

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*

徐阳春 沈其荣[†] 茆泽圣

(南京农业大学资源与环境科学学院, 农业部作物生长与调控重点实验室, 南京 210095)

摘 要 通过在黄棕壤上开展的 14 年田间定位试验研究稻-麦水旱轮作下长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷的影响。结果表明: 与不施肥的对照和单施化肥相比, 有机肥与化肥长期配合施用能显著增加土壤有机磷总量; 就有机磷的形态而言, 长期施肥主要增加中等活性有机磷的含量。土壤不同粒级中总有机磷的含量顺序为: $0 \sim 2 \mu\text{m} > 2 \sim 10 \mu\text{m} > 50 \sim 100 \mu\text{m} > 10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。从分配系数上看, 土壤有机磷各形态中以对植物有效性较高的中等活性有机磷占绝对优势, 对植物有效性最高的活性有机磷仅占 3% 左右。长期施用有机肥后使分配在活性、中等活性组分中有机磷的比例增加, 而稳定性有机磷中的比例下降。

关键词 长期施肥, 有机磷组分, 土壤粒级

中图分类号 S141, S153.6

土壤有机磷是土壤磷素的重要组成部分, 一般约占土壤全磷含量的 20% ~ 50%, 它是植物生长所需磷的一个重要给源, 尤其是在无机磷含量较低、固磷能力较强的土壤上, 植物吸收的磷有相当一部分来自有机磷的矿化。合理的土壤管理措施可增加土壤有机磷的累积, 改善土壤磷素肥力水平。张亚丽等^[1]发现, 施用有机肥料盆栽一季作物后, 土壤中 4 种有机磷组分的含量均显著提高; 旱作条件下长期施肥对土壤有机磷组分的影响也有一些报道^[2-4]。水旱轮作是我国南方特有的一种种植制度, 它形成了一个特殊的土壤环境, 在此条件下长期施用有机肥料对土壤有机磷含量及其各组分分配的影响如何尚未见报道。此外, 由于土壤有机质多与土壤矿质颗粒结合在一起, 因此土壤不同粒级的有机磷是土壤有机磷的重要组分, 而对不同粒级中有机磷的形态和分布特点的研究更是鲜见。开展这方面的研究有助于对土壤有机磷转化机理的进一步认识。

本文通过对稻-麦水旱轮作下, 连续 14 年 29 茬施用有机肥后土壤及其不同粒级中有机磷的形态组成与分布变化的研究, 以揭示不同有机肥种类对土壤有机磷库及改善土壤有机磷供应的影响, 阐明长期使用有机肥培肥土壤的作用机理, 为合理施磷和提高磷肥利用率提供依据。

1 材料与方 法

1.1 土壤与不同粒级的土粒

土壤为第四纪下蜀黄土发育的水稻土(水耕人为土), 采自江苏省丘陵地区镇江农业科学研究所(119°07'E, 31°56'N)。1983 年 6 月起在该土壤上开始长期定位试验, 设对照(不施肥)、化肥、秸秆+化肥、绿肥+化肥、猪粪+化肥 5 个施肥处理。化肥用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (含 P_2O_5 12%) + KCl; 秸秆夏、秋茬分别用小麦和水稻秸秆, 用量为每季 3750 kg hm^{-2} ; 绿肥夏、秋茬分别用紫花苜蓿和嫩玉米秆, 用量为每季 7500 kg hm^{-2} ; 猪粪用量为每季 7500 kg hm^{-2} 。各施肥处理等量施用 $\text{N } 150 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $\text{P } 50 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $\text{K } 155 \text{ kg hm}^{-2}$, 施肥前分别测定各有机物料中 N、P、K 和水分含量, 依用量计算由各自提供的三要素总量, 最后分别用化肥补充调节到上述施肥量。秸秆和绿肥在施用之前先切短至约 5 cm 长, 有机

* 国家自然科学基金重点项目(39830220)资助

[†] 通讯作者

收稿日期: 2002-01-07; 收到修改稿日期: 2002-07-23

肥与磷钾肥均作基肥,化学氮肥底、追肥各50%。试验按随机区组排列,每个处理重复3次,小区面积为4 m × 8 m。一年种植两季作物(水稻+小麦)。试验开始前0~20 cm土层基本性状为:有机碳14.8 g kg⁻¹,全氮N 1.37 g kg⁻¹,pH(CaCl₂ 1:1) 6.2, < 0.002 mm粘粒274 g kg⁻¹。于1997年10月第29季作物(水稻)收获后在各处理小区中按0~20 cm土层分别取样5 kg,土样风干后部分过20目筛,用于有机磷分级测定,其余的过60目筛后,用超声波振动-沉降虹吸分离法分离不同粒径的土壤颗粒^[5]。

1.2 分析方法

土壤有机磷的分级采用Bowman-Cole法^[6]。

2 结果与讨论

2.1 长期施用有机肥对土壤不同形态有机磷含量的影响

长期施肥后耕层土壤有机磷总量均明显增加(表1),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。这与前人报道的施入化学磷肥可与土壤有机磷竞争,形成不溶性铁、铝络合物,使有机磷呈微溶态,易于矿化分解而减少有机磷积累的结果迥然不同^[7]。究其原因可能是由于本试验中氮、磷、钾肥配合使用,作物的生物学产量较高,使残留于土壤中的植物残体增加,其中的有机磷转化进入了土壤有机磷库。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24.7%,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^[8],在土壤有机质的转化过程中补充了土壤有机磷库。就不同有机肥的种类而言,以施猪粪处理土壤有机磷含量最高。这是因为在供试的三种有机肥中,猪粪的全磷含量最高,该处理来自有机肥的磷最多。此外,猪粪类有机肥中含有大量的微生物^[4],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。

表1 长期施用有机肥对土壤有机磷各形态含量的影响^[1]

Table 1 Influence of long-term application of manure on the content of forms of organic P in soil (mg kg⁻¹)

处理 Treatment	活性有机磷 LOP	中等活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MROP	高稳性有机磷 HROP	总有机磷 Total O-P
对照	5.2	136.3	28.8	33.6	203.9
化肥	5.4	159.4	31.6	31.2	227.6
秸秆+化肥	6.9	190.3	38.4	31.5	267.1
绿肥+化肥	7.2	199.9	38.0	32.6	277.7
猪粪+化肥	9.9	237.8	31.6	32.6	311.9

1) LOP: labile organic P, MLOP: moderately labile organic P, MROP: moderately resistant organic P, HROP: highly resistant organic P, TOP: total organic P

土壤不同形态有机磷的含量也因施肥处理不同而异(表1)。长期单施化肥对活性有机磷的影响很小,仅比对照增加4.8%;化肥与有机肥配合施用对活性有机磷的影响较大,秸秆、绿肥和猪粪处理比化肥单施分别增加26.6%、33.6%和83.0%。该结果与前人的不同来源的磷(NPK、动物粪便)对活性磷的影响差异很小的报道并不相同^[9],其原因有待进一步研究。中等活性有机磷化肥单施较对照增加17%,化肥与秸秆、绿肥和猪粪配合施用分别比化肥单施增加19.4%、25.4%和49.2%。中稳性有机磷是与富里酸结合的磷,化肥单施及其与秸秆、绿肥和猪粪配合施用分别比对照增加9.5%、33.3%、32%和9.7%。长期施肥后高稳性有机磷的含量都略有下降。这与不同施肥处理后土壤高稳性有机磷均低于对照的结果相似^[2,10],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。

上述结果表明长期单施化肥主要增加中等活性有机磷含量,对其它形态的有机磷影响较小;化肥与秸秆和绿肥配合使用也以对中等活性有机磷的影响最大,活性和中稳性有机磷的增幅相当;化肥与猪粪配合则对活性有机磷影响最大,对中等活性有机磷的影响次之。不同有机肥种类之间的这种差异与其

自身有机磷各组分的相对含量不同有关, 据测定猪粪中活性有机磷约占有机磷总量的 22%, 绿肥和稻草分别为 11.2% 和 6.7%; 中等活性有机磷则以稻草 (74%) \geq 绿肥 (73.9%) $>$ 猪粪 (65.7%); 稻草、绿肥和猪粪中的中稳性有机磷分别占其有机磷总量的 14.4%、8.5% 和 8.3%; 三种有机肥中高稳性有机磷所占的比例较少, 仅为 4.3% ~ 6.4%^[1]。可见猪粪中有机磷以活性和中等活性有机磷为主, 约占 85% 以上, 而稻草和绿肥中以中等活性和中稳性有机磷为主, 约占 89%。

本研究的结果与前人报道的使用有机肥后活性和中稳性有机磷下降, 中等活性和高稳性有机磷含量增加的结果迥异^[8], 很可能与土壤类型及环境条件的不同有关。然而本试验的结果与前人的随着土壤肥力水平的提高, 土壤有机磷总量及中等活性有机磷含量均大幅度提高, 中稳性有机磷和活性有机磷含量也有一定程度提高, 而高稳性有机磷含量却降低的结果相吻合^[11], 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。

2.2 长期施用有机肥对土壤不同形态有机磷分配的影响

以不同形态有机磷占有机磷总量的百分数作为分配系数, 研究有机磷各组分对土壤有机磷的贡献。结果表明, 供试土壤有机磷各组分中以对植物有效性较高的中等活性有机磷占绝对优势, 约占土壤有机磷总量的 67% (表 2); 对当季植物有效性较低的中稳性和高稳性有机磷所占份额相当, 分别为 14% 和 16%; 而对植物有效性最高的活性有机磷仅占 2.5%。这与前人报道的中等活性有机磷 $>$ 中稳性有机磷 $>$ 高稳性有机磷 $>$ 活性有机磷的排序完全相同^[12]。

长期施肥不仅影响有机磷各组分的含量, 而且影响其组分分配 (表 2)。单施化肥仅中等活性有机磷所占的比率增加, 其它组分均下降; 化肥与有机肥长期配施, 除中等活性有机磷所占的份额增加较多外, 活性有机磷的比例也略有增加, 同时降低了稳定性有机磷的比例。这是因为施用有机肥在提高土壤有机磷含量的同时, 提高了土壤微生物和土壤磷酸酶活性^[13~15], 促进了有机磷形态间的转化, 尤其是向活性、中等活性有机磷的转化。虽然有机磷各组分的分配比例在长期施肥后发生了变化, 但中等活性有机磷所占的比例最大, 活性有机磷最低的基本格局并未改变, 表明在本试验条件下土壤有机磷各组分处于动态平衡之中。

表 2 长期施肥对有机磷各组分分配系数的影响¹⁾

Table 2 The distribution of forms of organic P after long-term fertilization (%)

处理 Treatment	活性有机磷 LOP	中等活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MROP	高稳性有机磷 HROP
对照	2.5	66.8	14.1	16.5
化肥	2.4	69.4	13.8	14.5
秸秆+ 化肥	2.6	71.2	14.4	11.8
绿肥+ 化肥	2.6	71.5	13.6	12.4
猪粪+ 化肥	3.2	76.2	10.1	10.5

1) LOP: labile organic P, MLOP: moderately labile organic P, MROP: moderately resistant organic P, HROP: highly resistant organic P

长期施用有机肥后总活性 (活性+ 中等活性) 有机磷的比率明显增加, 秸秆、绿肥和猪粪处理由化肥对照的 72% 分别增加到 74%、74% 和 79%; 而总稳定性有机磷的比例则由化肥的 28% 下降到 26%、26% 和 21% (表 2)。这与随着土壤肥力水平的提高总活性有机磷占土壤有机磷的比例增加, 而稳定性有机磷的比例减少的报道相一致^[16]。表明长期施用有机肥使土壤有机磷的活性加强, 土壤具有较高的供磷能力; 而长期不施肥, 有机磷的老化程度增高, 土壤的供磷能力降低。

2.3 长期施用有机肥对土壤不同粒级中有机磷含量的影响

土壤不同粒级中的有机磷总量因粒径不同而异 (表 3)。在 0~ 50 μm 范围内, 有机磷总量随粒径增粗而下降, $>$ 50 μm 后又增加。这与 Ruback 等报道的土壤有机磷总量随粒级变小而增加的结果并不完全相同^[17], 可能与土壤类型不同有关。50~ 100 μm 粒级有机磷含量比 10~ 50 μm 粒级高, 很可能与该粒

级中残留的粗有机残体较多有关^[5]。长期施肥后土壤不同粒级中有机磷的总量也发生了改变,单施化肥10~50 μm 粒级总有机磷比对照增加48%,0~2 μm 粒级也略增,另两粒级则下降。可能是由于长期施肥,一方面加剧了2~10 μm 粒级有机-无机复合体中有机磷消耗,另一方面促进了50~100 μm 粒级粗有机残体中的有机磷向小粒级中的转化。化肥长期配施有机肥,土壤各粒级有机磷总量均高于化肥单施;其与秸秆、绿肥配合2~10 μm 粒级有机磷增幅最大,与猪粪配合则以50~100 μm 粒级有机磷增加最多。产生这些差异的原因很可能与不同有机肥的C/P比有关^[3]。

表3 长期施肥对土壤不同粒级中各形态有机磷含量的影响¹⁾

Table 3 Contents of forms of organic P in soil particle sizes after long-term fertilization (mg kg⁻¹)

处理 Treatment	粒级 Particle size (μm)	活性有机磷 LOP	中等活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MROP	高稳性有机磷 HROP	总有机磷 TOP
对照	0~2	3.2	212.2	46.8	38.4	300.6
	2~10	1.9	149.6	42.4	28.3	222.1
	10~50	0.7	50.2	29.2	19.7	99.8
	50~100	2.3	137.3	23.6	26.5	189.6
化肥	0~2	12.6	229.1	38.2	34.6	314.5
	2~10	5.9	140.7	32.3	28.4	207.3
	10~50	0.5	112.9	20.6	13.8	147.8
	50~100	10.4	121.9	26.2	22.6	181.2
秸秆+化肥	0~2	20.4	236.7	83.8	44.2	385.1
	2~10	19.4	213.6	63.9	28.7	325.7
	10~50	10.5	103.7	27.4	20.6	162.1
	50~100	8.4	169.9	35.0	19.2	232.5
绿肥+化肥	0~2	22.3	256.7	45.9	31.2	356.1
	2~10	20.4	237.4	33.0	31.2	321.9
	10~50	10.5	105.3	25.3	21.7	162.8
	50~100	29.5	157.4	23.8	25.6	236.2
猪粪+化肥	0~2	24.5	266.0	63.1	54.9	408.5
	2~10	21.8	173.1	31.4	24.1	250.4
	10~50	11.4	116.8	24.8	19.0	172.0
	50~100	8.5	225.3	25.8	54.7	314.2

1) LOP: labile organic P, MLOP: moderately labile organic P, MROP: moderately resistant organic P, HROP: highly resistant organic P, TOP: total organic P

土壤各粒级中不同形态有机磷的含量也明显受施肥影响(表3)。活性有机磷除10~50 μm 粒级单施化肥较对照降低50%外,其它粒级长期施肥后均大幅度增加;与有机肥配合的处理,除50~100 μm 粒级外,其它粒级均比化肥单施显著增加。长期施肥使0~2 μm 和10~50 μm 粒级中等活性有机磷显著增加;长期施化肥后2~10 μm 和50~100 μm 粒级中等活性有机磷下降,而与有机肥配合则增加。单施化肥降低了0~2 μm 粒级中稳性有机磷含量,与秸秆、猪粪配合则比对照分别增加79%和35%;2~10 μm 粒级,除化肥与秸秆配合比对照增加51%外,其它处理均下降;各施肥处理10~50 μm 粒级中稳性有机磷含量均比对照下降,以单施化肥降幅最大;50~100 μm 粒级各施肥处理均比对照增加。长期单施化

肥及其与绿肥配合施用使 0~ 2 μm 粒级高稳性有机磷含量下降, 与秸秆、猪粪配合则增加, 以猪粪处理为最高; 2~ 10 μm 和 10 ~ 50 μm 粒级除化肥处理较对照下降外, 其它处理变化甚微; 50~ 100 μm 粒级仅化肥与猪粪配合比对照增加 106%, 其它处理变幅较小。

可见, 长期单施化肥由于土壤的 C/N、C/P 的改变, 首先使 10~ 50 μm 活性有机磷下降, 同时促进 2~ 10 μm 和 50~ 100 μm 粒级中等活性有机磷向活性有机磷的转化, 并使大粒级中的稳定性有机磷向着活性提高的方向转化; 而化肥与有机肥长期配施, 则可减少土壤各粒级中活性有机磷的消耗或具有更新作用, 使各粒级中的活性有机磷不断积累增加, 这也正是长期施用有机肥培肥土壤的机制所在。

3 小 结

1. 长期施肥能明显增加土壤中有机磷的含量。其中, 单施化肥对中等活性有机磷的影响较大, 化肥与秸秆、绿肥配合施用主要提高中等活性和中稳定性有机磷的含量, 而化肥与猪粪配合施用则显著增加了活性和中等活性有机磷的含量。

2. 长期施用有机肥后, 增加了总活性有机磷在土壤有机磷中所占的比例, 降低了稳定性有机磷的比重。土壤有机磷活性的提高, 是长期使用有机肥改善土壤磷素养分供应、培肥土壤的机制所在。

3. 土壤不同粒级中有机磷含量的高低顺序为: 0~ 2 μm > 2~ 10 μm > 50~ 100 μm > 10~ 50 μm 。长期使用有机肥对土壤不同粒级中有机磷各组分的影响因粒级和肥料种类而异。

参考文献

1. 张亚丽, 沈其荣, 曹翠玉. 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响. 南京农业大学学报, 1998, 21(3): 59~ 63
2. 刘小虎, 邹德乙, 刘新华, 等. 长期轮作施肥对棕壤有机磷组分及其动态变化的影响. 土壤通报, 1999, 30(4): 178~ 180
3. 王旭东, 李祖荫, 张一平. 不同有机物料施入土壤后的磷素转化及其供磷能力的差异. 土壤通报, 1998, 29(3): 113~ 115
4. 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响. 土壤学报, 1993, 30(4): 443~ 446
5. 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. 中国农业科学, 2000, 33(5): 65~ 71
6. Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Sci., 1978, 125: 95~ 101
7. 段平楣 译. 土壤有机磷. 土壤学进展, 1980, 8(4): 15~ 28
8. 张为政, 陈魁卿. 有机肥对土壤有机磷组分及其有效性的影响. 东北农学院学报, 1988, 13(2): 112~ 117
9. Guggenberger G, Christensen B T, Rubeck G H. Isolation and characterization of labile organic phosphorus pools in soils from the Askov long-term field experiments. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163(2): 151~ 155
10. Reddy D D, Rao A S, Rupa T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a vertisol. Bioresource Technology, 2000, 75(2): 113~ 118
11. 孙华, 熊德祥. 鲁南沙姜黑土及其有机无机复合体的有机磷研究. 土壤通报, 1998, 29(2): 61~ 64
12. Lindo P V, Taylor R W, Adriano D C, *et al.* Fractionation of residual phosphorus in a highly weathered sludge-treated soil: Organic phosphorus. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26: 2 639~ 2 653
13. 曹翠玉, 张亚丽, 沈其荣. 有机肥料对黄潮土有效磷库的影响. 土壤, 1998, 30(5): 235~ 242
14. 李和生, 王林权, 赵春生. 小麦根际磷酸酶活性与有机磷之关系. 西北农业大学学报, 1997, 25(2): 47~ 50
15. 李和生, 马宏瑞, 赵春生. 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析. 土壤通报, 1998, 29(3): 116~ 118
16. 甘海华, 卢瑛, 戴军. 红壤复合体不同活性有机磷的分布特征及其与磷酸酶的关系. 华南农业大学学报, 1999, (2): 75~ 79
17. Rubeck G H, Guggenberger G, Zech W, *et al.* Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1 123~ 1 132

INFLUENCES OF LONG-TERM FERTILIZATION ON THE CONTENTS AND DISTRIBUTIONS OF FORMS OF ORGANIC P IN SOIL AND SOIL PARTICLE SIZES

Xu Yang-dun Shen Qi-rong Mao Ze-sheng

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agri. Univ., Key Lab. of Crop Growth Regulation, Ministry of Agri., Nanjing 210095, China)

Summary

The effects of manure application on the contents and distributions of fractions of organic P in soil and soil particle sizes were investigated in a field experiment, which consisted five treatments of control (no fertilizers), chemical fertilizers, chemical fertilizers plus straw, chemical fertilizers plus green manure, and chemical fertilizers plus pig manure and had continued for 14 years at the farm of Jurong Agricultural Science Institute. The crop rotation of the experiment was summer rice (*Oryza Sativa L.*) and winter wheat (*Triticum aestivum*). The results showed that compared with the treatments of control or single application of chemical fertilizers, the combined application of organic manures with chemical fertilizers could significantly increase soil organic P. The contents of soil organic P in different soil particle size fractions were in the following order: 0~ 2 μm > 2~ 10 μm > 50~ 100 μm > 10~ 50 μm . Long-term fertilization mainly increased the contents of moderately labile organic P which was a little bit available to plant absorption and accounted for a largest percentage of soil organic P no matter in soil itself or in different soil fractions. The labile organic P was also increased in long-term fertilization but its contribution to plant P nutrition was small since it accounted for only 3% of total organic P in soils. Furthermore, long-term fertilization could decrease the percentage of highly resistant organic P showing that fertilization could also activate the native soil P to improve plant P nutrition.

Key words Long-term fertilization, Fraction of organic P, Soil particle size