

长期施肥对砂姜黑土有机磷组分及其有效性的影响^①

王道中^{1,2}, 郭熙盛²

(1 安徽农业大学资环学院, 合肥 230036; 2 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031)

摘要: 应用 Bowman 和 Cole 的有机磷 (P) 分组方法, 研究 23 年田间定位试验下不同有机肥对土壤有机 P 组分及其有效性的影响。结果表明: 与休闲、不施肥对照和长期单施化肥处理相比, 无机肥与有机肥配施能显著增加土壤有机 P 的总量, 不同有机肥对有机 P 的累积效应是牛粪>猪粪>麦秸。长期施肥主要是提高中活性有机 P 的含量, 活性和中稳性有机 P 的增幅相当, 高稳性有机 P 的含量几乎没有变化。相关分析表明活性有机 P 是土壤有效 P 的直接 P 源, 中活性有机 P 是活性有机 P 的有效补充, 而中稳性有机 P 和高稳性有机 P 的有效性较低。

关键词: 长期施肥; 砂姜黑土; 有机磷组分; 有效性

中图分类号: S153.6²

土壤有机磷 (P) 是土壤 P 素的重要组成部分, 约占全 P 的 20%~50%^[1], 自 1978 年 Bowman 和 Cole^[2] 提出土壤有机 P 分组方法以来, 我国学者对土壤有机 P 的分组、转化、有效性及施肥对土壤有机 P 组分的影响等作了一定的研究工作, 但多为盆钵试验^[3-5], 而长期施肥条件下土壤有机 P 组分的变化报道较少。此外, 由于土壤、气候及所投入的有机肥 (物) 料种类的不同, 所得的结论不尽相同。本文以长期定位试验土壤为材料, 研究长期施肥对土壤有机 P 组分及其有效性的影响, 对有机 P 资源的合理利用, 提高土壤供 P 能力具有重要意义。

1 材料与方 法

试验位于农业部蒙城砂姜黑土生态环境站内。试验站地处皖北平原中部, 属暖温带半湿润季风气候, 常年平均气温 14.8℃, 年均降水量 872.4 mm, 年均蒸发量 1026.6 mm。供试土壤为暖温带南部半湿润区草甸潜育土上发育而成的具有脱潜特征的砂姜黑土 (类), 普通砂姜黑土亚类, 占砂姜黑土土类面积的 99% 以上, 具有广泛的代表性。

试验于 1982 年进行, 设 7 个处理, 分别是: ①休闲 (CK₁); ②不施肥 (CK₂); ③NPK; ④NPK + 低量麦秸; ⑤NPK + 麦秸; ⑥NPK + 猪粪; ⑦NPK + 牛粪。无机肥用量为 N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O

135 kg/hm²。有机肥 (物) 料为麦秸 7500 kg/hm², 低量麦秸为 3750 kg/hm², 猪粪 (湿) 15000 kg/hm², 牛粪 (湿) 30000 kg/hm²。N 肥用尿素 (含 N 460 g/kg), P 肥用普通过磷酸钙 (含 P₂O₅ 120 g/kg), K 肥用氯化钾 (含 K₂O 600 g/kg), 全部肥料于秋季小麦种植前一次性施入, 后茬作物不施肥。试验小区面积 60 m², 设 4 次重复, 完全随机区组排列。1993—1998 年为小麦-玉米轮作, 其余均为小麦-大豆轮作。

土壤有机 P 分级测定采用 Bowman-Cole 法^[2]。

2 结果与讨论

2.1 长期施肥对有机 P 各组分含量的影响

由表 1 可以看出, 与休闲处理相比, 长期不施肥处理土壤有机 P 含量明显下降, 与休闲处理间差异达极显著水平; 长期施用化肥或有机肥与化肥配施均可明显提高砂姜黑土有机 P 的含量。单施化肥处理有机 P 总量较休闲处理增加 32.88 mg/kg, 相对含量增加 34.57%, 较不施肥处理绝对含量增加 51.32 mg/kg, 相对含量增加了 66.93%, 其差异均达极显著水平; 有机肥与化肥配施处理土壤有机 P 含量增幅大于单施化肥处理。不同有机肥处理对土壤有机 P 积累效应的大小顺序为牛粪>猪粪>麦秸>低量麦秸, 牛粪和猪粪、猪粪和麦秸、麦秸和低量麦秸处理间的差异均达到极显著水平, 这主要由施入土壤中的有机 P 的数量不同所致。

^①基金项目: 国家科技攻关项目 (96-004-01-07) 资助。

作者简介: 王道中 (1968—), 男, 安徽明光人, 副研究员, 硕士研究生, 主要从事植物营养与土壤肥料研究。E-mail: wdzhong-3@163.com

表 1 长期定位施肥对土壤有机 P 含量及其组分的影响 (mg/kg)
Table 1 Effects of long-term fertilization on contents and fractions of soil organic P

处理	有机 P	活性有机 P	中活性有机 P	中稳性有机 P	高稳性有机 P
CK ₁	95.12 F	3.91 eEF	57.34 eD	20.15 bcAB	13.72 cB
CK ₂	76.68 G	1.52 fF	42.86 fE	18.68 cB	13.62 cB
NPK	128.00 E	9.06 dDE	75.45 dC	27.95 bcAB	15.54 abcAB
低量麦秸+NPK	155.08 D	11.08 dCD	86.03 cC	42.78 abAB	15.19 bcAB
麦秸+NPK	164.96 C	14.87 cC	86.49 cC	45.83 aA	17.77 aA
猪粪+NPK	236.93 B	35.67 bB	131.34 bB	53.91 aA	16.01 abAB
牛粪+NPK	271.15 A	55.35 aA	142.97 aA	55.78 aA	17.05 abA

关于长期单施化肥对土壤有机P消长的影响,国内外报道并不一致。有研究认为施入土壤中的P肥可与土壤有机P竞争,形成不溶性的Fe、Al络合物,使有机P呈微溶态,易于矿化分解而减少有机P的积累^[6];但也有研究认为施入P肥能增加土壤中的有机P^[7]。本试验结果表明,单施化学肥料能显著提高土壤有机P含量。这可能是因为土壤中的有机P大部分以不同的结合形态存在于土壤有机质中,土壤有机P含量和有机质含量呈显著的正相关,本试验研究结果,其相关系数为0.9717,达极显著水平,因为单施化肥可提高土壤有机质含量,故土壤有机P的含量也有所提高。

由表 1 还可以看出,与休闲处理相比,长期不施肥处理活性有机 P、中活性有机 P 均和中稳性有机 P 含量均有明显下降,活性有机 P 下降幅度最大,达 61.13%,其次为中活性有机 P,下降了 25.25%,中稳性有机 P 下降了 7.30%,高稳性有机 P 的含量几乎没有变化。可见活性有机 P、中活性有机 P 对植物的有效性较高,这与他人研究的活性有机 P、中活性有机 P 对植物的有效性较高的结果相一致^[3,9]。而高稳性有机 P 的含量变化较小,这与黄庆海等^[8]关于红壤性水稻土长期施肥对有机 P 组分影响的结果并不一致,这可能与土壤性质不同有关。长期施用化肥或有机肥与化肥配施处理均可显著地提高砂姜黑土活性有机 P、中活性有机 P 和中稳性有机 P 含量,其中活性有机 P 和中活性有机 P 的含量与不施肥与休闲处理间的差异均达到了显著或极显著水平。有机肥与化肥配施处理以上 3 种有机 P 增量较大,其中牛粪、猪粪和麦秸处理与单施化肥处理间的活性有机 P 和中活性有机 P 的含量差异也达到了显著水平。不同有机肥对不同有机 P 组分的影响不一,化学肥料与麦秸配施处理中活性有机 P 和中稳性有机 P 增幅较大,猪粪和牛粪处理主要是提高活性有机 P 和中活性有机 P

含量。所有施肥处理间高稳性有机 P 含量也有所增加。

2.2 长期施肥对土壤有机 P 组分相对含量的影响

试验结果表明(表 2),砂姜黑土活性有机 P 占有机 P 总量的 1.98% ~ 20.41%,平均为 8.14%;中活性有机 P 占 52.43% ~ 60.28%,平均为 59.00%;中稳性有机 P 占 20.57% ~ 27.78%,平均为 22.74%;高稳性有机 P 占 6.29% ~ 17.76%,平均为 10.13%。可见砂姜黑土有机 P 以中活性有机 P 为主,其次为中稳性有机 P。

长期施肥对不同组分有机 P 的相对含量影响较大。不施肥处理由于土壤 P 素处于长期耗竭状态,有效性较高的活性有机 P 和中活性有机 P 含量下降幅度较大,而中稳性有机 P 和高稳性有机 P 下降幅度相对较小,故表现在相对含量上,与休闲处理相比活性有机 P 和中活性有机 P 下降,而中稳性有机 P 和高稳性有机 P 相对含量上升。长期施用化肥或化肥与有机肥配施均可提高活性有机 P 的相对含量,牛粪处理相对含量最高,较休闲处理增加了 16.30%,较单施化肥处理增加了 13.33%。增施猪粪和麦秸对活性有机 P 的相对含量的提高没有积极效应。施用化肥或与有机肥配施,中活性有机 P 的相对含量较休闲和不施肥处理均有所下降,特别是牛粪处理下降的较多,与休闲处理间差异达极显著水平,这与牛粪处理活性有机 P 相对含量增加最多相一致。中稳性有机 P 的相对含量以麦秸处理增幅最大,其次为低量麦秸和化肥处理,牛粪处理增幅最小。从表 2 还可以看出,所有施肥处理都可以降低高稳性有机 P 的相对含量,特别是在化学 P 肥的基础上增施有机肥,高稳性有机 P 的相对含量下降幅度更大,与休闲和不施肥处理相比,差异均达极显著水平。

表 2 长期不同施肥有机 P 组分相对含量 (%)

Table 2 Percentage contents of organic P under long-term fertilization

处理	活性有机 P	中活性有机 P	中稳性有机 P	高稳性有机 P
CK ₁	4.11 eD	60.28 aA	21.18 bAB	14.42 bB
CK ₂	1.98 fE	55.89 abcABC	24.36 abAB	17.76 aA
NPK	7.08 dC	58.95 abAB	21.84 bAB	12.14 cC
低量麦秸+NPK	7.14 dC	55.47 bcABC	27.59 aAB	9.79 eD
麦秸+NPK	9.01 cC	52.43 cC	27.78 aA	10.77 dD
猪粪+NPK	15.06 bB	55.43 bcABC	22.75 bAB	6.76 fE
牛粪+NPK	20.41 aA	52.73 cC	20.57 bB	6.29 fE

以上分析可以看出, 化肥和麦秸处理主要是提高中活性和中稳性有机 P 的含量, 而猪粪和牛粪处理活性和中活性有机 P 的增幅较大, 这可能与施入的有机肥料的本身以及土壤中腐殖质的组成有关。李和生等^[9]的研究得出, 牛粪中 4 种有机 P 的组分含量为中活性有机 P > 活性有机 P > 中稳性有机 P > 高稳性有机 P。张亚丽等^[10]的研究也表明, 猪粪中 4 种有机 P 组分的含量大小排序与牛粪完全相同, 这可能是牛粪和猪粪处理以中活性有机 P 和活性有机 P 积累效应更显著的原因。此外, 土壤的有机 P 以不同形态存在于土壤腐殖质中, 猪粪和牛粪处理活性腐殖质所占比例最高, 这也可能是牛粪和猪粪处理活性有机 P 相对含量较高的又一原因。

2.3 Olsen-P 和有机 P 各组间的相关性

因 Olsen 法测得的土壤有效 P 与植物吸 P 相关性极显著, 该方法被普遍用来测定中性和石灰性土

壤的有效 P 含量, 讨论各形态 P 与 Olsen-P 的相关性可说明其有效性。一般来说, 土壤 Olsen-P 和某组分 P 的相关性愈显著, 该组分的相对有效性就愈高, 对 Olsen-P 的影响也就愈大。试验结果相关分析显示 (表 3), 土壤 Olsen-P 与活性有机 P 和中活性有机 P 的相关系数为 0.9932 和 0.9778, 达 $p < 0.01$ 极显著相关水准, 与中稳性有机 P 相关系数为 0.8706, 达 $p < 0.05$ 显著相关水平, 而与高稳性有机 P 间相关性不显著。表明活性有机 P 和中活性有机 P 的活性较大, 可作为 Olsen-P 的有效 P 源, 而中稳性有机 P 可作为 Olsen-P 的潜在 P 源, 高稳性有机 P 为无效 P。从土壤有机 P 组分间的相关系数可以看出, 活性有机 P 和中活性有机 P、中活性有机 P 和中稳性有机 P 间相关系数均达极显著水平, 表明它们之间关系密切, 在一定的条件下有相互转化的可能。

表 3 Olsen-P 和有机 P 各组间的相关性

Table 3 Correlation coefficients between Olsen-P and forms of organic P

组分	活性有机 P	中活性有机 P	中稳性有机 P	高稳性有机 P
中活性有机 P	0.9562**			
中稳性有机 P	0.8469	0.9364**		
高稳性有机 P	0.6390	0.7098	0.8240	
Olsen-P	0.9923**	0.9778**	0.8706*	0.6348

注: $n = 7 - 2 = 5$; $r_{0.05} = 0.863$; $r_{0.01} = 0.917$ 。

值得注意的是, 两因子间的简单相关关系有时并不能很好地说明多因子共同作用时的复杂关系, 甚至可能得出相反的结论。进一步进行通径分析, 可以看出 (表 4), 土壤有机 P 各组分对 Olsen-P 的重要性依次为活性有机 P (0.6128) > 中活性有机 P (0.4821) > 高稳性有机 P (-0.0521) > 中稳性有机 P (-0.0568), 活性和中活性有机 P 对 Olsen-P 的贡献较大, 这与

他人研究结果相似^[11]。从表 4 还可看出, 中活性有机 P 的间接通径系数大于直接通径系数, 表明它主要是通过影响活性有机 P 的含量而影响 P 素的有效性。此外, 虽然中稳性和高稳性有机 P 对 Olsen-P 的直接作用为负效应, 但它们均可以在不同程度上通过直

表 4 土壤有机 P 各组分对 Olsen-P 的通路系数

Table 4 Path coefficients between Olsen-P and organic P forms

组分	活性有机 P	中活性有机 P	中稳性有机 P	高稳性有机 P
活性有机 P	0.6128 ⁺	0.4610	-0.0481	-0.0333
中活性有机 P	0.5859	0.4821 ⁺	-0.0532	-0.0370
中稳性有机 P	0.5190	0.4514	-0.0568 ⁺	-0.0429
高稳性有机 P	0.3916	0.3422	-0.0468	-0.0521 ⁺

注: ⁺表示直接通路系数, 其余为间接通路系数。

接影响活性和中活性有机 P 而间接影响 Olsen-P 的含量, 因为它们通过活性和中活性有机 P 都有一个较大的间接通路系数。

在相关分析的基础上进一步用 SAS 分析软件对土壤有机 P 各组分含量和 Olsen-P 之间的关系进行回归分析, 可得方程:

$$Y = 0.3775 + 0.6903X_1 + 0.2920X_2 - 0.0813X_3 - 0.7387X_4$$

Y表示Olsen-P, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别表示活性、中活性、中稳性和高稳性有机P。方程检验结果: $F = 159.58$, $p < 0.01$, $R^2 = 0.9969$ 。由回归方程可以看出, 活性和中活性有机P的系数较大, 且为正值, 而中稳性和高稳性有机P的系数为负值, 这和前面的分析结果相吻合。进一步剔除对Y值影响小且不显著的自变量, 最后可得方程:

$$Y = 3.7192 + 1.1190X_1 \quad F = 320.70 \quad p < 0.0001 \quad R^2 = 0.9816$$

本方程表明, 相对于有机 P 而言, 所提供的 Olsen-P 的 98.16% 是由活性有机 P 所决定的。

由以上分析可以得出, 活性有机 P 是 Olsen-P 的直接 P 源, 中活性有机 P 是活性有机 P 的有效补充, 而中稳性有机 P 和高稳性有机 P 对 Olsen-P 的作用较小。

3 结论

长期单施化学肥料或化学肥料与有机肥配施均可显著提高砂姜黑土有机P含量。化学肥料与麦秸配施处理中活性有机P和中稳性有机P增幅较大, 猪粪和牛粪处理主要是提高活性有机P和中活性有机P含量。不同

有机P组分中, 活性有机P有效性最高, 是 Olsen-P 的直接P源, 中活性有机P是活性有机P的有效补充, 而中稳性有机P和高稳性有机P对 Olsen-P 的作用较小。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤—植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998: 162-164
- [2] Bowman RA, Cole CV. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soil. *Soil Sci.*, 1978, 125: 95-101
- [3] 尹金来, 沈其荣, 周春霖, 洪立洲, 王凯, 丁金海, 茂文. 猪粪和磷肥对石灰性土壤有机磷组分及有效性的影响. *土壤学报*, 2001, 38(3): 295-300
- [4] 赵晶晶, 郭颖, 陈欣, 史奕, 韩晓日. 有机物料对土壤有机磷组分及其矿化进程的影响. *土壤*, 2006, 38(6): 740-744
- [5] 周春霖, 尹金来, 洪立洲. 猪粪和磷肥对黄潮土速效磷、有机磷组分及其有效性的影响. *江苏农业学报*, 2001, 17(1): 39-43
- [6] 段平楣译. 土壤有机磷. *土壤学进展*, 1980, 8(4): 15-28
- [7] 徐阳春, 沈其荣, 菲泽圣. 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. *土壤学报*, 2003, 40(4): 593-598
- [8] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 290-293
- [9] 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
- [10] 张亚丽, 沈其荣, 曹翠玉. 有机肥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
- [11] 向春阳, 马艳梅, 田秀平. 长期耕作施肥对白浆土磷组分及其有效性的影响. *作物学报*, 2005, 31(1): 48-52

Effects of Long-Term Fertilization on Organic Phosphorus Fractions and Availability in Shajiang Black Soil

WANG Dao-zhong^{1,2}, GUO Xi-sheng²

(1 *Resource and Environment College, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;*

2 *The Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: The effects of long-term fertilization on organic phosphorus fractions and availability in Shajiang black soil were studied with the method of the Bowman-Cole. The results of long-term located experiment showed that compared with the treatments of control, fallow and single applying chemical fertilizers, the combined application of organic manures and chemical fertilizers could increase the content of organic P significantly. The accumulative effects of different organic manures on organic P followed the order of cow dung>pig dung>wheat straw. Long-term fertilization mainly increased the content of moderately labile organic P. Correlation analyses showed that labile organic P was the direct resource of available P, moderately labile P was the supplement of labile organic P, the availability of moderately stable organic P and highly stable organic P was lower.

Key words: Long-term fertilization, Shajiang black soil, Fractions of organic phosphorus, Availability