

农业系统中磷肥残效及磷循环研究 I. 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化*

沈善敏 殷秀岩 张 璐 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳110015)

【摘要】 在碳酸盐褐色土上的6年试验表明, 总施肥量相同情况下, 6年一次大剂量和每年小剂量两种施磷方式的作物增产效果相似而以后者略高, 但后者在提高土壤有效磷方面明显优于前者。在碳酸盐褐色土上一次施磷的残效至少可持续5年以上, 虽然大剂量施磷第1年的利用率仅为7%, 但6年累加利用率可达34%。土壤中残留肥料磷进入速效库的比例以每年小剂量处理较高, 施肥第6年该比例为17%; 一次大剂量施肥后6年只有2%的残留肥料磷进入速效库。

关键词 磷 残效 磷循环

Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus recycling in a farming system I. Phosphorus uptake by crops, residual effect of phosphorus fertilizer and changes of soil available phosphorus. Shen Shanmin, Yin Xiuyan and Zhang Lu(Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015). -Chin. J. Appl. Ecol., 1992, 3(2): 138—143.

The results from a six years field experiment conducted on a calcic cinnamon soil indicated that there was no significant difference between the crop yields from two different ways of applying phosphorus fertilizer—once every six years with high rate and once every year with low rate, the latter gave a little more yields than the former, but was more effective in establishing soil available phosphorus pool. The residual effect from one application of phosphorus seemed to last more than five years on the calcic cinnamon soil, and thus, although the recovery of phosphorus was as low as 7% at the first year of application with high rate, the total recovery in six years was as high as 34%. The proportion of residual phosphorus transferring into soil available phosphorus pool was about 17% after six years of applying phosphorus every year with low rate, but only 2% from one application with high rate.

Key words Phosphorus, Residual effect, Phosphorus recycling.

1 引言

农业系统中磷循环研究的发展颇不平衡。对于作物吸磷量、作物对当季磷肥的利用率等, 本世纪早期以来便有广泛的试验研究; 关于磷肥残效, 则直至60年代方有一批田间试验先后发表了各自的研究结果^[1-5, 7, 8]; 对于磷在食物消费和饲养环中的损失、残留肥料磷在土壤中的有效性转化等, 虽有一些研究, 但依然所知甚少^[1]。

自1983年起, 一组有关磷肥残效和磷循环

研究的中长期试验在辽宁省喀左县的中国科学院沈阳应用生态研究所下河套工作站进行, 至1988年已完成第1个施肥周期的试验研究。本篇为该项研究的首篇报道, 着重报告不同施肥制度下的作物吸磷量、磷肥残效和残效迭加效应以及不同施肥制度下土壤有效磷库发展变化等研究结果。

2 试验地点自然条件

喀左县的平均年降水量约500mm, 干燥度1.5, 属半湿润-半干旱过渡地带。试验地位于河流冲积阶地, 土壤为碳酸盐褐色土。耕作

* 国家“七五”科技攻关项目《旱农》子课题。
本文于1991年11月20日收到。

层土壤有机质含量 1%, 全N 0.07%, 全P 0.05%, 速效P 4.5ppm, 代换K 200ppm, pH 8.3, 质地为重壤。1983年以前, 这里从未施过化学磷肥。

3 研究方法

3.1 田间试验

田间试验自1983年开始, 设计为中长期试验, 以观测不同施肥处理的中长期效应并借以研究磷及其他营养元素在不同施肥制度下的循环规律。设4个处理: I. 对照, 不施磷; II. 磷肥小剂量, 每年施用, 年施量为 14.4kg P/ha; III. 磷肥大剂量, 每6年施用1次, 1983年首次施用, 一次施量 86.4kg P/ha; IV. 磷肥用量同处理III, 同时, 本处理每年收获籽实的80%和大豆、玉米秸秆的全部经粉碎后分别用以喂猪和垫圈, 猪粪经堆腐后于翌年春季作基肥返回本处理。因此, 本处理自1984年起每年施用猪圈肥。

重复3次, 分别种植大豆(铁丰18号)、玉米(丹玉13号)和高粱(辽宁1号), 并以此顺序轮作。小区面积96m²。

供试磷肥为南京永利化肥厂产过磷酸钙, 经实测含P₂O₅ 13.2%。为使每年用肥的质量相同, 试验区的每年用肥均来自同批产品。

除大豆外, 4个处理的玉米、高粱每年均追施氮肥(尿素), 用量150kg N/ha。

干旱年份, 试验沟灌补水。试验期间, 玉米、高粱生长正常, 惟大豆自1986年以后每有不同程度根腐病发生, 处理I尤为严重, 影响产量。

各小区籽实及秸秆产量均分别计重。另选取代表株用于测定籽实及秸秆养分含量。大豆收割时叶片已大部凋落, 故大豆秸秆产量中未包括落叶量。

3.2 分析方法

土壤全N——凯氏法; 全P——Na₂CO₃ 融熔, 钼锑抗还原比色法; 全K——NaOH融熔, 火焰光度法; 代换K——NH₄Cl浸提, 火焰光度法; 速效P——0.5 M NaHCO₃浸提, 钼兰比色法。植物全N——凯氏法; 全P——硫酸消解, 钼兰比色法; 全K——三酸消解, 火焰光度法。

4 结果与讨论

4.1 作物产量

1983—1988年, 4个处理3种作物的每年平均产量和每种作物的6年平均产量分别列于表1与2。前者在于比较不同施肥处理每年的作物产量差异, 后者着重观察3种作物分别对磷肥和猪圈肥的反应。

由表1与2可见: (1)在土壤速效磷含量为4—5ppm情况下, 磷肥对3种作物均具有极好的增产作用: 6年平均增产30%上下(表1), 高粱和玉米的增产幅度又高于大豆(表2)。若以每公斤肥料磷(P)增产籽实的公斤数表示, 则处理II的6年平均为大豆37、玉米159、高粱142。这一数字远高于一般肥料试验的结果, 它显然包括了磷肥的残效。(2)每年小剂量(处理II)和6年1次大剂量(处理III)两

表1 不同施肥处理3种作物平均风干产量

Tab.1 Average air-dried yields of three crops under different fertilization treatments (kg/ha)

产品 Product	处理号 Treatment No.	施肥处理 Treatment	年 份 Year						平 均 Average	以对照为100 With control as 100
			1983	1984	1985	1986	1987	1988		
籽实 Grain	I	对照 Control	5160	5040	6810	5060	4820	3370	5040	100
	II	14.4kg P/ha·yr	6300	6120	7520	6930	7080	6040	6670	132
	III	每6年86.4 kg P/ha ¹⁾	7000	6630	7240	6710	6310	4800	6450	128
	IV	每6年86.4 kg P/ha, 每年猪圈肥 ²⁾	7000	6930	8450	8020	7500	6740	7440	148
秸秆 Stalk	I	对照 Control	4560	4590	5230	6750	3870	4450	4910	100
	II	14.4 kg P/ha·yr	5580	5490	6560	7970	5280	5720	6100	124
	III	每6年86.4 kg P/ha ¹⁾	6220	6100	6230	7900	4660	5120	6040	123
	IV	每6年86.4 kg P/ha, 每年猪圈肥 ²⁾	6220	6930	7470	8870	6020	6710	7040	143

Note: 1) 86.4kg P/ha every six years; 2) 86.4 kg P/ha every six years, with pig manure recycled every year.

种磷肥施用方式在碳酸盐褐色土上的作物平均增产效果几乎相似, 虽然每年小剂量的施用效果更好一些。一次大剂量施磷在头2年中作物产

表2 1983—1988年不同施肥处理大豆、玉米、高粱6年平均风干产量*

Tab.2 Average air-dried yields of each three crops in 1983—1988 (kg ha·yr)

处理号 Treat- ment No.	大豆Soybean		玉米Maize		高粱Sorghum	
	籽实 Grain	秸秆 Stalk	籽实 Grain	秸秆 Stalk	籽实 Grain	秸秆 Stalk
I	1920	2000	7100	6430	6110	6440
II	2450	2760	9390	7840	8150	7700
III	2400	2720	9000	7750	7940	7650
IV	3020	3180	10330	9560	8970	8380

* 风干大豆、玉米、高粱的烘干率分别为: 籽实, 0.90、0.87、0.88; 秸秆, 0.88、0.85、0.86。

量明显高于每年小剂量的, 但以后逐渐为每年小剂量所超越。从试验中可以清楚看出一次施磷后极持久的残效: 即使在施磷后的第5年, 较不施磷对照依然有明显的增产效果。(3)施用化肥配合猪圈肥回田(处理IV), 在6年中获得了最高的籽实产量: 玉米超过10t/ha, 高粱接近9t/ha, 大豆也超过了3t/ha。大豆在本试验的后期因每年染病而产量下降。对照区近2年的大豆产量不过400—900kg/ha; 磷肥处理产量可上升至800—1900kg/ha; 处理IV产量则可达1400—2500kg/ha, 病情明显轻于其他处理。(4)本试验设计了较低的磷肥用量, 平均年施用量不过14.4kg P/ha (或每亩不足1 kg P)。但3种作物6年平均产量(以处理II为例)玉米9t/ha、高粱8t/ha, 均达到了高产水平, 大豆产量6年平均2.4t/ha, 也达到了丰产水平, 如后期无病, 产量不难超过3t/ha。上述结果表明, 就这一地区农田的磷肥用量而言, 每年不低于P15kg/ha, 大致可保证作物高产的需磷要求, 如同时每年施用农家肥, 磷肥用量还略可减少。

4.2 作物吸磷量

根据作物收获产量、收获产品的干率以及产品的含磷浓度, 便可算得作物收获磷量。本节讨论的作物吸磷量不包括作物残茬和根系中

的磷。在本试验中, 收获产品分为籽实和秸秆两部分, 后者包括茎、叶、穗皮、豆荚等。由于大豆收获时已落叶, 因此收获磷量要比大豆地上部分的含磷量约低10%。不过由于每处理的3个小区中大豆只占一区, 且大豆的收获磷量又显著低于玉米、高粱, 因此对于计算这3种作物平均收获磷量不会带来太大误差。

由表3可见, 各处理收获磷量之间的差异与产量之间的差异(表1)是相似的, 不过前者的差异程度远较后者为大。例如, 处理II平均年收获磷量是处理I(对照)的15%(表3), 但产量仅为对照的132%(表1); 处理IV平均年收获磷量为对照的两倍, 但产量仅为对照的148%。说明作物籽实产量的增长与磷的消费是不等比例的。每一成籽实产量的增长, 需要消费一成以上的磷量, 这是因为磷供应状况的改善提高了作物产量的同时, 也提高了产品中磷浓度的缘故(表4)。

表3 不同施肥处理作物收获产品中含磷量

Tab.3 Phosphorus content of products from different fertilization treatments (kg P/ha)

处理号 Treatment No.	年 份 Year						6 年 收 获 磷 量 in six years P harvested	平均 年 收 获 磷 量 Annual P harvested
	1983	1984	1985	1986	1987	1988		
I	10.47	10.55	13.53	10.31	8.76	6.64	60.26	10.04
II	15.01	14.84	17.38	15.86	15.13	12.77	91.17	15.20
III	16.43	16.05	16.80	15.49	13.51	10.62	88.90	14.82
IV	16.43	20.32	23.23	22.65	19.69	17.70	120.02	20.00

表4 1983—1988年不同施肥处理作物籽实及秸秆平均含磷浓度

Tab.4 Average concentration of phosphorus in grains and stalks in 1983—1988 (P%)

处理号 Treat- ment No.	大豆Soybean		玉米Maize		高粱Sorghum	
	籽实 Grain	秸秆 Stalk	籽实 Grain	秸秆 Stalk	籽实 Grain	秸秆 Stalk
I	0.33	0.066	0.16	0.036	0.16	0.51
II	0.40	0.073	0.18	0.043	0.19	0.056
III	0.39	0.075	0.18	0.046	0.19	0.058
IV	0.44	0.080	0.21	0.063	0.24	0.061

比较作物之间的年收获磷量(表5), 则玉

表5 1983—1988年不同施肥处理大豆、玉米、高粱平均年收获磷量

Tab.5 Average phosphorus content in products of soybean, maize and sorghum in 1983—1988 (kg P/ha·yr)

处理号 Treatment No.	大 豆 Soybean			玉 米 Maize			高 粱 Sorghum		
	籽实 Grain	秸秆 Stalk	合计 Total	籽实 Grain	秸秆 Stalk	合计 Total	籽实 Soybean	秸秆 Stalk	合计 Total
I	5.70	1.16	6.86	9.88	1.97	11.85	8.61	2.82	11.43
II	8.81	1.77	10.58	14.71	2.86	17.57	13.64	3.71	17.35
III	8.43	1.80	10.23	14.10	3.03	17.13	13.27	3.81	17.08
IV	11.71	2.22	13.93	18.50	4.94	23.44	18.28	4.36	22.64

米和高粱是相似的, 在高产情况下, 平均每年 17—22kgP/ha。大豆产量低得多, 年收获磷量即使在高产情况下也不过是玉米、高粱的 2/3; 当产量为中等水平时, 只及玉米、高粱的一半。大豆茬具有较高肥力, 通常认为是由于大豆改善了土壤的氮素供应状况。现从大豆收获磷量显著低于玉米、高粱这一情况判断, 豆茬土壤的供磷状况也可能优于玉米和高粱茬。

4.3 磷肥利用率、磷肥残效和残效迭加

严格地说, 计算磷肥利用率应先测定并计算出作物的吸磷量, 后者除收获磷量外, 还应包括作物残茬及根系的磷。不过从研究农田养分收支的角度来说, 以收获养分量计算农田养分移出量和肥料利用率, 既有其方便之处, 又切合研究农田养分循环平衡的本意。因此, 本文计算磷肥利用率, 是以表 3 中的作物收获磷量为根据, 结果如表 6 所示。

表6 不同施肥处理肥料磷的表现利用率

Tab.6 Apparent recovery of phosphorus under different fertilization treatments

处理号 Treat- ment No.	年 份 Year						平均或累加 Average or total
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
I	0.32	0.30	0.27	0.39	0.44	0.43	0.36*
II	0.07	0.06	0.04	0.06	0.06	0.05	0.34**
IV	0.07	0.11	0.11	0.14	0.13	0.13	0.69

* 6 年平均值, ** 6 年累加值。

表 6 中处理 II 是以每年磷肥用量 (14.4 kg P/ha) 为计算基数, 处理 III、IV 是以 1983 年第 1 次施磷量 (86.4kg P/ha) 为计算基数。对于处理 IV, 这一计算方法有其不合理之处, 因为

通过饲养-堆腐环而循环再利用的磷并非全部来自肥料, 其中约 2/3 的磷来自土壤, 但通过处理 III、IV 比较, 也可看出收获产品中的养分如能得以循环再利用, 对于提高系统中养分的利用效率是何等地具有重要意义。

比较表中处理 II、III 的磷肥利用率还可看出以下几点: (1) 作物对磷肥的利用显然与磷肥的施用量有关, 在本试验中, 施用量少则利用率高, 用量仅为 14.4kg P/ha 的当季利用率可高达 30% 以上; 反之则低, 施量为 86.4 kg P/ha 的当季利用率仅为 7%。这一结果与其他许多实验的结果是一致的。(2) 从历年磷肥利用率的发展变化, 也可看出磷肥在供试土壤上的明显残效和残效迭加效应。例如处理 III 自 1983 年一次性施磷后, 每年仍有占施入磷量 4—6% 的磷被作物吸收, 表明磷肥残效在这一土壤上的持续性; 处理 II 随磷肥使用年限延长, 当季磷肥的表现利用率有不断增长趋势, 可以证明多次施磷的残效有着不断迭加的作用, 这与某些长期试验的结果相一致^[1]。(3) 通常由于只注意磷肥当年的利用率, 因此在人们的印象中磷肥利用率极低, 但如考虑到磷肥的残效, 则磷肥的总利用率其实并不很低。在本试验中, 两种不同施肥方式的磷肥利用率 6 年平均或累加可达 35% 上下, 如试验的年数延长, 利用率还会进一步提高。

4.4 土壤速效磷变化及残留肥料磷在土壤中的有效性转化

表 7 列出了各处理试验开始前、第一次施用磷肥后当年以及历年作物收获后耕层土壤的

表7 不同施肥处理耕层土壤(0—20cm)速效磷含量变化

Tab.7 Changes of soil available phosphorus content in cultivated layer of different fertilization treatments (ppm)

处理号	年 份 Year						
Treatment No.	1983.4	1983.10	1984.10	1985.10	1986.10	1987.10	1988.10
I	4.5	4.5	3.2	3.8	3.4	2.2	2.4
II	4.7	9.3	8.1	6.5	6.5	7.2	8.8
III	4.5	55.1	6.4	5.2	4.7	3.2	5.1
IV	5.8	71.7	10.7	7.2	9.5	6.6	7.9

速效磷含量。

试验地过去每年施用农家肥和氮肥,但从未施用过磷肥。由于每年施用农家肥,该土壤保持了低水平的速效磷浓度,属于缺磷但并非严重贫磷。

不同施肥处理经若干年后,土壤速效磷含量有了明显变化。对照处理在连续几年只施用氮而不施磷肥情况下土壤速效磷含量不断下降,下降速率约每年 0.5ppm,1987 年以后降至3ppm 以下,接近严重贫磷状态,这一情况可以说明通过施用农家肥而维持的低水平速效磷库十分脆弱,经不起长时间磷素收支不平

衡的影响。每年施用小剂量磷肥(处理 II)6 年中土壤速效磷浓度有了明显提高,平均每年约增长0.6ppm,至1988年已上升至8ppm。每6 年一次大剂量施磷的方法虽然在作物产量方面仅略较每年小剂量逊色,但对于建立土壤速效磷库显然远不如每年小剂量。一次大剂量施磷配合每年施用猪圈肥可显著改善土壤的速效磷浓度,其平均效果可优于每年小剂量磷肥处理。

根据磷肥用量、作物收获磷量以及土壤速效磷库在 6 年中的增减量,便可估算土壤中残留肥料磷的有效性转化(表 8)。

表8 1983—1988年两种磷肥施用方法耕层土壤中残留肥料磷转化

Tab.8 Transformation of residual phosphorus in soils with different ways of phosphorus application

处理号 Treatment No.	6 年磷用量 (kg P ha ⁻¹) Applied P	6 年作物吸收磷量 (kg P ha ⁻¹) P uptake	6 年作物吸收肥料磷 (kg P ha ⁻¹) P uptake from fertilizer	耕层土壤残留肥料磷 (kg P ha ⁻¹) Residual P	6 年中耕层土壤速效磷库增减 Changes of available P			6 年中残留肥料磷进入土壤迟效磷库 Residual P in nonavailable pool		
					ppm	kg P ha ⁻¹	占残留肥料磷 % % of residual P	ppm	kg P ha ⁻¹	占残留肥料磷 % % of residual
I	86.4	91.2	30.9	55.5	+ 4	+ 9.6	17	+ 19	+ 45.9	83
II	86.4	88.9	28.6	57.8	+ 0.5	+ 1.2	2	+ 24	+ 56.6	98

* 土壤迟效磷库是指土壤速效磷以外的磷贮量。

由表 8 可见,每年小剂量磷肥处理 6 年总计施磷86.4kg P/ha,其中30.9kg为作物所利用,55.5kg 留存耕层土壤之中,根据耕层土壤速效磷库增长情况可估算出有9.6kg P进入了速效磷库,占残留量的17%,其余则进入了迟效磷库。同样可计算得一次大剂量施磷经过 6 年之后,57.8kg残留肥料磷中仅 2 %进入了

速效库,其余绝大部分均进入了迟效库。可见肥料磷在这一土壤中留存的时间愈长,进入速效库的比例也就愈小。Mattingly^[6]总结洛桑试验站的一些短期和长期试验结果后认为,短期施肥后可有较高比例的肥料残磷进入速效库(如 3 年25%),但长期施肥该比例明显下降,两者的规律是相同的。

5 结 论

5.1 连续6年的田间试验表明, 磷肥在一缺磷但并非严重贫磷的碳酸盐褐色土上具有极好的增产作用。6年累计, 每公斤肥料磷(P)可增产大豆37kg或玉米159kg或高粱 142kg, 远高于一般的试验结果。这是因为连续多年试验包含了磷肥残效在内之故。

5.2 本试验设计的磷肥用量为低量, 平均每年仅 14.4kg/ha, 约相当于一季丰产作物的收获磷量。这一磷肥用量, 在每年配合施用氮肥但不施用有机肥情况下, 基本可维持作物丰产高产需要, 6年玉米平均产量达 9t/ha, 高粱8t/ha, 大豆 2.4t/ha。同时, 耕层土壤的速效磷状况在6年中也不断有所改善。

5.3 磷肥在本供试土壤上的残效至少可持续5年以上。如果计算进磷肥的残效, 磷肥的利用率并非如通常认识的那样低, 例如本试验中一次大剂量磷肥的当年利用率仅为7%, 但6年总利用率则可达34%。连续多年施用磷肥, 则由于残效的迭加作用, 可使当季磷肥的表观利用率逐渐提高, 例如本试验中每年小剂量磷肥的当季利用率开始几年为30%上下, 3、4年之后可提高至40%。

5.4 由于磷肥在本类土壤上持久的残效, 每年小剂量和6年一次大剂量两种施磷方式的作物增产效果十分近似, 而以每年小剂量略好。但对于改善土壤速效磷状况, 则以每年小剂量施磷优于6年一次大剂量。

5.5 初步的估测表明, 在短期施肥情况下, 土壤中残留肥料磷也只有少部分转入速效磷

库, 时间愈久, 这一比例愈小。在本试验中, 连续6年每年小剂量施磷时, 有17%的残磷进入速效库; 一次大剂量施磷6年后, 只有2%的残磷进入速效库。

参 考 文 献

- 1 沈善敏. 1985. 论我国磷肥生产与应用对策. 土壤通报, 16(3):97—103.
- 2 Cambell, R.E. 1965. Phosphorus fertilizer residual effects on irrigated crops in rotation. Soil Sci.Soc.Am.Proc., 29:67—70.
- 3 Hunter, A.S., Hoffman, E.N. and Yungen, J.A. 1961. Residual effects of phosphorus fertilizer on an Eastern Oregon soil. Soil, Sci.Soc.Am.Proc., 25:218—221.
- 4 Leamer, R.W. 1963. Residual effects of phosphorus fertilizer in an irrigated rotation in the southwest. Soil Soc.Am. Proc., 27:65—68.
- 5 Mattingly, G.E.G. and Widdowson, F.V. 1963. Residual value of super-phosphate and rock phosphate on an acid soil I. Yields and phosphorus uptakes in the field. J.Agric. Sci., 60:399—407.
- 6 Mattingly, G.E.G. and Johnston, A.E. 1976. Long-term rotation experiments at Rothamsted and Saxmundham Experimental Station. The effects of treatments on crop yields and soil analysis and recent modifications in purpose and design. Ann. Agron., 27:743—769.
- 7 Sanchez, P.A. et al. 1980. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In the role of phosphorus in agriculture (edited by Khasawneh et al.), 471—509.
- 8 Thomas, J.R. 1964. Availability of residual phosphorus as measured by alfalfa yields, phosphorus uptake and soil analysis. Soil Sci., 96:78—84.