

长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究

周宝库, 张喜林

(黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所, 黑龙江哈尔滨 150086)

摘要: 1980 年开始, 在小麦—大豆—玉米轮作制中, 研究长期定位施用常量的氮、磷、钾(小麦、玉米施肥量为 N 150、 P_2O_5 75、 K_2O 75 kg/hm²; 大豆为 N 75、 P_2O_5 150、 K_2O 75 kg/hm²) 和有机肥(马粪, 折 N 75 kg/hm², 只在玉米后茬上施用), 以及二倍和四倍量对土壤磷素积累、形态变化及磷肥后效的影响。23 年研究结果表明, 长期不施肥, 黑土土壤全磷下降 37.4%、速效磷下降了 60%; 施用磷肥土壤全磷增加 53.9%—65.7%、速效磷增加 6—15 倍。积累的磷素大部分以有效性较高的 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P 形态积累在土壤中, 施用磷肥可使 Ca_2 -P 增加 4—15 倍, Ca_8 -P 增加 4—16 倍, Al-P 增加 1.6—11.8 倍, Fe-P 增加 1.4—4.4 倍, O-P 增加 0.6—1.7 倍, Ca_{10} -P 增加 0.3—0.7 倍。所积累在土壤中的磷素具有生物有效性。

关键词: 黑土; 磷素形态; 有效性; 长期施肥

中图分类号: S155.2⁺7; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)02-0143-05

Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability

ZHOU Bao-ku, ZHANG Xi-lin

(Soil and Fertilizer Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Successively oversupply of phosphorus fertilizers brought about the accumulation of phosphorus in the black soil. The results showed that soil nutrients were unbalanced, and the fertilizer efficiency was low. The status of accumulated phosphorus, transform of inorganic phosphorus and bio-availability of accumulated phosphorus in black soil were studied in this paper by the means of long-term fixed site field trial. The results were as follows:

1. Total P content decreased by 37.4% due to long-term no fertilization. Phosphorus fertilization remarkably increased total P content, especially the treatment with 2 times phosphorus fertilization, which was 53.9%—65.7% higher compare with the treatment of no fertilization. Application of manure alone could not supply enough P to keep phosphorus balance in soil. And the P was exhausted.
2. Available P in black soil decreased by 60.0% and 23.2% for the treatments of no fertilization and long-term applying manure, respectively. But available P in P fertilization treatments enhanced which was 6—15 times higher than that of no fertilization treatment. The more P fertilizer was applied, the more available P was accumulated.
3. As to the accumulated P in black soil, Ca_{10} -P is highest, then is O-P, Ca_8 -P and Ca_2 -P content was lowest. P fertilization could increased Ca_2 -P, Ca_8 -P and Al-P content which had higher availability to crop, while it had little effect on the content O-P and Ca_{10} -P which had lower availability to crop.
4. The phosphorus was depleted in black soil under the condition of long-term no P fertilization, so the effect of the P fertilizer was significant for the treatment of long-term no P fertilization, while, for the treatment of long-term P fertil-

收稿日期: 2004-02-11

修改稿收到日期: 2004-07-12

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(C9807)资助。

作者简介: 周宝库(1963—), 男, 黑龙江省延寿县, 人, 副研究员, 长期从事土壤与植物营养研究工作。

ization, the response is quite low. The accumulated phosphorus has an after effect on crops. It needn't to applying a amount of P fertilizer to soil every year under the condition of P accumulation in soil.

Key words: black soil; phosphorus; long-term fertilization; availability

磷肥的利用率较低,一般当季利用率只有 10%~25%,其余 75%~90% 的磷以不同形态积累在土壤中,这些积累的磷对作物的有效性一直是国内外学者关注的热点。按传统的观点,当季被作物利用后残留在土壤中的磷,大部分是不可逆地被土壤固定。但是近 20 年来,相当一部分的学者对此提出了异议,认为残留在土壤中的磷,可增加土壤可溶性磷的潜在贮量,最终都有可能被作物利用。对所谓被固定的磷的利用率及后效需要重新做出估量^[1-9]。在这方面,国内还缺乏长期性的试验来提供论证。

土壤磷素形态及其转化的研究,一直受到国内外学者的高度重视。张守敬和 Jackson 提出的土壤无机磷分级体系,得到了广泛的应用,在酸性土壤上说明了许多理论和生产上的问题;但未能将石灰性土壤中的有效性差异很大的钙磷从二钙盐到难溶磷的磷灰石加以区分,从而难于对其有效性进行评价,使石灰性土壤磷的形态分级受到限制。1989 年,蒋柏藩、顾益初提出石灰性土壤无机磷的分级体系,土壤无机磷的分级研究又成为热点,对土壤无机磷的正确分级可以准确地评价磷的有效性^[3,6-9]。

磷肥在黑龙江省从 70 年代开始大量应用,效果很好,决策部门大量地进口高浓度的磷肥,使化肥氮磷比例失调,致使有相当一部分土壤大量施用过量磷肥,造成了新的土壤养分失调、肥料利用率下降和化肥资源的浪费。本研究利用长期定位试验,探讨黑土在长期施肥条件下,土壤磷的形态变化及磷肥后效,以期磷肥的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 黑土肥力长期定位试验

试验以黑龙江省农业科学院黑土肥力长期定位监测试验为基础,该试验于 1979 年布设,1980 年按小麦—大豆—玉米轮作顺序,到 2003 年共为 24 个生长季。试验面积 8060m²,小区面积 168m²,每区 8 垄,垄长 30m,垄距 70cm,无重复。供试土壤耕层(0—20cm)有机质含量为 26.7g/kg,全 N、全 P、全 K 分别为 1.47、1.07、25.16g/kg,碱解 N、速效 P、速效 K 为 151.1、51.0、200.0 mg/kg, pH 值为 7.22。

1980 年设 16 个常量施肥处理,1986 年增加 8 个 2 倍量和 8 个 4 倍量处理,共 32 个处理,其中 8 个 4

倍量施肥处理 1992 年以后为观察后效。常量施肥处理,在小麦和玉米上为 N 150 kg/hm², P₂O₅ 75 kg/hm², K₂O 75kg/hm²;在大豆上为 N 75kg/hm², P₂O₅ 150kg/hm², K₂O 75kg/hm², 分别以 N₁、P₁、K₁ 表示;有机肥为纯马粪,每轮作周期施一次,于玉米收获后秋施,按氮量 75 kg/hm²(约马粪 18600 kg/hm²),以 D₁ 表示。二倍量组的施肥量为常量组的二倍,记作 N₂、P₂、D₂,四倍量组的施肥量为常量组的 4 倍,记作 N₄、P₄、D₄。氮、磷、钾肥均为秋施肥,氮肥为尿素,磷肥为三料过磷酸钙,磷酸二铵,钾肥为硫酸钾。

取样方法:每年秋季收获后,在每小区中间位置随机选 5 点,取 0—20cm 土层的田间土壤样品供分析用。

分析方法:土壤全磷,酸溶—钼兰比色法测定;速效磷, Olsen 法提取,钼兰比色法测定; pH 值,电位法测定。无机磷分组采用蒋柏藩、顾益初的分级方法^[7,9]。

1.2 盆栽试验

取长期定位试验中的 CK、P、NP、NK、NPK、P₂、N₂P₂、D₂N₂P₂ 等 8 个处理的 0—20cm 耕层土壤进行盆栽试验以了解土壤磷素生物的有效性。每个处理的土壤在满足氮素供应的基础上分别设施磷(以 + P 表示)和不施磷(以 -P 表示)2 个处理,共 16 个处理,5 次重复。供试作物为小麦,品种为龙辐麦 4 号。每盆栽土 5kg,每盆均施尿素 3.00g,施磷处理每盆施 2.00g 三料磷肥(含 P₂O₅ 46%)。于 6 月 5 日、7 月 3 日、7 月 10 日调查小麦植株生长状况,8 月 22 日收获测产。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对磷素积累的影响

土壤全磷是土壤无机磷素和有机磷素的总和,能反映土壤磷库大小和潜在的供磷能力。不施肥处理,土壤全磷由 1979 年的 1.07g/kg 下降到 2002 年的 0.67g/kg,下降了 37.4%,其他不施磷肥处理全磷下降的也都非常明显,单施氮肥处理(N₁)下降了 29.0%,氮钾(N₁K₁)处理下降了 26.2%。而施磷肥处理土壤全磷都有明显的积累,土壤全磷与对照土壤相比增加了 53.9%~65.7%。23 年后 2 倍量磷肥

处理土壤全磷是不施磷肥处理的 2.5 倍,常量处理也是不施磷肥处理的 2 倍左右(图 1)。

图 1 还看出,不施肥处理,土壤速效磷下降了 60%,长期单施有机肥土壤速效磷下降了 23.2%,其他不施磷肥处理土壤速效磷下降也都十分明显。而

施磷肥处理,土壤速效磷都有显著的增加,与不施肥相比土壤速效磷增加 6~15 倍,施磷量越多,土壤速效磷积累的也越多。这一结果与国内很多研究结果一致^[2,4,6,10]。

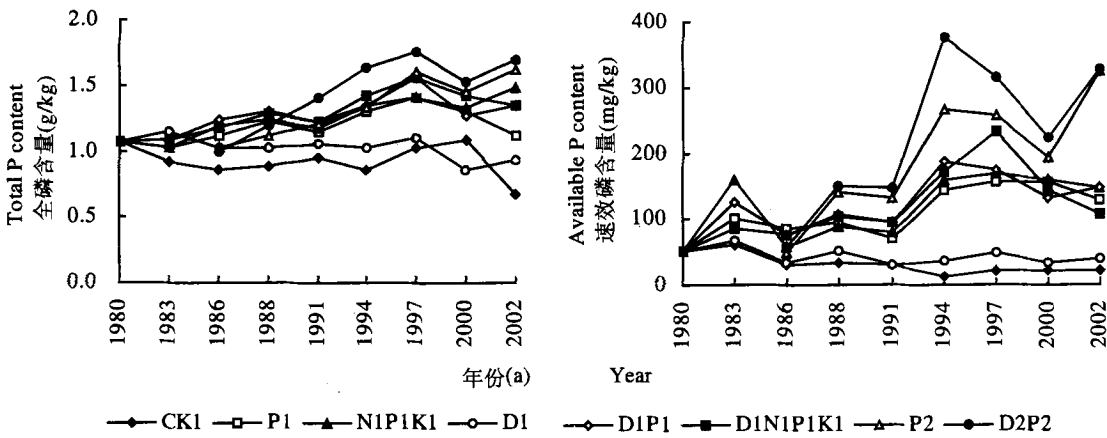


图 1 长期施肥条件下土壤全磷和速效磷的变化

Fig.1 The changes of total P and available P in black soil under long-term fertilization conditions

2.2 长期施肥对土壤磷素形态的影响

应用顾益初、蒋柏藩石灰性土壤无机磷分级的测定方法^[1,6-9],将土壤无机磷部分的磷酸钙盐分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,同时用混合浸提剂提取磷酸铁盐,以评价磷肥施入土壤后的形态转化和有效性。连续 3 年测定结果(表 1)看出,黑土无机磷以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,其次为 O-P , $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最低。施

用磷肥使不同形态的无机磷都有增加,对有效性较高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 影响较大,使 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 增加 4~15 倍, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增加 4~16 倍, Al-P 增加 1.6~11.8 倍, Fe-P 增加 1.4~4.4 倍, O-P 增加 0.6~1.7 倍, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 增加 0.3~0.7 倍;但对有效性低的 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 增加的幅度要小,说明积累的磷素大多以有效态的形式积累在土壤中,能够被作物吸收利用。

表 1 长期施肥对土壤无机磷形态的影响

Table 1 Influence of long-term fertilization on forms of inorganic p in black soil

处理号 No.	处理 Treatment	无机磷分组 Inorganic-P Fractionation (mg/kg)						无机磷总量 Total inorganic P (mg/kg)
		$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	
1	CK	6.50	4.63	11.94	27.96	51.86	65.85	168.75
2	N_1	4.73	4.02	10.17	23.90	38.84	54.57	136.22
3	P_1	42.95	33.46	58.00	74.60	70.83	79.46	359.29
5	N_1P_1	24.43	20.23	26.56	58.29	64.07	72.63	266.22
6	N_1K_1	9.53	8.04	18.49	39.26	46.34	64.74	186.41
8	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	40.59	33.56	60.85	85.61	61.71	80.50	362.81
9	D_1	11.99	12.73	21.06	36.45	55.99	69.15	207.37
11	D_1P_1	44.77	37.32	55.74	70.23	83.84	78.51	370.41
16	$\text{D}_1\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	49.06	42.31	63.44	128.35	106.15	85.84	475.14
19	P_2	74.52	52.37	99.60	98.72	100.21	86.17	511.60
20	N_2P_2	59.89	44.62	118.13	102.85	85.66	84.97	495.78
21	D_2	14.82	12.09	23.39	42.74	65.35	73.89	232.27
24	$\text{D}_2\text{N}_2\text{P}_2$	78.42	69.73	130.26	103.78	96.53	94.50	573.22

注(Note):为 1999~2001 三年平均值。Data is the average of three years (1999-2001).

2.3 长期施肥对土壤磷素有效性的影响

为了进一步评价长期施肥对土壤磷素有效性的影响,进行了生物试验。试验结果(表 2)看出,长期不施磷肥处理(CK、NK)土壤施用磷肥效果非常明显。长期不施肥处理,小麦子粒产量仅为施磷肥处理的 37.6%,说明长期不施磷肥的土壤已经严重地

缺磷,必须补充磷素营养才能保证作物生长的正常需要。而长期施用磷肥处理的土壤,种小麦时不施磷肥的子粒产量是施用磷肥的 94.0%~104.7%,施用磷肥基本上没有效果。说明原在土壤中积累的磷素对作物是有效的,因此当土壤中大量积累磷素的情况下,可不必每年大量施用磷肥。

表 2 长期施肥后土壤磷素的生物有效性
Table 2 The bio-availability of soil P after long-term fertilization in black soil

处理号 No.	处理 Treat.	5 Jun		3 Jul		Jul		Aug(收获期 Harvesting stage)			
		株高	植株鲜量	植株干重	株高	生物量 Biomass		株高	穗长	千粒重	产量
		Height	Fresh wt.	Dry wt.	Height	(g/10 株)		Height	Spike	1000-seeds	Yield
		(cm)	(g/10 株)	(g/10 株)	(cm)	鲜重	干重	(cm)	length	wt.	(g/pot)
						Fresh wt.	Dry wt.		(cm)	(g)	
1	CK-P	18.42	2.07	3.16	39.44	17.0	7.0	39.8	6.4	25.85	6.70 g
2	CK + P	27.73	6.44	6.71	47.30	43.0	19.4	46.8	10.9	30.26	17.83 cd
3	P-P	27.91	7.12	7.16	51.70	46.0	20.0	51.0	11.1	34.04	20.81 ab
4	P + P	28.55	7.55	7.49	48.60	43.6	19.2	48.5	11.0	34.93	19.87 abc
5	NP-P	25.17	6.16	5.69	49.90	38.0	17.0	49.0	10.7	33.12	18.02 bc
6	NP + P	26.94	6.96	6.26	43.20	32.3	14.0	44.4	10.2	30.49	18.57 abc
7	NK-P	24.14	3.84	3.89	41.00	27.4	9.0	42.6	8.2	27.41	10.50 f
8	NK + P	29.40	6.45	7.60	46.90	44.0	18.4	46.2	10.5	31.49	17.79 cd
9	NPK-P	28.00	5.58	3.52	51.20	43.4	17.0	51.4	11.8	34.80	19.34 abc
10	NPK + P	30.16	5.48	5.14	52.90	50.0	18.4	51.2	11.2	36.91	20.57 abc
11	P ₂ -P	26.86	4.25	7.17	41.10	31.8	13.8	43.1	10.2	28.90	14.34 e
12	P ₂ + P	27.54	5.54	7.74	44.00	36.4	15.4	43.2	10.6	29.17	14.24 e
13	N ₂ P ₂ -P	30.72	6.26	5.34	50.10	41.6	16.6	47.5	11.0	29.22	15.29 cd
14	N ₂ P ₂ + P	30.29	5.85	6.10	43.90	29.0	11.6	44.9	10.7	27.12	14.61 de
15	D ₂ N ₂ P ₂ -P	29.28	5.38	6.48	50.70	52.2	22.2	47.8	11.2	30.48	19.89 abc
16	D ₂ N ₂ P ₂ + P	30.54	5.99	6.04	48.50	44.0	18.4	47.2	11.1	32.73	20.89 a

2.4 作物对土壤磷素的吸收利用

作物对磷素的吸收测定结果(表 3)看出,利用长期不施磷的土壤,盆栽小麦不施磷肥的情况下,植株吸磷量很少,而施用磷肥的处理小麦吸磷量显著增加。长期施用磷肥处理的土壤,盆栽小麦吸收磷素的能力较强,在此基础上再施用磷肥,植株吸磷量还显著增加,说明植株的吸磷量不仅和土壤含磷量有关,还与施用磷肥的数量有关。子粒含磷量和施磷量关系不大,即大量施用磷肥,磷素也不会子粒中大量积累。

3 结论

近年来,由于黑龙江省大量连续使用磷肥,使磷肥在土壤中造成积累,造成土壤养分失调,肥料利用率下降和化肥资源的浪费。本试验摸清了长期施肥(23 年)条件下土壤磷素的积累状况,土壤无机磷形态变化以及土壤积累磷素的生物有效性。在连续大

表 3 不同施肥处理的植株含磷量(g/kg)
Table 3 The P content under different fertilization treatments

处理号 No.	处理 Treatment	5 Jun	3 Jul	收获 Harvest	
				植株 Plant	子粒 Grain
1	CK-P	3.70	5.15	0.120	1.48
2	CK + P	3.82	5.70	0.110	1.20
3	P-P	14.00	5.70	0.150	1.60
4	P + P	19.20	8.00	0.155	1.28
5	NP-P	8.20	5.40	0.115	1.60
6	NP + P	14.80	7.40	0.222	1.40
7	NK-P	6.20	5.30	0.115	1.68
8	NK + P	16.00	7.10	0.205	1.28
9	NPK-P	14.00	7.40	0.145	1.68
10	NPK + P	20.60	9.00	0.310	1.48
11	P ₂ -P	12.40	6.75	0.145	1.64
12	P ₂ + P	20.40	8.70	0.355	1.48
13	N ₂ P ₂ -P	16.80	7.10	0.160	1.72
14	N ₂ P ₂ + P	20.60	10.10	0.465	1.60
15	D ₂ N ₂ P ₂ - p	14.80	7.40	0.160	1.60
16	D ₂ N ₂ P ₂ + P	23.80	9.30	0.320	1.48

量施用磷肥情况下,施肥应以“稳氮、减磷、补钾”的原则进行合理施肥,充分利用土壤积累的磷素,节约资源,避免浪费。

定位试验结果表明,长期不施肥,土壤全磷下降了 37.4%,施磷肥处理土壤全磷都有明显的积累,尤其是施二倍量磷肥处理,土壤全磷积累更加明显,土壤全磷与对照土壤相比增加了 53.9%~65.7%。单施有机肥处理土壤全磷也仍然是下降的趋势,说明单施有机肥还不能保持土壤磷素的平衡。土壤速效磷和全磷的积累趋势一致,不施肥处理土壤速效磷下降了 60%,长期施有机肥土壤速效磷下降了 23.2%,其他不施磷肥处理土壤速效磷下降也都十分明显。而施磷肥处理,土壤速效磷都有显著的增加,与不施肥相比土壤速效磷增加 6~15 倍,施磷量越多,土壤速效磷积累的也越多。

黑土无机磷以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,其次为 O-P , $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最低。施用磷肥对有效性较高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 影响较大。施用磷肥使不同形态的无机磷都有增加,但对有效性低的 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 增加的幅度要小。

盆栽试验表明,长期不施磷肥处理的土壤,施用磷肥效果非常明显,由于长期不施磷肥的土壤严重缺磷,必须补充磷素营养才能保证作物生长的正常需要。而长期施用磷肥处理的土壤,积累在土壤中的磷素对作物是有效的,当土壤中大量地积累了磷素的情况下,可不必每年大量施用磷肥,以避免肥料资源的浪费。长期不施磷的土壤,种小麦时不施磷肥的情况下,植株吸收磷的数量很少,而施磷肥后吸磷量增加;长期施用磷肥处理的土壤,植株吸收磷素的能力较强,在此基础上再施用磷肥,植株吸收磷的量还有显著增加,但子粒吸磷量和施磷量关系不大。

参 考 文 献:

- [1] 沈仁芳,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报,1992,29(1):80-86.
Shen R F, Jiang B F. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(1): 80-86.

- [2] 郭晓冬,杨玲,张雪琴. 甘肃省主要耕地土壤磷素形态及其有效性研究[J]. 土壤通报,1998,29(3):119-122.
Guo X D, Yang L, Zhang X Q. Distribution and availability of phosphorus in main cultivated land in Gansu province[J]. Chinese Journal of Soil science, 1998, 29(3): 119-122.
- [3] 林葆,林继雄,李家康. 关于合理施用磷肥的几个问题[J]. 土壤学报,1992,24(2):57-60.
Lin B, Lin J X, Li J K. A few questions about rational phosphorus fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 24(2): 57-60.
- [4] 王兴仁,李洁茹,苏德纯,等. 北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹[J]. 中国农业大学学报,1999,4(5):43-49.
Wang X R, Li J R, Su D C *et al*. Management of phosphorus fertilizer in long-term rotation cropping in calcareous meadow soil in Beijing[J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(5): 43-49.
- [5] 沈善敏,廉鸿志,张璐,宇万太. 磷肥残效及农业系统养分循环再利用中长期试验[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(4):339-344.
Shen S M, Lian H Z, Zhang L, Yu W T. A long-term field trial on residual effect of phosphorus and on the use of recycled nutrients in a farming system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(4): 339-344.
- [6] 顾益初,钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性[J]. 土壤,1997,(1):13-17.
Gu Y C, Xin S W. The accumulation, transformation and availability of phosphorus under long-term phosphorus fertilization in meadow soil[J]. Soil. 1997, (1):13-17.
- [7] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(3):58-66.
Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. Scientia Agriculture Sinica, 1989, 22(3): 58-66.
- [8] 蒋柏藩,沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究[J]. 土壤学进展,1990,18(1):1-8.
Jiang B F, Shen R F. Fractionation of soil inorganic phosphorus[J]. Progress in Soil Science, 1990, 18(1): 1-8.
- [9] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤,1990,22(2):101-110.
Gu Y C, Jiang B F. A analysis method for fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. Soil, 1990, 22(2):101-110.
- [10] 张素君,张岫岚,刘鸿翔,王德禄. 东北黑土地区农业中磷肥残效的研究[J]. 土壤通报,1994,25(4):178-180.
Zhang S J, Zhang X L, Liu H X, Wang D L. Study on residual effect of phosphorus in agriculture in northeast areas black soil[J]. Chinese Journal of Soil science, 1994, 25(4): 178-180.