

夏まきキャベツ栽培における土壌診断に基づいたリン酸肥料の削減

Reducing Technique of Phosphoric Fertilizer Based on Results of Soil Analysis in Cultivation of Cabbage Sowed in Summer

富永純司・宮崎裕子*・城秀信

Junji TOMINAGA, Hiroko MIYAZAKI and Hidenobu JYUO

要 約

黒ボク土壌での夏まきキャベツ栽培（品種：豊光）で、土壌中の有効態リン酸含量に応じて目標収量を確保できる施肥リン酸量について検討した。夏まきキャベツの目標収量を500kg/aとしたとき、目標収量を確保するために必要なキャベツのリン酸吸収量は0.51kg/a以上であった。土壌中の有効態リン酸含量が15mg/100g乾土以上であれば、施肥リン酸を1.0kg/aまで削減しても目標の収量およびリン酸吸収量が確保され、27mg/100g乾土以上であれば、リン酸肥料が無施用であっても目標の収量およびリン酸吸収量が確保された。

キーワード：黒ボク土壌，夏まきキャベツ，有効態リン酸，リン酸肥料削減

I 緒言

植物の必須元素であるリンは、天然供給量が少ないため作物の生育阻害要因となりやすい無機栄養素である。そのため窒素やカリウムとともに、リン施肥により作物の生育及び生産性を高めることが現在の栽培の基本技術となっている。

日本はリン酸肥料の原料である燐鉱石資源に乏しいため、リン酸肥料の原料は100%輸入に頼っている。しかし、燐鉱石の埋蔵量は各国で大きな偏りがあるため、埋蔵量が多い燐鉱石産出国における供給体制の変化が、燐鉱石の輸入量及びリン酸肥料の価格に大きく影響する。さらに、これから発展途上国において食料増産のためリン酸肥料の需要が高まることが予想され、現在の需要の伸び率から燐鉱石は今後50～130年の間に枯渇すると試算されている²⁾⁴⁾。こうした背景から、需給が逼迫した2008年にはリン酸肥料価格が高騰し、農業経営に大きな打撃を与えた。さらに今後についても価格高騰が懸念されている状態である。

一方で、施肥リン酸は作物での吸収利用率が低いこと、多量に施用しても過剰害が出にくいことから、これまでリン酸肥料は、作物の吸収量と比較して、多量に施用される傾向にあった。また土づくり資材として施用される家畜ふん堆肥にもリン酸が含まれており、畜種によっては2～6%と比較的高い濃度のリン酸を含むことが報告されている¹⁾⁵⁾。そのため、土壌中において作物が利用可能な有効態リン酸の含量が、施肥及び有機物の施用により増加傾向となっている。そこで、土壌中の有効態リン酸の有効利用を図ることで、施肥リン酸を削減し施肥コ

ストを低減する技術の開発が求められるようになった。しかし、これまで熊本県においては減肥の基準が策定されていない。そこで、県内全域で栽培が行われており、施肥コストへの影響が大きいキャベツを用いて、土壌中の有効態リン酸含量に基づいて削減できるリン酸肥料の施肥量について検討した。

なお本研究は、2010～2011年度農林水産省「農業生産環境対策事業のうち減肥基準策定に向けたデータ収集事業」に参画して試験を行った。

II 材料および方法

1) 試験ほ場および土壌の種類

試験は熊本県農業研究センター内の露地畑で、試験開始以前まで各種化学肥料および有機物を用いた試験を行い、土壌のリン酸肥沃度が段階的に異なる土壌を用いて行った。ほ場の土壌は厚層多腐植質黒ボク土で、作土の土性は埴壤土（CL）である。

2) 供試作物、品種および耕種概要

供試作物としてキャベツ「豊光」を用い、2010～2011年の2ヶ年にわたって栽培試験を実施した。2010年は2010年8月12日に播種し、9月1日に定植した。収穫は12月6日に行った。2011年は2011年8月10日に播種し、9月2日に定植を行った。10月3日に追肥を行い、収穫は11月25日に行った。なお、2ヶ年とも試験区は20.4㎡/区とし、栽植密度は294株/a（60株/区）で実施した。また、作物残渣（外葉等）は全て鋤込んだ。

3) 試験区の設定

減肥栽培が可能となる土壌のリン酸肥沃度を求めるた

*：阿蘇地域振興局農業普及・振興課

め、第1表の通り試験区を設定した。土壌のリン酸肥沃度は、土壌の有効態リン酸含量が 7.2~11.0mg/100g 乾土（低リン酸土壌区：低P）、13.1~17.7mg/100g 乾土（中リン酸土壌区：中P）、23.2~45.6mg/100g 乾土（高リン酸土壌区：高P）の3水準を設けた。施肥リン酸については標準施用量を熊本県の栽培基準である 2.0kg/a とし（標準施用区）、基準の半量である 1.0kg/a（半量減肥区：1/2P 区）、リン酸肥料無施用（無リン酸区：無P区）の3つの水準を設け、土壌のリン酸肥沃度3水準、施肥リン酸量3水準を組み合わせる8試験区を設定した（高リン酸土壌区と半量減肥区の組み合わせは、試験区が確保できなかったことから設置しなかった）。試験は同一のほ場を2年間連続で用い、無リン酸区は、無リン酸栽培におけるキャベツの生育およびリン酸吸収量への影響のブレを少なくするため、低P土壌で2反復、中P土壌および高P土壌については3反復設置した。一方、標準施用区および1/2P区については反復なしで試験を行った。なお、窒素および加里の施用量は、熊本県の栽培基準である窒素 2.4kg/a、加里 2.0kg/a とした。2010年は、窒素肥

料として尿素および CDU 窒素を 1:1 で配合し、基肥で全量施用した。またリン酸肥料として重焼燐、カリウム肥料として硫加を基肥で全量施用した。2011年は、栽培現場で行われている分施肥体系に合わせ、基肥に窒素肥料として硫安を窒素成分で 1.2kg/a、リン酸肥料として過磷酸石灰、カリウム肥料として硫加を加里成分で 1.0 kg/a 施用し、結球前に NK 化成2号と硫安を用いて、窒素成分で 1.2kg/a、加里成分で 1.0kg/a 追肥を行った。

4) 調査方法

収穫期に各区 20 株を採取し、全重および結球重を測定した。さらに、採取した株から結球重が平均値に近い3株を選定し、結球部と外葉部に分けて乾物重とリン酸含有率を測定し、リン酸吸収量を求めた。作物体のリン酸含有率については試料を通風乾燥後、硫酸による湿式分解を行い、バナドモリブデン法で測定した。

栽培前後における土壌中の有効態リン酸含量の変化を比較するために、栽培前（施肥前）及び栽培後の作土を採取し、風乾・粉碎および 2mm 目の篩別後、Truog法で抽出、モリブデンブルー法で測定した⁶⁾。

第1表 試験区の構成

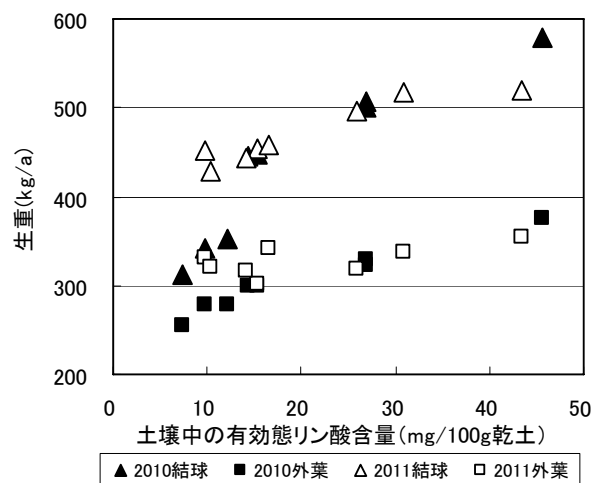
土壌のリン酸肥沃度	有効態リン酸 (mg/100g 乾土)	施肥リン酸	施肥量 (kg/a)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
低リン酸土壌区(低P)	7.2~11.0	無リン酸（無P）	2.4	0	2.0
中リン酸土壌区(中P)	13.1~17.7	半量施用（1/2P）	2.4	1.0	2.0
高リン酸土壌区(高P)	23.2~45.6	標準施用	2.4	2.0	2.0

注) 有効態リン酸含量のばらつきは、試験区内におけるばらつき及び年次変動に因る。

III 結果

1) リン酸肥料無施用でのキャベツの生育

リン酸肥沃度が異なる土壌において、リン酸肥料無施用でキャベツを栽培したときの生重を第1図に示した。キャベツの結球部および外葉部の生重は、土壌中の有効態リン酸含量が高くなるにつれ増加し、特に結球部はその傾向が強かった。また、有効態リン酸含量が 10mg/100g 乾土程度の土壌では、年度で結球部および外葉部の生重の変動が大きかったが、有効態リン酸含量が 15mg/100g 乾土以上では、年次間変動はほとんど見られなくなった。目標とする結球部の重量（収量）を熊本県農業経営指標から 500kg/a に設定すると、土壌中の有効態リン酸含量が 27mg/100g 乾土以上においては、リン酸肥料無施用で栽培しても目標以上の収量が得られた。



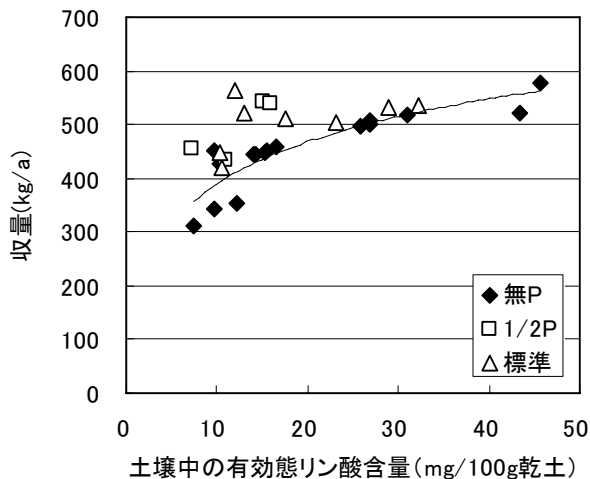
第1図 リン酸肥料無施用でのキャベツの部位別生重

2) リン酸施肥とキャベツの収量

リン酸肥沃度が異なる土壌で施肥リン酸量を変えて栽培

したときのキャベツの収量を第2図に示した。標準施用区では、土壌中の有効態リン酸含量が 11mg/100g 乾土の

ときのキャベツ収量は 420kg/a で、目標収量を下回った。しかし 12mg/100g 乾土以上であれば 510~560kg/a となり、目標の収量が確保された。またリン酸半量施用区では、有効態リン酸含量が 11mg/100g 乾土以下ではキャベツの収量は 430~460kg/a であったが、15mg/100g 乾土以上では 540kg/a となり、目標収量以上となった。



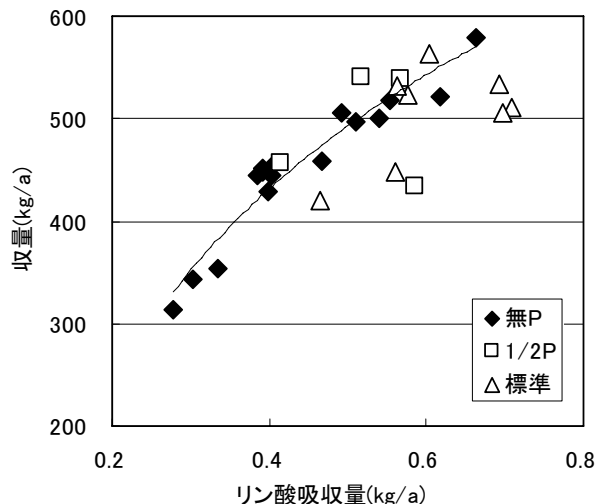
第2図 栽培前の土壌中の有効態リン酸含量とキャベツの収量

注) 図中の曲線は無リン酸区における有効態リン酸と収量の相関曲線($y=114.2\ln(x)+126.4$, $R^2=0.80$)

3) キャベツのリン酸吸収量

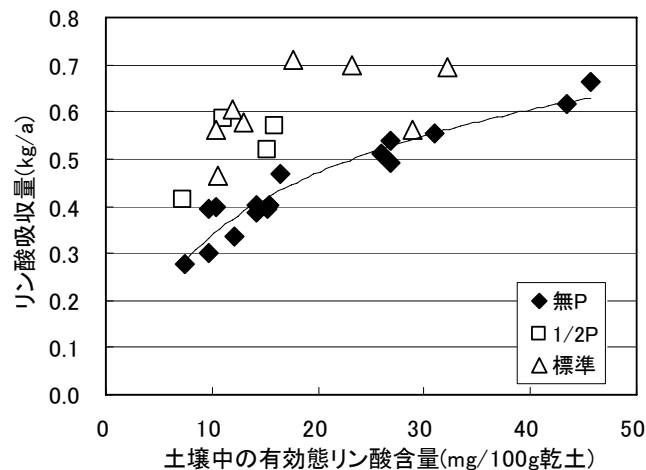
キャベツの収量とキャベツ地上部のリン酸吸収量との相関を第3図に示した。キャベツの収量はリン酸吸収量の増加とともに増大する傾向を示した。特に無リン酸区ではその傾向が顕著であり、施肥リン酸の影響がある標準施用区およびリン酸半量施用区では、リン酸吸収量と収量の相関はリン酸無施用区よりも低かった(各試験区において対数相関をとったときの決定係数 (R^2 値)は無リン酸区:0.93, リン酸半量施用区:0.03, 標準施用区:0.36)。無リン酸区において、キャベツの収量が目標収量である 500kg/a となるときのリン酸吸収量は、無リン酸区における相関曲線から 0.51kg/a であった。

土壌中の有効態リン酸含量とキャベツ地上部のリン酸吸収量との相関を第4図に示した。土壌中の有効態リン酸含量とキャベツのリン酸吸収量は、キャベツのリン酸吸収量と収量のとおり同様に、無リン酸区では相関が高くなったが、リン酸半量区、標準施肥区では相関が低くなった。無リン酸区において、キャベツ地上部のリン酸吸収量が 0.51kg/a となるときの土壌中の有効態リン酸含量は 24.5mg/100g 乾土となり、目標収量を達成するために必要な土壌中の有効態リン酸含量である 27mg/100g 乾土では、キャベツのリン酸吸収量は 0.51kg/a を超えた。



第3図 キャベツ地上部のリン酸吸収量と収量

注) 図中の曲線は無リン酸区におけるリン酸吸収量と収量の相関曲線($y=275.2\ln(x)+683.6$, $R^2=0.93$)



第4図 栽培前の土壌中の有効態リン酸含量とキャベツ地上部のリン酸吸収量

注) 図中の曲線は無リン酸区における土壌中の有効態リン酸含量とリン酸吸収量の相関曲線($y=0.19\ln(x)+0.10$, $R^2=0.92$)

4) キャベツのリン酸収支

施肥リン酸量とキャベツのリン酸吸収量からリン酸収支を求めた(第2表)。無リン酸区においては、すべての土壤区でリン酸収支は不足となり、外葉を鋤込んだ場合であっても、高リン酸土壌においては 0.31kg/a の不足であった。一方標準施用区及び半量施用区においては、結球及び外葉を持ち出した場合であってもリン酸収支はプラスであった。

第2表 キャベツのリン酸収支 (kg/a)

試験区	施肥リン酸量	リン酸吸収量			リン酸収支	外葉鋤込み	
		結球	外葉	合計			
		A	B	C			D(=B+C)
低 P	無 P	0.00	0.18	0.17	0.35	-0.35	-0.18
	1/2P	1.00	0.24	0.26	0.50	0.50	0.76
	標準	2.00	0.27	0.24	0.51	1.49	1.73
中 P	無 P	0.00	0.21	0.18	0.39	-0.39	-0.21
	1/2P	1.00	0.30	0.24	0.54	0.46	0.70
	標準	2.00	0.33	0.31	0.64	1.36	1.67
高 P	無 P	0.00	0.31	0.25	0.56	-0.56	-0.31
	標準	2.00	0.34	0.30	0.64	1.36	1.66

5) 土壌中の有効態リン酸含量

2010年および2011年における栽培前後の土壌の有効態リン酸含量を第3表に示した。土壌中の有効態リン酸含量を栽培前後で比較すると、2011年の低リン酸土壌における無リン酸区を除き、全ての試験区で同等もしくは増加する傾向が見られた。増加量は、無リン酸区で-0.4

～2.5mg/100g 乾土、半量施用区で0.1～4.0mg/100g 乾土、標準施用区では1.4～5.7mg/100g 乾土であり、リン酸肥料の施肥量が増えるにつれ、増加量も多くなる傾向が見られた。

第3表 有効態リン酸含量の推移 (mg/100g 乾土)

試験区	2010		2011		2010	2011	
	栽培前	栽培後	栽培前	栽培後	増減	増減	
	(A)	(B)	(C)	(D)	(B)-(A)	(D)-(C)	
低 P	無 P	8.6	10.8	10.0	9.6	2.2	-0.4
	1/2P	7.2	11.2	11.0	11.1	4.0	0.1
	標準	10.6	12.0	10.4	12.9	1.4	2.6
中 P	無 P	13.9	16.4	15.4	15.7	2.5	0.4
	1/2P	15.2	16.4	15.9	18.2	1.3	2.3
	標準	12.5	18.2	17.7	21.4	5.7	3.7
高 P	無 P	33.1	35.2	33.4	34.6	2.1	1.2
	標準	28.9	32.9	27.7	29.8	4.0	2.1

IV 考察

本試験は、夏まきキャベツ栽培において土壌中の有効態リン酸含量に応じて削減できるリン酸肥料の施肥量を求めることを目的とした。有効態リン酸の測定方法には、本試験で用いた Truog 法以外にも BrayNo.2 法、オルセン法などがあるが、作物が実際に利用するリン酸量を測定する方法は確立されておらず、現在議論がなされている状態である。なぜならば、土壌中のリン酸はカルシウム、鉄、アルミニウムなどと結合し不可給化するが、pH などの土壌条件や地温などによりその一部が可給化するた

め、その条件設定を行うことが困難であるからである。そのため、本試験においてもいくつかの分析方法を用いる必要があるかもしれないが、日本の畑地土壌における有効態リン酸の測定法は、Truog 法を用いることが一般的となっており、本試験においても、Truog 法を用いて得られた有効態リン酸含量に応じて削減できるリン酸肥料の施肥量を求めることとした。

本試験において、無リン酸区における土壌中の有効態リン酸含量とキャベツの収量およびリン酸吸収量は高い相関を示した(第2, 4図)。このことから、黒ボク土壌

における夏まきキャベツ栽培において、Truog 法で求める有効態リン酸含量は、施肥リン酸の削減が可能な有効態リン酸レベルを求めるに当たって有効であるとともに、土壌中の有効態リン酸含量からキャベツの収量およびリン酸吸収量を推計できると考えられた。そこで、無リン酸区のデータを基に、土壌中の有効態リン酸含量に応じて目標収量を得るために必要とされる施肥リン酸量を、下記の通り求めた。

(1) 施肥リン酸の利用効率

キャベツのリン酸吸収量は第2表より、低リン酸土壌区では無リン酸区で0.35kg/a、半量施肥区で0.50kg/a、標準施肥区で0.51 kg/aであった。よって、施肥によるリン酸吸収量の増加は、半量施肥区で $0.50 - 0.35 = 0.15$ kg/a、標準施肥区で $0.51 - 0.35 = 0.16$ kg/aであった。同様にして中リン酸土壌では、無リン酸区と比較して、半量施肥区で0.15 kg/a、標準施肥区で0.25 kg/a、リン酸吸収量が増加した。以上の結果から施肥リン酸の利用効率を求めると、半量施肥区では1.0kg/aの施肥に対してリン酸吸収量が0.15kg/a増加したことから、施肥リン酸の利用効率は15%程度であると推定された。同様にして標準施肥区では8~12.5%程度であると考えられた。施肥量が増加するにつれ利用効率は低下する傾向が見られるが、黒ボク土壌における夏まきキャベツの施肥リン酸の利用効率は、最低でも8%程度はあると推定された。野菜栽培における施肥リン酸の利用効率は10%程度であるという報告³⁾と今回の結果は、ほぼ同等の結果であった。

(2) 必要とされる施肥リン酸量の推定

本試験において、無リン酸区における収量とリン酸吸収量の関係から、目標収量500kg/aを達成するためのリン酸吸収量は0.51kg/aであることを示した(第3図)。そこで、リン酸肥料無施用栽培における土壌中の有効態リン酸含量とリン酸吸収量の相関曲線の式(第4図脚注)

から、有効態リン酸含量の各レベルにおけるリン酸吸収量を算出し、(1)で求めた施肥リン酸の利用効率を踏まえて、目標収量を達成する施肥リン酸量を推定した。算出結果は第4表に示し、用いた算出式は第4表の脚注に記した。

算出結果から、土壌中の有効態リン酸含量が10mg/100g 乾土であれば、目標収量を達成するために必要とされる施肥リン酸量は2.1kg/aであり、施肥リン酸の削減できなかつたが、15mg/100g 乾土では標準の半量程度である1.2kg/aまで削減、25mg/100g 乾土ではリン酸肥料無施用でもリン酸吸収量の確保が見込まれた。実際に第2図で示した土壌中の有効態リン酸含量と収量の相関と算出結果を照合すると、10mg および 25mg/100g 乾土では、算出結果と実際の収量がほぼ一致していた。15mg/100g 乾土では施肥リン酸が標準の半量であっても目標とする収量が確保されており、算出結果とはやや異なるが、施肥リン酸の利用効率を最低で見積もっていることを勘案すると、示した算出式は有効であると示唆された。

今回の試験で、黒ボク土壌における夏まきキャベツ栽培において、土壌中の有効態リン酸含量に基づいて削減できるリン酸肥料の施肥量を示すことができた。今回の結果が他の土壌においても有効かについては不明であるが、黒ボク土壌はリン酸を固定する能力が高く、施肥リン酸が効きにくいことから、他の土壌においては土壌中の有効態リン酸含量がより少ない状態であっても減肥できる可能性が考えられる。そのため、他の土壌においてリン酸肥料の減肥栽培を行う場合は、新たに施肥量の検討を行うことも必要であると考えられる。

第4表 施肥リン酸量の推定

土壌中の有効態リン酸含量 (A)	(mg/100g 乾土)	5	10	15	20	25	30
リン酸無施肥におけるリン酸吸収量 (B)	(kg/a)	0.21	0.34	0.42	0.47	0.51	0.55
必要な施肥リン酸量 (C)	(kg/a)	3.8	2.1	1.2	0.5	0.0	-0.5
削減可能な施肥リン酸量 (D)	(kg/a)	-1.8	-0.1	0.8	1.5	2.0	2.5

(B)の算出式: $0.19 \times \log_e(A) + 0.10$ (第4図脚注より引用)

(C)の算出式: $(0.51 - (B)) / 0.08$

(D)の算出式: $2.0 - (C)$

V 参考文献

- 1) 伊藤豊彰, 小宮山鉄兵, 三枝正彦, 森岡幹夫(2010) : 豚ふんおよび鶏ふん堆肥のリン酸組成, 土肥誌, 81, 215-223
- 2) 黒田章夫, 滝口昇, 加藤純一, 大竹久夫(2005) : リン資源枯渇の予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol.4, No.2, 87-94
- 3) Mishima S. Itahashi S. Kimura R. Inoue T. (2003) : Trends of Phosphate Fertilizer Demand and Phosphate Balance in Farmland Soils in Japan, Soil Sci. Plant Nutr., 49(1) 39-45
- 4) 俵谷圭太郎, 和崎淳(2012) : リン酸資源の枯渇に対応したリン栄養研究 1. 講座のねらい, 土肥誌, 83, 173-176
- 5) 横田剛, 伊藤豊彰, 小野剛志, 高橋正樹, 三枝正彦(2003) : 製造条件の異なる牛ふん堆肥の無機態リン酸組成 土肥誌, 74, 133-140
- 6) 財団法人日本土壌協会(2001) : 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質および植物体分析法

Summary

Reducing Technique of Phosphoric Fertilizer Based on Results of Soil Analysis in Cultivation of Cabbages Sowed in Summer

Junji TOMINAGA , Hiroko MIYAZAKI and Hidenobu JYU

In cultivation of cabbage var. "Toyohikari" sowed in summer on Ando soil, the amount of phosphoric fertilizer and available phosphoric acid in soil were examined to get the target yield. A 500kg per Are of cabbage production, being the target yield in Kumamoto prefecture, were gained when cabbages absorbed more 0.51kg per Are of phosphoric acid. When the amount of available phosphoric acid was more 15mg per 100g soil, phosphoric fertilizer could be reduced until 1.0kg per Are. In addition, non phosphoric fertilizer was needed to get the targets of the yield and the amount of phosphoric acid absorption, in condition that amount of available phosphoric acid was more 27mg per 100g soil.