

北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹^①

王兴仁^② 李洁茹 苏德纯 曹一平 毛达如

(中国农业大学资源与环境学院)

摘要 以中国农业大学昌平试验站 11 年肥料试验结果为依据,分析了北京地区潮土在长期轮作条件下,磷肥的施用与作物产量、肥料经济效益、磷肥迭加效应、土壤速效磷变化趋势以及作物对肥料和土壤磷的吸收比例等的关系,据此并结合近期研究进展提出:在冬小麦—夏玉米→春玉米轮作条件下,每年施磷肥(P_2O_5) $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,并作为冬小麦、春玉米基肥,是一个既能获得作物持续高产和肥料高效,又能维持或不断提高土壤供磷能力的优化磷肥运筹方案。

关键词 磷肥运筹;石灰性潮土;轮作

分类号 S143.2; S147.4

Management of Phosphorus Fertilizer in Long-term Rotation Cropping in Calcareous Meadow Soil in Beijing

Wang Xingren Li Jieru Su Dechun Cao Yiping Mao Daru

(College of Resource and Environmental Sciences, CAU)

Abstract Relationship between the application rate of phosphorus fertilizer and crop yield, economic profit of fertilizer, accumulated response to fertilizer residual, dynamics of available phosphorus in soil, proportion of phosphorus absorbed by crops from fertilizer and from soil were studied, according to experiment results of 11 years at Changping experiment station of CAU. Based on the relationship, it is recommended that an annual rate of $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} P_2O_5$ of phosphorus fertilizer applied as basal fertilizer for winter wheat or spring corn was optimal under winter wheat-summer corn → spring corn rotation system in Beijing.

Key words application of phosphorus fertilizer; calcareous meadow soil; rotation cropping

我国的磷肥推荐多依据以短期肥料田间试验为基础的肥料效应函数法,其施肥量往往偏高^[1-2],这对引导农民增加肥料投入,改变我国土壤普遍缺磷的状况曾起到积极作用。但由于没有从磷肥的迭加效应规律和综合效益上把握作物持续高产与土壤长期供磷能力之间的关系,因此从长远的观点看,仍然带有一定的盲目性。鉴于这种情况,我们从持续农业和养分资源观点出发^[3],扩大施肥决策的时空观念,通过长期轮作肥料定位试验,研究了磷肥连续施用与作物产量、经济效益、肥料利用率、土壤速效磷含量、磷收支平衡的年度变化、作物对土壤和肥料磷的吸收比例等的关系,从磷肥多元效应的综合运筹上寻求作物持续高产,土壤供磷能力和肥料效益的最佳结合点。

收稿日期: 1997-09-04

①本研究由北京市自然科学基金(6932005)和国家自然科学基金(39500086)资助

②王兴仁,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

1 试验条件和研究方法

1.1 试验条件

定位试验在中国农业大学昌平实验站进行。该站地处昌平区温榆河中游,属于暖温带半湿润半干旱季风气候区。土壤为砂姜潮土,冲积母质,1981~1984年匀地播种后,在1985年试验前取0~20 cm土层土壤测得,土壤有机质1.31%,全氮(N)0.080%,碱解氮(N)68.1 mg·kg⁻¹,速效磷(P)6.1 mg·kg⁻¹,交换性钾(K)114.0 mg·kg⁻¹,缓效钾(K)583.5 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主处理2个,每年每公顷施用7 500 kg鸡粪(M)和不施鸡粪(F),副处理10个,由3×3+1设计构成,即:

$$\begin{bmatrix} N_0 \\ N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} + N_2P_2K \longrightarrow N_0P_0, N_1P_0, N_2P_0, N_0P_1, N_1P_1, N_2P_1, N_0P_2, N_1P_2, N_2P_2, N_2P_2K$$

其中 N_0, N_1, N_2 表示施氮水平(N),分别为0, 135, 270 kg·hm⁻², P_0, P_1, P_2 表示施磷水平(P_2O_5),分别为0, 67.5, 135 kg·hm⁻², K表示施钾量(K_2O),为225 kg·hm⁻²。

1985,1986年种冬小麦,从87年起实行冬小麦—夏玉米→春玉米轮作。鸡粪和全部磷肥、钾肥及40%的氮肥作冬小麦和春玉米的基肥,田间管理除施肥外均按大田生产要求进行,秸秆不还田。

每年秋施基肥前取0~20 cm(1990年起隔年加取20~40 cm)土层土壤,测定速效磷含量,用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法。用收获时植株测全磷含量,其中籽粒用钒钼黄比色法、秸秆用钼锑抗比色法。

2 试验结果和分析

下面以1985~1995年磷肥处理 $FN_0P_0, FN_1P_0, FN_1P_1, FN_2P_1, FN_1P_2, MN_1P_1$ 等的试验结果为主要依据,研究冬小麦—夏玉米→春玉米轮作条件下磷肥的合理运筹。

2.1 施肥对作物产量和肥料效益的影响

将1985~1995年不同处理的冬小麦,夏玉米,春玉米各年的平均产量及施肥利润列于表1。可以看出,在氮水平一定条件下,当施磷量(P_2O_5)为67.5 kg·hm⁻²(P_1)时,作物产量显著提高,但施磷量进一步增加到135 kg·hm⁻²(P_2)时,作物产量虽然有所提高(冬小麦,夏玉米)或减少(春玉米),但变化不大。这说明过量施用,会降低磷肥的经济效益。三茬作物总计进一步表明,只有氮肥与磷肥配合而且比例合理时,产量和施肥利润才能显著地提高。在各种肥料配合的处理中,以 FN_1P_1 的产量和经济效益最高。 MN_1P_1 产量及施肥利润均高于 FN_1P_1 ,这是因为有机肥中N和P含量较高, MN_1P_1 因每年施鸡粪7 500 kg·hm⁻²,较 FN_1P_1 多提供氮肥93.75 kg·hm⁻²,磷肥16.12 kg·hm⁻²,所以其产量和化肥利润均高于 FN_1P_1 。

2.2 施肥对磷肥利用率的影响

分析磷肥利用率既要看到其当季表观利用率,也要看到长期施用迭加效应。

生物效应差减法求得的1985~1995年不同施肥处理的磷肥表观利用率及其平均值(表

2)。其中, FN_1P_1 , FN_2P_1 , FN_1P_2 , FN_2P_2 磷肥表观利用率呈逐年上升趋势, 这说明残留在土壤中的磷能继续被后季作物所利用, 即磷肥残效具有逐年迭加效应^[4]。但其年度间变异较大, 这主要是由于年份间气候条件差异。在低温年份, 土壤供磷能力差, 无磷处理产量水平低, 所以由差减法算得的磷肥利用率相对较高; 反之, 如果该年份风调雨顺, 不施磷处理的产量较高, 由差减法得到的利用率也就较低。

表 1 施肥方式对作物产量和肥料经济效益的影响

分析项目	肥料处理						
	FN_0P_0	FN_1P_0	FN_0P_1	FN_1P_1	FN_2P_1	FN_1P_2	MN_1P_1
冬小麦产量/ $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	2 061.5	3 034.2	2 881.0	5 438.9	5 331.3	5 937.7	5 319.5
夏玉米产量/ $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	3 146.6	4 583.1	3 000.0	5 180.9	5 368.7	5 508.3	7 002.0
冬小麦—夏玉米施肥利润/ $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	2 355.5	745.2	6 222.9	5 709.3	6 961.1	7 864.9	
春玉米产量/ $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	3 762.4	4 335.8	5 419.8	8 376.5	7 428.9	7 179.3	7 927.9
春玉米施肥利润/ $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$		303.4	1 488.7	4 175.4	2 957.9	2 809.4	3 726.8
三茬平均产量/ $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	2 990.2	3 984.3	3 766.9	6 332.1	6 043.0	6 214.4	6 749.8
三茬平均利润/ $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$		604.1	930.6	3 643.4	2 906.3	3 145.0	3 829.6

注: 冬小麦价格: $1.5 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; 夏玉米春玉米价格: $1.0 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; 磷肥价格: $2.5 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{P}_2\text{O}_5)$; 氮肥价格: $2.0 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{N})$ 。

表 2 1985~1995 年磷肥表观利用率及其平均值

年份	肥料处理							$w\%$
	FN_0P_1	FN_1P_1	FN_2P_1	FN_0P_2	FN_2P_2	FN_1P_2	MN_1P_1	
1985	0.6	29	46	5	22	26	0.4	
1986	16	34	30	14	23	26	41	
1987	19	40	40	12	43	40	15	
1988	17	7	2	11	2	4	6	
1989	13	28	12	5	22	10	25	
1990	32	42	47	19	16	22	10	
1991	37	19	27	23	21	8	7	
1992	14	29	26	4	12	14	-1	
1993	-13	50	39	16	60	63	52	
1994	-12	39	50	-2	11	21	-2	
1995	6	74	95	8	51	66	107	
平均	12	36	38	10	26	27	23	

FN_0P_1 , MN_0P_2 , FN_1P_1 的磷肥利用率出现了负值, 这是因为昌平实验站的土壤 N, P 比较缺乏, 都是产量限制因子, 单施磷肥使土壤 N, P 养分比例更加失调, 产量有时比不施肥还低, 所以差减法得到的磷肥利用率就是负值。对 MN_1P_1 来说, 鸡粪中 N, P 养分特别是 P 含量较高, 因此 MN_1P_0 处理的产量有时也会高于 MN_1P_1 处理, 使磷肥利用率出现负值。

从 FN_0P_1 , FN_1P_1 , FN_1P_2 , MN_1P_1 处理的土壤速效磷含量 11 年的年度变化趋势(图 1)。可以看到,这 4 个处理土壤速效磷年度间均呈现不同程度的波动。这是由于每年气候变异导致作物产量和土壤中磷有效性的年度差异。其中 FN_0P_1 , FN_1P_1 处理在每年施用 P_2O_5 $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 情况下,前几年由于产量较低,土壤有效磷稍有累积。

在 N_1 水平条件下, P_2 处理的土壤比 P_1 处理速效磷水平上升幅度大,这是因为磷肥用量增加了 1 倍,而作物产量和作物带走的磷却变化不大,所以使土壤有效磷含量进一步提高。 MN_1P_1 处理土壤有效磷累积量显著超过 FN_1P_1 ,这是因为有机肥含磷量较高,施用有机肥相当于每年增加磷 P_2O_5 的投入量 $16.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,在连续施用鸡粪或每年施 P_2O_5 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥的条件下可以适当减少施磷量或隔年施磷。

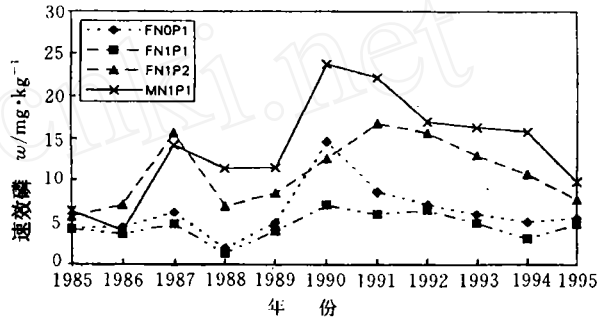


图 1 0~20 cm 土壤速效磷(P)含量历年变化趋势

从 1993 年开始, MN_1P_1 , FN_1P_2 土壤有效磷呈下降趋势,这是由于 1993 年以后作物产量较高,每年带走磷较多。

2.3 施肥对土壤速效磷含量变化趋势及剖面分布的影响

FN_1P_1 , FN_1P_2 , FN_2P_1 , FN_2P_2 4 个处理的土壤在 0~20, 20~40 cm 土层速效磷含量的变化趋势是一致的(表 3)。对任何一个 N 水平的这两个土层, P_2 处理的土壤速效磷含量均高于 P_1 处理。这说明施肥对土壤速效磷含量影响的土层范围为 0~40 cm。其中, 0~20 cm 土层速效磷含量平均为 $6.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,在机械条件下,应从 0~40 cm 土壤速效磷含量评价土壤供磷能力。

表 3 施肥对不同土层土壤速效磷含量的影响

$w(P)/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

年份	土壤深度/cm	肥料处理				平均
		FN_1P_1	FN_1P_2	FN_2P_1	FN_2P_2	
1993	0~20	4.8	13.0	4.3	9.6	6.2
1994	0~20	3.0	10.7	2.6	7.4	
1995	0~20	4.7	7.7	3.0	6.5	
1993	20~40	1.0	12.6	2.9	8.1	3.1
1994	20~40	0.6	4.9	1.8	6.2	
1995	20~40	1.0	3.6	0.7	1.4	

2.4 施肥对土壤磷养分支平衡的影响

经过不同的施肥处理,土壤养分表现为耗竭或累积,如果土壤养分不断耗竭,地力下降,将引起减产;如果土壤养分不断累积,会造成土壤中养分比例失调,使肥效降低,甚至减产,所以维持土壤养分支平衡,使土壤养分维持在临界值附近,才能达到持续增产的目的^[5,6]。

1985~1995 年间各处理的土壤磷养分的投入、携出及收支平衡表 4。

对 P_1 水平来说, 由于磷肥投入量相对较低, 收支平衡随年度增加而出现负值。这说明 P_1 肥料投入量已不能满足作物增产对磷的需求, 特别是 FN_1P_1 处理, 其产量和磷肥利用率较高, 作物从土壤中带走的养分较多; 最后几年, 磷养分出现亏缺。因此必须适当增加磷的投入才能维持土壤养分平衡, 保证作物持续高产。

对 P_2 水平来说, 磷肥投入量较大, 收支平衡值虽然逐年有所下降, 但总的来说肥料投入大于作物携出, 土壤中的磷呈积累趋势, 同时积累量 $FN_0P_2 > FN_1P_2 > FN_2P_2$ 。这说明氮磷肥适量配合使作物带走的养分增加, 所以收支平衡值降低。 P_1 的不同处理也有同样的变化趋势。

表 4 1985~1995 年土壤磷养分的收支平衡*

P, $kg \cdot hm^{-2}$

年份	肥料处理						
	FN_0P_1	FN_1P_1	FN_2P_1	FN_0P_2	FN_1P_2	FN_2P_2	MN_1P_1
1985	21.6	8.1	7.1	48.5	33.0	34.5	23.7
1986	17.7	9.6	12	43.5	35.3	45.6	25.2
1987	15.0	5.0	2.6	42.8	20.7	20.4	10.3
1988	13.7	13.4	10.1	41.7	43.4	38.3	29.4
1989	8.7	0.1	2.7	39.3	24.9	29.9	8.2
1990	12	6.3	5.9	40.1	38.6	36.3	24.6
1991	-4.9	-14.0	-13.4	14.6	9.0	19.7	-2.0
1992	16.7	6.3	5.0	47.7	37.1	40.1	23.8
1993	18	-1.1	-0.9	34.2	7.7	3	-23.3
1994	36.3	5.4	4.5	48.6	39.6	36.0	20.2
1995	6.3	-7.7	-10.4	42.9	13.8	8.4	-37.5
平均	14.9	2.9	2.3	40.3	27.5	28.4	9.5

* 收支平衡指每年肥料投入和作物携出养分之差的平均值。

2.5 作物对土壤和肥料养分相对吸收量的比较

在冬小麦—夏玉米→春玉米轮作中, FN_1P_1 处理和 FN_1P_2 处理, 冬小麦、夏玉米、春玉米 3 种作物对土壤和肥料养分相对吸收量(表 5)。从中可以看出, 无论从土壤中还是肥料中吸收的磷养分, 都是冬小麦最多, 夏玉米最少, 春玉米居中。在每年施磷 P_2O_5 $67.5 kg \cdot hm^{-2}$ 情况下, 3 种作物从肥料中吸磷量的比例为 2.5 : 1.0 : 1.9; 从土壤中吸磷量的比例为 1.11 : 1.00 : 1.07, 说明在冬小麦—夏玉米轮作中磷肥应优先施于冬小麦, 夏玉米可以利用前茬肥料后效。

表 5 3 种作物从土壤和肥料吸收磷的比例

 $w(P)/\%$

项 目	FN_1P_1				FN_1P_2			
	冬小麦	夏玉米	春玉米	合计	冬小麦	夏玉米	春玉米	合计
从土壤吸收的磷	21	19	21	61	18	16	18	52
从肥料吸收的磷	18	7	14	39	29	11	8	48

此外, 当施磷量进一步增加到 P_2O_5 $135 kg \cdot hm^{-2}$ 时, 3 种作物从肥料中吸磷总量也随之提

高,达 48.66%。这说明增加施肥量将降低作物对土壤养分的依赖性。

上面分别从 5 个方面分析了不同的施肥处理对产量,经济效果,土壤有效磷养分含量及其收支平衡,磷肥利用率和不同作物对土壤和肥料养分的相对吸收等的影响。

2.6 施肥运筹

4 种氮磷钾配合处理的 5 种效益判据列于表 6。其中, FN_1P_1 处理的产量、经济效益及磷肥利用率最高,所以,每公顷施 N 135 kg, P_2O_5 67.5 kg 是较理想的氮磷配合。但从土壤有效磷含量及收支平衡来看, FN_1P_1 较低,从其年度变化来看, FN_1P_1 处理中磷养分逐渐出现亏缺,甚至低于试验前水平 ($6.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),所以要维持土壤生产力,保持持续,稳定高产。还应在 FN_1P_1 基础上适当增加磷肥的投入。

北京地区和黄淮海平原大量肥料田间试验证明,冬小麦—夏玉米轮作实现冬小麦 $5\ 250 \sim 6\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,夏玉米 $7\ 500 \sim 8\ 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 产量目标的优化施磷量为 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [7,8]。春玉米 $15\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 产量目标的优化施磷量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此推断,实现上述产量目标,该轮作周期施磷量约为 P_2O_5 $(135+90)/2=112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,并分别作为冬小麦,春玉米基肥。这一施肥方案可以保证作物持续高产,维持和提高土壤供磷能力并获得较高的肥料经济效益,因而是优化的。

表 6 4 个处理的 5 种效益判据

处理	产量 $/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	经济效益 $/\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	土壤有效磷 $w/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	收支平衡 $/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	磷肥利用率 $w/\%$
FN_1P_1	6 332.08	3 643.4	4.49	2.86	36
FN_1P_2	6 214.43	3 144.9	10.92	27.5	26
FN_2P_1	6 042.98	2 966.3	4.6	2.28	38
FN_2P_2	6 311.8	2 915.7	9.14	28.4	27

3 结论

通过昌平实验站 11 年定位肥料试验对磷肥效益综合研究,可得出如下几点结论:

①只有氮磷配合而且比例合理时,产量和施肥利润才能提高。在每年施磷(P_2O_5) $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 情况下,一个轮作周期 3 种作物平均总产和施肥总利润分别为 $18\ 996.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10\ 930 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

②氮磷配合而且施用适宜时,可以显著提高肥料利用率,适量氮磷配合使磷肥平均利用率高达 36%~38%。而且磷肥利用率逐年上长,具有效应迭加的特点。

③土壤速效磷含量随着有机肥和磷肥施用量增加而增加,每年施用 $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥,土壤速效磷始终维持在 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水平,但 5 年后土壤磷收支平衡开始入不敷出。

④在冬小麦—夏玉米→春玉米轮作中,各种作物从土壤和肥料中吸收磷的比例不同,对肥料磷的吸收以小麦为最高,春玉米次之,夏玉米最低,仅利用冬小麦磷肥后效。在每年施磷 P_2O_5 $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,3 种作物对肥料磷的吸收比例为 2.5 : 1.0 : 1.9。

⑤作物从肥料中吸收磷的量随着施肥量的增加而增加,在每年施磷 P_2O_5 $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

条件下,3 种作物从肥料中吸磷总量占作物吸磷总量的 38.41%;而当施磷量(P_2O_5)增加到 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,作物从肥料中的吸磷总量上升到 47.66%。

⑥在冬小麦—夏玉米→春玉米轮作中,每年施磷肥(P_2O_5) $112.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,并且只作为冬小麦,春玉米基肥,可以获得作物持续高产和较高的肥料效益,并使土壤供磷能力逐年有所提高,是一个优化轮作施肥方案。

参 考 文 献

- 1 杨守春主编. 黄淮海平原主要作物优化施肥和培肥技术. 北京:中国农业科技出版社,1991
- 2 王兴仁,曹一平,张福锁,陈新平. 磷肥恒量监控施肥法在农业中应用探讨. 植物营养与肥料学报,1995,1(3-4):59~65
- 3 张福锁,王兴仁,王敬国. 提高作物养分资源利用效率的生物学途径. 北京农业大学学报,1995,21(增):104~110
- 4 沈善敏,殷秀岩,张璐,廉鸿志,宇万太,陈欣. 石灰性土壤磷肥效中长期试验. 见:中国科学院沈阳应用生态所. 1994 年全国定位试验学术会议论文,1995
- 5 王兴仁,毛达如,陈伦寿,曹一平,张福锁. 我国北方石灰性潮土养分变化趋势和施肥对策. 见:北京土壤学会编. 土壤管理与施肥. 北京:中国农业科技出版社,1994,27~38
- 6 Mallarino A P, Webb J R, Blackmer A M. Corn and soybean yields during 11 years of phosphorus and potassium fertilization on high testing soil. Production Agriculture, 1991, 4(3):312~317
- 7 北京市土肥工作站. 冬小麦、夏玉米两茬轮作中磷肥分配方式的研究. 见:北京市土肥工作站. 平衡施肥配套技术论文集,1995,90~94
- 8 白纲义,赵杨景,梁惠英. 京郊菜地土壤肥力状况及其培肥问题. 土壤肥料,1984,(2):8~12