

經九年水稻玉米輪作下不同施肥管理對土壤氮和磷劃分之影響

周恩存¹ 王鐘和² 鍾仁賜³ 陳琦玲^{4,*}

摘要

周恩存、王鐘和、鍾仁賜、陳琦玲。2016。經九年水稻玉米輪作下不同施肥管理對土壤氮和磷劃分之影響。台灣農業研究 65(3):313–327。

氮與磷是作物栽培上需要不斷補充之養分，然有許多因子會影響氮與磷在土壤中的轉變與有效性。本研究目的在探討施用不同種類之肥料在水(水稻)旱(玉米)田輪作下，經9年後對土壤中氮與磷劃分之影響。試驗共有7種施肥處理，分別為：(1)未施肥之對照組(CK)、(2)化學氮肥區(Chem-N)、(3)堆肥區(Comp)、(4)堆肥與化學氮肥區之化學氮肥1/3用量共用區(Comp + 1/3 N)、(5)堆肥與化學氮肥區之化學氮肥2/3用量共用區(Comp + 2/3 N)、(6)綠肥與化學氮肥區之化學氮肥1/3用量共用區(GM + 1/3 N)、(7)泥炭與化學氮肥區之化學氮肥1/3用量共用區(Peat + 1/3 N)。經栽培作物9年後，採取土壤以Bremner (1965a, 1965b, 1965c)的方法將氮劃分，以Sui *et al.* (1999)之序列萃取法將磷劃分。結果顯示，化學肥料施用對土壤，總氮與有機態氮無增加之效應，但卻使可水解氮濃度與占總氮的比例上升；堆肥與泥炭增加土壤總氮與有機態氮，且可水解氮與不可水解氮亦增加；與堆肥共用而多施之化學氮肥也無增加土壤總氮與有機態氮之作用；綠肥可緩慢提高土壤總氮與可水解氮。堆肥能增加可水解氮劃分之胺基態氮與可水解銨態氮濃度，其餘施肥處理對不可辨認的可水解氮及胺基醣態氮濃度之影響則較小。施磷肥使磷劃分分佈趨勢改變，留存之肥料磷主要轉變成碳酸氫鈉萃取無機磷與氫氧化鈉萃取無機磷。磷肥施用量多時，此兩劃分相對也增加較多，但有機質之性質會改變磷肥施用之影響，殘餘磷與鹽酸萃取磷受施肥管理之影響則較小。

關鍵詞：可水解氮、不可水解氮、碳酸氫鈉溶液可萃取磷、鹽酸溶液可萃取磷。

前言

土壤有機質的含量與特性影響土壤之物理、化學與生物性質，土壤有機質也是土壤品質之重要指標之一 (Doran *et al.* 1996; Reeves 1997)，而耕耘使土壤有機質含量下降 (Fließbach *et al.* 2007)。因此，適當的施用有機質肥料，乃今日農業上重要的施肥管理手段。不同有機質肥料組成各異 (Lee & Lian 2004)，在土壤中的降解、礦化速率亦不同 (Hadas &

Pornoy 1994; Eghball *et al.* 2002; Lin *et al.* 2003)，大部分施入土壤中的有機質會在短時間被分解 (Rasmussen & Collins 1991; Darwish *et al.* 1995)，故土壤要累積有機質需要長期不斷補充。

土壤有機質是土壤中植物所需的許多元素的重要來源，尤其是氮與磷 (Bauer & Black 1994)，其化學型態影響其對植物的有效性。土壤有機質亦是土壤中微生物的能源，影響微生物活性，進而影響土壤中許多物理、化學

投稿日期：2015年9月24日；接受日期：2015年12月9日。

* 通訊作者：Chiling@tari.gov.tw

¹ 國立台灣大學農業化學系研究生。台灣 台北市。

² 國立屏東科技大學農園生產系教授兼系主任。台灣 屏東縣。

³ 國立台灣大學農業化學系教授。台灣 台北市。

⁴ 農委會農業試驗所農業化學組研究員。台灣 台中市。

與生物反應。因此，有機質肥料之施用對土壤各種性質之影響，與單施用化學肥料是不同的 (Kaur *et al.* 2005; Mastro *et al.* 2006)，而不同的有機質種類影響亦不同。

土壤中的氮大部分為有機態 (Warren & Whitehead 1988; Kelley & Stevenson 1995)，施入土壤的有機質會影響土壤供氮能力，亦影響其在土壤中的累積量。施入土壤中的無機氮肥也會影響土壤氮的劃分 (fraction)，如利用 N-15 的研究顯示，第一生長季結束後約有 1/3 的化學肥料氮轉變為有機態，其中僅有少部分 (< 15%) 可在第二季被植物吸收 (Allen *et al.* 1973)。施肥量、作物移去量、土壤特性與氣候條件是影響有機與無機肥料磷在土壤中不同貯存庫分布之主要因子，McKenzie *et al.* (1992) 及 Schmidt *et al.* (1996) 之研究顯示，施用有機與無機肥料磷多年後，土壤中無機與有機磷均增加。

Bremner (1965a, 1965b, 1965c) 提出根據氮化合物的特性劃分 (fractionation) 土壤氮的方法，是廣被接受的土壤氮組成劃分法。Chang & Jackson (1957) 提出土壤磷的序列劃分，即用不同的萃取劑，將土壤中的磷按照化學特性劃分；Hedley *et al.* (1982) 則基於植物有效性的觀點發展序列劃分法。此 2 種磷劃分法經修改後 (Williams *et al.* 1967; Tiessin *et al.* 1984; Sui *et al.* 1999)，廣泛應用於土壤磷化學的研究。

國內對於農田土壤氮與磷的有效性研究甚多 (Tseng & Wang 1959, 1967; Chen 1971; Lee 1971; Lin *et al.* 1973a, 1973b; Lin *et al.* 1977; Lian *et al.* 1996)，然對土壤中氮與磷不同的化合物組成之研究卻相對較少。Lin *et al.* (1973a) 探討台灣主要水田土壤之氮劃分，顯示水田土壤氮中，不可水解氮 (nonhydrolyzable N) 占 24%，可水解全氮 (total hydrolyzable N) 占 76%，而可水解全氮中，胺基酸態氮 (amino acid-N)、可水解銨態氮 (hydrolyzable $\text{NH}_4\text{-N}$)、胺基醣態氮 (amino sugar N) 與不可辨認之可水解氮 (unidentified hydrolysable N) 分別占總氮之 36、25、5 及 10%。Lin *et al.* (1973b) 以 Bremner (1965a, 1965b, 1965c) 的

氮劃分法與 Chang & Jackson (1957) 的磷劃分法，分別探討經 48 年連用相同肥料之水田土壤之氮與磷劃分，顯示不可水解氮平均占總氮的 36%，可水解氮占總氮 64%，而可水解氮中，胺基酸態氮、可水解銨態氮、胺基醣態氮及不可辨認之可水解氮分別占總氮之 31、16、6 及 17%；而各處理之各種可水解氮劃分占總氮的比例不同，顯示施肥管理會影響水田土壤氮劃分組成。Olk *et al.* (1996) 表示經 30 年集約之水稻栽培，使土壤中不穩定的腐質酸劃分 (labile humic acid fractions) 發生改變；而 Keeney & Bremner (1964) 之研究則顯示不單是總氮含量，不同劃分氮的分佈亦受耕作管理影響，如胺基酸態氮在草原土壤高於耕作土壤；Lin *et al.* (1973b) 磷之研究則顯示不同施肥管理之水田經 48 年後，其土壤平均鈣結合態磷、鋁結合態磷、鐵結合態磷分別占總磷之 15、31 及 23%，其研究亦顯示施肥管理會影響水田土壤磷劃分組成。

氣候條件 (Tiessen *et al.* 1984)、土壤性質 (Agebenin & Tiessen 1994) 及施肥種類與時間等耕作條件，均顯著影響土壤氮與磷型態 (Asami 1971; Allison 1973; Richards *et al.* 1995; Xu *et al.* 2003)。因此，由長期不同施肥管理後土壤氮與磷劃分的變化，可瞭解施肥管理和土壤氮與磷供應的關係。

長期試驗可以評估農業系統永續性與決定作物栽培對土壤之影響。台灣有關不同有機質肥料和化學肥料共用、單用化學肥料或單用有機質肥料，於長期輪作下對土壤氮與磷劃分的影響之研究仍鮮少。因此，本研究旨在探討水旱田輪作下，經過 9 年不同的肥培管理對土壤氮與磷劃分的影響，以作為土壤營養管理之參考。

材料與方法

地點與試驗設計

試驗土壤取行政院農業委員會農業試驗所 (Taiwan Agricultural Research Institute) 永續農法試驗田 (35 號田) (24°1.8' N, 120°41.4' E)，屬砂頁岩非石灰質新沖積土 (Fluvaquen-

tic Dystudept)，質地為壤土。試驗前土壤之 pH 值為 5.3 (1 : 1 土水比)、Bray-1 可萃取磷 14.8 mg kg⁻¹、有機碳 12.5 g kg⁻¹、總氮 1.1 g kg⁻¹；土壤之陽離子交換容量 (cation exchange capacity) 為 7.4 cmol k⁻¹ (1.0 N neutral ammonium acetate)，交換性鉀、鈣與鎂分別為 74、625 與 149 mg kg⁻¹。

試驗自 1995 年 8 月開始進行，試驗田面積為 0.5 ha。本試驗樣品為經 9 年、水稻與玉米各栽培 9 期作之土壤，第 18 期作之作物為水稻。於 2004 年 6 月第 18 期作作物收穫後採集表層 (0–20 cm) 土壤，每小區採 4 個亞樣品組成一複合樣品。

試驗作物為春作水稻 (*Oryza sativa* L., cultivar ‘TNG 67’) 及秋作玉米 (*Zea mays* L., cultivar ‘TNG 1’)。使用之肥料為化學肥料與有機質肥料。化學肥料為硫酸銨 (種植水稻時施用)、尿素 (種植玉米時施用)、過磷酸鈣與

氯化鉀；有機質肥料則為豬糞堆肥、綠肥 (埃及三葉草 *Trifolium alexandrinum* L. 或田菁 *Sesbania roxburghii* Merr.) 及泥炭。試驗共設定 7 種施肥處理如表 1：(1) 未施肥之對照組 (代號 CK)、(2) 化學氮肥區 (代號 Chem-N)、(3) 堆肥區 (代號 Comp)、(4) 堆肥與化學氮肥區 1/3 氮肥用量共用區 (代號 Comp + 1/3 N)、(5) 堆肥與化學氮肥區 2/3 氮肥用量共用區 (代號 Comp + 2/3 N)、(6) 綠肥與化學氮肥區 1/3 氮肥用量共用區 (代號 GM + 1/3 N)、(7) 泥炭與化學氮肥區 1/3 氮肥用量共用區 (代號 Peat + 1/3 N)。化學氮肥區肥料三要素 (N-P₂O₅-K₂O) 之施用量於種植玉米時為 140-80-80 kg ha⁻¹，種植水稻時為 120-60-60 kg ha⁻¹，其餘處理施氮量與 9 年之總施肥量如表 2。每處理 4 重複，逢機完全區集排列，小區面積為 20 × 6 m²。各小區之位置及處理在試驗期間均維持不變。除未施肥之對照組外，其他處理均施用與化學

表 1. 各處理之氮肥施用量。

Table 1. Nitrogen application rate of different treatments.

Treatment	Application rate (kg ha ⁻¹)	
	Corn	Rice
CK	0 (without fertilization)	0 (without fertilization)
Chem-N	140 (urea N)	120 (ammonium sulfate N)
Comp	140 organic N (as compost)	120 organic N (as compost)
Comp + 1/3 N	140 (compost N) + 47 (urea N)	120 (compost N) + 40 (ammonium sulfate N)
Comp + 2/3 N	140 (compost N) + 93 (urea N)	120 (compost N) + 80 (ammonium sulfate N)
GM + 1/3 N	140 (green manure N) + 47 (urea N)	120 (green manure N) + 40 (ammonium sulfate N)
Peat + 1/3 N	140 (peat N) + 47 (urea N)	120 (peat N) + 40 (ammonium sulfate N)

表 2. 各處理 9 年之總施肥量。

Table 2. Total amounts of fertilization of different treatments during nine years.

Treatment	N (kg ha ⁻¹)	P (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)
CK	0	0	0
Chem-N	2,340	550	1,050
Comp	2,340	2,254	1,590
Comp + 1/3 N	3,120	2,254	1,590
Comp + 2/3 N	3,900	2,254	1,590
GM + 1/3 N	3,120	892	3,950
Peat + 1/3 N	3,120	790	1,350

肥料區相同量的化學磷肥與鉀肥。玉米與水稻之磷肥均以基肥施入土壤中，玉米之鉀肥 50% 當基肥，50% 於播種後 30 d 追施；水稻之鉀肥 60% 當基肥，40% 於移植後 20 d 追施。

採樣與一般化學分析

採樣時，每小區採取 3 個亞樣品 (sub-sample)，組成一個複合樣品 (composite)。經風乾、磨碎並過 20 mesh 之篩網，置於夾鏈袋中儲存，並進行化學分析。分析酸鹼度 (土水比 1:1) (McLean 1982)、飽和水導電度 (Rhoades 1982)、有機碳以有機碳分析儀測定 (Model 1010 O.I. Analytical, Texas, USA)、總氮濃度 (Bremner 1965a, 1965b, 1965c)、Bray 1-P (Olsen & Sommers 1982)、Mehlich III 可萃取之鉀、鈣、鎂、銅與鋅 (Mehlich 1984)。

氮的分析

總氮 (Bremner 1965a, 1965b, 1965c)：秤取 1.0 g 土壤置於分解管，加入 2 mL 去離子水靜置 30 min，加入 1.1 g 分解促進劑 (硫酸鉀：硫酸銅：硒 = 100:10:1)、0.2 g 水楊酸及 8 mL 濃硫酸，靜置過夜。加 0.3 g 硫代硫酸鈉 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)，在 350°C 下分解，分解後以蒸餾法定量。

無機態氮 (銨態氮 + 硝酸態氮) (Bremner 1965a, 1965b, 1965c)：5 g 土壤，以 50 mL 的 2.0 M 氯化鉀溶液萃取 2 h，過濾，以蒸餾法定量。

有機態氮劃分 (Bremner 1965a, 1965b, 1965c)：經無機態氮萃取後，土壤加 20 mL 6 N 鹽酸溶液，在 110–120°C 下煮沸、迴流 (reflux) 12 h，得土壤水解液 (soil hydrolysate)，再測定各型態態氮。

可水解全氮 (total hydrolyzable N)：適量中和過之水解液於分解管中，加入分解促進劑及濃硫酸分解，完成後，以蒸餾法定量。(1) 可水解銨態氮 (hydrolyzable ammonium-N)：適量水解液，加入過量氧化鎂 (MgO)，以蒸餾法定量。(2) 可水解銨及胺基醣態氮 (hydrolyzable ammonium-N + amino sugar-N)：適量水解液，加入磷酸鹽 - 硼酸鹽緩衝液 10 mL，以蒸餾法定量。(3) 胺基醣態氮 (amino sugar-

N)：可水解銨及胺基醣態氮之值減去可水解銨態氮。(4) 胺基酸態氮 (amino acid-N) (Horwitz 1980)：適量水解液以茚滿三酮 (ninhydrin) 試劑呈色，比色法定量。(5) 不可辨認的可水解氮：可水解全氮減去可水解銨態氮、胺基醣態氮及胺基酸態氮。

不可水解氮：總氮減去可水解全氮與無機態氮。

磷的分析

以 Sui *et al.* (1999) 序列萃取劃分磷：(1) 0.5 g 風乾土置於 30 mL 的離心瓶中，加入 28 mL 的去離子水，振盪 16 h，2,862× g 離心 30 min，濾膜 (0.45 μm) 過濾，以鉬藍法測磷 (Murphy & Riley 1962)，為水萃取磷 ($\text{H}_2\text{O-P}$)。(2) 加入 25 mL 0.5 M pH 8.2 之碳酸氫鈉溶液於上述沉澱土壤之離心管中，振盪 16 h，2,862× g 離心 30 min，濾膜 (0.45 μm) 過濾，以鉬藍法測磷，為碳酸氫鈉萃取無機磷 ($\text{NaHCO}_3\text{-IP}$)。(3) 加入 25 mL 0.1 M 氫氧化鈉溶液於上述沉澱土壤之離心管中，振盪 16 h，2,862× g 離心 30 min，濾膜 (0.45 μm) 過濾，以鉬藍法測磷，為氫氧化鈉萃取無機磷 (NaOH-IP)。(4) 加入 25 mL 0.1 M 鹽酸溶液於上述沉澱土壤之離心管中，振盪 16 h，2,862× g 離心 30 min，濾膜 (0.45 μm) 過濾，以鉬藍法測磷，為鹽酸萃取磷 (HCl-P)。(5) 將剩餘土壤乾燥後取出移入分解管中，加入 1 mL 1 N 氯化鎂溶液、5 mL 濃硫酸，360°C 下加熱分解 1 h，放置冷卻，加入 1 mL 混合酸 (濃硫酸：70–72% 過氧酸 = 92:2)，360°C 加熱 5 min 取出定量至 50 mL，以鉬藍法測磷，為殘餘磷 (residual-P)。(6) 分別取碳酸氫鈉及氫氧化鈉之萃取液 10 mL 置於試管中，以 0.4 g 的過硫酸銨 (ammonium persulphate) [$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$] 置於高壓釜中消化分解 (以 103.5 kPa，121°C 分別消化 60 min 及 90 min)，以 1 N 氫氧化鈉溶液調整 pH 後，以鉬藍法測磷，則分別為碳酸氫鈉及氫氧化鈉萃取全磷。將此濃度分別扣除碳酸氫鈉與氫氧化鈉萃取無機磷，則分別得碳酸氫鈉萃取有機磷 ($\text{NaHCO}_3\text{-OP}$) 與氫氧化鈉萃取有機磷 (NaOH-OP)。(7) 總磷以 Kjeldahl

法分解，以鉬藍法測定 (Bremner & Mulvaney 1982)。

統計分析

所有資料均以 SAS 軟體進行 ANOVA 分析，再以鄧肯氏多變域比較測定 (Duncan's multiple range test)，比較各處理間之差異。施入之磷肥量與土壤總磷濃度間，以及 Bray-1 有效磷、水萃取磷、碳酸氫鈉萃取無機磷、氫氧化鈉萃取無機磷、鹽酸萃取磷、殘餘磷、有機磷等劃分與土壤總磷濃度間之關係，進行線性迴歸分析 (linear regression analysis)。

結果與討論

土壤性質

經過 9 年水旱田輪作後，其土壤 pH 值在 5.26–6.04 之間，以 Chem-N 處理最低，Comp 處理最高 (表 3)。產酸氮肥 (acid-forming N fertilizer) 之連用會造成土壤 pH 值下降 (Lee *et al.* 2004; Kemmitt *et al.* 2006; Tan & Chen 2012)，然而，本研究連用產酸氮肥 9 年 18 作後，與起始之土壤 pH 值 (5.30) 相比，並未呈現土壤 pH 值下降的現象，應是與肥料性質 (如尿素為中性肥料)、土壤的酸鹼緩衝力大及連用的時間仍短有關。

土壤 EC 值均在 0.41–0.52 dS m⁻¹ 之間 (表 3)，以未施肥之 CK 處理最低。雖然不同的處理間有顯著差異，但屬於無鹽度之範圍 (Jackson 1958)，顯示本試驗田的施肥量未累積可

溶性鹽。

土壤有機碳濃度介於 12.0–13.2 g kg⁻¹ 之間 (表 3)。以施用堆肥與泥炭之 4 處理較高，然而此 4 處理間未達統計之顯著差異；CK、Chem-N 與 GM + 1/3 三處理較低，此 3 處理間亦未達統計之顯著差異。土壤總碳濃度之增加直接反應添加至土壤中之有機質的質與量，雖然堆肥比泥炭易分解 (Niklsch & Joergensen 2001)，然而其施用仍能累積土壤有機碳含量。施用化學氮肥之處理，其有機質來源為作物殘體與雜草，就所有施肥處理而言，在 Chem-N 處理下，回歸及施用到土壤的有機質量是較少的，而施入之化學氮肥因促發反應 (priming effect) (Kuzuyakov *et al.* 2000) 而增加土壤有機碳的降解，此由 Chem-N 處理之土壤有機碳濃度略低於起始土壤，即可說明此現象。

除氮、磷外其他營養要素之有效性如表 4。Mehlich 3 可萃取鉀濃度在 63.4–95.3 mg kg⁻¹ 之間，以 GM + 1/3 N 處理較高、其次為 Comp、Comp + 1/3 N、Comp + 2/3 N 與 Peat + 1/3 N 四處理，而 CK 與 Chem-N 兩處理最低。Mehlich 3 可萃取鈣濃度為 563–1,636 mg kg⁻¹，除 CK 處理外，其餘處理均在施入化學磷肥時同時施入相同量鈣。施用堆肥之 3 處理則因堆肥含有鈣，使土壤的 Mehlich 3 可萃取鈣濃度增加。土壤的 Mehlich 3 可萃取鎂濃度在 111–234 mg kg⁻¹ 之間，亦以施用堆肥之 3 處理較高，而 CK、GM + 1/3 N 與 Peat + 1/3 N 三處理較低，顯示不同肥料處理對鎂濃度略有影響。各處理土壤的 Mehlich 3 可萃取銅與

表 3. 土壤基本化學性質 (一)。

Table 3. Selected chemical properties of the soil (1).

Treatment	pH 1 : 1	EC (dS m ⁻¹)	Organic C (g kg ⁻¹)	Total N (mg kg ⁻¹)	Total P (mg kg ⁻¹)
CK	5.74 bc ^z	0.41 c	12.0 b	1,336 c	527 c
Chem-N	5.26 e	0.48 ab	12.1 b	1,367 c	665 b
Comp	6.04 a	0.44 bc	13.1 a	1,986 a	1,127 a
Comp + 1/3 N	5.85 ab	0.52 a	13.1 a	2,126 a	1,178 a
Comp + 2/3 N	5.84 ab	0.48 abc	12.9 a	2,035 a	1,109 a
GM + 1/3 N	5.45 de	0.41 bc	12.2 b	1,572 b	667 b
Peat + 1/3 N	5.55 cd	0.48 abc	13.2 a	2,021 a	741 b

^z Within columns, means followed by the same letter(s) are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

表 4. 土壤基本化學性質 (二)。

Table 4. Selected chemical properties of the soil (2).

Treatment	Meh-III ^z K (mg kg ⁻¹)	Meh-III Ca (mg kg ⁻¹)	Meh-III Mg (mg kg ⁻¹)	Meh-III Cu (mg kg ⁻¹)	Meh-III Zn (mg kg ⁻¹)
CK	63.4 c ^y	563 c	111 c	1.64 a	2.24 c
Chem-N	65.1 c	989 b	182 b	1.65 a	4.75 b
Comp	84.3 b	1,636 a	234 a	1.02 c	8.94 a
Comp + 1/3 N	84.4 b	1,620 a	226 a	1.08 bc	9.65 a
Comp + 2/3 N	78.7 b	1,565 a	226 a	1.13 bc	9.28 a
GM + 1/3 N	95.3 a	648 c	119 c	1.63 a	3.01 c
Peat + 1/3 N	82.8 b	851 b	128 c	0.69 d	2.61 d

^z Mehlich III extractable.

^y Within columns, means followed by the same letter(s) are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

鋅濃度有顯著差異，然而，施用堆肥之處理並未因堆肥中之銅濃度高於其他資材而呈現較高的濃度，應是被土壤吸持 (retain) 而無法顯現其有效性；施用堆肥之處理土壤之 Mehlich 3 可萃取鋅濃度則呈現增加現象，顯示鋅在土壤中累積且提高其植物有效性。此結果說明長期施含鋅濃度高的肥料會造成鋅的累積而使其有效性提高。

氮的分析

氮是自然界分佈最廣的元素之一，然存在於土壤中的氮僅占其中一小部分，其中對植物有效者的比例更少，卻為影響植物生長最明顯的養分因子之一。土壤中的氮大部分為有機態，無機態氮一般不超過總氮量的 5% (Warren & Whitehead 1988)。表 3 顯示，在施氮量相等的前提下，施堆肥之 Comp 處理之土壤總氮濃度顯著高於施用化學氮肥的 Chem-N 處理，即因化學氮肥易被植物吸收利用，甚至流失，而來自堆肥的氮，其中不易礦化的部分會在土壤中累積，而後再礦化。此亦可由 Chem-N 處理與 CK 處理土壤中的總氮濃度未達統計之顯著差異得證，顯示在 9 年 18 期作期間所施入的化學氮肥並未在土壤中留存、累積。堆肥與不同量化學氮肥共用，其各處理總氮濃度未達統計之顯著差異，顯示多施的化學氮肥並未在土壤中留存，即所施的化學氮肥並未增加土壤總氮；而 Comp + 1/3 N、GM + 1/3 N、Peat + 1/3 N 三種處理施入的總氮量是相同的，但

Comp + 1/3 N 與 Peat + 1/3 N 處理之土壤總氮濃度顯著高於 GM + 1/3 N，此結果說明綠肥中的氮殘存在土壤中的量較少，而堆肥與泥炭則相近，應是泥炭或堆肥分解相對較為緩慢，而綠肥被快速分解，在短時間內即礦化，其作用與化學氮肥相似。

無機態氮：土壤中無機態氮 (inorganic N) 主要是硝酸態氮和銨態氮，土壤 pH 值、溫度、水分與植被等因子皆會影響礦化作用。雖然不同的處理間無機態氮濃度有顯著差異，但是其值均低，顯示水稻栽培後土壤中的無機態氮被利用殆盡。在相同氮量之施肥處理中，Comp 處理的濃度顯著高於 Chem-N 處理，顯示殘存在土壤中的堆肥可持續礦化而維持土壤無機態氮的濃度。Flowers & Arnold (1983) 及 Chen & Lee (1997) 之研究結果顯示，施用堆肥可提升土壤氮有效性，亦說明其有較大的礦化潛能 (potential)。Peat + 1/3 N 處理的土壤總氮濃度高，但是無機態氮的濃度並未顯示較高，表示其不易礦化。

有機態氮：土壤中有機態氮主要存在於蛋白質、核酸、胺基酸和腐植質等之中，而以腐植質的比例較高。表 5 顯示本研究各處理之有機態氮占總氮之 97.7–98.7%，以施堆肥與泥炭之四處理顯著高於 CK、Chem-N 與綠肥之處理，綠肥之處理則顯著高於 CK 與 Chem-N 兩處理。泥炭不易分解，施用後會在土壤中逐漸累積碳與氮 (Eklind & Kirchmann 2000)。適量施用堆肥亦可累積土壤有機態氮，經 9 年

表 5. 土壤之無機態氮、有機態氮、可水解全氮與不可水解氮濃度。

Table 5. The concentrations of inorganic nitrogen, organic nitrogen, total hydrolysable nitrogen and non-hydrolysable nitrogen.

Treatment	Inorganic N (mg kg ⁻¹)	Organic N (mg kg ⁻¹)	THN ^z (mg kg ⁻¹)	Nonhydro. N (mg kg ⁻¹)
CK	22 d ^y (1.6) ^x	1,314 c (98.4)	782 e (58.6)	532 b (39.8)
Chem-N	26 cd (1.9)	1,341 c (98.1)	895 d (65.5)	446 b (32.6)
Comp	46 a (2.3)	1,939 a (97.7)	1,105 bc (55.7)	834 a (42.0)
Comp + 1/3 N	28 bcd (1.3)	2,099 a (98.7)	1,230 a (57.8)	869 a (40.9)
Comp + 2/3 N	40 ab (1.9)	1,996 a (98.1)	1,179 ab (57.9)	817 a (40.1)
GM + 1/3 N	36 abc (2.3)	1,537 b (97.7)	1,019 c (64.8)	518 b (33.0)
Peat + 1/3 N	29 bcd (1.3)	2,092 a (98.7)	1,168 ab (55.1)	924 a (43.6)

^z THN: total hydrolysable N; Nonhydro. N: non-hydrolyzable N.

^y Within columns, means followed by the same letter(s) are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

^x The number in parenthesis is the ratio of N fraction to total N in percentage.

施用後與泥炭之效果相近 (表 5)。僅施化學氮肥雖因作物產量比未施肥料之處理高而使回歸至土壤中的作物殘體量較多 (資料未示)，然而此兩處理土壤的有機態氮卻未達統計之顯著差異，可歸因於化學氮肥之促發反應 (Kuzyakov *et al.* 2000) 及處理時間仍短。雖然綠肥比堆肥或泥炭易分解，但與 Chem-N 處理比較，仍有累積土壤有機氮的作用。

有機態氮的化學型態影響土壤氮的有效性，許多研究指出，不同耕作和種植系統對土壤有機氮型態有顯著影響 (Allison 1973; Campbell *et al.* 1986)。Asami (1971) 之研究顯示，長期施用化學氮肥或化學氮肥與廐肥共用，會促進礦化作用和生物固定作用，進而影響土壤中不同的有機態氮劃分。

可水解全氮：可水解全氮占總氮的比例 55.1–65.5% (表 5) (平均為 59.3%)，比不可水解氮 (平均為 40.7%) 約多 20%。可水解氮被認為是可礦化氮 (Keeney & Bremner 1964; Ferguson & Gorby 1971)。施用化學氮肥或有機質肥料比不施肥的 CK 處理之土壤的可水解全氮濃度高，而 CK 與 Chem-N 兩處理的有機態氮未達統計之顯著差異，顯示施肥改變土壤的氮組成，施用堆肥則使可水解與不可水解氮均增加，可水解氮占總氮比例略降，施用化學氮肥使可水解氮占總氮的比例增加。Puranik *et al.* (1978) 及 Xu & Wu (1991) 的研究也顯示廐肥可提高可水解氮濃度；Rao & Ghosh

(1981) 之研究則顯示，不施肥料會使可水解氮大量耗損 (在 7 年內耗損量 12%)，亦指出可水解氮相對易降解；其他研究同樣顯示可水解氮在耕作下較易被礦化 (Rendig 1951; Keeney & Bremner 1964; Ferguson & Gorby 1971)。只施堆肥及堆肥與化學氮肥共用的 3 種處理，以 Comp + 1/3 N 處理的可水解全氮濃度顯著高於 Comp 處理，而 Comp + 2/3 N 處理的濃度與 Comp 處理雖未達統計之顯著差異，但是 Comp + 2/3 N 處理有較高的傾向，顯示堆肥與化學氮肥共用，可增加土壤可水解氮，同時占總氮的比例也略增。Keeney & Bremner (1964) 及 Bharadwaj & Omanwar (1994) 之研究也顯示，長期化學氮肥與廐肥共用，可增加土壤可水解氮。有機質肥料與化學肥料共用時，土壤可水解氮的增加比單施化學氮肥者多。施用同量氮肥不同有機質之處理則顯示，泥炭雖然比堆肥與綠肥難分解，但其施用卻比堆肥與綠肥處理者增加較多的可水解全氮 (表 5)。本研究亦依據 Bremner (1965a, 1965b, 1965c) 提出以氮化合物的特性劃分土壤氮的方法，將可水解氮再進行劃分如表 6，分析結果顯示，施用堆肥能增加可水解氮劃分之胺基酸態氮與可水解銨態氮濃度。

不可水解氮：不可水解氮占總氮的比例為 32.6–43.6% (表 5) (平均為 40.7%)，說明土壤中有 40% 氮為未知其組成且不瞭解其特性，Chen *et al.* (1977) 的研究同樣顯示土壤中不

表 6. 土壤中不同劃分可水解氮濃度。

Table 6. The concentrations of different fractions of hydrolysable nitrogen.

Treatment	Ammonium-N (mg kg ⁻¹)	Amino acid-N (mg kg ⁻¹)	Amino sugar-N (mg kg ⁻¹)	Unidentified-N (mg kg ⁻¹)
CK	263 d ^z (19.7) ^y	341 c (25.5)	46 c (3.4)	106 b (7.9)
Chem	279 cd (20.4)	361 c (26.4)	45 c (3.3)	141 b (10.3)
Comp	347 ab (17.4)	403 abc (20.3)	46 c (2.3)	307 a (15.5)
Comp + 1/3 N	379 a (17.8)	496 a (23.3)	61 bc (2.9)	389 a (18.3)
Comp + 2/3 N	382 a (18.8)	441 abc (21.7)	64 b (3.2)	403 a (19.8)
GM + 1/3 N	318 bc (20.2)	372 bc (23.6)	66 b (4.2)	299 a (19.0)
Peat + 1/3 N	363 a (17.1)	472 ab (22.3)	122 a (5.8)	315 a (14.9)

^z Within columns, means followed by the same letter(s) are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

^y The number in parenthesis is the ratio to total N in percentage.

可水解氮占總氮之 20–40%。不可水解氮為鍵結強的氮型態，是生物有效性較低的劃分，因其比可水解氮不易礦化 (Keeny & Bremner 1964)，其占總氮的比例會隨土壤有機質被分解的程度增加而上升。表 5 顯示不可水解氮，以施堆肥與泥炭之四處理較高，而此四處理間則未達統計之顯著差異；以 CK、Chem-N 及 GM + 1/3 N 三處理較低，此三處理間亦未達統計之顯著差異。此結果說明施用化學氮肥造成之促發反應，會增加土壤有機態氮的礦化。綠肥與化學氮肥共用之處理 (GM + 1/3 N 處理)，其不可水解氮低於施用相同氮量之其他有機質肥料處理 (Peat + 1/3 N 與 Comp + 1/3 N 處理)，說明來自綠肥中之有機態氮比堆肥與泥炭易降解，綠肥之易分解，亦造成促發反應。雖然在統計上差異不顯著，Peat + 1/3 N 處理之不可水解氮濃度高於 Comp + 1/3 N 處理，顯示在表觀上 (apparently)，施用泥炭會使土壤中不可水解氮增加多於施堆肥者，而與堆肥共用之化學氮肥則不影響土壤中不可水解氮濃度 (表 5)。

磷的分析

總磷：土壤含磷量受母質、成土作用和施肥的影響 (Dean 1949; Smeck 1985)。由於土壤中極大部分的磷以植物無效狀態存在，因此土壤總磷量與可供當季作物吸收利用的磷含量通常無相關性。本研究顯示，土壤經過 9 年耕作之後，土壤總磷濃度 (表 7) 與磷肥施用量

呈現極顯著線性相關 ($r = 0.988$, $P < 0.01$, $n = 7$)，顯示磷肥在土壤中累積。未施肥處理之土壤總磷濃度顯著低於施用磷肥之處理，是由於無外加之磷源，而栽培作物仍持續吸收其中的磷。單用堆肥及堆肥與化學氮肥共用的處理 (Comp、Comp + 1/3 N、Comp + 2/3 N)，其總磷濃度顯著高於其他處理者，係因此三處理之磷肥施入量較其他處理多。而 GM + 1/3 N 處理所施入土壤的磷量雖較 Peat + 1/3 N 處理多，但是土壤總磷的濃度卻較低，此應是由於綠肥快速分解，而使其中的磷在短時間礦化而被作物利用。

有效磷：土壤 Bray-1 磷以 CK 處理較低，但與 Chem-N 及 Comp 兩處理未達統計之顯著差異 (表 7)。然而，與起始土壤之 Bray-1 磷 (14.8 mg kg^{-1}) 比，CK 處理經過 9 年未施肥而栽培作物，其有效磷並未有大的改變，可能由其他型態的磷轉變而來 (Kapoor *et al.* 1982; Richards *et al.* 1995)；Comp 處理施入的磷比 Chem-N 處理多，但對 Bray-1 磷影響不大。

單用堆肥及堆肥與化學氮肥共用處理之土壤 Bray-1 磷以 Comp + 1/3 N 與 Comp + 2/3 N 兩處理較高，應與其 pH 值略低有關，與 Verma *et al.* (2005) 之結果相同。Reddy *et al.* (1999) 之研究亦顯示廐肥和化學氮肥共用，會使土壤有效磷濃度增加。除 Comp + 1/3 N 外，GM + 1/3 N 與 Peat + 1/3 N 兩處理的 Bray-1 磷濃度未達統計之顯著差異，以 Comp + 1/3 N 處理較高，除了經由堆肥施入的磷總量較多

表 7. 不同處理土壤之水溶性磷、有效性磷與總磷濃度。

Table 7. The concentrations of water soluble phosphorus, available phosphorus and total phosphorus under different treatments.

Treatment	H ₂ O-P ^z (mg kg ⁻¹)	Bray-1 P (mg kg ⁻¹)	Total-P (mg kg ⁻¹)	Recovery (%)
CK	3.4 c ^y (0.6) ^x	17.8 b	527 c	106
Chem-N	4.0 c (0.6)	30.5 b	665 b	102
Comp	16.8 a (1.6)	37.3 b	1127 a	92
Comp + 1/3 N	16.1 a (1.4)	65.3 a	1178 a	97
Comp + 2/3 N	15.6 a (1.5)	66.2 a	1109 a	95
GM + 1/3 N	5.8 bc (0.8)	31.9 b	667 b	108
Peat + 1/3 N	7.3 b (1.0)	34.4 b	741 b	104

^z H₂O-P: Water soluble P; Recovery: Recovery of fractionation.

^y Within columns, means followed by the same letter are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

^x The number in parenthesis is the ratio of P fraction to total P in percentage.

(2,254 kg P ha⁻¹) 之外，應與有機質之性質有關。堆肥之施用減少磷被固定因而使磷有效性提高 (Chen 1995)，泥炭與綠肥之效應則較小，因 GM + 1/3 N 處理所施入的磷比 Peat + 1/3 N 處理多，但 Bray-1 磷則相近。Singh & Jones (1976) 之研究顯示，有機質增加或減少土壤磷的吸附作用，與有機質之種類、磷濃度及加入之磷含量有關。Bray-1 有效磷與總磷呈顯著線性正相關 ($r = 0.856$, $P < 0.05$, $n = 7$)，顯示土壤總磷增加時，Bray-1 有效磷亦會增加。

水萃取磷：本研究磷劃分之回收率為 92–108% (表 7)。未施肥之 CK 處理之水萃取磷顯著低於 Comp 處理，但與 Chem-N 處理未達統計之顯著差異。Chem-N 處理之水萃取磷濃度與 CK 處理未達統計之顯著差異，即因所施入的水溶性磷易被作物吸收利用或在土壤中易轉變為不溶性的劃分。Comp、Comp + 1/3 N 及 Comp + 2/3 N 三處理之水溶性磷濃度未達統計之顯著差異，顯示其未受化學氮肥施用之影響。施用不同有機質的處理中，以 Comp + 1/3 N 處理顯著高於 Peat + 1/3 N 及 GM + 1/3 N 兩處理，Peat + 1/3 N 及 GM + 1/3 N 兩處理則未達統計之顯著差異，顯示堆肥、綠肥及泥炭等不同有機資材對土壤中水萃取磷濃度之影響不同，有機資材所含的磷含量越多，則有愈多的有機磷可供礦化，對水萃取磷的增加效果也越大 (Dormaar 1972; Singh & Jones 1976)。由於堆肥所含的磷含量比泥炭及綠肥多，可礦化

釋放的有效磷亦多，但 GM + 1/3 N 處理所施入的磷比 Peat + 1/3 N 處理多，卻未顯示相同的結果，顯示有機質的性質對土壤磷的轉變有甚大的影響。

Bray-1 有效磷與水可萃取磷 ($r = 0.810$, $P < 0.05$, $n = 7$) 呈顯著相關，顯示 Bray-1 磷增加時，水可萃取磷亦增加。

碳酸氫鈉萃取無機磷：碳酸氫鈉溶液萃取無機磷 (NaHCO₃-IP) 劃分為植物有效性磷之一部分 (Enwezor 1977; Bowman & Cole 1978)，是溶解度大之鈣結合態磷及部分鋁結合態磷 (Stewart *et al.* 1987)。NaHCO₃-IP 濃度與占總磷的比例與鹽酸萃取磷 (HCl-P) 及殘餘磷 (residual-P) 相近，為第 2 高之劃分 (表 8)。Chem-N 處理的濃度顯著高於 CK 處理，顯示未施肥而栽培作物會使此劃分的濃度下降，占總磷的比例也下降。Reddy *et al.* (1999) 亦有相同的研究結果，此亦說明施肥管理會影響磷的組成分，施用化學磷肥直接增加易變動的無機磷源。Comp 處理所施的磷肥多於 Chem-N 處理，因此 Comp 處理之 NaHCO₃-IP 濃度顯著高於 Chem-N 處理，但占總磷的比例則相近，顯示經由有機質肥料施入的磷易形成 NaHCO₃-IP。Hountin *et al.* (2000) 的研究顯示，長期施用豬糞廄肥增加土壤中 NaHCO₃-IP 濃度，也是因經由廄肥施入較多的磷所致。有機質降解所產生的有機酸，會與磷酸鐵與磷酸鋁化合物中的鐵、鋁鉗合，而使無機磷釋

表 8. 不同處理土壤之磷劃分濃度。

Table 8. The concentrations of different fractions of phosphorus (P) under different treatments.

Treatment	NaHCO ₃ -IP ² (mg kg ⁻¹)	NaHCO ₃ -OP (mg kg ⁻¹)	NaOH-IP (mg kg ⁻¹)	NaOH-OP (mg kg ⁻¹)	HCl-P (mg kg ⁻¹)	Residual-P (mg kg ⁻¹)
CK	75 c ^y (13.4) ^x	28 b (5.1)	130 c (23.4)	56 c (10.0)	119 d (21.4)	145 b (26.1)
Chem-N	129 b (19.0)	31 b (4.5)	203 b (29.9)	58 bc (8.5)	112 d (16.5)	142 b (21.0)
Comp	213 a (20.5)	43 ab (4.2)	347 a (33.4)	67 abc (6.4)	199 ab (19.2)	152 b (14.6)
Comp + 1/3 N	226 a (19.7)	41 ab (3.6)	385 a (33.6)	73 ab (6.4)	218 ab (19.0)	187 a (16.3)
Comp + 2/3 N	208 a (19.8)	55 a (5.2)	377 a (35.8)	69 abc (6.5)	178 bc (16.9)	151 b (14.4)
GM + 1/3 N	126 b (17.5)	40 ab (5.5)	207 b (28.8)	78 a (10.8)	113 d (15.8)	149 b (20.7)
Peat + 1/3 N	149 b (19.5)	29 b (3.8)	241 b (31.4)	68 abc (8.8)	136 cd (17.7)	137 b (17.9)

² NaHCO₃-IP: NaHCO₃ extractable inorganic P; NaHCO₃-OP: NaHCO₃ extractable organic P; NaOH-IP: NaOH extractable inorganic P; NaOH-OP: NaOH extractable inorganic P; HCl-P: HCl extractable inorganic P.

^y Within columns, means followed by the same letter(s) are not significantly different ($P = 0.05$) by Duncan's multiple range test.

^x The number in parenthesis is the ratio of P fraction to total P in percentage.

出，此亦可能是堆肥處理之 NaHCO₃-IP 濃度高的原因之一。單用堆肥及堆肥與化學氮肥共用的 3 種處理，所施入的磷肥量相同，其 NaHCO₃-IP 濃度與占總磷的比例亦未達統計之顯著差異，顯示所施用之化學氮肥未影響此劃分磷濃度與占總磷之比例 (表 8)。施用不同有機質肥料但相同量氮之 Comp + 1/3 N、Peat + 1/3 N 及 GM + 1/3 N 三處理中，Comp + 1/3 N 處理之 NaHCO₃-IP 顯著較高，此與處理施入的磷較多有關外，有機質的性質亦會影響其含量，如 Peat + 1/3 N 及 GM + 1/3 N 兩處理之 NaHCO₃-IP 濃度未達統計之顯著差異，但 GM + 1/3 N 處理所施入之磷較 Peat + 1/3 N 處理多。NaHCO₃-IP 濃度與 Bray-1 磷濃度 ($r = 0.859, P < 0.05, n = 7$) 呈顯著線性相關。

氫氧化鈉萃取無機磷：氫氧化鈉萃取無機磷 (NaOH-IP) 主要是土壤中鐵和鋁結合的磷，平均占總磷的比例為 30.9%，除了 CK 處理外，NaOH-IP 在所有處理中為最大之磷劃分 (表 8)。NaOH-IP 為無法立即脫附的磷，為中度不穩定磷 (moderately labile P) (Stewart *et al.* 1987)。Chem 與 Comp 兩處理，其 NaOH-IP 濃度顯著高於未施肥之對照組 (CK)，可歸因於留存肥料磷有甚大的比例轉為此劃分，亦說明磷肥添加會直接增加 NaOH-IP (McKenzie *et al.* 1992; Zhang *et al.* 2004)，未施肥而栽培作物則使此劃分減少。單用堆肥及堆肥與化學氮肥共用的 3 種處理，其 NaOH-IP 濃度未

達統計之顯著差異，但是多施化學氮肥之處理有較高的趨勢，顯示化學氮肥會影響堆肥處理土壤中此劃分磷的變化。Comp + 1/3 N、GM + 1/3 N 及 Peat + 1/3 N 三處理中，以 Comp + 1/3 N 處理之 NaOH-IP 濃度較高，可歸因於施用的磷較多，GM + 1/3 N 及 Peat + 1/3 N 兩處理間之 NaOH-IP 濃度未達統計之顯著差異，但以 Peat + 1/3 N 處理略高，而 Peat + 1/3 N 處理之磷施入量少於 GM + 1/3 N 處理，顯示土壤有機質之性質影響磷在土壤中的反應。NaOH-IP 濃度與 Bray-1 磷濃度 ($r = 0.907, P < 0.01, n = 7$) 呈顯著線性相關。

鹽酸萃取磷劃分：鹽酸溶液萃取磷 (HCl-P) 是土壤中穩定的磷，是生物無效的鈣鍵結磷 (Williams *et al.* 1980)，通常當土壤 pH 值越高或在石灰質土壤，土壤便含有較多的鈣結合磷。Chem-N 及 CK 兩處理之 HCl-P 濃度未達統計之顯著差異，顯示即使施用之磷肥中鈣含量高，以作物需求量之化學磷肥之施用，對此劃分之影響仍小，或許需要經更長的時間之後，才會有顯著差異。Zhang *et al.* (2004) 之研究亦顯示，中度不穩定的磷劃分轉為較穩定的組成分是一緩慢之反應。Reddy *et al.* (1999) 及 Lee *et al.* (2004) 之研究也顯示，長期之作物系統與施肥管理對土壤中穩定的磷劃分影響較小。

單施堆肥及堆肥與化學氮肥共用的 3 種處理的 HCl-P 未達統計之顯著差異，化學氮肥施

用量亦無一致的影響。Comp + 1/3 N、GM + 1/3 N 及 Peat + 1/3 N 三處理中，以 Comp + 1/3 N 處理之 HCl-P 濃度較高，可歸因於施用的磷含量較多，GM + 1/3 N 及 Peat + 1/3 N 兩處理之 HCl-P 濃度未達統計之顯著差異，但仍以 Peat + 1/3 N 處理略高。而 Peat + 1/3 N 處理之磷施入量少於 GM + 1/3 N 處理，亦說明土壤有機質之性質影響磷在土壤中的反應。

殘餘磷：殘餘磷劃分為所有抽出劑抽出後殘存之部分，為不能萃取的三氧化二鐵 (sesquioxide) 包裹之鐵鋁無機磷、礦物中與鈣鍵結的無機磷，以及較穩定的有機磷，可利用強酸高溫分解而得 (Bauwin & Tyner 1957)，其對植物有效性低 (Chang & Jackson 1957)。Oberson *et al.* (1993) 則認為殘餘磷大部分為有機，此劃分受有機質肥料施用影響。於本研究中並未顯示此項結果，因施用堆肥之 3 種處理，其殘餘磷濃度並不一致。所有處理之殘餘磷中，以對照組所占比例最高，其餘處理則因施肥管理而有不同的變化，主要是因施肥管理影響土壤中殘餘磷外之其他磷劃分的轉變。Reddy *et al.* (1999) 之研究亦顯示施用磷肥不影響殘餘磷量，但 Halvorson & Black (1985) 之研究則顯示定規施肥 (regular fertilization) 之殘存肥料磷可大幅增加不溶與化學穩定的殘餘磷劃分，而後再釋出被利用。在所有處理中，僅 Comp + 1/3 N 處理之殘餘磷濃度顯著較高，但其原因不易解釋，其他處理間則未達統計之顯著差異。

有機磷：土壤的碳酸氫鈉萃取有機磷 (NaHCO₃-OP) 及氫氧化鈉萃取有機磷 (NaOH-OP) 濃度是最低的兩個劃分，NaOH-OP 濃度則高於 NaHCO₃-OP，即由於氫氧化鈉溶液為較強的試劑，提取較多的 NaOH-OP 所致。Stewart *et al.* (1987) 認為 NaOH-OP 主要來自腐植化合物，是由植物殘體轉變而來。雖然不同處理間的 NaHCO₃-OP 有顯著差異，Comp + 2/3 N 處理仍較高，其餘則相近。NaOH-OP 以未施肥濃度較低，以 GM + 1/3 N 處理較高。從分析結果顯示，除施肥管理外，亦有其他因子影響土壤中磷的轉變，或者需要更長的時間，才能顯現其對有機磷的影響。

結論

水旱田輪作下經 9 年 18 作之栽培與施肥管理顯示，化學肥料施用對土壤總氮與有機態氮無增加之效應，但使可水解氮濃度與占總氮的比例上升；堆肥與泥炭增加土壤總氮、有機態氮、可水解氮與不可水解氮；與堆肥共用而多施之化學氮肥並無增加土壤總氮與有機態氮之效用；綠肥可稍提高土壤總氮與可水解氮；堆肥增加胺基酸態氮與可水解銨態氮濃度，施肥管理對於不可辨認的可水解氮與胺基醯態氮濃度之影響小。施用磷肥使磷劃分分佈趨勢改變，留存之肥料磷主要轉變成碳酸氫鈉萃取無機磷與氫氧化鈉萃取無機磷劃分，磷肥施用量多時，此兩劃分相對也增加較多，但有機質之性質會改變磷肥施用量之影響，殘餘磷與鹽酸萃取磷受施肥管理之影響小。綜言之，施用化學肥料並未造成土壤特性的劣化，但對土壤肥力的提高相當有限；施用綠肥則可稍提高土壤總氮與可水解氮 (即有效性氮)；而施用堆肥與泥炭均可顯著提高土壤總氮與可水解氮，但因泥炭為進口資材，價格偏高，且含磷量低。因此，在相同施氮量下，其施磷量相對較少，土壤總磷與有效磷相對較低。就施用堆肥而言，除可顯著增加土壤有機質、提升土壤總氮與總磷含量外，在有效性方面，施用堆肥之處理，其有效性氮與有效性磷含量亦高於其他處理組合，顯示施用堆肥對於增加土壤有效性氮、磷有正面助益，若欲維持較高的土壤肥力建議可施用堆肥。

誌謝

本研究經行政院國家科學委員會 NSC 95-2313-B-002-077 經費補助，謹致謝忱。

引用文獻

- Agebenin, J. O. and H. Tiessen. 1994. The effects of soil properties on the different phosphate sorption by semiarid soils from Northeast Brazil. *Soil Sci.* 157:36-45.
- Allen, A. L., F. J. Stevenson, and L. T. Kurtz. 1973. Chemical distribution of fertilizer nitrogen in soil as revealed by nitrogen-15 studies. *J. Environ. Qual.* 2:120-124.

- Allison, F. E. 1973. Soil organic matter and its role in crop production. p.58–66. *in*: Development in Soil Science. (Allison, F. E., ed.) Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 634 pp.
- Asami, T. 1971. Immobilization and mineralization of nitrogen compounds in paddy soils. V. Distribution of immobilized nitrogen to various organic N fractions. *J. Sci. Soil Manure* 42:103–108.
- Bauer, A. and A. L. Black. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58:185–193.
- Bauwin, G. R. and E. H. Tyner. 1957. The nature of reductant soluble phosphorus in soils and concretions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 21:250–257.
- Bharadwaj, V. and P. K. Omanwar. 1994. Long-term effects of continuous rotational cropping and fertilization on crop yields and soil properties. II. Effects on EC, pH, organic matter and available nutrients of soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42:387–392.
- Bowman, R. A. and C. V. Cole. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soil. *Soil Sci.* 125:95–101.
- Bremner, J. M. 1965a. Inorganic forms of nitrogen. p.1179–1237. *in*: Methods of Soil Analysis Part 2. (Black, C. A., ed.) American Society of Agronomy Inc. Madison, WI. 1572 pp.
- Bremner, J. M. 1965b. Organic forms of nitrogen. p.1238–1255. *in*: Methods of Soil Analysis Part 2. (Black, C. A., ed.) American Society of Agronomy Inc. Madison, WI. 1572 pp.
- Bremner, J. M. 1965c. Total nitrogen. p.1149–1178. *in*: Methods of Soil Analysis Part 2. (Black, C. A., ed.) American Society of Agronomy Inc. Madison, WI. 1572 pp.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Salicylic acid-thiosulfate modification on Kjeldahl method to include nitrate and nitrite. p.621–622. *in*: Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed. (Page, A. L., ed.) American Society of Agronomy: Soil Science Society of America. Madison, WI. 1692 pp.
- Campbell, C. A., V. O. Biederbeck, F. Selles, M. Schnitzer, and J. W. Stewart. 1986. Effect of manure and P fertilizer on properties of a black chernozem in Southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 66:601–614.
- Chang, S. C. and M. L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84:133–144.
- Chen, C. 1971. Study on the results of experiments on fertility of paddy soils in regions north of Miaoli in Taiwan. *J. Agric. Res. China* 20:21–39. (in Chinese with English abstract)
- Chen, J. H. 1995. Effect of organic fertilizers addition on the availability and mineralization of soil phosphorus. *J. Chinese Agric. Chem. Soc.* 33:533–549. (in Chinese with English abstract)
- Chen, J. H. and J. Y. Lee. 1997. The effects and evaluation of composts addition on the availability and mineralization of nitrogen in strongly acid soil. *J. Agric. Assoc. China New Ser.* 179:73–93. (in Chinese with English abstract)
- Chen, Y., F. J. Sowden, and M. Schnitzer. 1977. Nitrogen in Mediterranean soils. *Agrochimica* 27:7–14.
- Darwish, O. H., N. Persaud, and D. C. Martens. 1995. Effect of long-term application of animal manure on physical properties of three soils. *Plant Soil* 176:289–295.
- Dean, L. A. 1949. Fixation of soil phosphorus. *Adv. Agron.* 1:391–411.
- Doran, J. W., M. Sarrantino, and M. A. Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56:1–54.
- Dormaar, J. F. 1972. Seasonal patterns of soil organic phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 52:107–122.
- Eghball, B., B. J. Wienhold, J. E. Gilley, and R. A. Eigenberg. 2002. Mineralization of manure nutrients. *J. Soil Water Conserv.* 57:470–473.
- Eklind, Y. and H. Kirchmann. 2000. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: Nitrogen turnover and losses. *Bioresour. Technol.* 74:125–133.
- Enwezor, W. O. 1977. Soil testing for phosphorus in some Nigerian soils: I. Comparison of methods of determining available phosphorus in soils of south-eastern Nigeria. *Soil Sci.* 123:48–53.
- Ferguson, W. S. and E. J. Gorby. 1971. Effects of various periods of seed down to alfalfa and brome grass on soil nitrogen. *Can. J. Soil Sci.* 51:65–73.
- Fließbach, A., H. Oberholzer, L. Gunst, and P. Mäder. 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118:273–284.
- Flowers, T. H. and P. W. Arnold. 1983. Immobilization and mineralization of nitrogen in soil incubated with pig slurry or ammonium sulphate. *Soil Biol. Biochem.* 15:329–335.
- Hadas, A. and R. Pornoy. 1994. Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soils. *J. Environ. Qual.* 23:1184–1189.
- Halvorson, A. D. and A. L. Black. 1985. Fertilizer phosphorus recovery after seventeen years of dryland cropping. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:933–937.
- Hedley, M. J., J. W. B. Stewart, and B. S. Chauhan. 1982. Changes in the inorganic and organic soil phospho-

- rus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 46:970–976.
- Hountin, J. A., A. Karam, D. Couillard, and M. P. Cescas. 2000. Use of a fraction procedure to assess the potential for P movement in a soil profile after 14 years of liquid pig manure fertilization. *Agric. Ecosyst. Environ.* 78:77–84.
- Jackson, M. L. 1958. Soluble salt analysis for soils and waters. p.227–271. *in: Soil Chemical Analysis.* (Jackson, M. L., ed.) Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ. 485 pp.
- Kapoor, M. L., G. S. Sekhon, and B. Singh. 1982. Nitrogen, phosphorus and potassium nutrition of maize and wheat from the surface and subsurface layers. *Indian J. Ecol.* 9:264–269.
- Kaur, K., K. K. Kapoor, and A. P. Gupta. 2005. Impact of organic manures with and without mineral fertilizers on soil chemical and biological properties under tropical conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168:117–122.
- Keeney, D. R. and J. M. Bremner. 1964. Effect of cultivation on the nitrogen distribution in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:653–656.
- Kelley, K. R. and E. J. Stevenson. 1995. Forms and nature of organic N in soil. *Fert. Res.* 42:1–11.
- Kemmitt, S. J., D. Wright, K. W. T. Goulding, and D. L. Jones. 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 38:898–911.
- Kuzyakov, Y., J. K. Friedel, and K. Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.* 32:1485–1498.
- Lee, C. H., C. Y. Park, K. D. Park, W. T. Jeon, and P. J. Kim. 2004. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere* 56:299–304.
- Lee, T. Z. 1971. Effects of CaCO_3 , CaSiO_3 , and organic manure on the growth and yield of rice on a flooded acid latosolic soil. *J. Agric. Res. China* 20:47–55. (in Chinese with English abstract)
- Lee, Y. and S. Lian. 2004. Contents and variations of the major constituents in the organic manures in Taiwan. *J. Agric. Res. China* 46:181–189. (in Chinese with English abstract)
- Lian, S., C. H. Wang, and S. C. Lee. 1996. Tracing of the labelled urea-N flood-fertigated with different depths of water at knee-high stage under no-till conditions. *J. Agric. Res. China* 45:47–56. (in Chinese with English abstract)
- Lin, C. F., A. H. Chang, and C. C. Tseng. 1973a. The nitrogen status and nitrogen supplying power of Taiwan Soils. *J. Agric. Res. China* 22:186–203. (in Chinese with English abstract)
- Lin, C. F., T. S. Lee, A. H. Chang, and C. Y. Cheng. 1973b. Effects of some long-term fertilizer treatments on the chemical properties of soil and yield of rice. *J. Agric. Res. China* 22:241–262. (in Chinese with English abstract)
- Lin, C. F., W. K. Wu, and A. H. Chang. 1977. Effects of soil composition on the relationships between P-uptake of rice plant and soil test values for phosphorus fertilizer requirements. *J. Agric. Res. China* 26:138–146. (in Chinese with English abstract)
- Lin, Y. W., T. S. Liu, and C. H. Wang. 2003. Study on nitrogen mineralization characteristics of organic materials. *J. Agric. Res. China* 52:178–190. (in Chinese with English abstract)
- Masto, R. E., P. K. Chhonkar, D. Singh, and A. K. Patra. 2006. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a subtropical Inceptisol. *Soil Biol. Biochem.* 38:1577–1582.
- McKenzie, R. H., J. W. B. Stewart, J. F. Dormaar, and G. B. Schaalje. 1992. Long-term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations. I. In a Chernozemic soil. *Can. J. Soil Sci.* 72:569–579.
- McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement, p.199–224. *in: Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties.* 2nd ed. (Page, A. L., ed.) American Society of Agronomy: Soil Science Society of America. Madison, WI. 1142 pp.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15:1409–1416.
- Murphy, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31–36.
- Niksch, H. and R. G. Joergensen. 2001. Decomposition of peat, biogenic municipal waste compost, and shrub/grass compost applied in different rates to a silt loam. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164:365–369.
- Oberson, A., J. C. Fardeau, J. M. Besson, and H. Sticher. 1993. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biol. Fertil. Soils* 16:111–117.
- Olk, D. C., K. G. Cassman, E. W. Randall, P. Kinchesh, L. J. Sanger, and J. M. Anderson. 1996. Changes in chemical properties of organic matter with intensified rice cropping in tropical lowland soil. *Eur. J. Soil Sci.* 47:293–303.
- Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus, p.403–430. *in: Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical*

- and Microbiological Properties. 2nd ed. (Page, A. L., ed.) American Society of Agronomy: Soil Science Society of America. Madison, WI. 1142 pp.
- Puranik, R. B., D. K. Ballal, and N. K. Barde. 1978. Studies on nitrogen forms as affected by long term manuring and fertilization in vertisols. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 26:169–172.
- Rao, A. S. and A. B. Ghosh. 1981. Effect of continuous cropping and fertilizer use on the organic nitrogen fractions in a typical Ustochrept soil. *Plant Soil* 62:377–383.
- Rasmussen, P. E. and H. P. Collins. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45:93–134.
- Reddy, D. D., A. S. Rao, and P. N. Takkar. 1999. Effects of repeated manure and fertilizer phosphorus additions on soil phosphorus dynamics under a soybean wheat rotation. *Biol. Fertil. Soils* 28:150–155.
- Reeves, D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.* 43:131–167.
- Rendig, V. V. 1951. Fractionation of soil nitrogen and factors affecting the distribution. *Soil Sci.* 71:253–268.
- Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. p.167–178. *in: Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* 2nd ed. (Page, A. L., ed.) American Society of Agronomy: Soil Science Society of America. Madison, WI. 1142 pp.
- Richards, J. E., T. E. Bates, and S. C. Sheppard. 1995. Changes in the forms and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production. *Can. J. Soil Sci.* 75:311–318.
- Schmidt, J. P., S. W. Buol, and E. J. Kamprath. 1996. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: fractionation analyses. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 60:1168–1172.
- Singh, B. B. and J. P. Jones. 1976. Phosphorus sorption and desorption characteristics as affected by organic residues. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 40:389–394.
- Smeck, N. E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma* 36:185–199.
- Stewart, J. W. B., I. P. O'Halloran, and R. G. Kachanoski. 1987. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 67:147–163.
- Sui, Y., M. L. Thompson, and C. Shang. 1999. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63:1174–1180.
- Tan, T. W. and K. N. Chen. 2012. Effect of long-term application of chemical fertilizers on soil pH in different cropping systems. *J. Agric. Res. China* 61:355–360. (in Chinese with English abstract)
- Tiessin, H., J. W. B. Stewart, and C. V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of offering pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48:853–858.
- Tseng, H. D. and C. H. Wang. 1959. A study on the methods of determining available phosphorus of paddy soils in Taiwan. *J. Agric. Res. China* 8:11–20. (in Chinese with English abstract)
- Tseng, Y. I. and C. H. Wang. 1967. Study on the behavior of urea in soils. *J. Agric. Res. China* 16:58–68. (in Chinese with English abstract)
- Verma, S., S. K. Subehia, and S. P. Sharma. 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biol. Fertil. Soils* 41:295–300.
- Warren, G. P. and D. C. Whitehead. 1988. Available soil nitrogen in relation to fractions of soil nitrogen and other soil properties. *Plant Soil* 112:155–165.
- Williams, J. D. H., J. K. Syers, and T. W. Walker. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's Procedure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:736–739.
- Williams, J. D. H., T. Mayer, and J. O. Nriagu. 1980. Extractability of phosphorus from phosphate minerals common in soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44:462–465.
- Xu, C. X. and S. R. Wu. 1991. Composition of organic nitrogen in Lou soil and its changes under fertilization conditions. *Chinese J. Soil Sci.* 27:54–56. (in Chinese with English abstract)
- Xu, Y. C., Q. R. Shen, and W. Ran. 2003. Content and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization. *Chemosphere* 50:739–745.
- Zhang, T. Q., A. F. MacKenzie, B. C. Liang, and C. F. Drury. 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68:519–528.

Effect of Different Fertilization Managements on the Changes of Soil Nitrogen and Phosphorus Fractions under Rice and Corn Rotation for Nine Years

En-Tsun Chou¹, Chong-Ho Wang², Ren Shih Chung³, and Chi-Ling Chen^{4*}

Abstract

Chou, E. T., C. H. Wang, R. S. Chung, and C. L. Chen. 2016. Effect of different fertilization managements on the changes of soil nitrogen and phosphorus fractions under rice and corn rotation for nine years. *J. Taiwan Agric. Res.* 65(3):313–327.

Nitrogen (N) and phosphorus (P) are the most common limiting nutrient on the growth and yield of crops. There are many factors that influence the availability and transformation of N and P in soils. The objectives of this study were to evaluate the effects of different fertilization managements and application of different kinds of fertilizers on the different fractions of soil N and P under upland-lowland (corn and rice) rotation for nine years. There were seven treatments, namely, 1. CK (without fertilization), 2. Chem-N (applying chemical N fertilizer only), 3. Comp (applying compost with the same rate as N of Chem-N treatment), 4. Comp + 1/3 N (applying compost complemented with 33% of chemical N fertilizer as Chem-N treatment), 5. Comp + 2/3 N (applying compost complemented with 66% of chemical N fertilizer as Chem-N treatment), 6. GM + 1/3 N (applying green manure complemented with 33% of chemical N fertilizer as Chem-N treatment), and 7. Peat + 1/3 N (applying peat complemented with 33% of chemical N fertilizer as Chem-N treatment). The methods proposed by Bremner (1965a, 1965b, 1965c) and Sui *et al.* (1999) were used to fractionate N and P, respectively, into different fractions. The results indicated that soil total N and organic N were not affected the proportion of hydrolysable N increased by the application of chemical N fertilizer. Application of compost and peat resulted in increased soil total N and organic N. Furthermore, both hydrolysable and nonhydrolyzable N increased. The chemical N fertilizer applied with compost had no effect on the concentrations of soil total N and organic N. Application of green manure gradually increased soil total N and hydrolysable N. The unidentified hydrolysable N and amino sugar-N were less affected by different fertilization managements. Compost increased soil amino acid-N and hydrolysable ammonium N. Different fertilization managements resulted in change of concentration and proportion of different soil P fractions. Residual fertilizer P predominantly became sodium bicarbonate extractable inorganic P (NaHCO₃-IP) and sodium hydroxide extractable inorganic P (NaOH-IP). The greater the P fertilizer applied, the more the increase in these fractions of P. The characteristics of organic fertilizer affected the transformation of residual fertilizer P in the soil. Residual P and hydrochloric acid extractable P were less affected by fertilization management.

Key words: Hydrolyzable nitrogen, Nonhydrolyzable nitrogen, Sodium bicarbonate extractable phosphorus, Hydrochloric acid extractable phosphorus.

Received: September 24, 2015; Accepted: December 9, 2015.

* Corresponding author, e-mail: Chiling@tari.gov.tw

¹ Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC.

² Professor and Head, Department of Plant Industry, National Pintung University of Science and Technology, Pintung, Taiwan, ROC.

³ Professor, Department of Agricultural Chemistry, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC.

⁴ Research Fellow, Agricultural Chemistry Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.