项(201103004)、烟草根际促生菌的筛选及其促生机理的研究(黔科合 J 字[2013]2198)资助。

* 通讯作者(ycxu@njau.edu.cn)

作者简介: 李想(1982—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 主要从事农田生态系统养分循环研究。E-mail: newcool1361214@163.com

效钾 95.2 mg/kg, 土壤 pH 6.83。

1.1.2 供试肥料 氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用氯化钾, 猪粪有机肥(以猪粪为主要原料和水稻秸秆经高温堆肥发酵制成), 其含有机碳 300 g/kg, N、P₂O₅、K₂O 分别为 17.3 g/kg、22.2 g/kg、14.9 g/kg。

1.1.3 供试作物 供试小麦为扬麦 158(*Triticum aestivum* L. 158), 购自江苏省农科院种子分公司; 水稻为武运粳 7 号(*O. sativa* L. cv. Wuyujing 7)购自南京农业大学神州种业股份有限公司; 大豆为九月黄(*Glycinemax* L.), 购自江苏省农科院种子分公司。3 种作物品种均为当地主栽品种。小麦和水稻栽培密度为 12 cm × 12 cm, 每盆 5 穴, 中间 1 穴, 周围 4 穴。

1.2 试验设计

试验于 2007 年 12 月至 2009 年 10 月在江苏省有机固体废弃物资源化重点实验室网室进行(31.35°N, 119.75°E)。白天最高温度 36°C, 最低温度 17°C。该区年平均降雨量 1 100 ~ 1 400 mm。试验共设 7 个处理: 不施磷肥(0:0); 100:0(纯无机肥磷); 90:10(90% 无机肥磷 + 10% 猪粪有机肥磷); 85:15(85% 无机肥磷 + 15% 由猪粪有机肥磷); 80:20(80% 无机肥磷 + 20% 猪粪有机肥磷); 70:30(70% 无机肥磷 + 30% 猪粪有机肥磷); 0:100(纯猪粪有机肥磷)。除 0:0 处理外, 其他各处理磷肥施用量相同。小麦季施 N 0.106 g/kg、P₂O₅ 0.06 g/kg、K₂O 0.106 g/kg, 水稻季施 N 0.106 g/kg、P₂O₅ 0.03 g/kg、K₂O 0.106 g/kg, 大豆季施 N 0.1 g/kg、P₂O₅ 0.04 g/kg、K₂O 0.106 g/kg。氮、钾养分不足部分用化肥补充。有机肥、磷肥、钾肥作为基肥于作物播种或移栽前施用。氮肥小麦季分基肥、分蘖肥和穗肥按 5:3:2 的比例施入, 水稻季分基肥、分蘖肥、拔节肥和齐穗肥按 4:2:2:2 的比例依次施入, 大豆季一次性施入。

种植模式为小麦-水稻-小麦-大豆。2007 年 12 月 25 日播种小麦, 2008 年 5 月 30 日小麦收获; 2008 年 6 月 20 日移栽水稻, 10 月 29 日水稻收获; 2008 年 12 月 25 日播种小麦, 2009 年 4 月 26 日小麦收获; 2009 年 5 月 2 日播种大豆, 10 月 29 日大豆收获。

1.3 样品采集与分析方法

1.3.1 植株和土壤样品的采集 沿土表剪下植株地上部, 所有植株样品于 105°C 杀青 30 min, 70°C 烘干至恒重, 称量。植株样品用粉碎机磨细后装入自封袋保存待用。大豆收获后采集土样, 每盆钵均采取 5 点, 将 5 点土样混合均匀, 磨细过 2 mm 筛后, 组成一个混合土样, 装入塑料自封袋, 置于 4°C 冰箱保存, 48 h 内完成速效磷和微生物量碳磷含量的

测定。

1.3.2 土壤磷的测定 土壤有机磷的分级采用 Bowman-Cole 法^[14], 土壤无机磷分析采用 Chang-Jackson 方法进行测定^[15], 土壤微生物量碳、磷(MBC、MBP)的测定依据 Brooks 等^[16]和 Wu 等^[17]的方法。

1.4 数据分析与处理

数据处理和分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS13.0 进行。各处理间用一维方差分析(ANOVA)进行差异显著性分析, 所示结果均为 3 次重复的平均值。

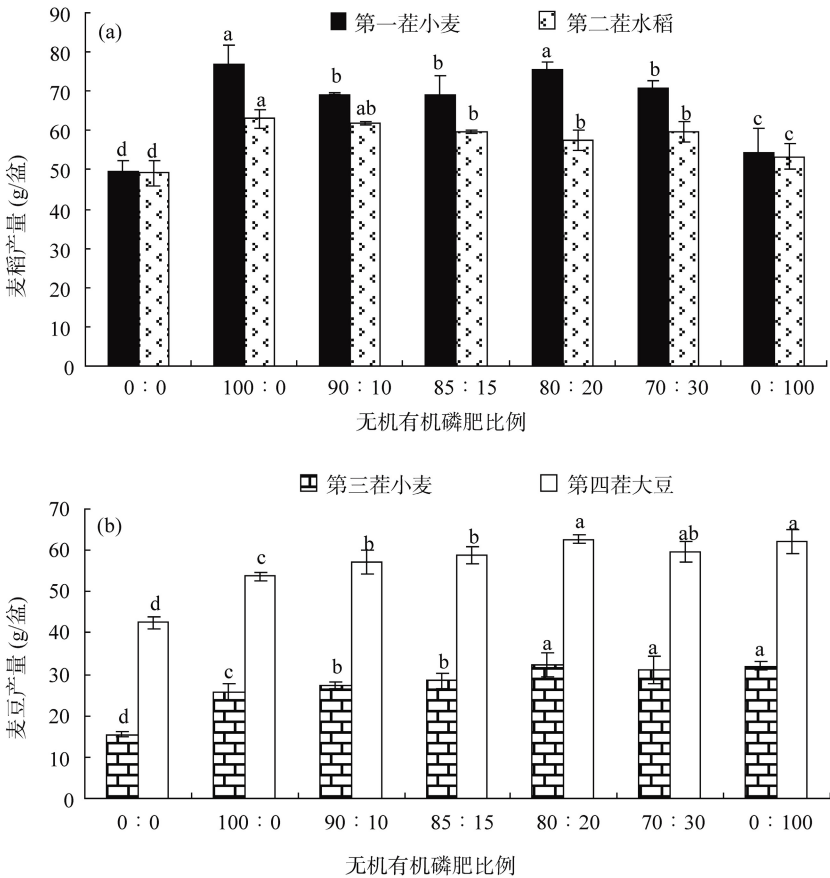
2 结果与分析

2.1 无机有机肥磷配施对作物产量的影响

无机有机磷肥比例 80:20 与 100:0 处理的第一茬小麦产量无显著差异, 但显著高于其他无机有机肥处理, 分别比 90:10、85:15 和 70:30 处理增产 9.07%、9.36% 和 6.81%。第二茬水稻籽粒产量也以 100:0 处理最大, 100:0 与 90:10 处理水稻产量差异不显著, 但二者显著高于其他无机有机肥处理, 分别比 85:15、80:20 和 70:30 处理的产量高 5.88%、9.68% 和 5.44%(图 1a)。由于早春天气原因导致第三茬小麦分蘖数减少, 小麦整体籽粒产量较第一茬降低, 80:20 处理的第三茬小麦籽粒产量最大, 与 70:30 处理间无显著差异, 但比 90:10、85:15 和 100:0 处理分别高 19.0%、14.3% 和 26.1%, 且差异显著。第四茬大豆籽粒产量也以 80:20 的处理最大, 与 100:0 和 90:10 处理间差异显著, 但和其他施肥处理的产量差异不明显, 分别比处理 90:10 和 100:0 的大豆产量高出 9.6% 和 16.8%(图 1b)。

2.2 无机有机肥磷配施四茬后对土壤有机磷形态的影响

土壤不同形态有机磷的含量经过四茬无机有机肥磷配施处理后表现不同(表 1)。100:0 处理的活性有机磷含量显著低于无机有机肥磷配施处理, 90:10、85:15、80:20 和 70:30 处理的活性有机磷含量分别比 100:0 处理增加 40.0%、53.3%、60.0% 和 64.4%。化肥与有机肥磷配合施用对中等活性有机磷的影响也较大, 90:10、85:15、80:20 和 70:30 处理中等活性有机磷含量分别比化肥磷单施处理增加 29.6%、39.8%、51.7% 和 53.4%。中稳性有机磷是与富里酸结合的磷, 100:0 处理与各无机有机肥配施处理之间无显著差异。长期施肥后高稳性有机磷的含量都略有下降, 表明长期施肥促进了土壤中高稳性有机磷向活性提高的方向转化。



(柱形图上方不同小写字母表示同茬作物不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著)

图 1 无机有机肥配比对麦-稻-麦-豆四茬作物产量的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on grain yield of wheat-rice-wheat-soybean rotation system

表 1 无机有机肥磷配比对土壤有机磷各形态含量的影响 (mg/kg)
Table 1 Effects of different fertilization treatments on soil organic P fractions

无机有机肥比例	有机磷分级				总有机磷
	活性有机磷	中活性有机磷	中稳性有机磷	高稳性有机磷	
0 : 0	4.3 d	157.2 f	26.4 ab	30.5 a	218.4 f
100 : 0	4.5 d	165.7 e	26.0 b	26.4 e	222.6 e
90 : 10	6.3 c	214.7 d	25.8 b	27.1 d	273.1 d
85 : 15	6.9 bc	231.6 c	25.8 b	27.8 d	292.1 c
80 : 20	7.2 b	251.4 b	25.9 b	28.4 c	312.9 b
70 : 30	7.4 b	254.2 b	26.0 b	28.5 c	316.1 b
0 : 100	9.3 a	289.3 a	26.7 a	29.6 b	354.9 a

注：表中数值均为 3 次重复的均值；同列不同字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著，下同。

2.3 无机有机肥磷配施四茬后土壤无机磷形态的变化

经过四茬无机有机肥磷配施处理后，土壤无机磷中的铁磷(Fe-P)和闭蓄态磷(O-P)含量发生了明显的变化(表 2)。100 : 0 处理的 Fe-P 的含量最高，达到 62.86 mg/kg，随着有机肥比例的增加，Fe-P 的含量不断下降，70 : 30 处理的 Fe-P 含量仅为 45.64 mg/kg，仅为单施化肥处理的 72.61%；土壤中的 O-P 含量 0 : 0 处理最高，与其他各处理间存在显著差异，100 : 0 处理的 O-P 含量仅次于 0 : 0 处理，但也显著高于无

机有机肥磷配施处理，70 : 30 的 O-P 含量最低，仅为 245 mg/kg；有机肥比例的提高显著减少 O-P 的含量，说明有机肥可以减少化肥磷以 O-P 形态的固定，促进磷在土壤中的移动。无机有机磷配施对土壤中 Al-P 和 Ca-P 的影响较小(表 2)。各无机有机肥磷配施处理的土壤速效磷含量均显著高于 100 : 0 处理，其中 70 : 30、80 : 20、85 : 15 和 90 : 10 处理的土壤速效磷分别是 100 : 0 处理的 2.07、2.11、1.67 和 1.42 倍；80 : 20 处理土壤速效磷含量最高，且处理 85 : 15 和 90 : 10 间差异显著。

表 2 无机有机磷配施对土壤不同形态无机磷含量的影响 (mg/kg)
Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil inorganic P fractions

无机有机肥比例	无机磷分级				
	速效磷	Al-P	Fe-P	Cal-P	O-P
0 : 0	3.2 e	13.6 a	24.3 e	5.74 c	323 a
100 : 0	11.7 d	12.4 b	62.9 a	9.99 a	298 b
90 : 10	16.7 c	12.5 b	53.7 b	10.3 a	271 c
85 : 15	19.6 b	12.6 b	51.9 b	9.89 a	276 c
80 : 20	24.7 a	12.5 b	46.1 c	9.19 a	255 c
70 : 30	24.2 a	12.5 b	45.6 c	9.21 a	245 c
0 : 100	12.0 d	12.4 b	40.1 d	7.93 b	215 d

各无机有机肥磷配施处理的土壤微生物生物量碳(MBC)均显著高于 100 : 0 处理, 90 : 10、80 : 20 和 70 : 30 处理的 MBC 含量分别比处理 100 : 0 增加 13.2%、37.0% 和 37.1%, 80 : 20 和 70 : 30 两处理之间无明显差异, 但都显著高于 90 : 10 处理。各无机有机肥配施处理的土壤微生物生物量磷(MBP)同样也显著高于 100 : 0 处理, 70 : 30 和 80 : 20 处理之间存在明显差异, 显著高于 90 : 10 处理。各无机有机肥磷配施处理 MBC/MBP 均显著小于 100 : 0 处理, 80 : 20 处理的 MBC/MBP 在所有各无机有机肥处理中最小, 90 : 10 处理显著低于 100 : 0 处理, 显著高于 80 : 20 处理(表 3)。

表 3 无机有机磷配施对土壤微生物量碳、微生物生物量磷及二者之比的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass C, microbial biomass P and microbial C/P ratio

无机有机肥比例	MBC (mg/kg)	MBP (mg/kg)	MBC/MBP
0 : 0	131 e	2.2 e	59.5 a
100 : 0	189 d	3.9 d	48.9 b
90 : 10	214 c	4.6 c	46.5 c
85 : 15	216 c	4.7 c	46.6 c
80 : 20	239 b	5.8 b	41.6 d
70 : 30	259 ab	5.7 b	45.4 c
0 : 100	270 a	7.6 a	35.5 e

3 讨论

本试验结果表明, 4 个无机有机肥磷配比比例中, 仅有机肥料提供的磷占总磷的 20% 时, 第一茬小麦产量与纯无机肥处理基本持平, 其他 3 个无机有机肥配比处理第一茬小麦产量都略低于纯无机肥处理。Singh 等^[18]报道 5 t 堆肥或者 6 t 绿肥可以减少 P 4.6 kg/hm², 且有机肥处理的土壤 Olsen-P 显著高于纯无机肥处理, 有机肥还可以增加土壤中短期的有效磷浓度同时可以长期保持有效磷, 满足作物的需

求, 由于速效磷的含量与产量呈正相关^[1], 因此有机肥可以适当替代无机肥料却不会导致作物减产。第二茬水稻产量单施化肥处理显著高于各无机有机肥处理, 这与前人的结果基本一致, 即不同的供试土壤和有机肥料对水稻产量影响稍有不同, 但总体趋势是施有机肥前期存在对水稻产量不利因素, 后期可表现很大的优越性。在麦-豆两茬作物中 80 : 20 的无机有机肥磷配施处理明显高于纯无机肥处理, 其他各无机有机肥磷配施处理在产量上也都高于纯无机肥处理; 验证了前期施用有机肥对作物产量有不利因素, 但随着种植年限的增长可以逐步显现优越性。试验结果表明用猪粪代替 20% 的无机肥磷能够保证作物的较高产量, 这与国内许多研究结果基本一致^[19-21]。

长期施肥后耕层土壤有机磷总量均明显增加, 即使长期单施化肥土壤有机磷总量也有小幅度的提高, 表明在此条件下有机磷的合成略高于矿化, 这与人报道的施入化学磷肥也可以促进土壤有机磷的积累相似^[22-23]。在施磷量相等的条件下, 化肥与有机肥长期配合施用后土壤有机磷总量比单施化肥平均增加 54.4%, 这是由于前者的磷除了来自化肥外, 还有部分源自有机肥。有机肥中的有机磷是土壤有机磷的直接供应者^[24], 在土壤有机质的转化过程中补充了土壤有机磷库。此外, 猪粪有机肥中含有大量的微生物, 施用后土壤微生物大量繁殖, 吸收固持了部分化肥磷, 促进了无机磷向有机磷的转化, 也是该处理土壤有机磷增加的原因之一。土壤有机磷的增加对提高根际土壤中有效磷的供给水平, 增加作物对磷的吸收利用具有积极意义。本研究结果与前人报道的使用有机肥后土壤活性和中等活性有机磷含量提高, 中稳性有机磷和高稳性有机磷的变化不大的结果类似^[25], 表明长期施用有机肥培肥了地力, 提高了土壤磷的有效供应水平。

在本试验中, 100 : 0 处理无机磷都是最高, 而随着有机肥比例的增加, 各项无机磷都随之减少, 其中 Fe-P 减少的幅度最大, O-P 减少的幅度次之, 可见有

机肥可以减少土壤对化肥磷的固定,为作物提供有效的磷源,这与前人研究基本一致^[26-27]。王伯仁等^[28]发现56年连续施用有机肥料,土壤中的磷以Ca-P和Al-P积累为主要表现形式,化学磷肥的施用能够提高土壤的全磷,并以Al-P增幅为最大,在所有处理中均表现为土壤O-P相对稳定。杨莉琳和李金海^[29]发现增施有机肥,前期可以降低O-P的水平,而后期又促使Ca₂-P向Ca₈-P转化,抑制了向Al-P的转化,O-P的含量也有提高。于群英等^[30]研究表明单施无机磷肥处理,随着施磷量的减少,土壤中作物有效的各形态无机磷含量也呈下降趋势。与单施无机磷肥用量150.0 kg/hm² P₂O₅相比,用猪粪中的磷替代其中20%无机磷肥处理,提高了土壤中的Olsen-P和Ca₂-P含量。

本试验结果显示纯有机肥处理的土壤微生物生物量磷(MBP)和微生物生物量碳(MBC)均是所有处理中最大的,而80:20处理的MBC/MBP是所有无机有机肥配施处理中最小的,进而可以看出有机肥的增加提高了土壤MBC、MBP,但适宜的无机有机配比可以使MBC/MBP最小,因而具有较大的土壤供磷能力。长期施用化学磷肥或有机肥均能增加土壤MBP的含量,尤以有机肥的作用更显著^[31-33]。长期施肥增加了土壤微生物体的供磷量,微生物体供磷量与作物产量及吸磷量关系密切^[27],本试验的无机有机肥处理与纯有机肥处理MBP显著高于纯无机肥处理,这也是其第三、四茬作物产量高于单施化肥处理的重要原因之一。

土壤微生物生物量碳磷比(MBC/MBP)反映了土壤微生物对磷有效性调节作用的潜力。当MBC/MBP值较小时,土壤微生物释放磷的潜力较大,从而能够发挥补充有效磷库的功能。而当MBC/MBP值过高时,微生物处于缺磷状态,趋于吸收土壤中有效磷^[34],从而与作物争夺土壤中的有效磷。Joergensen等^[35]研究指出施用无机磷肥显著降低了土壤MBC/MBP,然而Ofori和Rowell^[36]的研究与前者结论相反,即表明施无机磷肥并不影响土壤MBC/MBP。本试验结果与Joergensen等^[35]的研究结果相同,随着有机肥比例的增加显著降低了土壤MBC/MBP,在等磷养分的情况下,有机肥可以减少土壤MBC/MBP,这可能由于施入有机肥后,有机肥中的有机质为微生物提供了营养,促进了土壤微生物的活性,同时有机肥的磷多为有机磷可以增加微生物的磷,进而减小土壤MBC/MBP。本试验中0:100处理MBC/MBP最小,说明该处理的MBC/MBP可以向土壤中转移,进而促进作物对磷的吸收。反之,0:0处理MBC/MBP

最大,微生物缺磷,土壤中的磷有向微生物转移的趋势,进而导致土壤中更加缺磷,影响作物的正常生长。

4 结论

无机有机肥磷以80:20配施的处理第一茬小麦当季产量与单施化肥处理无显著差异,第二茬水稻产量略低于单施化肥处理,而在第三、四茬小麦、大豆中都表现出良好的产量效应,显著高于单施化肥处理。本试验条件下所获的无机有机肥最佳配比为80%无机肥磷配施20%有机肥磷。

经过四茬施肥后,80:20处理的活性有机磷含量比单施化肥处理增加60.0%,其中等活性有机磷含量比单施化肥处理增加51.7%。单施化肥处理的Fe-P含量最高,随着有机肥比例的增加,Fe-P含量下降,80:20处理的Fe-P含量仅为单施化肥处理的73.2%。单施化肥处理的O-P含量显著高于各无机有机肥磷配施处理,80:20的O-P含量仅为100:0处理的85.5%。无机有机磷配施对Al-P和Ca-P的影响较小。

各无机有机肥磷配施处理的土壤微生物生物量碳、磷均显著高于100:0处理。各无机有机肥磷配施处理MBC/MBP均显著小于100:0处理,80:20处理的MBC/MBP在所有无机有机配施处理中最小。

参考文献:

- [1] Ayaga G, Todd A, Brookes PC. Enhanced biological cycling of phosphorus increases its availability to crops in low-input sub-Saharan farming systems.[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 81-90
- [2] 刘芷宇. 植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性[J]. 土壤, 1992, 24(2): 97-101
- [3] 李绍长, 白萍, 龚江. 作物磷效率研究进展[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2002, 6(3): 251-254
- [4] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[J]. 中国农业科学院, 北京, 2005.
- [5] 罗春燕, 冀宏杰, 张认连, 雷秋良, 龙怀. 有机废弃物的磷素形态研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 709-715
- [6] 马超, 周静, 郑学博, 刘满强, 李辉信, 姜中山, 王维国. 秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 30-35
- [7] Bandyopadhyay KK, Misra AK, Ghosh PK, Hati KM. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 110: 125-135
- [8] Xu M, Li D, Li J, Qin D, Kazuyuki Y, Hosen Y. Effects of Organic Manure Application with Chemical Fertilizers on Nutrient Absorption and Yield of Rice in Hunan of Southern China[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(10): 1245-1252

- [9] Liu E, Yan C, Mei X, He W, Bing SH, Ding L, Liu Q, Liu S, Fan T. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 173-180
- [10] 李冬初, 李菊梅, 徐明岗. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(3): 23-25
- [11] 康国战, 翟金中, 张振华, 刘广军, 孙治安. 大豆施用有机无机复混肥的增产效果[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31(2): 316-317
- [12] Calbrix R, Barray S, Chabrierie O, Fourrie L, Laval K. Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 511-522
- [13] Lei L, Per G, Tao Z, Jiangming M. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44: 31-38
- [14] Bowman RA, Cole CV. Transformation of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 -extraction[J]. *Soil Science*, 1978, 125: 49-54
- [15] Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 84: 133-144
- [16] Brookes PC, Powlson DS, Jenkinson DS. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1982, 14: 319-329
- [17] Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, Chaussod R, Brookes PC. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22: 1 167-1 169
- [18] Singh M, Sammi Reddy K, Singh VP, Rupa TR. Phosphorus availability to rice (*Oriza sativa* L.)—wheat (*Triticum estivum* L.) in a Vertisol after eight years of inorganic and organic fertilizer additions[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1 474-1 481
- [19] 朱宝国, 于忠和, 王囡囡, 孟庆英. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2010, 29(1): 97-100
- [20] 林国林, 云鹏, 陈磊, 高翔, 张金涛, 卢昌艾, 刘荣乐, 汪洪. 小麦季磷肥施用对后作玉米的效果及土壤中无机磷形态转化的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 676-680
- [21] 李云, 张宁, 邢文英. 一年两熟地区小麦的磷肥累积利用率研究[J]. *土壤肥料*, 2002(4): 26-30
- [22] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 593-597
- [23] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 李茶苟, 吴建华, 赵美珍. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 63-66
- [24] 杨利玲, 杨学云, 古巧珍, 孙本华. 长期施肥对旱地土壤有机磷及其组分的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(5): 942-944
- [25] 陈军平, 汪金舫. 长期施肥条件下潮土耕层有机磷含量与组分的变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 331-334
- [26] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 李冬初. 长期施肥对红壤旱地磷组分及磷有效性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 28(4): 293-297
- [27] 王晔青, 韩晓日, 马玲玲, 王玲莉, 赵立勇, 李鑫. 长期不同施肥对棕壤微生物量磷及其周转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 322-327
- [28] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤旱地磷的影响[J]. *中国农学通报*, 2005(9): 255-259
- [29] 杨莉琳, 李金海. 磷肥在褐土中的动态转化及施用有机肥的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24(1): 21-23
- [30] 于群英, 李孝良, 李粉茹, 汪建飞. 安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 57-61
- [31] 黄敏. 稻田土壤微生物磷变化对土壤有机碳和磷素的响应[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1 400-1 406
- [32] 谢林花. 长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 65-68
- [33] 侯化亭, 张丛志, 张佳宝, 陈效民. 不同施肥水平及玉米种植对土壤微生物量碳氮的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 163-166
- [34] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 李学垣. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 366-370
- [35] Joergensen RG, Kübler H, Meyer B, Wolters V. Microbial biomass phosphorus in soils of beech (*Fagus sylvatica* L) forests[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19: 215-219
- [36] Ofori Frimpong K, Rowell DL. The decomposition of cocoa leaves and their effect on phosphorus in dynamics in tropical soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(1): 165-172

Interactive Effects of Combining Inorganic and Organic Fertilizers on Grain Yields and Phosphorus Forms

LI Xiang^{1,2}, LIU Yan-xia^{1,2}, LIU Yi-ren^{2,3}, XU Yang-chun^{2*}

(1 *Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550000, China*; 2 *Jiangsu Key Lab of Organic Solid Waste Utilization, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*; 3 *Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China*)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of superphosphate (SP) combined with various rates of pig manure (PM) on crop yields, organic and inorganic P fractions, accumulation of microbial biomass carbon and phosphorus (MBC, MBP) and MBC/MBP. The main results obtained were as follows: the 100 : 0 treatment gave the highest yield of wheat and rice in the first two seasons. The grain yield of the 80 : 20 treatment was significantly higher than that of 100 : 0 treatment in the third and fourth seasons. As for various forms of organic P, labile organic P (LOP) and moderately labile organic P (MLOP) of the 80 : 20 treatment was higher than those of the 100 : 0 treatment, increasing by 60.0%, 51.7%, respectively. The iron phosphates (Fe-P) and occluded P (O-P) of the 80 : 20 treatment were lower than those of the 100 : 0 treatment, and there were no significant differences between the 80 : 20 treatment and the 100 : 0 treatment on aluminium phosphates (Al-P) and calcium phosphates (Ca-P). MBC and MBP of the 80 : 20 treatment was higher than that of 100 : 0 treatment. The results indicated that a ratio of 80 : 20 was a more suitable ratio than the other ratios for the inorganic /organic phosphorous.

Key words: Organic and inorganic phosphorous fertilizers, Grain yield, Organic and inorganic phosphorus fractions, MBP