

麦稻轮作体系中磷素平衡的研究

马保国¹, 杨太新², 郭凤台¹, 韩俊杰²

(1. 河北工程学院水电学院; 2. 河北工程学院农学院, 河北 邯郸 056006)

摘要: 采用田间小区试验方法, 研究了高肥力土壤施用磷肥对冬小麦/水稻轮作周期中作物产量、磷肥利用率和磷养分平衡等的影响。结果表明, 施磷对当季作物有增产效果, 而磷肥残效对后茬作物增产明显。1 个轮作周期一次性施磷(P_2O_5) $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 即可保持麦稻两季作物高产; 磷肥施用在小麦季水稻利用其后效, 小麦季磷肥利用率为 $7.6\% \sim 13.6\%$, 水稻季磷肥利用率为 $7.3\% \sim 12.2\%$, 累积利用率为 $14.9\% \sim 25.8\%$; 磷肥施用在水稻季小麦利用其后效, 水稻季磷肥利用率为 $7.9\% \sim 12.7\%$, 小麦季磷肥利用率为 $7.8\% \sim 12.2\%$, 累积利用率为 $15.7\% \sim 24.9\%$ 。1 个轮作周期后还有 $74.2\% \sim 85.1\%$ 磷积累在土壤中。磷平衡计算结果进一步表明, 经过 3 个轮作周期后, 不施磷处理磷素亏缺 $144.73 \sim 145.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施磷(P_2O_5) $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 亏缺磷素(P_2O_5) $41.82 \sim 41.83 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施磷(P_2O_5) $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷素盈余(P_2O_5) $77.42 \sim 78.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施磷(P_2O_5) $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷素盈余(P_2O_5) $200.78 \sim 201.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随着施磷量的增加土壤速效磷呈明显递增趋势, 小麦—水稻轮作高肥力土壤水稻季施用(P_2O_5) $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 就可以维持土壤速效磷平衡。从磷素平衡角度来说, 施入的磷肥量应大体上等于作物吸收带走的量, 土壤施用磷肥(P_2O_5) $45 \sim 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间就可以维持土壤—作物体系中磷素的收支平衡。

关键词: 麦稻轮作; 石灰性土壤; 磷素平衡

中图分类号: S131.1, S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2005)02-0371-04

Balance of Phosphorus in a Rotation System with Winter – Wheat and Rice

MA Bao-guo¹, YANG Tai-xin², GUO Feng-tai¹, HAN Jun-jie²

(1. College of Hydroelectricity, 2. College of Agronomy, Hebei University of Engineering, Handan 056006, China)

Abstract: A field experiment from 1995 to 1999 was carried out at a field station of Handan in China with an aim at assessing effects of phosphorus application on grain yield, P recovery, p balance and dynamics of Olsen – P of soil in winter – wheat/rice rotation system. The experiment was conducted on a calcareous cultivated meadow cinnamon soil with pH 7.6, organic matter $42.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ALK. – N $112.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Olsen – P $26.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{OAC} - \text{K}$ $168.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Four P treatments (0, 45, 90, 135 $P_2O_5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) were randomly placed in 12 plots as 3 blocks. Meanwhile, concentrated super nitrogen as N fertilizer was applied to the soil. After harvest, the grain yield and straw yield were calculated according to the weighed results from sampling plots. P recovery was calculated by method of difference. P balance between P input and P output was calculated according to both whole stage growth of winter wheat and rice. The results showed that with the increase of P fertilizer rates (0, 45, 90, 135 $P_2O_5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) to rice or winter wheat, the Olsen – P content in the soil increased, and had a marked effect on the increase of grain yield in present rice season. P recovery of applying more P fertilizer to crop was in a rage of $7.3\% \sim 13.6\%$. The residual effects of phosphorus applied to the succeeding crop winter wheat were significant, and maintained the higher grain yield of succeeding crop, but available P decreased. Under high yield condition for the winter wheat – rice period of rotation, the phosphorus application of $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for winter wheat or $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for rice were suitable. P fertilizer at one time each year was able to meet the needs on growth and differentiation of rice or winter wheat. It may be concluded that supplying phosphorus in rice season could be decreased to $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ that was able to maintain the higher grain yield of both rice and winter wheat. The research on P balance showed that P had deficit $144.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \sim 145.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $41.82 \sim 41.83(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ when P application rate was $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $45(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P had surplus $77.42 \sim 78.85(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $200.78 \sim 201.77(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ when P application rate was $90(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $135(P_2O_5) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. When applied P fertilizer reached at $45 \sim 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the balance of P was maintained.

Keywords: wheat – rice rotation; calcareous soil; P balance

收稿日期: 2004 – 07 – 14

基金项目: 河北省自然科学基金资助(397418)

作者简介: 马保国(1967—), 男, 河北邯郸人, 硕士, 副教授, 从事磷循环及其生物有效性研究。E – mail: bgma671002@sohu.com

水体富营养化的一个重要污染源就是农田径流, 其中湖泊富营养化的养分 50%、河流的 60% 来自于农田径流水^[1]。由于地表径流、侵蚀、磷渗漏等原因, 从农田输出的磷对河流、湖泊水体富营养化构成威胁^[2]。磷随地表径流的流失从形态上分颗粒态和溶解态 2 部分, 降雨径流条件下, 流失的磷中 80% 以上是颗粒形态的磷, 而颗粒磷中 60% ~ 90% 以上的磷随 0.1 mm 以下的颗粒物流失^[2]。

关于磷的淋洗量和淋洗速度, 英国 Rothamsted 试验站的长期田间试验表明, 当土壤表层速效磷含量超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 磷的淋失量会急剧增加^[4]。宴维金研究表明, 水稻田磷径流量取决于施肥量、水稻田持水量、降雨量、水稻生长过程等因素, 在施用磷肥条件下, 水稻田磷流失量高达 $0.69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是不施磷的 10 ~ 30 倍^[5]。张水铭等对农田排水中磷对太湖水系的污染状况研究表明, 农田排水中的磷浓度与磷肥用量、施用方法和植被覆盖条件有密切关系^[6]。由于地表径流、土壤侵蚀及磷渗漏, 从水稻田输出的磷对周围环境造成潜在威胁。稻麦轮作高产区, 长期大量不合理地施用磷肥, 土壤磷素高度积累, 一方面浪费磷矿资源, 另一方面污染环境。因此, 加强麦稻轮作高肥力土壤磷的科学管理, 探讨轮作周期中磷肥的分配方式, 提高积累态磷的利用率, 已成为麦稻轮作体系中磷管理研究的重要课题。

1 材料与方法

试验在邯郸市马头镇刘庄村进行。土壤类型为潮褐土, 耕层土壤 pH7.6, 有机质 $42.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮和全磷分别为 2.30 和 $2.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮、速效磷 (Olsen-P) 和速效钾 ($\text{NH}_4\text{OAC}-\text{K}$) 分别为 112.0、26.4 和 $168.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该地区土壤长期麦稻轮作。

试验共设 2 个试验区, 小麦施用磷肥 (A 处理), 水稻用其后效; 水稻施磷肥 (B 处理), 小麦用其后效。试验各处理均施等量氮肥, 不施有机肥。磷肥施用磷酸二铵 (含 P_2O_5 46%, N 18%) 分 4 个水平, 重复 3

次: I (不施磷肥), II ($45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$), III ($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$), IV ($135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$)。氮肥施用尿素 $225 \text{ Nkg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在小麦、水稻季各施 1/2, 其中底肥、追肥各 1/2, 磷肥作为底肥 1 次底施。

在试验前 (1995-10)、小麦成熟期 (1996-06、1997-06、1998-06、1999-06)、水稻成熟期 (1996-10、1997-10、1998-10) 每小区分别采集 (0 ~ 20 cm) 耕层土壤样品进行测定。

2 结果与分析

2.1 磷肥处理对冬小麦和水稻产量的影响

磷是农业生产中最重要的产量限制因子之一, 施用磷肥是作物获得高产的重要措施, 但随着土壤磷肥力不断提高, 磷肥的合理施用已成为农业持续发展的关键问题。

表 1 列出 3 个轮作周期 A 和 B 处理平均作物产量和统计分析结果。结果表明, 在麦稻轮作高肥力土壤上, 施用磷肥对作物产量有显著的增产效果, 其后效也达到显著水平。施磷的作物产量与不施磷处理之间的差异均达到 5% 的显著水平。小麦季施磷 3 个施磷 (P_2O_5) 处理 (45、90、 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 间小麦产量未达显著差异, 而其后效之间达到显著水平; 水稻季施磷 3 个施磷 (P_2O_5) 处理 90、 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间小麦产量达到显著差异水平, 而 90 与 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间差异未达显著水平, 其后效也是如此。从两季作物总产量来看, 施肥各处理均比不施磷显著增产, 施磷各处理间作物总产量差异均未达到显著水平。进一步说明, 麦稻轮作高肥力土壤上, 1 个轮作周期内一次性施磷 (P_2O_5) $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 即可满足作物较高产量水平, 磷肥施在麦季和稻季没有明显区别。

2.2 对冬小麦和水稻吸磷量和磷肥利用率的影响

表 2 列出 1996 年—1997 年第 1 个轮作周期的结果。随着施磷量的提高, 作物的植株吸磷量明显增加, 说明施用磷肥促进了植物地上部对磷的吸收。磷肥施用在小麦季水稻利用其后效, 小麦季磷肥 (P_2O_5) 施用

表 1 施磷对小麦、水稻产量影响的多重比较

Table 1 Comparison of application of P on the yields of wheat and rice

处理	小麦施磷			水稻施磷		
	小麦产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	水稻产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	总产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	小麦产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	水稻产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	总产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
I	6 056a	5 655a	11 711a	5 981a	5 926a	11 907a
II	6 828b	6 122b	12 950b	6 256b	6 581b	12 837b
III	6 778b	6 307bc	13 085b	6 529c	6 831bc	13 360b
IV	6 962b	6 608c	13 570b	6 579c	6 728bc	13 307b

注: a、b、c 为 0.05 差异显著性。

45、90 和 135 kg · hm⁻² 处理,小麦季磷肥利用率分别为 13.6%、8.6% 和 7.6%,水稻季磷肥利用率分别为 12.2%、8.4% 和 7.3%,累积利用率分别为 25.8%、17.0% 和 17.9%。磷肥施用在小麦季小麦利用其后效,水稻季磷肥(P₂O₅)施用 45、90 和 135 kg · hm⁻² 处理,水稻季磷肥利用率分别为 12.7%、10.2% 和 7.9%,小麦季磷肥利用率分别为 12.2%、7.9% 和

7.8%,累积利用率分别为 24.9%、17.9 和 15.7%。随着施磷量的增加,作物磷肥利用率呈下降趋势,磷肥的累积利用率且很高。施肥一个季节后还有 86.4%~92.7% 的磷肥积累在土壤中,即使 1 个轮作周期后仍有 74.2%~85.1% 的磷积累在土壤中。磷肥施在稻季和麦季无明显区别,因此提高土壤积累磷的利用率十分必要。

表 2 不同施磷水平下植株吸磷量与磷肥利用率(以 P₂O₅ 计)

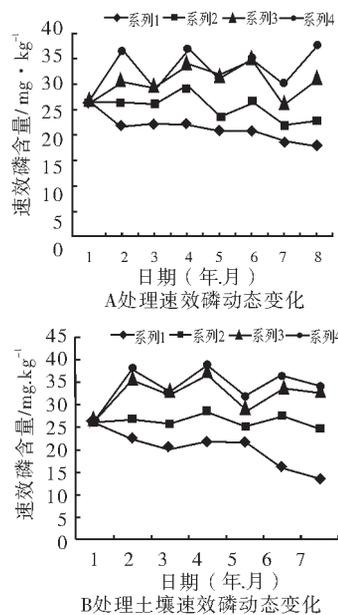
Table 2 P uptake by the crops and recovery of P at different P₂O₅ rates

处理	小麦施磷					水稻施磷				
	小麦吸磷量 /kg · hm ⁻²	磷利用率 /%	水稻吸磷量 /kg · hm ⁻²	磷利用率 /%	累积利用率 /%	小麦吸磷量 /kg · hm ⁻²	磷利用率 /%	水稻吸磷量 /kg · hm ⁻²	磷利用率 /%	累积利用率 /%
I	25.4	-	23.7	-	-	23.1	-	24.4	-	-
II	31.5	13.6	29.2	12.2	25.8	28.6	12.2	30.1	12.7	24.9
III	33.1	8.6	31.3	8.4	17.0	30.2	7.9	33.6	10.2	17.9
IV	35.7	7.6	33.6	7.3	14.9	33.7	7.8	35.1	7.9	15.7

2.3 土壤中速效磷的动态变化

土壤速效磷是评价土壤供磷水平的重要指标,它不仅可以反映出土壤磷素状态的动态变化,而且可以反映土壤对作物的供磷水平。由图 1A 可以看出,小麦季施磷后到收获小麦时土壤速效磷含量比不施磷处理有较大幅度增加,III 处理增加 8.6~13.8 mg · kg⁻¹,IV 处理增加 14.6~18.2 mg · kg⁻¹。随着磷肥用量的增加,速效磷含量明显增加,IV 处理的土壤速效磷含量达 38 mg · kg⁻¹ 以上。经后作水稻吸收利用前茬磷肥残效,速效磷含量呈降低趋势。由图 1A 还可以看出,经过 3 个轮作周期,II 处理土壤速效磷含量与试验开始时相比,变化范围在 -4.6~2.6 mg · kg⁻¹ 之间,而 III 和 IV 处理土壤速效磷含量均有所提高,最高增加 12.6 mg · kg⁻¹,这说明过量施磷有较多的速效磷积累在土壤中。

由图 1B 看出水稻季施磷的试验结果与小麦季相似。当季水稻施磷使土壤速效磷含量上升,其磷肥残效被后茬小麦吸收利用即呈下降趋势。与不施磷处理相比,在水稻季施磷 III 和 IV 处理速效磷含量分别增加 12.9~18.2 mg · kg⁻¹、15.4~20.9 mg · kg⁻¹。经 3 个轮作周期,各处理速效磷含量与试验开始时相比,不施磷处理的土壤速效磷降低 3.8~10.6 mg · kg⁻¹,而施磷处理的速效磷变化依次为 -1.1~2.5、2.4~10.6 和 5.8~12.3 mg · kg⁻¹。IV 处理土壤速效磷高于其它处理。作物从土壤中吸收了有效磷以后,不施磷处理速效磷含量明显降低,而在高磷土壤上超量施磷则发生磷素累积现象。不管磷肥在麦季还是稻季,施用磷肥(P₂O₅) 45 kg · hm⁻² 就可以维持土壤速



图中系列 1、2、3、4, 为处理 I、II、III、IV; 日期 1、2、3、4、5、6、7、8 为 1995-10、1996-06、1996-10、1997-06、1997-10、1998-06、1998-10、1999-06。

图 1 麦稻轮作土壤速效磷的动态变化

Figure 1 The dynamic of soil available P amounts under wheat/rice rotation

效磷平衡。

2.4 对土壤-作物体系中磷平衡的影响

从表 3 中可以看出,在 1 个轮作周期中,磷素平衡 A 处理中 A II 亏缺 11.7~16.18(P₂O₅) kg · hm⁻², A III 盈余 25.02~27.24(P₂O₅) kg · hm⁻², 而 A IV 盈余 64.98~68.88(P₂O₅) kg · hm⁻²; B 处理中 B II 亏缺 11.65~15.9(P₂O₅) kg · hm⁻², B III 盈余 23.69~28.25(P₂O₅) kg · hm⁻², 而 B IV 则盈余 64.37.4~70.9

表3 不同处理对磷素平衡的影响(以 P_2O_5 计)

Table 3 Effects of P fertilizer treatments on P balance

日期	项目	A 处理/ $kg \cdot hm^{-2}$				B 处理/ $kg \cdot hm^{-2}$				
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
1996—1997 (第一个轮作周期)	投入	0	45	90	135	0	45	90	135	
	输出	小麦吸磷	25.4	31.5	33.1	35.7	23.1	28.6	30.2	33.7
		水稻吸磷	23.7	29.2	31.3	33.6	24.4	30.1	33.6	36.1
		磷流失量	0.05	0.48	0.58	0.72	0.05	0.58	0.72	0.83
平衡	-49.15	-16.18	+25.02	+64.98	-47.55	-14.28	+25.48	+64.37		
1997—1998 (第二个轮作周期)	投入	0	45	90	135	0	45	90	135	
	输出	小麦吸磷	26.1	29.6	32.2	33.6	20.7	22.0	24.5	25.9
		水稻吸磷	24.5	28.9	30.6	31.9	23.2	34.1	36.5	37.3
		磷流失量	0.04	0.44	0.61	0.62	0.03	0.55	0.75	0.90
平衡	-50.64	-13.94	+26.59	+68.88	-43.93	-11.65	+28.25	+70.9		
1998—1999 (第三个轮作周期)	投入	0	45	90	135	0	45	90	135	
	输出	小麦吸磷	21.4	27.6	30.7	33.8	25.5	28.5	31.0	31.2
		水稻吸磷	23.5	28.6	31.4	33.5	28.2	31.9	34.5	36.4
		磷流失量	0.04	0.50	0.66	0.78	0.04	0.50	0.81	0.90
平衡	-44.94	-11.7	+27.24	+66.92	-53.74	-15.9	+23.69	+66.5		
总平衡	-144.73	-41.82	+78.85	+200.78	-145.22	-41.83	+77.42	+201.77		

(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$ 。经过 3 个轮作周期后, 磷素总平衡 A 处理中 AI 亏缺 144.78(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, A II 亏缺 41.82(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, A III 盈余 78.85(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, 而 A IV 盈余 200.78(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$; B 处理中 BI 亏缺 145.22(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, B II 亏缺 41.83(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, B III 盈余 77.42(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, 而 B IV 则盈余 201.72(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$ 。从磷的流失量来看, 随着施磷量的增加磷的流失量也增加。在一个轮作周期中, 稻季施磷流失量高于麦季施磷, B IV 处理的磷流失量高达 0.90(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$ 。无论 A 处理还是 B 处理磷素平衡没有明显差别。施用磷肥(P_2O_5) 45 $kg \cdot hm^{-2}$ 处理磷素略有亏缺, 施用磷肥 90(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$ 处理略有盈余, 施用磷肥 135(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$ 处理则盈余较多。所以从磷素平衡角度来说, 施入的磷肥量应大体上等于作物吸收带走的量, 土壤施用磷肥 45 ~ 90(P_2O_5) $kg \cdot hm^{-2}$, 就可以维持土壤磷素收支平衡的目标。

3 小结

(1) 施磷对当季作物有增产效果, 而磷肥残效对后茬作物增产明显。无论稻季施磷, 还是麦季施磷, 1 个轮作周期一次性施磷 (P_2O_5) 45 $kg \cdot hm^{-2}$ 即可保持麦稻两季作物高产。

(2) 本试验的小麦 - 水稻轮作高肥力土壤, 磷肥施用在小麦季后作水稻利用其后效, 小麦季磷肥利用率为 7.6% ~ 13.6%, 水稻季磷肥利用率为 7.3% ~

12.2%, 累积利用率为 14.9% ~ 25.8%; 磷肥施用在水稻季后作小麦利用其后效, 水稻季磷肥利用率为 7.9% ~ 12.7%, 小麦季磷肥利用率为 7.8% ~ 12.2%, 累积利用率为 15.7% ~ 24.9%。一个轮作周期后还有 74.2% ~ 85.1% 磷积累在土壤中。

(3) 随着施磷量的增加土壤速效磷呈明显的递增趋势, 小麦 - 水稻轮作高肥力土壤水稻季施用磷肥 (P_2O_5) 45 $kg \cdot hm^{-2}$ 就可以维持土壤速效磷平衡。

(4) 从磷素平衡角度来说, 施入的磷肥量应大体上等于作物吸收带走的量, 土壤施用磷肥 (P_2O_5) 45 ~ 90 $kg \cdot hm^{-2}$ 之间就可以维持土壤 - 作物体系中磷素收支平衡。

参考文献:

- [1] Parry R. Agricultural phosphorus and water quality: AUS. Environmental protection agency perspective[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 258 - 261.
- [2] McIsaac F G, Hirschi M C, Mitchell J K. Nitrogen and phosphorus in eroded sediment from corn and soybean tillage systems[J]. *Journal of Environment Quality*, 1991, 20: 663 - 670.
- [3] 晏维金, 章 申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 332 - 337.
- [4] Heckkrath G, Brookes P C, Poulton P R. phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk Experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 904 - 910.
- [5] 晏维金, 尹澄清, 孙 濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 312 - 316.
- [6] Humphreys F R, Pritchett W L. Phosphorus adsorption and movement in some sandy forest soils[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1971, 35: 495 - 500.