

農業長期生態系之水旱田輪作對土壤肥力的影響： 以雲林分場水旱田輪作試驗區為例¹

潘佳辰²、江汶錦²、王瑞章²、陳琦玲³

摘 要

潘佳辰、江汶錦、王瑞章、陳琦玲。2020。農業長期生態系之水旱田輪作對土壤肥力的影響：以雲林分場水旱田輪作試驗區為例。臺南區農業改良場研究彙報 75：77-87。

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，當中包含水旱輪作區及水田連作區。本次研究將以兩種施肥量對於水旱輪作土壤肥力之影響進行討論，並試圖以灌溉水質探討土壤肥力之影響。2007 年至 2018 年之土壤電導度監測結果顯示各期作土壤 EC 值皆低於 0.6 dS m^{-1} ；高投入制度 (CA) 及低投入 (SA) 制度所推薦之施肥量，在 2007 ~ 2018 年的監測期間，土壤電導度未高於 0.6 dS m^{-1} 。土壤有機質隨著土壤深度增加而降低：0 ~ 15 公分土壤有機質範圍 0.7 ~ 2.4%；15 ~ 30 公分土壤有機質平均約 1%；30 ~ 50 公分土壤有機質約 0.4 ~ 0.7%。土壤有效性磷及鉀以表土 0 ~ 15 公分最高，並且隨著土壤深度增加而下降。主要原因是施肥位置大多為表面撒施，故以表土磷累積量最高。土壤酸鹼值及有效性鈣鎂在 2009 及 2014 年有明顯提高的現象，進一步比對灌溉水酸鹼值及鈣鎂離子監測資料。結果顯示溝水酸鹼值於 2009 年及 2014 年並未出現明顯的變化，然而溝水之鈣鎂僅於 2009 年出現較高測值，尚無法充分解釋土壤有效性鈣鎂提高的原因。

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：水旱輪作田為台灣重要的耕作制度之一，將有助於後續進行田間養分循環相關研究。

關鍵字：農業長期生態、土壤品質、土壤有機質

接受日期：2020 年 4 月 29 日

1. 行政院農業委員會臺南區農業改良場研究報告第 520 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。

3. 行政院農業委員會農業試驗所研究員。

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⁽⁶⁾，其它國家絕大部分以自然生態系研究站為主。美國 KBS (Kellogg Biological Station, Michigan State University) 農業生態研究站位於溫帶地區的研究站⁽⁵⁾。臺灣地處亞熱帶於 2006 年建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及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。雲林分場水旱輪作區，自 2007 年規劃為水稻 - 甘藷連作區，後於 2009 年修改為水稻 - 落花生輪作區 (王等, 2012)⁽¹⁾。透過水旱輪作，可以藉由水田耕作移除旱作時所累積的肥力。藉由長年監測土壤肥力變化及產量變化，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旱田輪作區 (E 23.6366218, N 120.4743396)。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⁽²⁾。本試驗區自 2007 年正式開始實施水旱田輪作 (代號 LU)，作物制度為第一期作種植水稻 (品種：臺南 11 號)，第二期作種植甘藷 (臺農 57 號)；自 2009 年開始，第二期作修改為種植落花生 (臺南 14 號)。本研究之肥料施用量分為高投入 (CA)、低投入 (SA)。CA 定義規劃為以現行之推薦管理方法進行施作，2007 年至 2012 年一期作水稻施肥量為 160 : 72 : 84 (氮素：磷酐：氧化鉀，公斤)，2013 年至 2018 年一期作水稻施肥量為 200 : 72 : 84 (氮素：磷酐：氧化鉀，公斤)；甘藷施肥量為 80 : 45 : 180 (氮素：磷酐：氧化鉀，公斤)；落花生施肥量 45 : 45 : 80 (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；一期作水稻施肥量為 100 : 30 : 30 (氮素：磷酐：氧化鉀，公斤)；甘藷施肥量為 60 : 30 : 120 (氮素：磷酐：氧化鉀，公斤)；落花生施肥量 20 : 15 : 40 (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，依病蟲害發生時期施用藥劑防治。CA 及 SA 各有 3 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樣品逐一分析，每批次樣品數為 90 個；而 2015 至 2018 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 18 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 得有機質數據。2016 年至 2017 年土壤有機質分析儀器更換為 Soli TOC cube，秤取土壤 0.5 公克進行分析，得分析數據後再乘以 1.724 得有機質數據。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 1. (a)：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)。(b)：2009 ~ 2011 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. 1. (a): Experimental design on Yunlin Branch Station in 2006 ~ 2008 (CA: Conventional Agro-ecosystem, SA: Sustainable Agro-ecosystem, I-IV: Replicates); (b): Experimental design on Yunlin branch station in 2009 ~ 2011 (CA: Conventional Agro-ecosystem, SA: Sustainable Agro-ecosystem, I-IV: Replicates)

三、灌溉水質監測

雲林分場試驗田灌溉水分為溝水及井水，溝水為農田水利會提供之灌溉水，水源為濁水溪及清水溪，井水為分場內之地下灌溉水源。每個月採集溝水及井水分析水質。灌溉水採樣後，以玻璃電極法分析灌溉水酸鹼值 (Multi 3630 IDS SET F)。灌溉水先以 0.2 um 濾膜過濾灌溉水樣品後，以感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP) (HORIBA/ULTIMA C) 分析鈣及鎂。

結 果

一、2007 年至 2018 年 0 ~ 15 公分土壤肥力指標變遷

(一) 土壤導電度 (EC)

由 2007 年至 2018 年之土壤導電度值監測結果 (圖 2) 顯示不論施肥處理及耕作模式, 各期作土壤導電度值皆低於 0.6 dS m^{-1} 。

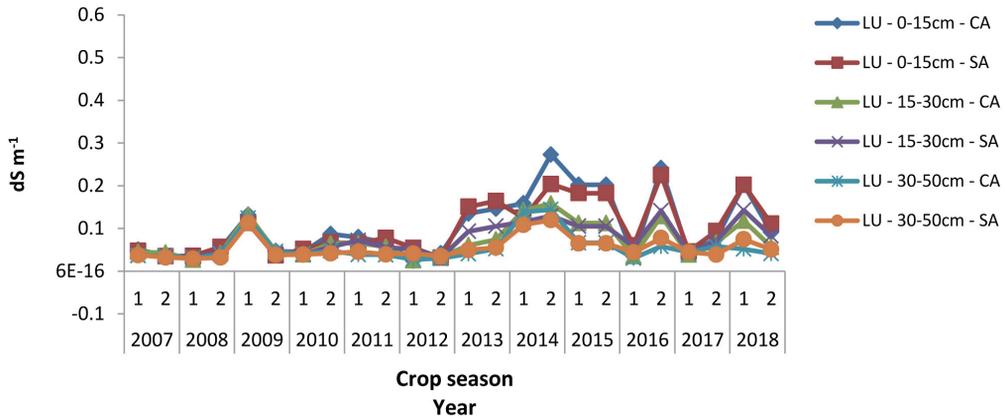


圖 2. 2007 至 2018 年 0 ~ 15 公分土壤導電度於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 2. The trend of soil EC in 0-15 cm soil depth under two fertilizer dose during 2007 to 2018

(二) 土壤有機質

土壤有機質由監測資料 (圖 3) 所示, 雲林分場水旱輪作區土壤有機質隨著土壤深度增加而降低: 0 ~ 15 公分土壤有機質範圍約略落在 0.7 ~ 2.4%; 15 ~ 30 公分土壤有機質平均約在 1%; 30 ~ 50 公分土壤有機質約在 0.4 ~ 0.7%。

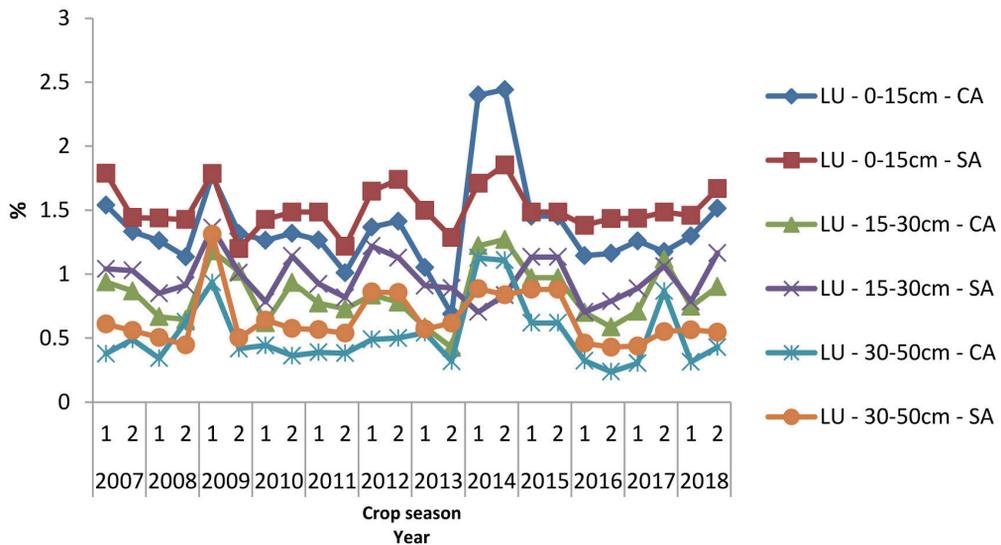


圖 3. 2007 至 2018 年 0 ~ 15 公分土壤有機質於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 3. The trend of soil O.M. in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

(三) 土壤有效性磷及鉀

試驗過程中主要以化學肥料補充氮、磷及鉀。土壤有效性磷之監測資料如

圖 4，土壤有效性磷以表土 0 ~ 15 公分最高，並且隨著土壤深度增加而下降。值得注意的是 2013 年前之表土土壤有效性磷大多落在 60 ~ 110 mg kg⁻¹，而 2013 年後則出現明顯的下降，且於往後幾年維持在 15 ~ 45 mg kg⁻¹。

土壤有效性鉀肥之監測結果如圖 5，與土壤有效磷結果相似，有效性鉀累積量以表土 0 ~ 15 公分最高，並且隨著土壤深度增加而下降。土壤有效性鉀自 2007 至 2018 年，不論土層深度呈現逐漸下降的趨勢。

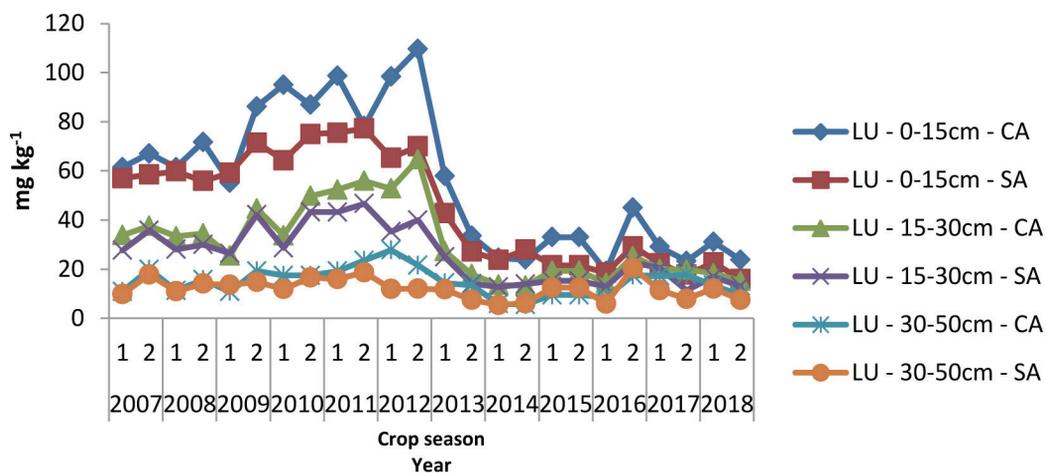


圖 4. 2007 至 2018 年 0 ~ 15 公分土壤有效性磷於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 4. The trend of soil available P in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

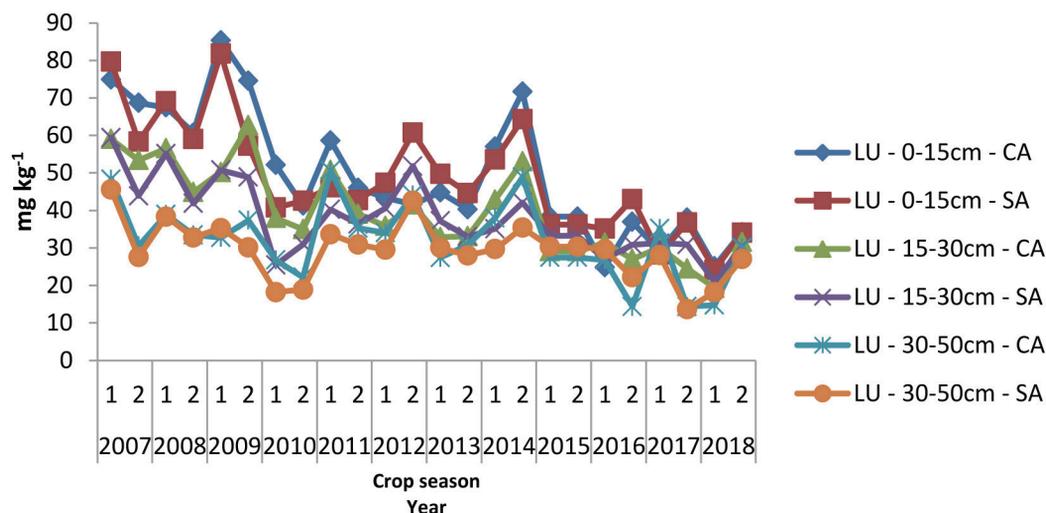


圖 5. 2007 至 2018 年 0 ~ 15 公分土壤有效性鉀於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 5. The trend of soil available K in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

(四) 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。根據土壤調查結果顯示(圖 6)，試驗田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。而在本試驗實際監測土壤酸鹼值，結果顯示土壤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 ~ 30 公分)、6.6 ~ 7.7 (30 ~ 50 公分)。

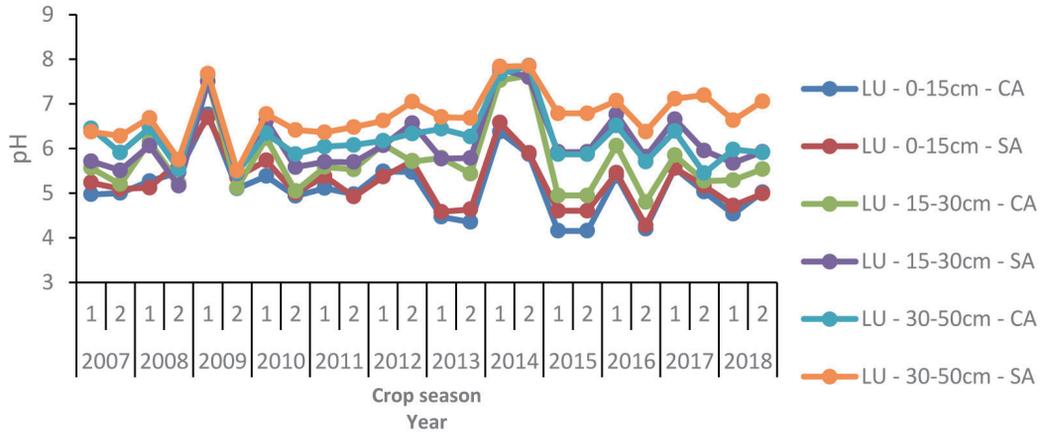


圖 6. 2007 至 2018 年 0-15 公分土壤酸鹼值於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 6. The trend of soil pH in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

(五) 土壤有效性鈣及鎂

土壤有效性鈣及鎂之監測資料(圖 7、8)後發現，有效性、鈣鎂之變化趨勢與酸鹼值變化趨勢一致。由監測資料發現土壤有效性鈣、鎂隨土壤深度加深而增加，且土壤酸鹼值隨深度加深而增加。2009 年及 2014 年之土壤有效性鈣及鎂有一明顯的高值，對照土壤酸鹼度變化趨勢亦在這兩個期作土壤酸鹼值有較高的現象。

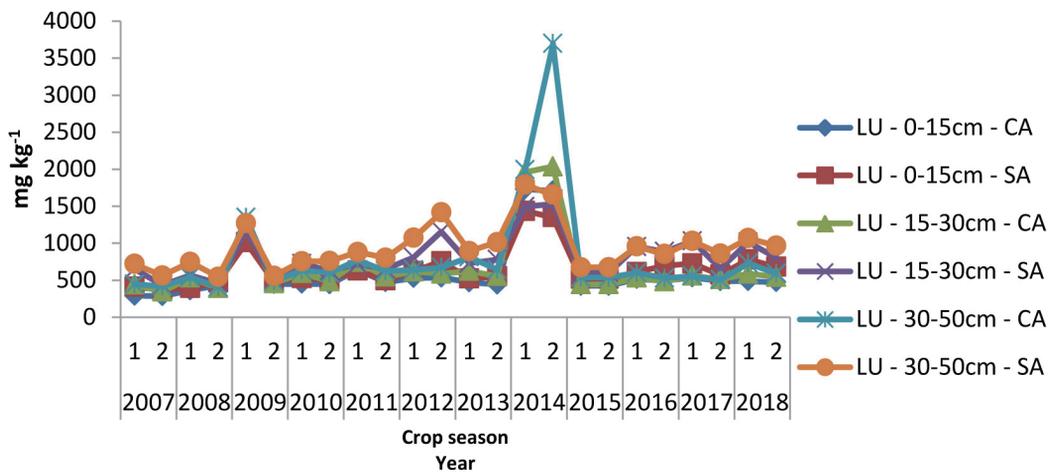


圖 7. 2007 至 2018 年 0-15 公分土壤有效性鈣於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 7. The trend of soil available Ca in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

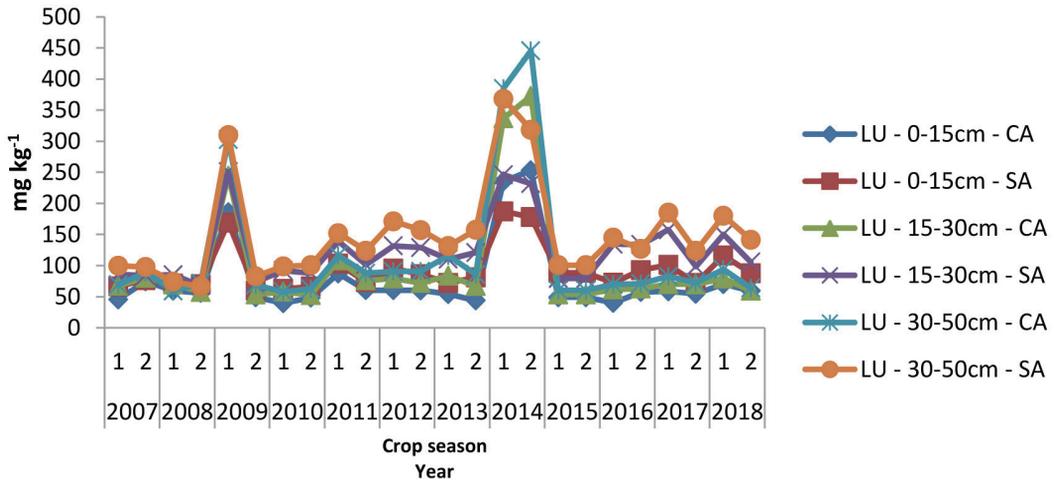


圖 8. 2007 至 2018 年 0-15 公分土壤有效性鎂於兩種施肥處理下之變化趨勢

Fig. 8. The trend of soil available Mg in three soil layer under two fertilizer dose during 2007 to 2018

二、2006 ~ 2018 年灌溉水質監測結果

雲林分場灌溉水源包含溝水以及井水，溝水為農田水利會提供之灌溉水，水源為濁水溪及清水溪，井水為分場內之灌溉水源。水田淹水時期，當灌區輪流供水時，會改採井水對試驗田進行灌溉。溝水酸鹼值介於 6.6 ~ 8.8；井水酸鹼值介於 6.2 ~ 7.3，根據監測結果顯示 (圖 9) 溝水及井水酸鹼值在監測期間，灌溉水質酸鹼值呈現動態平衡。

灌溉水中鈣離子含量監測結果 (圖 10)，溝水鈣離子含量介於 19 ~ 95 mg kg^{-1} ，平均值為 53.4 mg kg^{-1} ；井水鈣離子含量介於 4 ~ 22 mg kg^{-1} ，平均為 10.7 mg kg^{-1} 。井水鈣離子含量低於溝水，而井水鈣離子隨採樣時間不同而有較大的變異。2006 ~ 2009 年溝水鈣離子相較於 2009 年以後有較高的趨勢。

灌溉水中鎂離子含量監測結果 (圖 11)，水中鎂離子含量介於 4 ~ 42 mg kg^{-1} ，平均值為 15.9 mg kg^{-1} ；井水鈣離子含量介於 1 ~ 4 mg kg^{-1} ，平均為 3.03 mg kg^{-1} 。井水鎂離子監測值維持穩定，而溝水之鎂離子監測值隨採樣時間不同有較明顯的變化。2006 ~ 2009 年溝水鎂離子相較於 2009 年以後有較高的趨勢。

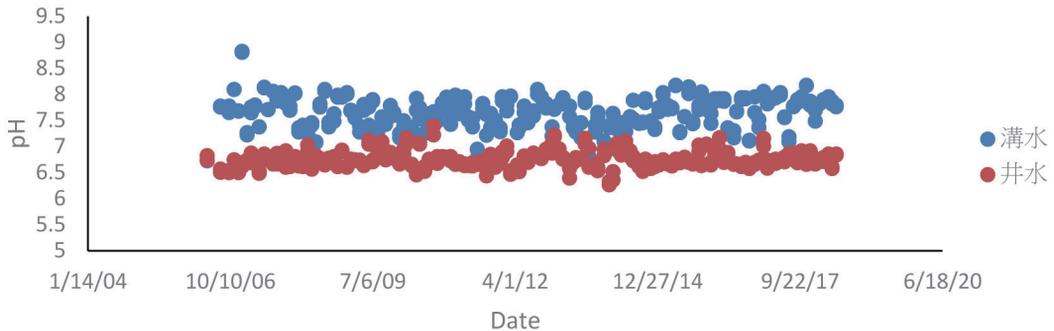


圖 9. 雲林分場灌溉水酸鹼值監測

Fig. 9. The pH of irrigation water in Yunlin branch

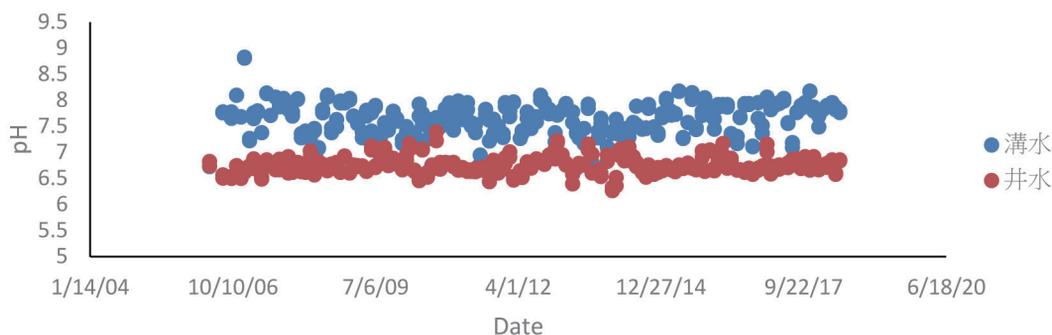


圖 10. 雲林分場灌溉水鈣離子監測

Fig. 10. The Ca concentration of irrigation water in Yunlin branch

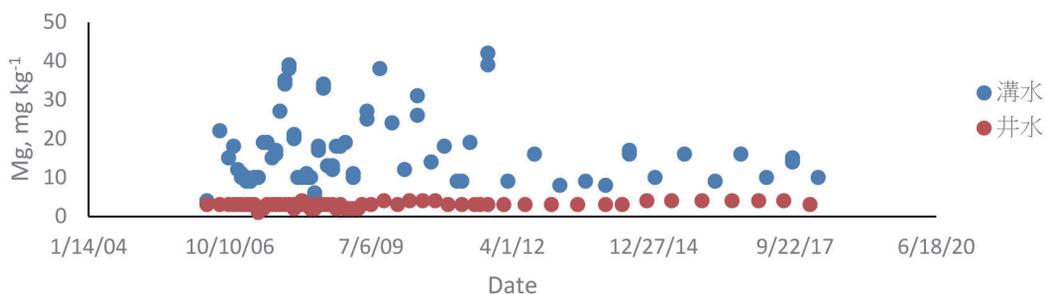


圖 11. 雲林分場灌溉水鎂離子監測

Fig. 11. The Mg concentration of irrigation water in Yunlin branch

討 論

一、土壤肥力變遷

土壤導電度在多年的監測下皆維持在 0.6 dS m^{-1} (水土比 5 : 1) 以下，顯示目前截至目前為止試驗所投入的肥料量並不會令土壤導電度過度累積。

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。本試驗不論水田或是旱田，在採收後會將作物殘體直接翻入土壤中，作為唯一的土壤有機質來源為水稻以及甘藷或落花生殘體。Pampolino 等人 (2008)⁽⁵⁾ 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。由監測結果顯示與文獻類似，不論土深度為何，土壤有機質含量在結果上維持一動態平衡。又由於作物殘體通常翻耕在土壤 0 ~ 15 公分，故土壤有機質以 0 ~ 15 公分累積量最多。

針對土壤有效性磷在 2012 年之後呈現大幅度的降低，在施肥量不變、產量亦無明顯變化以及實驗室分析方法未做更動之條件下，初步可排除變更試驗方法所造成的誤差，但實際原因仍然不明；而土壤有效性鉀在監測結果下發現不論施肥處理或是土壤深度，皆隨著年度增加而遞減，然而作物產量並未發現逐漸遞減的現象。可以推論就目前土壤有效性鉀的含量仍可以維持作物產量，然而就維持土壤有效性鉀含量而言，目前的施肥量有不足的可能，仍需要透過長期的調查以觀察土壤肥力對作物的交互影響。

由土壤酸鹼值監測結果發現，表土土壤酸鹼值最低並且隨著深度提高而升高，其可能原因是翻土深度大多是在 0 ~ 15 公分，土壤有機質與空氣反應後，會釋出有機酸，將會降低土壤酸鹼值；另一方面施肥位置皆以表面為主，長期施用亦會造成土壤酸鹼值偏低。而中、底層土壤在相對厭氧環境下，會使得土壤酸鹼值提高。本試驗所添加化學肥料僅補充氮磷鉀，故有效性鈣鎂僅源自於原本自然環境或是區外移入（如灌溉水）。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，故在監測結果中可以發現土壤有效性鈣鎂含量會隨著深度增加而增加。

針對 2009 以及 2014 年之土壤酸鹼值及有效性鈣鎂升高之現象，其明確原因尚不清楚，然而可由兩個面向進行討論：其一為翻土時底層土壤被翻上來，並且被採樣進行分析；其二為境外移入酸鹼值較高的物質對土壤酸鹼值進行改變。然而翻土深度無法考究，境外移入物質又以灌溉水最多，故以下將會分析土壤灌溉水品質以釐清土壤酸鹼值及鈣鎂在少數期作升高的原因。

二、灌溉水質分析

雲林分場灌溉水質監測資料分析，以灌溉水之酸鹼值、鈣及鎂離子變化趨勢進行探討。灌溉水亦為提供土壤養分之重要來源，由於溝水來源為濁水溪及清水溪，其鈣鎂離子含量將隨不同季節變化，故由監測結果發現，鈣鎂離子之變化較大。由灌溉水水質監測結果顯示，水質酸鹼值於 2009 及 2014 年並未出現明顯的變化，故土壤酸鹼值變化可能不是灌溉水所影響。溝水之鈣及鎂離子於 2009 年有較高的現象，然而 2014 年並未出現升高的現象，顯示溝水鈣鎂離子高低並無法完全解釋土壤有效性鈣鎂的升高現象。目前亦無法了解土壤酸鹼值及有效性鈣鎂變化以及灌溉水質鈣鎂變化是否為一週期性的變遷，仍需要透過長時間的觀測已逐步釐清變化原因。

結論與檢討

- 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；土壤有效性鉀有逐漸漸少的趨勢，顯示當前施肥量仍有增量的空間，故建議實際操作時除了氮肥以外，仍需要補充相當程度的鉀肥以維持土壤肥力及提供作物足夠之養分。
- 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 2009 及 2014 年之 pH、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。利用灌溉水監測資料探討土壤肥力變化發現，水質酸鹼值於 2009 及 2014 年並未出現明顯的變化。溝水之鈣及鎂離子於 2009 年有較高的現象，於 2014 年並未出現升高的現象，目前溝水鈣鎂離子高低並無法完全解釋土壤有效性鈣鎂的升高現象。
- 四、目前雖然可以觀測到某些土壤肥力指標變化趨勢，然而在變化上無法確定是否為週期性的變化或是所謂突發事件，故仍須持續進行監測以釐清相關原因。

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、農業試驗所陳琦玲研究員團隊進行水質採樣及分析及各項資訊的諮詢。感謝黃裕銘博士對於本文的簽正及指導。

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. 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。
3. Mollers Jr. MC (2010) Ecology: Concepts and Applications. 5th ed. McGraw-Hill. p.533-534.
4. 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.
5. 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.
6. 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: lowland-upland rotation system at Yunlin branch, TNDARES¹

Pan, C. C.², J. C. Wang², W. J. Jiang² and C. L. Chen³

Abstract

Agricultural long term ecosystem has been set up to the 12th years at the Yunlin branch, TNDARES. The long term effect of fertilizer on soil quality under lowland- upland rotation system would be revealed by monitoring the soil data. The results showed that soil EC was always below 0.6 dS m⁻¹. Soil O.M. was maintained at the range between 0.7 and 2.4% in 0~15 cm soil depth, and soil organic matter was decreased by soil depth. Soil available P and K showed the highest content at the 0~15 cm in soil depth. In 2009 and 2014 soil pH, and available Ca and Mg raised, but pH of irrigation water did not significantly increased and Ca, and Mg of irrigation water increased. Irrigation water may not be the major reason for the increase of the soil pH, Ca and Mg.

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?

We turned soil data into diagram which would make the soil trend clearly.

What is the expected impact on this field?

Lowland and upland crop rotation system was one of the major crop system in Taiwan, these result would help us to investigate the nutrient cycle in this system.

Key words: Agricultural long term ecosystem, Soil quality, Soil organic matter

Accepted for publication: April 29, 2020

-
1. Contribution No. 520 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.
 3. Researcher, Taiwan Agricultural Research Institute. COA.