

農業長期生態系之水田連作對土壤肥力及產量的影響：以雲林分場水田連作試驗區為例¹

潘佳辰、王瑞章、江汶錦²

摘 要

潘佳辰、王瑞章、江汶錦。2017。農業長期生態系之水田連作對土壤肥力及產量的影響：以雲林分場水田連作試驗區為例臺南區農業改良場研究彙報 72：41-51。

臺南區農業改良場雲林分場農業長期生態系試驗區已歷經 12 年，其中水稻連作區已 9 年。透過監測土壤品質指標及作物產量將有助於了解施肥處理對土壤及作物的影響。監測 0~15 公分土壤結果發現土壤電導度皆低於 0.6 dS m^{-1} 、土壤有機質維持在 0.7~2.4%。2014 年土壤電導度、酸鹼值、有效性鉀鈣鎂以及 2012 年土壤有效性磷出現與往年不同的變動，確切原因尚未釐清。分析個別土壤品質指標在各層土壤分佈情形發現，由於施肥位置大多位於表面，使得土壤電導度、有效性磷鉀及有機質皆是 0~15 公分最高；土壤酸鹼值及土壤有效性鈣鎂則是隨著土壤深度加深而升高。本研究將持續分析氣候變遷對其他土壤品質之影響程度。

現有技術：農業長期試驗區已設立 12 年，並累積多筆土壤分析數據。

創新內容：將分析數據圖像化，有助於釐清長期土壤變化。

對產業影響：依據本試驗肥料處理對土壤品質及產量之影響，有助於協助農友調整施肥量。

關鍵字：農業長期生態、土壤品質、土壤有機質

接受日期：2018 年 10 月 12 日

1. 行政院農業委員會臺南區農業改良場研究報告第 494 號。

2. 行政院農業委員會臺南區農業改良場助理研究員。712 臺南市新化區牧場 70 號。

前 言

以往農業相關的試驗大多偏重於短期且小試區試驗調查，通常無法評估長期人為介入下（施肥或施藥）對於農業環境及作物的影響。全球目前大約有 38 個國家設有長期生態研究站，除了中國大陸含有 16 個農業生態系研究站外⁽⁷⁾，其它國家絕大部分以自然生態系研究站為主。而美國 KBS (Kellogg Biological Station, Michigan State University) 農業生態研究站則是位於溫帶地區的研究站⁽⁶⁾。臺灣地處亞熱帶於 2006 年成立臺灣地區之長期生農業生態研究，分別於臺南區農改場雲林分場設立雙期作水田與水旱輪作田等兩種生態系、臺灣農業試驗所嘉義分所設立雙期作水田、水旱輪作田及荔枝原生種保存圃。藉由亞熱帶農業長期生態研究站的設立以利臺灣建立長期試驗數據，並且能與其他國家及其他氣候帶之農業生態研究站進行成果交流。雲林分場水田連作區，2006 年初期規劃為甘藷連作區，後於 2009 年改為水田連作區（王等，2012）⁽¹⁾。藉由長年監測土壤肥力變化及水稻產量變化，來探討肥料施用量的影響。

材料與方法

一、試驗地點及試區規劃

試驗地點位在臺南區農業改良場雲林分場試驗田區之水田連作區。本試驗區土壤屬於非石灰岩砂頁岩沖積土，包括仁德系、玉里林系等，土壤酸鹼質介於 4 ~ 6.5，土壤質地為砂質壤土⁽³⁾。分析本試驗區自 2007 開始，試驗初期設計之旱田連作區（代號 UU）（作物別為甘藷）於 2009 年變更為水田連作（代號 LL）。水稻品種為臺南 11 號。為使得土壤肥力分析資料脈絡更加完整，本報告將加入旱田連作區之資料。本研究之肥料施用量分為高投入（CA）、低投入（SA）。CA 定義為規畫為以現行之推薦管理方法進行施作，一及二期作之每公頃肥料施用量皆為 160 : 72 : 84（氮素：磷酐：氧化鉀，公斤）。SA 定義為考慮長久的最大利益為依歸，不求取現今最大的利益為目標，其管理方法隨時間與環境變動調整；施用量約為 CA 推薦量之 80%，故一及二期作之每公頃肥料施用量皆為 100 : 30 : 30（氮素：磷酐：氧化鉀，公斤）。不論 CA 或 SA，作物殘體皆回歸農田再利用，且暫不考慮畜牧廢棄物循環利用。病蟲害管理上，CA 之農藥使用按現行管理，SA 則在病蟲害嚴重時才使用農藥。CA 及 SA 各有 4 區試驗田。試驗田分佈、面積及重複數說明如圖 1。

二、土壤採樣、樣品前處理及分析方法

2006 至 2014 年之土壤分析是將各處理之各深度土壤逐一分析，故每批次總樣品數為 135 個；而 2015 至 2017 年，則是將每一重複數之相同深度的土壤混合後分析，故樣品數為 27 個。各期作採收前 5 ~ 7 天開始採土，每一試區包含 5 個採樣點，每個採樣點依據深度分為 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 50 公分。土壤採集送至臺南區農業改良場土壤肥料研究室分析。試驗土壤經風乾 3 ~ 5 天，過 1 mm 篩網去除作物殘體及石塊後待測。秤取待測土壤樣品 10.0 公克，再加去離子水 50 毫升，調製成土：水 (w/v) = 1 : 5 作成懸浮體，過濾後以導電度計 (WTW/Cond 730 型) 測定樣品 EC 值。秤取待測土壤樣品 10.0 公克，再加去離子水 10 毫升，調製成土：水 (w/v) = 1 : 1 作成懸浮體，平衡一小

時後以玻璃電極法 (TOADKK/HM-25R) 測定樣品酸鹼值。土壤有機質，2006 至 2015 年為秤取土壤 1.0 公克以總有機碳 (TOC) 分析儀 (Analytikjena /EA4000) 測定之，獲得總有機碳數據後再乘以 1.724 得有有機質數據。民國 2016 至 2017 年始土壤有機質分析儀器更換為 Soli TOC cube，秤取土壤 0.5 公克進樣分析，得分析數據後再乘以 1.724 得有有機質數據。土壤有效性磷以 Bray No.1 法測定，分光光度計波長為 882 nm。土壤秤取 5.0 公克放置於 50 毫升錐形瓶，加入 20 毫升 Mehlich No.1 萃取液，以 200 rpm 震盪 5 分鐘後過濾。濾液以感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP) (HORIBA/ULTIMA2) 測定土壤有效性鉀、鈣及鎂。



圖 1a. 2006 ~ 2008 年雲林分場試驗設計配置圖 (CA：慣行耕作模式；SA：永續耕作模式；I ~ IV：重複)

圖 1b. 2009 ~ 2017 年雲林分場試驗設計配置圖 (CA：慣行耕作模式；SA：永續耕作模式；I ~ IV：重複)

Fig. 1a. Experimental design on Yunlin Branch Station in 2006 ~ 2008 (CA: Conventional Agro-ecosystem, SA: Sustainable Agro-ecosystem, I ~ IV: Replicates)

Fig. 1b. Experimental design on Yunlin branch station in 2009 ~ 2011 (CA: Conventional Agro-ecosystem, SA: Sustainable Agro-ecosystem, I ~ IV: Replicates)

結果與討論

一、2006 年至 2017 年 0-15 公分土壤肥力指標變遷

(一) 土壤電導度 (EC)

耕作一般作物時建議土壤電導度可以維持在 0.6 dS m^{-1} (水土比 5 : 1) 以下，較有利於作物根系發展。本試驗於施用基肥、一追、二追及穗肥時，皆是將肥料施用在表面，肥料溶於水後再入滲至土壤中供水稻根系吸收。

由 2006 年至 2017 年之土壤 EC 值監測結果 (圖 2) 得之各期作土壤 EC 值皆低於 0.6 dS m^{-1} ，結果顯示 CA 及 SA 所推薦之施肥量，不論對於雙期作甘藷 (2006 至 2008 年，UU 表示)，或是雙期作水田 (2009 至 2017 年，LL 表示) 皆不會使得土壤 EC 值超過建議值。值得注意的是 2014 年第一期及第二期作土壤 EC 值出現較往年較大的變化幅度。由於各期作及各施肥時期之施肥量皆相同；且透過耕作履歷調

查作物產量及耕作記錄，結果發現產量方面並沒有大幅增加，原因目前不明。

(二) 土壤酸鹼值

土壤酸鹼值決定於母岩，土壤酸鹼值的高低也直接影響部分營養元素的有效性。根據歷史資料，雲林分場試驗區土壤酸鹼值，會隨著深度增加而逐漸升高，酸鹼值範圍由淺到深依序為：4.7 ~ 6.4 (0 ~ 15 公分)、5.3 ~ 6.8 (15 ~ 300 公分)、6.6 ~ 7.7 (30 ~ 50 公分)。本次研究分析表土 (0 ~ 15 公分) 酸鹼值變化趨勢發現 (圖 3)，除 2006 年二期作、2009 年一期作、2014 年一、二期作及 2017 年二期作有明顯的提高外，其餘年度土壤酸鹼值平均在 4.0 ~ 6.0，符合歷史數據。針對少數期作之土壤酸鹼值升高，原因可能是上一期作翻土時將某一區域之底土往上翻，採樣時將之列為樣品，故在分析時呈現較高的酸鹼值。

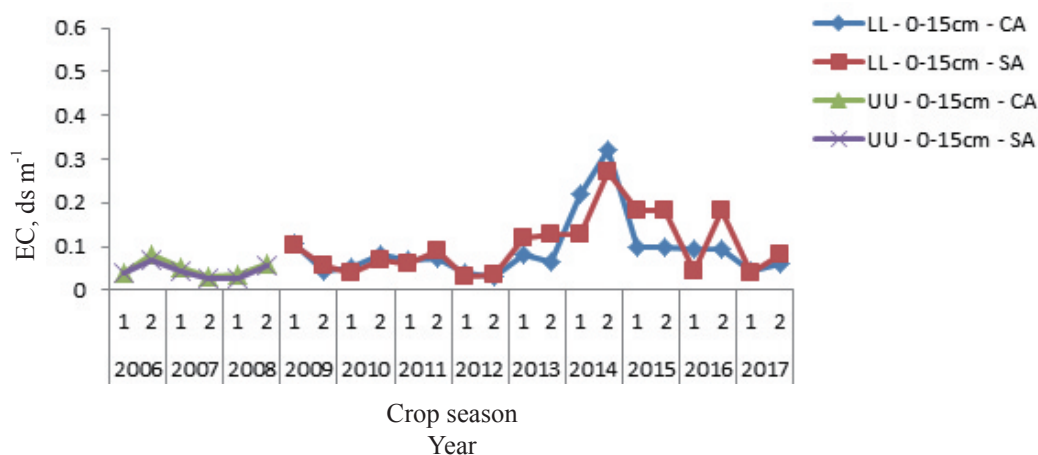


圖 2. 2006 至 2017 年 0 ~ 15 公分土壤電導度於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 2. The trend of soil EC in 0 ~ 15 cm soil depth under two fertilizer dose during 2006 to 2017

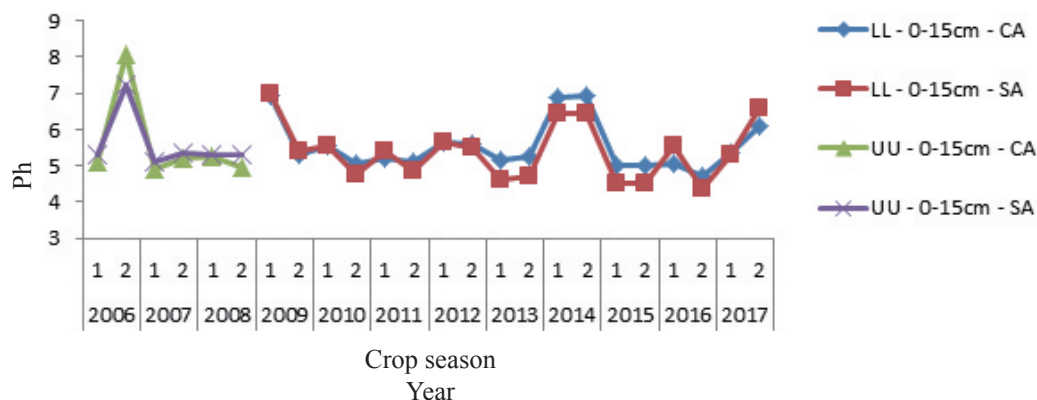


圖 3. 2006 至 2017 年 0 ~ 15 公分土壤酸鹼值於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 3. The trend of soil pH in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

(三) 土壤有機質

土壤有機質不僅提供植物及微生物養份外，也是土壤暫存養分的能力。耕作土

壤通常建議在 3% 以上，然而臺灣氣候往往高溫多濕，容易加速微生物分解土壤有機質。本試驗之有機質來源為水稻生產後將作物殘體直接翻入土壤中，且從未額外添加任何品目之有機質肥料。Pampolino 等人 (2008)⁽⁶⁾ 於研究中提到試驗土壤經過 15 年水田連作，試驗區之表土有機質呈現維持水平或是增加。表土有機質由監測資料 (圖 4) 所示，雲林分場水田連作區之表土有機範圍約略落在 0.7 ~ 2.4%，且維持動態平衡。由此一結果可以得之，雖然稻草為唯一的有機質來源，然而在 9 年水田連作下土壤有機質仍維持在一定水準。

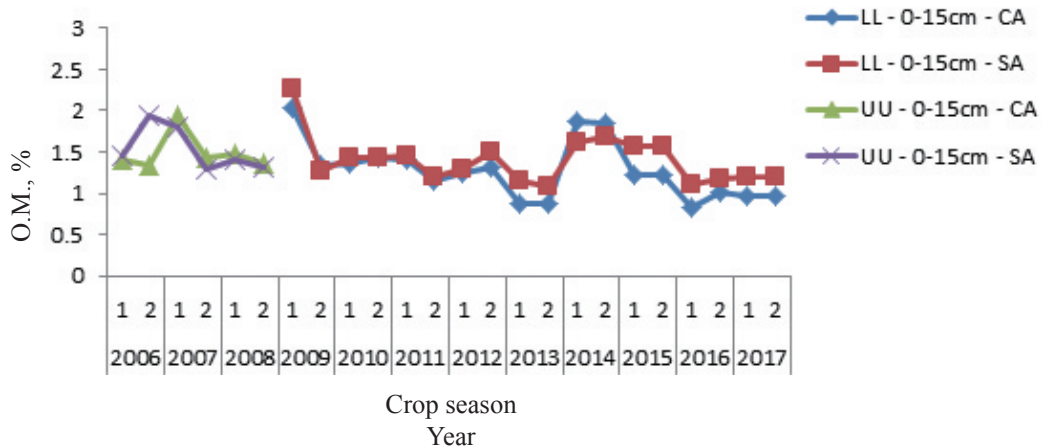


圖 4. 2006 至 2017 年 0-15 公分土壤有機質於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 4. The trend of soil O.M. in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

(四) 土壤有效性磷及鉀

本試驗於基肥、一追、二追及穗肥時期皆使用化學肥料來補充氮、磷及鉀。土壤有效性磷之監測資料 (圖 5) 顯示，2013 年前之土壤有效性磷大多落在 $60 \sim 110 \text{ mg kg}^{-1}$ ，而 2013 年後則出現一明顯的下降，且於往後幾年維持在 $15 \sim 45 \text{ mg kg}^{-1}$ 。由於施肥量不變、產量亦無明顯增加以及實驗室分析方法未做更動，故發生原因目前尚無法得之。就施肥處理效應而言，SA 處理於多數期作皆高於 CA。

由土壤有效性鉀肥之監測結果 (圖 6) 中發現，土壤於 2006 至 2008 年甘藷連作時，土壤有效性鉀肥不論 CA 或是 SA 皆有逐年增加的趨勢，三年間土壤有效性鉀提升約 20 mg kg^{-1} 。自 2008 年一期作開始實施水田連作後，土壤有效性鉀隨即於當年一期作後下降至 $40 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ 。實行水田連作後，多數期作之土壤有效性鉀不論施肥處理皆維持一動態平衡且 CA 處理略高於 SA 處理。而 2014 年一及二期作土壤有效性鉀提高之原因仍然不明。

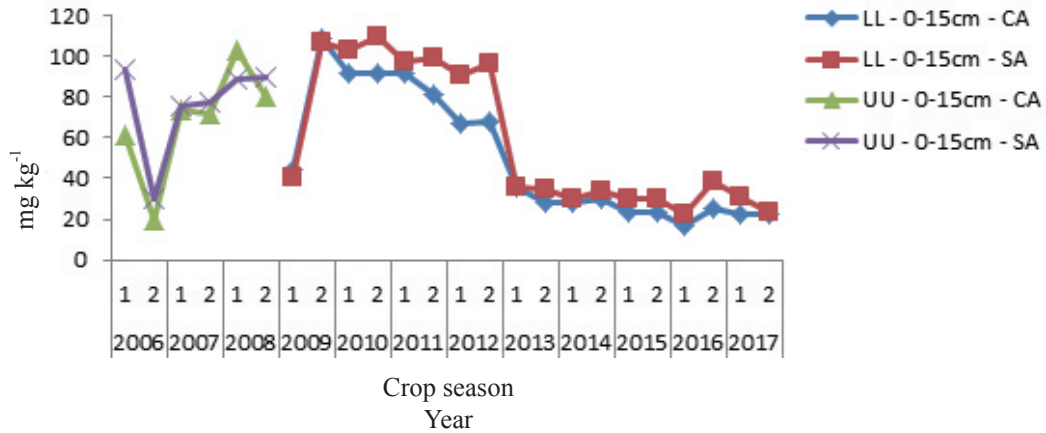


圖 5. 2006 至 2017 年 0 ~ 15 公分土壤有效磷於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 5. The trend of soil available P in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

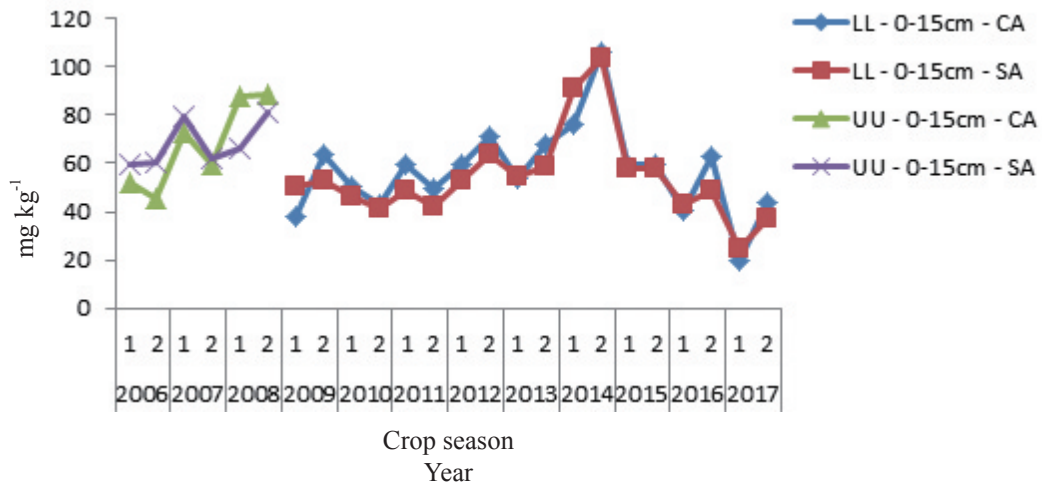


圖 6. 2006 至 2017 年 0 ~ 15 公分土壤有效鉀於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 6. The trend of soil available K in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

(五) 土壤有效鈣及鎂

本試驗所添加化學肥料僅補充氮磷鉀，故有效鈣鎂僅源自於原本自然環境或是區外移入（如灌溉水）。分析土壤有效鈣之監測資料（圖 7）後發現，有效鈣之變化趨勢與酸鹼值變化趨勢一致。Njoku 等人 (1987)⁽⁵⁾ 提到酸性土壤會使得鋁有效性提高及降低鈣之有效性。由歷史資料發現土壤有效鈣隨土壤深度加深而增加，且土壤酸鹼值隨深度加深而增加。可以初步確定土壤酸鹼值於 2006 年及 2014 年上升之原因之一可能為翻土時將某一區域之底土翻起。由土壤有效鎂之監測資料（圖 8）發現，其變化趨勢與有效鉀（圖 6）相似，皆於 2006 至 2008 年甘薯連作時，逐年增加。三年間土壤有效鎂提升約 80 mg kg⁻¹。自 2008 年一期作開始實施水田連作後，土壤有效鉀隨即於當年一期作後下降至 35 ~ 75 mg kg⁻¹。實行水田連作後，多數期作之土壤有效鎂皆維持一動態平衡。2014 年一及二期作土壤

有效性鎂提高之原因可能是因為底土被翻起所造成。

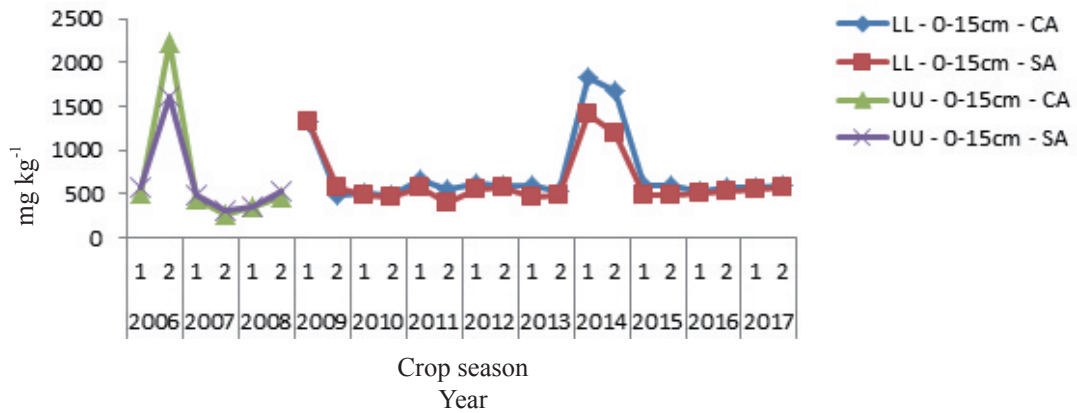


圖 7. 2006 至 2017 年 0~15 公分土壤有效性鈣於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 7. The trend of soil available Ca in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

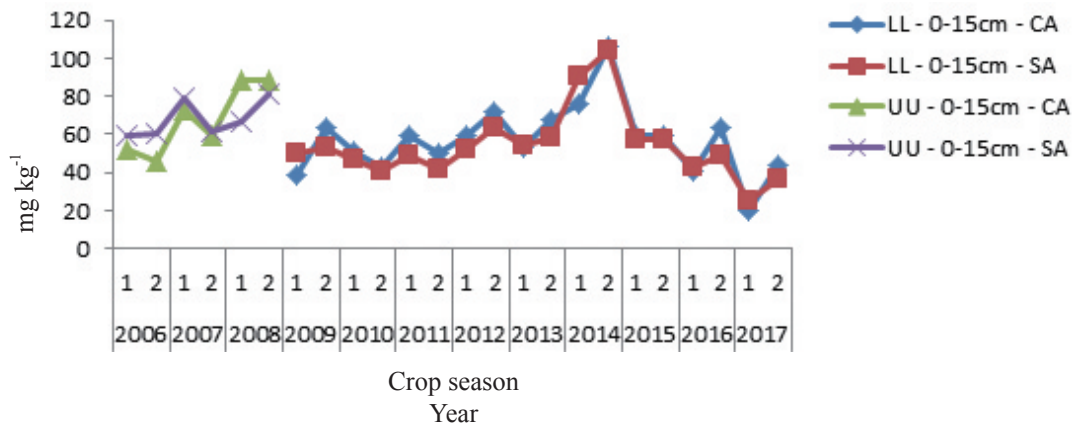


圖 8. 2006 至 2017 年 0-15 公分土壤有效性鎂於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 8. The trend of soil available Mg in three soil layer under two fertilizer dose during 2006 to 2017

二、土壤肥力指標於各層之分佈

分析各年度土層肥力監測資料(圖 9)，可以發現隨著施肥模式(是否額外添加肥料)或是施肥深度，皆會影響土壤肥力於各層土壤的表現。本試驗透過化學肥料補充作物所需氮磷鉀，且施用深度位於 0~15 公分，不論是 CA 或是 SA 皆使得土壤 EC (圖 9a)、有效性磷鉀(圖 9d、9e)於表土(0~15 公分)有最高的累積程度，並且漸次隨著深度而降低。作物殘體於耕作後直接回歸土壤有機質，且沒有額外添加任何型態之有機質肥料，使得土壤有機質分佈以表層土壤最多，且隨著土壤深度增加而降低。土壤酸鹼值與土壤有效性鈣鎂有類似的趨勢。0~15 公分土壤酸鹼值平均約 5.7，並且隨著深度增加而提升(圖 9b)；土壤有效性鈣(圖 9f)及鎂(圖 9g)於 0~15 公分之含量分別約為 600~650 及 80~90 mg kg⁻¹，並且隨著深度增加而逐漸提升。可能的原因為試驗中未添加鈣鎂肥，在作物長時間移除有效性鈣鎂後，使得表土酸鹼值逐漸下降。

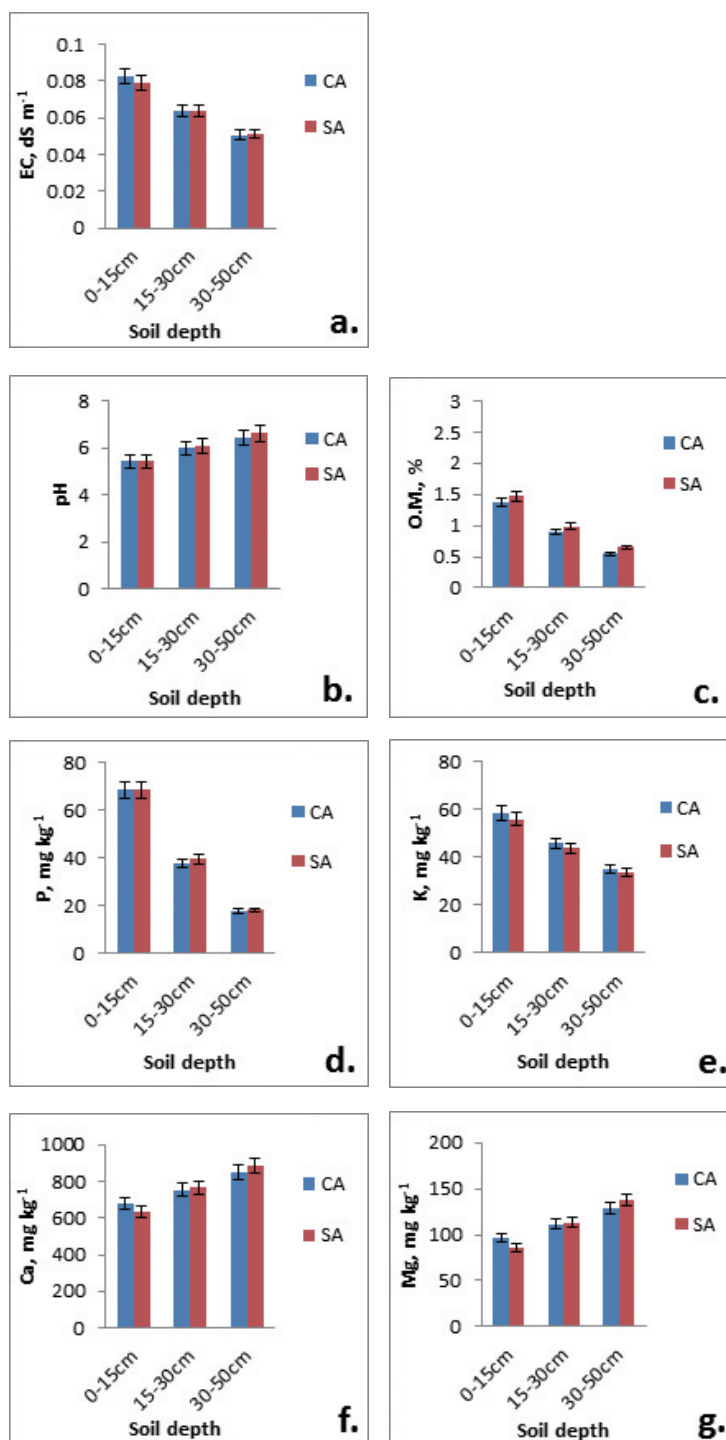


圖 9. 土壤品質指標於 0 ~ 15、15 ~ 30 及 30 ~ 50 cm 分佈情形 (a) EC, (b) pH, (c) soil O.M, (d) soil available P, (e) soil available K, (f) soil available Ca, (g) soil available Mg

Fig. 9. Soil quality index in 0 ~ 15, 15 ~ 30, and 30 ~ 50 cm (a) EC, (b) pH, (c) soil O.M, (d) soil available P, (e) soil available K, (f) soil available Ca, (g) soil available Mg

三、水田連作區之水稻產量變化

自 2009 年轉換為水田連作區後，以持續連作 9 年。平均產量落於每公頃 7,000 ~ 9,000 公斤。肥料處理對於水稻產量沒有統計上的差異。值得注意的是，就水稻產量監測數據結果 (圖 10) 顯示，並非施肥量高必定造成產量高。自 2012 年二期作後，除了 2014 年二期及 2015 年一期 CA 處理水稻產量較高外，其餘期作皆是以 SA 處理較高。

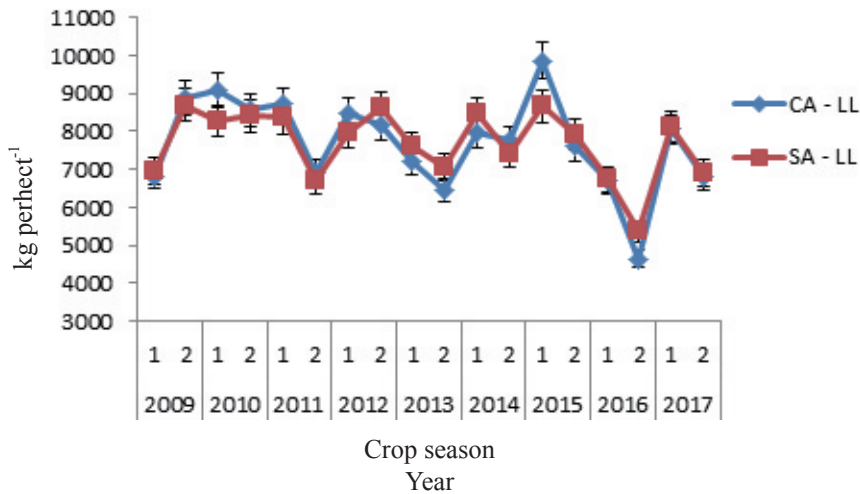


圖 10. 2009 至 2017 年水稻產量於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 10. The production of LL continuous cultivation under two fertilizer dose during 2009 to 2017

結論及建議

- 一、透過農業長期試驗可以觀察到各土壤肥力指標的變化。由監測 0 ~ 15 公分土壤結果得知，土壤 EC 值皆低於 0.6 dS m^{-1} ；土壤 pH 除了部分期作外，皆維持在 4 ~ 5.5，且土壤有效性鈣鎂之變化與土壤 pH 相似；土壤有機質則維持在 0.7 ~ 2.4%；土壤有效性磷於 2013 年起有一較大的變化波動；土壤有效性鉀於實施旱田連作後三年內鉀含量逐漸提升，並於水田連作實施第一年後降低，顯示水田確實有助於養分淋洗。
- 二、由土壤肥力指標於各層土壤分佈顯示，有效性磷、鉀及有機質皆因為施用於表面，使得分析數值皆以 0 ~ 15 公分最高。
- 三、本次報告亦發現 2014 年一二期作之 pH、EC、有效性鈣及鎂之監測量，相較於歷年資料有一較大的變化幅度。土壤有效性磷於 2013 年一期作後有明顯的降低，綜合目前各項書面紀錄仍無法將確切原因釐清。
- 四、在本次試驗結果顯示，水稻產量並非隨著施肥量高而提升產量。產量仍受到其他環境及生物因子影響⁽²⁾。
- 五、隨著氣候變遷議題逐漸受到重視，氣候變遷對於農業生態影響便顯得重要，對於後續如溫度變化、雨量變化對於土壤其他因子的影響仍需要研究機構投入研究，以期找出維持耕作土壤品質之因應方法。

致 謝

本文感謝行政院農業委員會農業試驗所計畫經費支持。行政院農業委員會臺南區農業改良場土壤肥料研究室團隊執行土壤樣品分析、雲林分場團隊調查水稻產量及田間管理。黃裕銘博士對於本文的釜正及指導。

引用文獻

1. 王瑞章、孫文章、江汶錦、林晉卿、黃山內。2012。農業長期生態系對作物生產力及土壤肥力的影響。臺南區農業改良場研究彙報第 60 號。
2. 有機水稻栽培管理技術。2015。臺南區農業改良場技術專刊。NO.161。
3. 陳琦玲、陳炳輝、黃山內、劉大江、郭鴻裕、陳健忠。2011。農業生態系長期生態研究目標與試驗設計。行政院農業委員會農業試驗所報告書。
4. Mollers Jr. MC (2010) Ecology: Concepts and Applications. 5th ed. p.533-534. McGraw-Hill.
5. Njoku BO, Enwezor WO, Onyenakwe BI (1987) Calcium deficiency identified as an important factor limiting maize growth in acid ultisols of eastern Nigeria. Fertil Res 14: 113-123.
6. Pampolino, Mirasol F.; Laureles, Eufrocino V.; Gines, Hermenegildo C. 2008. Soil carbon and nitrogen changes in long-term continuous lowland rice cropping. Soil Sci. Soc. Am. J. 72: 798-807.
7. Robertson Gp (2006) Long-term ecological research in agricultural ecology at the Kellogg biological station. In: proceeding of Workshop on Long Term Ecological Research in Agricultural Ecosystems. March 8, 2006. Taiwan Agricultural Research Institute. Wufeng, Taichung Hsien, Taiwan ROC. p. 3.

Effect of agricultural long term ecosystem on soil fertility and productivity of crops: continuous lowland rice system at Yunlin branch, TNDARES¹

Pan, C. C., J. C. Wang and W. J. Jiang²

Abstract

Agricultural long term ecosystem has been set up for 12th years at Yunlin branch, TNDARES. The 9-year-continuous lowland rice system has been included. The long term effect of fertilizer on soil quality and yield would be revealed by monitoring the soil and yield data. The results showed that soil EC was always below 0.6 dS m^{-1} , and soil O.M. was maintained at the range between 0.7 and 2.4%. The soil EC, pH, and soil available Ca and Mg raised in 2014 and soil available P dropped in 2012. The reason of these unusual issues was not known. Because the fertilizer were treated on soil surface, the soil EC, available P and K, and O.M. were highest in top soil (0-15 cm). Soil pH and available Ca and Mg increased with the increase of soil depth. Further study would focus on the effect of climate change on other soil quality.

What is already known on this subject?

The agricultural long term ecosystem station has been set up at Yunlin branch for 12 years. And soil data were well collected.

What are the new findings?

The soil data is into plotted diagram to make the soil trend more clearly.

What is the expected impact on this field?

The result of monitoring soil quality and rice yield can serval as a foundation to help farmer to adjust fertilization strategy.

Key words: agricultural long term ecosystem, soil quality, soil organic matter

Accepted for publication: October 12, 2018

1. Contribution No.494 from Tainan District Agricultural Research and Extension Station.

2. Assistant scientist, Tainan District Agricultural Research and Extension Station. 70 Muchang, Hsinhua, Tainan 712, Taiwan, R.O.C.