

用 ^{32}P 示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化*

冯 固 杨茂秋 白灯莎 黄全生

(新疆农科院核技术生物技术研究所, 830000)

摘 要

水溶性磷肥施入土壤后,其有效性随时间延长而降低,短期内(2个月)有2/3左右变成不可提取态磷(Olsen)法,其形态主要是 $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P 型磷酸盐。在种植玉米时,施入的磷肥22.6—27.8%转化成 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 27.5—30.6%转化成 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 9.1—10.0%转化成 Al-P , 10.5—15.6%转化成 Fe-P , 11.3—18.8%被玉米吸收利用。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 型磷酸盐对玉米生长都有一定的肥效,它们对植物干物质生产的效率(即引入每百毫克磷所产生的植株干重)的大小顺序是: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P}$ 。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 型磷酸盐对玉米生长无效。

关键词 石灰性土壤,水溶性磷肥,磷的形态和有效性变化, ^{32}P 示踪

应用无机磷分级方法研究土壤磷素有效性和磷肥在石灰性土壤中的形态及有效性变化已有许多报道^[3-4, 9-10],这些研究多采用相关分析、通径分析和回归分析等模糊数学手段解释试验数据,其不适之处是所获得的结论是定性的概念,缺乏直观效果。

本试验采用 ^{32}P 示踪法系统地研究了水溶性磷肥在石灰性土壤中的形态转化、有效性变化规律以及不同形态土壤无机磷对植物生长的肥效,以期直观地反映磷肥在石灰性土壤中的去向和不同形态土壤无机磷对植物磷素营养的贡献。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试土壤为灰漠土,其农化性状见表1。供试作物为玉米(Sc704);水溶性磷肥为重过磷酸钙(含 P_2O_5 46%)。

1.2 方 法

1.2.1 水溶性磷肥在石灰性土壤中有效性变化动态 将200g土壤(过2mm筛,下同)与 ^{32}P 标记的重过磷酸钙混匀(^{32}P 标记磷肥的方法见参考文献[1],下同),装入塑料钵中,土壤水分保持在田间持水量状态,在室温下培养。分别于施肥后的0、2、5、14、20、30天取一定土样,风干后过1mm筛,用0.5mol/L NaHCO_3 浸提(Olsen法),浸提液用Beckman Ls-7800液体闪烁计数器测量 ^{32}P 放射性强度,依照以下

* 本试验为国家自然科学基金和新疆自然科学基金资助。
收到修改稿日期:1995-05-24

公式计算 Olsen-P 浸出率。

$$\text{标记磷肥的浸出率(\%)} = \frac{\text{浸提液中 } ^{32}\text{P 放射性强度}}{\text{施入磷肥 } ^{32}\text{P 放射性强度}} \times 100$$

表 1 供试土壤农化性状

Table 1 Some properties of the soils tested

土壤 Soil	取样地点 Location	有机质 O.M. (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	碱解氮 Available-N (mg/kg)	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (g/kg)
试验 1	昌吉市	15.9	0.67	0.82	5.7	49.6	8.6	53.6
试验 2	玛纳斯	13.9	0.86	0.71	6.0	57.7	8.7	102.0
试验 3	乌鲁木齐	16.8	0.87	1.10	9.9	10.7	8.2	70.0

1.2.2 水溶性磷肥在植物-土壤系统中的去向 采用盆栽方法进行。设 11、22、44mgP/kg 土 3 个施磷水平的处理(均种作物)和 1 个施 11mgP/kg 土(不种作物)的处理,所用磷肥均标记³²P。将标记磷肥与供试土壤混匀装入 19cm×14cm×16cm 底部无孔的塑料盆中(下同),每盆装土 3kg,各处理均重复 3 次。每盆播 6 粒种子,出苗后间留 2 株。67 天后收获植株,同时采集根际土壤。植株洗净后在 60—70℃ 下烘干测定干重、全磷(H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、钼蓝比色法,下同)和³²P 放射性强度(用 FH-408 定标器测,下同);根际土壤采用蒋柏藩、顾益初提出的石灰性土壤无机磷分级体系^[2,5]测水溶性磷肥转化为不同形态磷酸盐的³²P 放射性强度(用 Beckman Ls-7800 液体闪烁计数器测量)。根据下列公式计算水溶性磷肥的利用率和在土壤中的形态转化率:

$$\text{磷肥利用率(\%)} = \frac{\text{植株吸收的 } ^{32}\text{P 放射性总强度}}{\text{施入土壤的 } ^{32}\text{P 放射性总强度}} \times 100$$

$$\text{磷肥形态转化率(\%)} = \frac{\text{浸提液中 } ^{32}\text{P 放射性强度}}{\text{施入土壤的 } ^{32}\text{P 放射性强度}} \times 100$$

1.2.3 石灰性土壤中不同形态的无机磷酸盐对植物的有效性 采用盆栽法进行,盆钵为塑料盆,每盆装土 3kg,播 6 粒玉米种子,出苗后间留 2 株。供试的磷源为³²P 标记的重过磷酸钙和人工合成的 CaHPO₄·2H₂O、Ca₈H₂(PO₄)₆·5H₂O、Ca₁₀(PO₄)₆·F₂、FePO₄·2H₂O 和 AlPO₄·nH₂O(由蒋柏藩先生提供,其化学性质见参考文献[2])。试验设 6 个处理:

- (1) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土;
- (2) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土+CaHPO₄·2H₂O 21.8mgP/kg 土
- (3) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土+Ca₈H₂(PO₄)₆·5H₂O 65.5mgP/kg 土
- (4) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土+Ca₁₀(PO₄)₆·F₂ 65.5mgP/kg 土
- (5) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土+FePO₄·2H₂O 58.2mgP/kg 土
- (6) ³²P 标记的重过磷酸钙 10.9mgP/kg 土+AlPO₄·nH₂O 43.6mgP/kg 土

各处理均重复 4 次,出苗后 58 天收获,植株在 60—70℃ 下烘干称重,测量植株全磷和³²P 放射性强度,依照下列各式计算出植株对不同形态无机磷酸盐的吸收量及利用率:

- (1) 植株吸收总磷量 = 植株干重 × 全磷含量

$$(2) \text{ 植株体内来自 } ^{32}\text{P} \text{ 标记磷肥的磷量 (Pdff)} = \frac{\text{植株体内 } ^{32}\text{P} / ^{31}\text{P} \text{ 比值}}{\text{标记磷肥 } ^{32}\text{P} / ^{31}\text{P} \text{ 比值}} \times \text{植株吸收总磷量}$$

$$(3) \text{ 植株体内来自土壤和不同形态的无机磷酸盐的磷量 (Pdfs+Pi)} = \text{植株吸收总磷量} - \text{Pdff}$$

$$(4) \text{ 土壤供磷能力 (Ap 值)} = \frac{\text{Pdfs} + \text{Pi}}{\text{Pdff}} \times ^{32}\text{P} \text{ 标记磷肥的施用量}$$

$$(5) \text{ 植株吸收不同形态无机磷酸盐量 (Pi)} = \text{施用人工合成的磷酸盐处理的 (Pdfs+Pi) 值} - \text{处理 (1) 的 Pdfs 值}$$

$$(6) \text{ 植株对不同形态无机磷酸盐的利用率 (\%)} = \frac{\text{植株吸收的磷酸盐量 (Pi)}}{\text{施入土壤的磷酸盐量}} \times 100$$

$$(7) \text{ 不同形态磷酸盐的效率} = \frac{\text{植株的干重}}{\text{施入土壤的磷酸盐量}}$$

本试验处理设置的几点说明: 1. 由于人工合成的 5 种磷酸盐多为难溶于水的, 无法在实验室进行人工标记³²P, 故采用间接标记法; 2. 我们的研究曾发现, 施磷可引起玉米增加对土壤磷的吸收, 即“激发效应”, 但不同的施磷水平之间, 玉米吸收土壤磷量差异不大^[8,11]。因此在本试验中, 各处理在施入了少量重过磷酸钙后再引入人工合成的磷酸盐, 可以消除“激发效应”的干扰; 3. 由于不同形态的磷酸盐对植物的有效性差异很大^[3,4], 若采用等施磷量处理, 则有可能造成有效性高的磷酸盐对植物过剩而有效性低的磷酸盐又不能维持植物正常生长的现象, 故采用了上述不等量施磷的处理方案; 4. 在施用了³²P 标记的肥料磷的条件下, 引入土壤中的不同形态人工合成的磷酸盐以土壤磷的状态存在。

2 结果与讨论

2.1 水溶性磷肥在石灰性土壤中有效性的变化动态

在不同时间内用 0.5mol/L NaHCO₃ 浸提液对标记磷肥的浸出率反映水溶性磷肥施入土壤后有效性变化的动态。由图 1 可见, 随着磷肥与土壤反应时间的延长, 标记磷肥的浸出率逐渐减少, 即肥料磷的有效性不断降低。施肥后 30 天时, ³²P 的浸出率只有

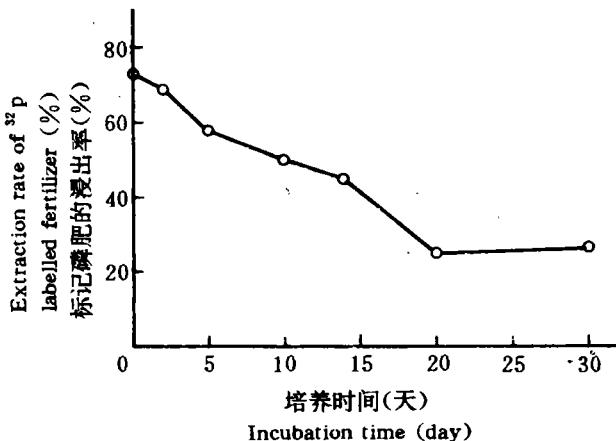


图 1 水溶性磷肥在石灰性土壤中有效性变化动态

Fig.1 Dynamics of availability of ³²P-labelled water-soluble phosphate fertilizer in calcareous soil during incubation

27%, 73%的肥料磷被土壤固定。这与王光火^[6]、吕家珑^[7]等的研究报道一致。

2.2 水溶性磷肥在石灰性土壤-植物系统中的去向

重过磷酸钙施入土壤中 67 天,在有玉米生长和无玉米生长两种情况下,其形态主要转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 型磷酸盐。没有检测到转化为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 型磷酸盐的放射性³²P(表 2)。

表 2 水溶性磷肥在石灰性土壤中的形态转化率(%)

Table 2 Percentages of different inorganic-P fractions transformed from ³²P-labelled water-soluble phosphate

施磷水平 P applied (mgP / kg)	fertilizer(%)				植物吸收 Plant uptake (%)	回收率 Recovery (%)
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P		
11	22.6	30.6	9.4	15.6	13.0	89.4
22	25.5	27.5	9.1	12.6	16.8	91.6
44	27.8	27.5	10.0	10.5	18.8	94.2
11(不种作物)	39.2	39.7	10.2	15.7	0	104.9

在有玉米苗生长的条件下,重过磷酸钙的去向是:11.3—18.8%为玉米苗吸收利用,22.5—27.8%转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐,27.4—30.5%转化成 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型磷酸盐,9.1—10.0%转化为 Al-P 型磷酸盐,10.4—15.6%转化成 Fe-P 型磷酸盐,磷肥的回收率为 89.2—94.2%(表 2)。

不同施磷水平下,重过磷酸钙的转化形态有一定的差异。由表 2 可见,随着施磷水平增加,重过磷酸钙转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐的比例相应增加,转化为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 型磷酸盐的比例则基本一致。

在施磷而不种玉米的条件下,重过磷酸钙在土壤中的去向为:39.2%转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐,39.7%转化为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型磷酸盐,10.2%转化为 Al-P 型磷酸盐,15.7%转化为 Fe-P 型磷酸盐,磷肥的回收率为 104.9%。可见,在没有玉米根系影响下,水溶性磷肥转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型磷酸盐的比例高于在有玉米根系影响下,磷肥转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型磷酸盐的比例。显然,这一现象是由于植株对磷肥的吸收所致。此外,玉米的根系分泌物也可能对磷肥由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型转化产生延缓和阻遏作用。

用 Olsen 法浸提出的土壤磷主要是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型的磷酸盐,同时也包括少量其他形态的磷^[2,3]。上述在施磷而不种玉米条件下,重过磷酸钙在土壤中的形态转化规律与图 1 所显示的重过磷酸钙在土壤中有效性变化动态的规律是吻合的。即用 Olsen 法未能浸提出来的那部分标记磷肥已经转化成了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型、 Al-P 型和 Fe-P 型磷酸盐。

2.3 石灰性土壤中不同形态的无机磷对植物的有效性

采用蒋柏藩先生提供的人工合成的 $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{Fe}$ 、 $\text{AlPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 模拟土壤中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 型、 Al-P 型和 Fe-P 型磷酸盐。结果表明,除 Ca_{10} 型磷酸盐之外,其余四种形态的磷酸盐对玉米生长都具有不同程度的有效性(表 3)。

表 3 不同形态的磷酸盐对玉米的肥效

Table 3 Efficiency comparison amongs the different inorganic phosphates

处 理 Treatment	植株干重 Dry weight (g / pot)	吸磷总量 Total P absorbed (mgP / pot)	Pdf (mg / pot)	Pdfs+Pi (mgP / pot)	土壤 Ap 值		磷酸盐效率 DWPP (g / 100mgP)	磷酸盐利用率 Utilization of phosphate (%)					
					Ap value (mgP / pot)	Pi (mgP / pot)							
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2(\text{CK})$	6.13 cd	BC	7.75de	D	1.99 b	BC	5.75 d	C	94.10 c	C			
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2+\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	14.98 a	A	22.13 b	B	3.34 a	A	18.77 b	B	188.95 b	B	13.02**	19.86	
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2+\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	9.98 b	B	15.99 c	C	2.48 b	AB	13.51 c	B	177.14 b	B	7.76**	3.94	
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2+\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{F}_2$	4.46 d	C	5.94 e	D	1.30 c	C	4.64 d	C	118.63 c	BC	-1.11	0	
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2+\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	8.71 bc	BC	11.09 d	CD	2.35 b	B	8.74 d	BC	113.75 c	BC	2.99	1.17	1.71
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2+\text{AlPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	15.60 a	A	32.43 a	A	3.18 a	A	29.25 a	A	302.16 a	A	23.50**	7.23	17.93

注:1. Pi 为玉米吸收的人工合成无机磷酸盐量;2. Pdf为玉米吸收的³²P 标记磷肥量;3. Pdfs 为玉米吸收的来自土壤的磷量;4. 同一列标有不同小写英文字母表示差异达 5% 显著水平,标有不同大写字母的表示差异达 1% 显著水平;5. ** 表示处理与对照差异达 1% 显著水平;6. 磷酸盐效率(DWPP)为每 100mgP 的磷酸盐生产的干重。

2.3.1 玉米生长和生物产量 与仅施用重过磷酸钙的处理(CK)相比,引入磷酸二钙、磷酸八钙、磷酸铝和磷酸铁处理的玉米植株干重均有所增加。其中引入磷酸八钙处理的增幅达到显著差异水平($p < 0.05$);引入磷酸二钙和磷酸铝处理的增幅达到极显著水平($p < 0.01$);引入磷灰石处理的植株干重比对照略有减少;引入磷酸铁处理的植株干重比对照有一定增加,但未达到显著差异水平。

2.3.2 玉米植株吸磷量 与对照相比,引入磷酸二钙、磷酸八钙、磷酸铝和磷酸铁处理的玉米植株吸磷量均有不同程度的增加,而引入磷灰石处理的植株吸磷量则相反。其中,引入磷酸二钙、磷酸八钙和磷酸铝处理的增幅达到极显著差异水平($p < 0.01$)。

2.3.3 玉米对人工合成磷酸盐的吸收利用 ^{32}P 同位素示踪法的优越性在于能够区分植株吸收的来自标记磷肥的磷量(Pdff)和来自土壤自身的磷量(Pdfs)。本试验条件下,引入人工合成的磷酸盐处理的玉米吸收来自土壤的磷包括两部分:一部分是来自人工合成的磷酸盐(Pi),另一部分是来自土壤自身的磷(Pdfs),对照的玉米吸收土壤磷量只有Pdfs这一部分。引入人工合成磷酸盐处理的(Pdfs+Pi)与对照的Pdfs之差,就是植株吸收人工合成磷酸盐的量(Pi)。试验结果表明,引入磷酸二钙、磷酸八钙、磷酸铝和磷酸铁时,Pi值均为正数;而引入磷灰石时,Pi值为负数。说明在本试验条件下,磷灰石是不能为玉米吸收的,而其它四种形态的磷酸盐均能为玉米吸收利用。 t 测验表明,玉米对磷酸二钙、磷酸八钙和磷酸铝的吸收量均达到极显著差异水平($p < 0.01$,表3)。

2.3.4 引入人工合成磷酸盐后土壤的供磷能力(A_p 值) 土壤 A_p 值是反映土壤有效磷含量的重要指标, A_p 值愈大,说明土壤中的有效磷含量越高。本试验中,在施用 ^{32}P 标记磷肥的基础上引入了不同形态人工合成的磷酸盐(相当于增加了土壤磷量)。如果它们对植物是有效的,那么土壤的 A_p 值必然会增加。试验结果表明,引入磷酸二钙、磷酸八钙、磷酸铝处理的土壤 A_p 值极显著地高于对照的土壤 A_p 值($p < 0.01$);引入磷酸铁处理的土壤 A_p 值也高于对照,这与前面的试验结果是一致的。

2.4 不同形态磷酸盐对植物生长有效性差异比较

试验中引入的人工合成磷酸盐的磷量大小依次是磷灰石 = 磷酸八钙 > 磷酸铁 > 磷酸铝 > 磷酸二钙,其比例依次为 1 : 1 : 0.89 : 0.67 : 0.33。表3所列植株干重、吸磷总量、土壤 A_p 值及Pi值等指标的大小顺序均是磷酸铝的 > 磷酸二钙的 > 磷酸八钙的 > 磷酸铁的 > 磷灰石的。磷酸铝的肥效甚至显著地大于磷酸二钙的肥效,这一现象与其他学者报道的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐的肥效大于 Al-P 型磷酸盐^[4]是相反的。如果以不同形态磷酸盐的效率(引入每百克磷所生产的植株干重)和植株对不同形态磷酸盐的利用率来比较土壤中不同形态无机磷对植物的有效性,则可看出(表3),五种形态磷酸盐对玉米的有效性大小依次为: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 型。其中, Al-P 型的有效率相当于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型的53%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型的有效率相当于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型的15%, Fe-P 型的有效率相当于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型的9%,这表明在石灰性土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型是有效性最高的磷源,其它几种的有效性依次为 Al-P 型、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 型、 Fe-P 型、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 型。

上述结果说明,本试验观察到的磷酸铝的肥效高于磷酸二钙的肥效是由于试验中未采用等磷量条件所致。这一现象恰好反映了石灰性土壤中不同形态无机磷含量分布与其对植物磷营养实际贡献大小的关系问题。据统计,我国北方地区石灰性土壤中 Al-P 型

磷酸盐的含量是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐含量的 2—3 倍^[3]。本试验原始土壤中 Al-P 型磷酸盐含量是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐含量的 8 倍,而引入土壤中的磷酸铝的量仅为引入的磷酸二钙量的 1 倍。远低于这两种无机磷在土壤中的实际比例。上述结果似乎表明,土壤中 Al-P 型磷酸盐对植物磷营养的贡献大于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 型磷酸盐。这一问题有待进一步研究证实。

参 考 文 献

1. 陈子元、温贤芳,1983:核技术及其在农业科学中的应用。科学出版社。
2. 蒋柏藩、顾益初,1989:石灰性土壤无机磷分级体系的研究。中国农业科学,第22卷3期,58—66页。
3. 蒋柏藩,1992:石灰性土壤无机磷有效性的研究。土壤,第24卷2期,61—64页。
4. 顾益初、李阿荣、蒋柏藩,1991:不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力。土壤,第23卷6期,296—301页。
5. 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。
6. 王光火、朱祖祥、J. K. Syers,1993:石灰性土壤与磷酸盐的反应及吸持态磷的同位素交换性。土壤学报,第30卷4期,374—379页。
7. 吕家珑、李祖荫,1991:石灰性土壤中固磷基质的探讨。土壤通报,第25卷5期,204—206页。
8. 杨茂秋、冯固、白灯莎、黄全生,1992:VA菌根对玉米吸收利用磷肥的影响。土壤肥料,第4期,36—40页。
9. 尹金来、曹翠玉、史瑞和,1989:磷肥在石灰性土壤中的形态转化及其有效性。土壤通报,第20卷1期,14—16页。
10. 张为政,1991:土壤磷组分的通径分析及其相对有效性。土壤学报,第28卷4期,417—424页。
11. 冯固、杨茂秋、白灯莎、黄全生,1993:用同位素示踪法研究土壤磷素对不同作物生物有效性的差异。土壤通报,第24卷1期,30—32页。

STUDY ON CHANGES IN FRACTIONS AND AVAILABILITY OF PHOSPHORUS IN CALCAREOUS SOIL BY ^{32}P TRACER METHOD

Feng Gu Yang Maoqiu Bai Dengsha and Huang Quansheng

(Nuclear Technology and Biotechnology Institute of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, 830000)

Summary

P availability of water-soluble phosphate fertilizer decreased with time in calcareous soil. During a short time (two months), about two thirds of fertilizer turned into inextractable phosphates with 0.5mol/L NaHCO_3 . The fractions of the phosphates were primarily Ca-P, Al-P and Fe-P. Under conditions of corn growth, 22.6—27.8% of fertilizer-P was transformed into $\text{Ca}_2\text{-P}$, 27.5—30.6% into $\text{Ca}_8\text{-P}$, 9.1—10.0% into Al-P, 10.5—15.6% into Fe-P, while 11.3—18.8% was absorbed by the corn plants.

$\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P and Fe-P phosphates in calcareous soil were available for corn. The DWPP (dry weight of corn plant produced by 100mg supplied phosphorus of the four phosphate-types) in a decreasing order: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P}$. $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ phosphate was unavailable for corn.

Key words Calcareous soil, Water-soluble P-fertilizer, Fraction and availability changes, ^{32}P tracer