



## 有機磷之消化與植酸酶之應用

沈添富\* 陳婉琳

國立台灣大學畜產學系

電話：(02)27327301#117；傳真：(02)27324070

e-mail：tianfuh@ccms.ntu.edu.tw

### 摘 要

磷為動物需要的多量元素之一，家禽與豬隻對其需要量僅次於鈣，居第二位。目前家禽和豬隻的飼糧，大都以植物性之穀物和油粕類為主，而其中所含之有機磷的利用性，是多年來被關切的問題。

植物性飼料中存在之植酸和植酸鹽，可以添加植酸酶(phytase)，使其在雞和豬之腸道中被分解，釋出磷酸根，而加以利用。飼糧中植酸鹽之存在也會影響鈣、磷、蛋白質/胺基酸和澱粉等的利用，添加植酸酶對這些營養分之利用也有改善之效果。在家禽和豬隻方面，飼糧中補充植酸酶對改善有機磷化物之利用效果，屬於非直線反應。植酸酶之劑量反應，端視(1)植酸酶之活性、(2)飼糧中總磷含量、(3)飼糧中植酸磷含量及(4)飼料製造方法等而有變異，該酵素之使用宜考慮其所能產生之磷當量價值。

關鍵詞：家禽、豬隻、植酸、植酸酶、磷。

### 一、前言

在礦物質營養中，磷為動物所需要之多量元素之一，其在動物體內之含量僅次於鈣。實用飼糧中需要補充磷化物，否則容易產生缺乏症狀，影響生產表現。目前用於飼養家畜、禽之飼料原料，大都為植物性飼料，因此存在於植物組織中之有機磷化物，被消化或利用之效率，就成為常被關注的問題。

本文討論之重點，在於單胃動物之雞和豬對有機磷之消化，以及植酸酶之應用效果，以提供做為業界參考應用之依據。

## 二、雞、豬對磷之需要量

雞和豬之飼糧中磷的需要量已大致確定。美國國家研究委員會(NRC)之推薦資料,如表 1 所示。雞隻在不同生長或生產階段之磷需要量(NRC, 1994),以非植酸磷(即有效磷)表示,此意謂植酸磷不為家禽所利用。而豬隻對磷之需要量(NRC, 1998)則以總磷和有效磷表示,其有效磷占總磷的比率,因生長豬體重之增大而變小,顯示大豬對總磷之利用性較佳。

表 1. 雞和豬對磷之需要量(90% 乾物質)

雞	非植酸磷 <sup>(1)</sup> (%)	豬	總磷 <sup>(2)</sup> (%)	有效磷 <sup>(2)</sup> (%)
童子雞(肉雞)		生長豬(體重)		
0-3 週齡	0.45	3-5 公斤	0.70	0.55
3-6 週齡	0.35	5-10 公斤	0.65	0.40
6-8 週齡	0.30	10-20 公斤	0.60	0.32
來航型新母雞		20-50 公斤	0.50	0.23
0-6 週齡	0.40	50-80 公斤	0.45	0.19
6-12 週齡	0.35	80-120 公斤	0.40	0.15
12-18 週齡	0.30	懷孕母豬	0.60	0.35
18 週 -產第一個蛋	0.32	泌乳母豬	0.60	0.35
產蛋母雞(日攝食 100 公 克飼料)	0.25	種公豬	0.60	0.35

<sup>(1)</sup> NRC, 1994. Nutrient Requirements of Poultry. National Academy Press, Washington, D.C., U.S.A.

<sup>(2)</sup> NRC, 1998. Nutrient Requirements of Swine. National Academy Press, Washington, D.C., U.S.A

## 三、有機磷之消化

### (一)植酸與植酸鹽

雞和豬飼糧之主要原料為穀物和油粕類,存在於這些飼料原料之

磷，大部分(60-80%)為植酸鹽之磷。植酸(phytic acid)為 myo-inositol 1,2,3,4,5,6 hexakis phosphate，其構造如圖 1 所示。它是植物種子之主要成分，其分佈因不同植物而有差別，如穀粒主要存在於麩皮部位；玉米則在胚芽部位。常用飼料穀物和油粕類之植酸磷含量，如表 2 所示。表 2 之資料分別來自 NRC (1994) 家禽營養分需要量手冊，以及 NRC (1998) 豬隻營養分需要量手冊；植酸磷(%)係總磷扣除非植酸磷而得 (NRC, 1994)；而 NRC (1998)中之植酸磷係扣除有效磷而得。由家禽和豬隻之資料，可見雞隻和豬隻對有機磷之利用率均頗低，大都低於 30%。

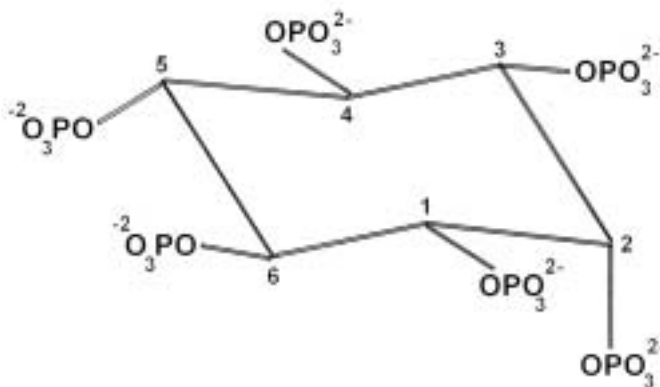


圖 1. 植酸之化學結構 ( myo-inositol hexakis phosphate )。磷酸根上接上  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  或  $\text{Zn}^{2+}$  等則變成植酸鹽。

## (二)植酸磷之有效性(Bioavailability)

動物對植酸磷之消化或利用，可由測定其有效性而得。餵飼雞隻所用之穀類和油粕類飼料中的非植酸磷含量，用於估算其有效性，所得結果列於表 3，表中顯示穀類飼料中，除大麥外，植酸磷之有效性均低於 30%，表示其存在之大部分磷，無法被雞隻所利用；油粕類亦如此，除大豆粕外，亦均低於 30%。

豬隻對飼料中有機磷之利用效率列於表 2，表中顯示所列之飼料原

料中磷之有效性亦頗低，大都低於 30%，可見豬隻對有機磷之利用能力亦相當差。

表 2. 常用穀類及其副產物與油粕類之植酸磷含量

	雞 (NRC, 1994)			豬 (NRC, 1998)		
	總磷	非植酸磷	植酸磷 <sup>b</sup>	總磷	磷之有效性 <sup>a</sup> (%總磷)	植酸磷 <sup>b</sup>
----- (%) -----						
穀類及副產物						
玉米	0.28	0.08	0.20	0.28	14	0.24
大麥	0.36	0.17	0.19	0.36	30	0.25
燕麥	0.27	0.05	0.22	0.31	22	0.24
高粱	0.30	-	(0.24)	0.29	20	0.23
麩皮	1.15	0.20	0.95	1.20	29	0.85
米糠	1.50	0.22	1.28	1.61	25	1.21
油粕類						
大豆粕 (CP44%)	0.65	0.27	0.38	0.65	31	0.45
芝麻粕	1.37	0.34	1.03	1.22	-	-
花生粕	0.63	0.13	0.50	0.65	12	0.57
油菜子粕 (canola meal)	1.17	0.30	0.87	1.01	21	0.80

<sup>a</sup> 與 monosodium 或 monocalcium phosphate 比較

<sup>b</sup> 植酸磷為計算值

### (三) 植酸與養分結合之可能性

植酸構造上含高量磷(28.2%)，其磷化物為磷酸根，帶負電荷；因此，在中性液中，很容易和二價及三價之正離子結合，形成不溶之鹽類。如在小腸之 pH 環境下，一分子之植酸可以結合 3-6 個鈣離子，形成不溶之植酸鈣，因而降低鈣和磷之有效性。其他礦物質，如鋅、銅、鈷、錳、鐵和鎂等也會形成複合物，尤其對鋅和銅有很強的親合力。

是以植酸與礦物質之結合，影響礦物質之有效性甚鉅。

表 3. 家禽飼料之非植酸磷含量<sup>(1)</sup>

飼料類別	非植酸磷(% 總磷)
穀類	
玉米	28
大麥	47
燕麥	18
麩皮	17
米糠	15
油粕類	
大豆粕(CP 44%)	41
芝麻粕	25
花生粕	21
油菜子粕(canola meal)	26

<sup>(1)</sup>本資料計算自 NRC (1994)

植酸之存在對蛋白質和胺基酸之利用有負面的影響。因為植酸之存在可能會抑制腸道中胃蛋白酶和胰蛋白酶的作用。在酸性環境下，植酸上之磷酸根可能與蛋白質或胺基酸之胺根結合，如離胺酸、精胺酸；而在中性環境下，則可能與胺基酸之羧根(carboxyl)結合。因此植酸-蛋白質或植酸-礦物質-蛋白質複合物可能會減低蛋白質的利用。

#### 四、植酸酶之應用

植酸酶廣泛分佈於微生物、植物和一些動物組織。微生物源之酵素(3-phytase, EC 3.1.3.8)首先水解 C<sub>3</sub> 上之磷酸根；而植物源之酵素(6-phytase, EC 3.1.3.26)則先分解 C<sub>6</sub> 之磷酸根。*Aspergillus* 生產之酵素有兩個適當的 pH 範圍，一為 pH 2.5，另一為 pH 5.5。小麥植酸酶僅有 pH 5.2 之適當作用區，因此，其每單位之作用效率較微生物生產者為低。

在雞和豬腸道中，可能有四種來源之植酸酶可以分解植酸：(1)消

化道分泌之腸植酸酶；(2)飼料成分中存在之植酸酶；(3)腸內細菌產生之植酸酶；(4)外源微生物產生之植酸酶。豬之胃和腸道以及雞隻之嗉囊、胃和小腸中所含有的植酸酶活性均很低，可以忽略，其對消化飼糧植酸磷之貢獻，難以確定。非反芻動物腸內細菌所產生之植酸酶的重要性，亦尚未被確認，可能不甚重要。

植物之植酸酶也有分解植酸之能力。許多植物種子，如稻穀、小麥、大麥、玉米、黑麥、大豆和產油種子均含有不同活性之植酸酶，但除了小麥、黑麥和黑小麥外，大多數種子所含的酵素活性均很低。玉米和大豆粕中所含的植酸酶活性也低，實用上並不重要。雖然有些飼料原料中含有天然的植酸酶活性，但商業上製造粒狀飼料時，顯著地流失許多內源植酸酶活性，以致在做飼糧配方時，對其所殘留之酵素活性，則未予考慮。

微生物植酸酶存在於細菌、酵母和黴菌(fungi)中，其水解飼糧植酸之效果首於 1971 年被 Nelson *et al.* 發現。因具有經濟價值而在商業上利用植酸酶於豬和雞之飼料，則起源於 1980 年代末期，因為當時(1)生物技術的進展，導致基因修飾植酸酶的發展；(2)荷蘭規定必須減少家畜之排磷量。另外，發酵技術之改進亦為貢獻因子之一。

現今主要商業上應用的微生物植酸酶有四種，兩種係由基因轉殖 *Aspergillus* 之發酵產品 (Natuphos<sup>®</sup> & Novo phytase)；另兩種為 *Aspergillus* 培養液萃取之產品 (Finase<sup>™</sup> & Alltech phytase)。大部分產品為粉狀、顆粒狀或液態形式。Natuphos<sup>®</sup> 和 Novo 植酸酶之基因源自 *A. ficuum*，然後轉殖到 *A. niger* 或 *A. oryzae*。熱穩定之植酸酶亦已被發展出來了，據稱，*A. fumigatus* 植酸酶於 90 加熱 20 分鐘，尚可保留 90% 酵素活性。

在豬隻，胃為植酸酶的主要活動部位，小腸下半段極少發現植酸酶之活性或植酸磷之分解。顯著量(40-50% 之總量)之植酸磷經小腸流入大腸，而大部分會在大腸中被分解，但在此處卻極少被吸收。小腸(空腸和迴腸)中植酸酶的活性低，可能係因其 pH 值較高(介於 6.5-7.6)，不利於酵素之活動所致；或可能係因植酸酶被小腸中之蛋白酶分解所致。在雞隻，添加的微生物植酸酶活性有 69-86% 在嗉囊中被檢測出，31-38% 於前胃被檢出，小腸中則未檢測出植酸酶活性；試驗並發現飼糧植酸磷於嗉囊和前胃消失，顯示家禽之嗉囊和前胃為植酸酶作用之主要處所。

## 五、家禽和豬隻飼糧中微生物植酸酶之效用

添加微生物植酸酶可以有效改善植物性飼料中有機磷之利用性，同時也可能影響一些養分之利用率。但家禽和豬隻飼糧中微生物植酸酶之應用，受許多因素之影響，譬如磷和植酸酶之成本、植酸酶釋放磷和其他養分之效率、以及減少排泄磷之環境成本需要等。

### (一)植酸酶對改善磷有效性之影響

#### 1. 磷之消化率

於家禽及豬隻之飼糧中補充植酸酶，發現其對磷之消化率呈非直線反應(圖 2 和 3)。添加植酸酶 500 U/kg，家禽對磷之滯留量(retention)可增加 7.8% 單位(表 4)，但仍較豬隻的 19.7% 為低(表 5)。在低植酸酶濃度時，每單位酵素活性之增加幅度較高，如家禽在 400-500 U/kg 時，可增加 1.18% 單位；而在 900-1000 U/kg 時則僅增加 0.60% 單位。

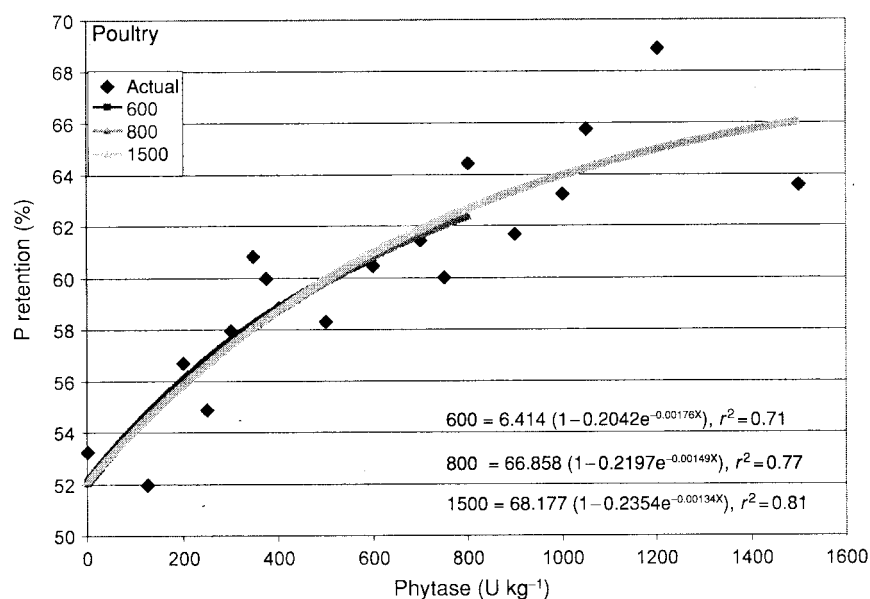


圖 2. 家禽飼予低磷飼糧後，補充微生物植酸酶對磷滯留量之影響

(註：一單位 (U) 植酸酶活性相當於在 37 °C，pH 5.5 條件下，每分鐘可自 5.1 mM Na phytate 溶液釋出 1 μmole 無機磷所需的酵素量)。(資料來源：Kornegay, E.T., 2001)

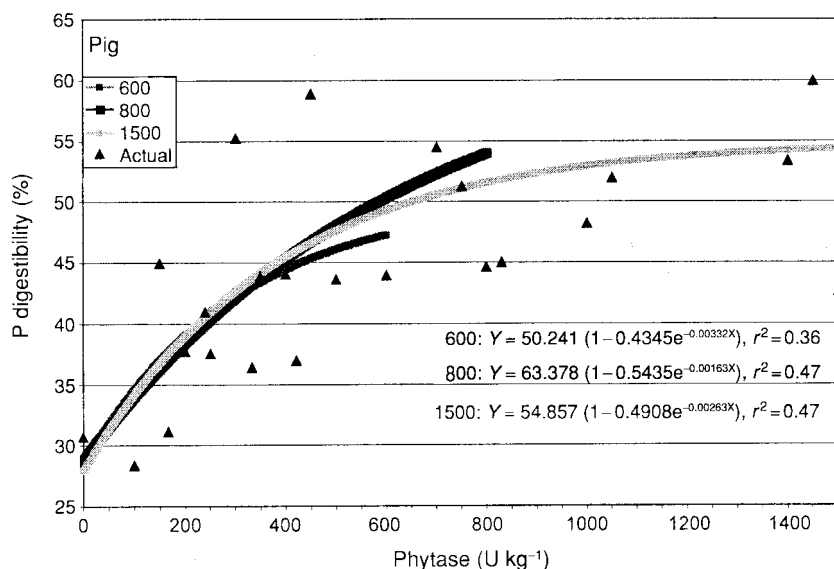


圖 3. 豬隻飼糧補充微生物植酸酶對磷消化率之影響  
(資料來源：如圖 2)

## 2. 消化之磷量 (Digested phosphorus)

低磷基礎飼糧之總磷含量乘以添加酵素後之磷消化率，即可得到消化磷量。如表 4 所示，家禽飼糧中添加 500 U 酵素/kg，則因添加酵素而增加之消化磷量估計為 0.037% (0.37g/kg)，低磷飼糧之平均總磷含量為 0.478%，鈣含量為 0.78%。表 5 顯示，同樣 500 U 酵素/kg 添加量下，豬隻消化磷為 0.075% (0.75g/kg)，而豬隻之負對照（低磷）飼糧之總磷含量為 0.381%，鈣為 0.588%。顯示家禽之利用率較豬為低，可能與基礎飼糧之總磷含量有關。

## 3. 磷之排泄

依表 4 之資料，與正對照組(總磷 0.578%)比較，補充酵素 500 U/kg，磷之排泄減少 31.9%；而豬隻（表 5）方面，如與其正對照組飼糧(含總磷 0.481%)比較，則減少 33.2%。

## 4. 植酸酶活性之相當磷價

許多試驗曾根據日增重、骨骼礦物化程度和磷消化率，估算植酸酶用於豬隻之相對磷價，結果認為 500 U 酵素/kg 相當於 1.0g 無機磷的磷當量價值。1.0 g 無機磷×76.7% (飼料級磷化物之磷消化率)，得 0.767 g 磷，相當於表 5 之消化磷 0.75 g。另有報告指出 500 U 酵素/kg 相當於 0.8 g 消化磷(digestible phosphorus)，此約相當於來自 monocalcium

phosphate 之 1.0 g 磷。

童子雞(0-3 週齡)之試驗以增重和趾灰分百分比為測定基準，認為 500 U 酵素/kg 相當於 0.70 g 無機磷。0.7g 乘以 46.2% (飼料級磷源之消化率 46.2%) 得到 0.32 g 磷,此值相當於表 4 之 0.37 g 消化磷(0.037%)。

## (二)植酸酶之補充對蛋雞之影響

研究指出，在低磷飼糧中補充植酸酶對蛋雞的使用效果良好，200-300 U 酵素/kg 相當於 0.5-1.2 g monocalcium phosphate 之磷，且蛋雞飼料大多為粉料，沒有熱穩定度的問題。

## (三)植酸酶之添加對其他養分之影響

植酸酶添加於飼糧中，除了對磷之利用有影響外，一般還認為對鈣、鋅、胺基酸和澱粉的利用也多少會有影響。Schoner *et al.* (1994)以童子雞之增重和趾灰分量評估，顯示 500 U 微生物植酸酶/kg 相當於 0.46 g 鈣。Jongbloed *et al.* (1996)於豬隻之試驗也顯示，500 U 植酸酶/kg 相當於 0.4-0.7 g 鈣。因此，胃中植酸酶水解植酸除了導致磷消化率之增加，並間接影響鈣之消化。

鋅為最容易與植酸形成複合物之礦物質，雞和豬的研究均顯示，飼糧鋅之需要量受飼糧植酸鹽之影響，而鈣之存在更可能形成鈣-植酸鹽-鋅之複合物，阻礙鋅之吸收。Yi *et al.* (1996) 於三週齡童子雞之試驗顯示，600 U 植酸酶/kg 相當於 5.4 mg 鋅/kg 飼糧。年青生長豬之研究也顯示植酸酶之添加有改善鋅利用之效果，但其相對當量則未建立。

在低或中性 pH 下，植酸鹽會和蛋白質/胺基酸結合，天然飼料中，可能會有植酸鹽-蛋白質/胺基酸複合物形成；在上消化道中，植酸鹽和蛋白質分解酶也可能產生結合；這些複合物之形成，可能會降低蛋白質和胺基酸之利用。若植酸鹽被酵素分解，則可以減少此種抑制作用。到目前為止，植酸酶對蛋白質利用的影響各研究所得結果變化頗大，尚無一致之結論。

四週齡童子雞餵飼玉米-大豆粕等為主之飼糧時，植酸酶之添加 (600 U/kg)可以改善表面代謝能(AME)值，顯示植酸影響澱粉消化之方式可能經由(1)結合  $\alpha$ -澱粉酶或螯合住鈣離子；或(2)經由蛋白質之聯結，直接結合澱粉。植酸鹽水解之後，即可釋放出酵素或澱粉。

表 4. 家禽飼糧補充植酸酶對磷之利用

植酸酶 添加量 (U/kg)	總磷 消化率	植酸酶對磷帶 留量之增加	被植酸酶 消化的磷 (%)	總磷 排泄量	磷排泄量 減少
0	52.1	0	0	0.229	18.4
100	54.1	2.0	0.010	0.219	21.8
200	55.9	3.8	0.018	0.211	24.8
250	56.7	4.6	0.022	0.207	26.2
300	57.4	5.3	0.025	0.203	27.5
350	58.1	6.0	0.029	0.200	28.6
400	58.8	6.7	0.032	0.197	29.7
450	59.4	7.3	0.035	0.194	30.8
500	60.0	7.8	0.037	0.191	31.9
550	60.5	8.4	0.040	0.189	32.7
600	61.0	8.9	0.042	0.186	33.5
650	61.5	9.3	0.045	0.184	34.3
700	61.9	9.8	0.047	0.182	35.0
750	62.3	10.2	0.049	0.180	35.7
800	62.7	10.6	0.050	0.178	36.4
900	63.4	11.2	0.054	0.175	37.6
1000	64.3	11.8	0.057	0.172	38.6
1100	64.7	12.4	0.059	0.170	39.5
1200	65.0	12.8	0.061	0.168	40.3
1300	65.4	13.2	0.063	0.166	41.0
1400	65.7	13.6	0.065	0.164	41.6
1500	66.0	13.9	0.066	0.162	42.1

基礎飼糧總磷量為 0.478%。

正對照飼糧總磷量為 0.578%。

(資料來源：如圖 2)

表 5. 豬隻飼糧補充植酸酶對磷之利用

植酸酶 添加量 (U/kg)	總磷 消化率	植酸酶對磷帶 留量之增加	被植酸酶 消化的磷	總磷 排泄量	磷排泄量 減少
	----- (%)-----				
0	27.9	0	0	0.275	8.3
100	34.2	6.2	0.024	0.251	16.3
200	38.9	11.0	0.042	0.233	22.3
250	40.9	13.0	0.049	0.225	24.8
300	42.6	14.7	0.056	0.219	27.0
350	44.1	16.2	0.062	0.213	28.9
400	45.5	17.5	0.067	0.208	30.6
450	46.6	18.7	0.071	0.203	32.1
500	47.6	19.7	0.075	0.200	33.2
550	48.5	20.6	0.078	0.196	34.5
600	49.3	21.4	0.081	0.193	35.5
650	50.0	22.1	0.084	0.191	36.4
700	50.6	22.7	0.086	0.188	37.1
750	51.1	23.2	0.088	0.186	37.8
800	51.6	23.6	0.090	0.184	38.4
900	52.3	24.4	0.093	0.182	39.4
1000	52.9	25.0	0.095	0.179	40.1
1100	53.4	25.4	0.097	0.178	40.7
1200	53.7	25.8	0.098	0.176	41.1
1300	54.0	26.0	0.099	0.175	41.5
1400	54.2	26.2	0.100	0.175	41.7
1500	54.3	26.4	0.101	0.174	41.9

基礎飼糧總磷量為 0.381%。

正對照飼糧總磷量為 0.481%。

(資料來源：如圖 2)

## 結 論

單胃動物如雞和豬，因為對植物性飼料之有機磷(植酸磷)的利用能力相當差；因此，微生物植酸酶目前已普遍而有效的應用於飼糧，除了可改善植酸磷之有效性，減少磷排泄量外，並可促進其他養分的利用，如礦物質(鈣、鋅等)、蛋白質/胺基酸、澱粉。植酸酶對改善雞和豬之磷利用率的劑量反應曲線呈非直線，使用時宜考慮植酸酶之活性、飼糧中總磷和植酸磷含量、飼料製造方法，以及該酵素所產生之磷當量價值。

## 參考文獻

- Kornega, E.T., 2001. Digestion of phosphorous and other nutrients: the role of phytase and factors influencing their activity. in “*Enzymes in Farm Animal Nutrition*”, pp. 237-271, Ed. by M.R. Bedford and G.G. Partridge, CABI Publishing, N.Y., U.S.A.
- NRC, 1994. Nutrient Requirements of Poultry. National Academy Press, Washington, D.C., U.S.A.
- NRC, 1998. Nutrient Requirements of Swine. National Academy Press, Washington, D.C., U.S.A.