

磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化

II. 土壤有效磷及土壤无机磷组成*

陈欣 宇万太 沈善敏

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 110015)

摘要

在碳酸盐褐土上9年的试验结果表明: 持续施用低量磷肥即施肥量与作物收获磷量相当, 可缓慢提高土壤速效磷的浓度, 并最终稳定在接近土壤“不缺磷”水平, 但不能使土壤建立较大的有效磷库。只有在结合80%收获产品喂猪-堆腐回田的施肥制度后则可达到这一目的。猪粪中的磷与化肥磷对于改善土壤有效磷库的作用相似。每年小剂量较之每6年一次大剂量施磷更有利于提高土壤速效磷和活性磷的浓度并有利于提高肥料残磷进入 Ca_2-P 库的比率。

关键词 磷肥低量施用, 有效磷, 无机磷

前文^[1]已报道, 三种低投入磷肥施用制度下耕层土壤总磷库及有机、无机磷库的发展变化。简言之, 磷肥的年投入量约相当于作物年收获磷量时, 耕层土壤的总磷库及有机、无机磷库在9年中几无变化或仅有微少增长; 施用磷肥加上收获产品的80%喂猪、猪粪回田则可使耕层土壤的有机磷含量有明显增长。

本篇进一步讨论上述施肥制度下土壤有效磷库及无机磷库组成的变化。

1 研究方法

有关田间试验设计和实验、分析方法已在前文说明^[1]。为便利读者, 简要列出田间试验四个处理如下:

- I. 对照, 不施磷;
 - II. 每年低量施磷, 年施磷量 $P\ 14.4\text{kg}/\text{ha}$;
 - III. 每6年一次大剂量磷肥, 1983年首次施用, 1989年第二次施用, 一次施磷量 $P\ 86.4\text{kg}/\text{ha}$;
 - IV. 磷肥用量同处理 III, 收获产品的80%喂猪, 猪粪回田。因此本处理自1984年起每年施用猪圈肥, 猪圈肥中养分含量平均每年约为 $N\ 85\text{kg}/\text{ha}$ 和 $P\ 12\text{kg}/\text{ha}$ ^[1]。
- 四个处理的供试作物为大豆、玉米、高粱, 除大豆外, 每年追施氮肥 $N\ 150\text{kg}/\text{ha}$ 。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994-07-03; 收到修改稿日期: 1995-12-01

2 结果与讨论

2.1 土壤速效磷变化

1983—1991 期间各处理作物收获后耕层土壤速效磷 ($0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 浸提) 浓度的发展变化如图 1 所示。

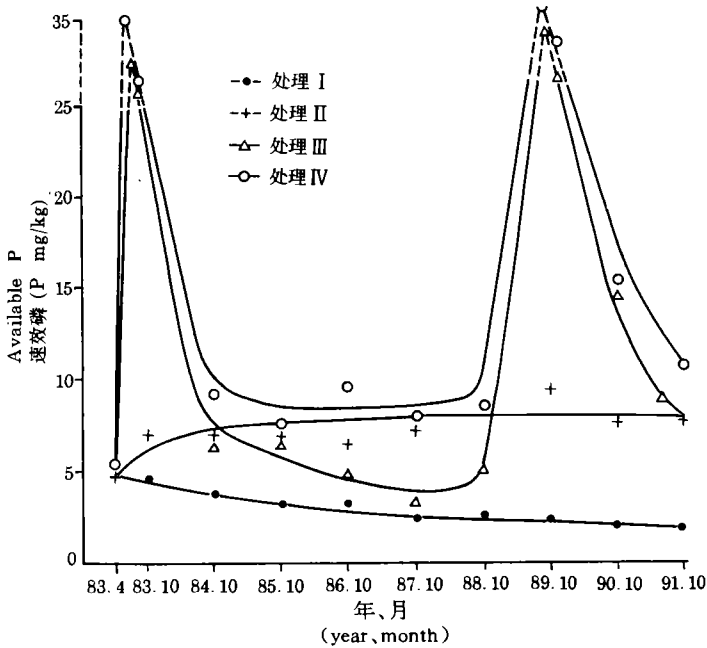


图 1 不同施肥处理土壤速效磷动态变化

Fig.1 Dynamic changes of soil Olsen-P under different fertilization treatments in nine years

由图可见,春播时一次大剂量施磷(处理 III、IV)可使施肥当年作物收获后的土壤速效磷浓度上升到相当高的水平,但自第二年起便迅速下降,表明残留土壤中的肥料磷经一年之后便大部分转入土壤迟效磷库。

每年施用低量磷肥(处理 II)可使耕层土壤的速效磷浓度缓慢而持续地增长,至第 6 年达到 $P 8 \text{ mg/kg}$ 左右,之后趋于稳定平衡。前文农田土壤每年支出和收入的植物有效磷在数量上基本相同^[1],然而耕层土壤的速效磷库却能缓慢增长。似乎表明在这一土壤的磷固定与释放平衡系统中,土壤释出植物有效磷的速度略超过了土壤对施入肥料磷固定的速度,因而使施肥中少部分磷得以保存于土壤速效磷库中,直至达到新的平衡。本试验中, $P 8-9 \text{ mg/kg}$ 可能是这一类土壤连续低量施磷多年之后土壤速效磷浓度的新平衡点。这一平衡点当然是不稳定的,一旦停止施用磷肥,土壤速效磷将迅速下降;而提高磷肥用量,平衡点将进一步上升,如处理 IV。

处理 IV 在 6 年一次大剂量磷肥基础上每年施用猪圈肥,根据磷在饲养-堆腐过程中的循环率^[2]和每年收获磷量估算,每年猪圈肥中的含磷量大致在 $P 12 \text{ kg/ha}$ 左右,接

近处理 II 每年的磷肥用量。因此, 就磷肥用量而言, 处理 IV 大致便是处理 II 和处理 III 之和, 年平均投入的磷量约为 P 26 kg / ha, 明显超过了作物年移出磷量。从图 1 中处理 IV 土壤速效磷的发展变化观之, 处理 IV 土壤速效磷浓度不仅远超过了处理 III, 也超过了处理 II, 1991 年已超过 P 10mg / kg, 观其发展趋势似乎尚未达到新的平衡点而依然处于缓慢上升之中。

关于只施氮肥不施磷肥(处理 I) 情况下土壤速效磷浓度的变化在前文^[1] 已有讨论, 图 1 表明了这一发展变化的动态过程, 可以看出在作物强烈吸收利用下耕层土壤的速效磷浓度在 9 年中几乎呈直线下降, 至 1991 年已下降至 P 1.9mg / kg, 成为严重贫磷。不过土壤速效磷浓度的这一下降势头不可能持续保持恒定, 事实上自 1988 年以后其下降速率已明显减缓, 若干年后也将达到新的稳定平衡点。

综上可以认为, 对于供试土壤持续采用磷肥低投入技术, 在维持作物较高产量的同时, 略可改善耕层土壤的有效磷库, 并以每年小剂量较之每 6 年一次大剂量的施磷方式为佳, 不过所形成的速效磷库容量有限, 远不能达到土壤丰磷水平。磷肥施用结合有机肥循环回田则可显著提高土壤速效磷浓度, 长期保持这一施肥制度, 可望逐渐为土壤建立起较大的速效磷库。

2.2 土壤活性磷变化及残留肥料磷有效性转化

表 1 列出了用阴离子树脂法平衡 24 小时测定的土壤活性磷结果, 其浓度大致为速效磷浓度的 2—3 倍, 与 Olsen(1983)^[5] 在中性土壤上测得的比值相似而略高。

表 1 1983—1991 不同施肥制度下耕层土壤(0—20 cm)活性磷库变化(P mg / kg)

Table 1 Changes of labile P in soil cultivated layer under different fertilization treatments in 1983—1991

处 理 Treatment	年 份 Year			9 年间变化 Changes in nine years
	1983	1988	1991	
I	13.4	10.7	9.7	-3.7
II	13.4	19.2	17.3	+3.9
III	13.6	15.6	17.2	+3.6
IV	14.2	20.5	21.2	+7.0

活性磷浓度的变化与速效磷十分相似, 大抵是: 大剂量磷肥投施当年可使土壤的活性磷浓度显著上升, 但第二年便迅速下降; 连续施用低量磷肥(处理 II) 可使土壤活性磷缓慢上升, 9 年间增加了 P 4mg / kg; 施用磷肥结合猪圈肥循环回田可显著扩大土壤活性磷库, 9 年中增加了 P 7mg / kg, 几乎是 II、III 两处理在同期内增加幅度之和。本研究未对活性磷的年际动态变化进行连续测定, 但可预期其变化趋势可能与速效磷相似, 在不同的磷肥施用制度下经过漫长岁月, 土壤活性磷浓度也将分别达到并稳定在一定的水平上。

为进一步了解土壤中残留肥料磷的有效性转化, 表 2 列出了各施肥处理残留肥料磷在土壤各磷库中分布的计算结果。

表 2 1983—1991 年不同施肥制度下土壤中残留肥料磷转化

Table 2 Transformation of residual phosphorus in soils under different fertilization treatments in 1983—1991

处 理 Treatment	9 年施入 磷 肥 (kg /ha)	9 年作物 移出磷量 (kg /ha)	9 年作物吸 肥料磷量 (kg /ha)	耕层土壤残 留肥料磷量 (kg /ha)	9 年中耕层土壤速效磷增加 Increase of soil Olsen-P in cultivated layer in nine years		
	P applied in nine years	P taken up in nine years	P taken up from fertilizer in nine years	Residual P in cultivated layer	P (mg /kg)	P (kg /ha)	占残留磷 % % of residual P
II	129.6	131.4	48.0	81.6	3.1	7.4	9.1
III	172.8	130.4	47.0	125.8	3.2	7.7	6.1
IV	268.8	174.0	90.7	178.1	5.3	12.7	7.1
猪圈肥*	96.0	43.6	43.6	52.4	2.1	5.0	9.5

处 理 Treatment	9 年中耕层土壤活性磷增加 Increase of soil labile P in cultivated layer in nine years			9 年中耕层土壤非活性磷增加 Increase of soil non-labile P in cultivated layer in nine years		
	P (mg /kg)	P (kg /ha)	占残留磷 % % of residual P	P (mg /kg)	P (kg /ha)	占残留磷 % % of residual P
II	3.9	9.4	11.5	30.1	72.2	88.5
III	3.6	8.6	6.8	48.8	117.2	93.2
IV	7.0	16.8	9.4	68.0	163.1	90.6
猪圈肥*	3.4	8.2	15.6	18.4	44.2	84.4

* 处理 IV 施入猪圈肥在各项中的相应值。

试验 9 年中, 残留土壤中肥料磷进入活性磷库的比例各处理略有不同; 每年施用小剂量磷肥(处理 II)有 12% 的残磷进入了活性磷库, 其中的 80% 为速效磷; 每 6 年一次大剂量施磷(处理 III)的相应值为 7% 和 88%, 就改善土壤速效磷和活性磷水平而言每年小剂量施磷的效果显然优于 6 年一次大剂量。处理 IV 介于两者之间, 9% 的残磷进入了活性磷库。此外, 用减差法可估算猪圈肥中残磷进入速效磷库和活性磷库的比率, 结果大抵与结果 II 相似, 但进入活性磷库的比率略高于处理 II。

上述结果显著低于某些文献报道, 例如, Mattingly (1957, 引自 Russell^[6]) 根据英国洛桑试验站的长期试验结果, 认为在连续施磷情况下 35—45% 的残留肥料磷可进入活性磷库; 根据 Johnston(1977) 资料进行计算也有 37—44% 的肥料磷进入了活性磷库^[3, 7]。除了由于测定活性磷的方法不同(上述作者采用 ³²P 反应平衡一周)可造成这一

表 3 不同施肥制度下耕层土壤(0—20cm)无机磷库各组分含量变化

Table 3 Changes in the composition of soil inorganic phosphorus in cultivated layer (0—20cm) under different fertilization systems

年、月 Year, month	处 理 Treatment	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Fe-P		Al-P		O-P		Ca ₄₀ -P		无 机 磷 Inorganic P	
		P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P	P (mg/kg)	占全磷 % % in total P
1983年 4月	I	4.2	0.8	22.9	4.1	26.6	4.8	30.6	5.5	54.2	9.8	355.2	64.3	493.7	89.4
	II	4.1	0.7	22.7	4.1	26.1	4.7	29.6	5.4	56.9	10.3	354.9	64.3	494.3	89.5
	III	4.4	0.8	22.1	4.0	24.8	4.5	29.6	5.4	54.7	10.0	354.9	64.6	490.5	89.2
	IV	4.2	0.7	27.4	4.9	27.3	4.9	34.2	6.1	56.6	10.1	350.5	62.4	500.2	89.0
1988年 10月	I	2.8	0.5	21.8	4.1	24.2	4.6	28.9	5.5	55.0	10.5	336.7	64.1	469.2	89.3
	II	7.5	1.3	25.2	4.5	29.4	5.3	36.6	6.6	51.1	9.2	345.8	62.1	495.4	89.0
	III	4.7	0.8	22.2	4.0	27.6	5.0	32.7	5.9	51.4	9.3	353.2	63.7	491.8	88.7
	IV	8.8	1.5	29.9	5.2	31.0	5.4	36.9	6.4	53.8	9.3	345.5	60.0	505.9	87.8
1991年 10月	I	2.4	0.5	15.4	3.0	25.9	5.0	24.3	4.7	—	—	—	—	463.3	89.1
	II	8.2	1.5	24.3	4.4	30.0	5.4	31.1	5.6	—	—	—	—	492.4	88.7
	III	8.3	1.4	24.7	4.3	29.8	5.1	31.7	5.5	—	—	—	—	512.5	86.4
	IV	12.3	2.1	32.2	5.5	33.3	5.6	35.2	6.0	—	—	—	—	516.8	87.7

差异之外, 土壤本身的所谓磷饱和度也可能影响残留肥料磷进入活性磷库的比率, 本试验供试土壤为一从未施用过磷肥的石灰性贫磷土壤, 试验用肥量相当低, 这些都可能使肥料残磷进入活性磷库中的比率下降。

2.3 土壤无机磷组成变化

据前文讨论, 可确信该土壤的无机磷库是作物的主要磷源, 为此, 采用改进的无机磷分组法^[4], 进一步研究了不同施肥处理对土壤无机磷组成的影响, 结果列入表 3。

根据不施磷肥土壤(处理 I)在试验 9 年中各无机磷组分浓度的变化, 可准确判定各组分对作物的相对有效性。Ca₂-P 对作物的有效性显然很高, 连续不施磷可使其浓度显著下降; 其次是 Ca₈-P, 也有较高的有效性; 再次是 AL-P 和 Fe-P; 而 O-P 和 Ca₁₀-P 的有效性最低, 其中 Ca₁₀-P 在测定的 6 年中其浓度有所下降, O-P 则几无变化。此外, 在本试验中土壤速效磷浓度与 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P、Al-P 的相关系数均超过了 0.90, 而与 O-P、Ca₁₀-P 的相关系数分别仅为 0.15 和 0.43, 表明后两者的有效性较低。

持续施用磷肥可明显提高 Ca₂-P 的浓度, 其次是 Ca₈-P、Fe-P 和 Al-P, 对 O-P 和 Ca₁₀-P 的影响较小且不十分规律。如将土壤无机磷组分适当归并, 以 Ca₂-P 代表有效性较高的无机磷源, Ca₈-P、Fe-P 和 Al-P 代表有效的无机磷源, 并比较试验 9 年中各自的变化, 便可粗略地估算残留肥料磷在土壤有效无机磷源中的分布, 如表 4 所示。

表 4 1983—1991 年不同施肥制度下残留肥料磷在土壤有效无机磷源中的分布

Table 4 Distribution of residual fertilizer phosphorus in soil effective inorganic phosphorus sources under different fertilization systems in 1983—1991

处 理 Treatment	残留肥料磷 P (kg / ha) Residual fertilizer P	Ca ₂ -P 增加 Increase of Ca ₂ -P		
		P (mg / kg)	P (kg / ha)	占残留肥料磷 % in residual fertilizer P
II	81.6	4.1	9.8	12.0
III	125.8	3.9	9.4	7.5
IV	178.1	8.1	19.4	10.9
猪圈肥	52.4	4.2	10.1	19.3

处 理 Treatment	Ca ₈ -P、Fe-P、Al-P 增加 Increase of Ca ₈ -P, Fe-P and Al-P		
	P (mg / kg)	P (kg / ha)	占残留肥料磷 % in residual fertilizer P
II	7.0	16.8	20.6
III	9.7	23.3	18.5
IV	11.8	28.3	15.9
猪圈肥	2.1	5.0	9.5

由表 4 可见, 在持续施用磷肥情况下, 残留肥料磷的 25—30% 可转化为对作物有效的无机磷源, 其中约 1/3 为有效性较高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 源。随磷肥施用方式不同, 上述比例亦略有区别, 以每年小剂量(处理 II)较之每 6 年一次大剂量(处理 III)更有利于肥料残磷转为有效无机磷源。猪圈肥残磷转为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的比率似略高于无机磷肥, 因此, 虽然处理 IV 肥料残磷转为有效无机磷源的总比率仅略高于处理 III, 但其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的比例明显高于后者。

3 结 语

1. 在供试验的石灰性土壤(碳酸盐褐土)上, 持续施用低量磷肥——施磷量与作物收获磷量相当, 可使耕层土壤的速效磷库和活性磷库缓慢、持续地增长并接近土壤“不缺磷”水平, 之后趋于稳定平衡。因此, 这一施肥制度可以维持较高的作物产量, 可以改善土壤的有效磷水平, 但最终不能使土壤建立起较大的有效磷库。

2. 施磷方式不同对于改善土壤有效磷水平的效果也不同。与 6 年一次大剂量相比, 每年小剂量施磷较有利于提高土壤速效磷和活性磷的浓度, 肥料残磷转为有效无机磷源—— $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 的比例也较高, 约可占肥料残磷总量的 1/3, 而前者仅为 1/4。

3. 施用低量磷肥结合 80% 产品喂猪、猪圈肥回田, 不仅作物产量最高, 对于改善土壤有效磷水平的效果也最好, 试验第 9 年速效磷浓度已超过 $\text{P } 10\text{mg/kg}$, 且依然保持缓慢上升趋势。可以推测, 如长期保持这一施肥制度, 最终可使耕层土壤建立起较大的有效磷库。

4. 猪粪中磷对于改善土壤有效磷的作用大抵与化肥磷相似而略优, 可能与猪粪残磷转为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的比例较化肥磷略高有关, 这有待进一步研究。

参 考 文 献

1. 宇万太、陈欣、张璐、廉鸿志、殷秀岩、沈善敏, 1996: 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 I. 土壤总磷库和有机、无机磷库。土壤学报, 第 33 卷 4 期。
2. 殷秀岩、张璐、宇万太、沈善敏, 1992: 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 III. 投料中磷和氮在饲养—堆腐环中的循环率及有机肥料中养分的利用率。应用生态学报, 第 3 卷 3 期, 236—239 页。
3. 沈善敏, 1985: 论我国磷肥生产与应用对策。土壤通报, 第 16 卷 3 期, 97—103 页。
4. 顾益初、蒋柏藩, 1990: 石灰性土壤无机磷分级的测定方法。土壤, 第 22 卷 2 期, 101—102 页。
5. Olsen, S. R., 1983: Evaluation for fertilizer phosphate residues by plant uptake and extractable phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J., 47: 952—958.
6. Russell, F. W., 1973: Soil condition and plant growth, 10th edition, Longman, London. 600—601.
7. Johnston, A. E. and Poulton, P. R., 1977: Yields on the Exhaustion land and the changes in the NPK content of the soils due to cropping and manuring 1852—1975. Rothamsted Report for 1976, part 2: 53—85.

**CHANGES OF SOIL PHOSPHORUS POOL UNDER LOW-INPUT
PHOSPHORUS FERTILIZATION SYSTEM**
**II. SOIL AVAILABLE PHOSPHORUS AND THE COMPOSITION OF
SOIL INORGANIC PHOSPHORUS**

Chen Xin Yu Wantai and Shen Shanmin

(Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, 110015)

Summary

The results from a nine-year field experiment on a carbonate cinnamon soil indicated that the continuous low-input of phosphorus fertilizer with 14.4 kg P/ha annually could slightly increase soil Olsen-P and labile-P to the level as "non-deficiency" of phosphorus but far from setting up a large available phosphorus pool. The application of phosphorus fertilizer combined with recycled phosphorus from pig manure every year seemed to be able to set up a large available phosphorus pool finally. The role of phosphorus in pig manure was similar to that of fertilizer phosphorus in improving soil available phosphorus pool. However, the application of phosphorus every year with low dose was much better in increasing soil Olsen-P, labile-P and Ca₂-P than the treatment with high dose once every six years.

Key words Low-input phosphorus, Available-P, Inorganic-P