

嘉南平原施肥與水質污染之研究

國中教師組地球科學第二名

臺南縣下營國中

作者：張振成

一、研究動機

據統計臺灣肥料之消耗量 1972 年為八十八萬噸，至目前，每年還以 10 % 之增加量累積，於此巨額消耗量中，氮肥佔最大部份，以 1972 年而言，其消耗量約為氮素十七萬噸，世界其他各國，氮肥之消耗量也是最高。

由過去發表之文獻，發現氮肥施於土壤後，被植物所利用者，僅佔 50 %，其他 50 % 被流失，氮肥之流失除表面之逕流外，主要係以 NO_3^- 離子型態淋洗到地下水。由於肥料之流失，很自然地便造成水質污染之間題。

許多研究指出，如果水中含有 40 mg/l 以上之 NO_3^- 離子時，嬰兒飲用此種水後，則將發生變性血色蛋白血症或藍嬰（blue baby），而為害人體之健康。對於家畜，也同樣會發生許多病症，1976 年美國伊利諾州農田之地下水經研究後，也發現其 NO_3^- 離子含量超過 60 mg/l ，已可導致小豬死亡。

作者窮居在嘉南平原的一個偏僻農村裡，深知目前一般農民往往為了能在單位面積耕地上獲得高度產量，增加施肥已為其通行之手段。例如水稻作物，以往政府之氮肥推薦量為每公頃施八十公斤氮素，而今農民之施用量已增加到一倍，甚至於還有每公頃施二百公斤以上，如此，農民並沒有考慮到其增施之肥料量是否有效於作物，抑或產生流失作用。鑑於施肥影響水質污染之重要性，作者自 1972 年開始對於嘉南平原農業區之地下水質進行調查研究，俾供有關單位參考。

二、研究目的

- (一) 獲得嘉南平原農業區地下水中氮素肥料之殘餘量。
- (二) 對於環境污染提供施肥可造成水質污染之程度。
- (三) 希望給農民提供科學的與合理的肥料施用量限界。

三、研究材料與方法

(一) 研究區域與觀測井位置

本調查研究區域，包括八掌溪與鹽水溪間之嘉南平原，東至烏山頭水庫，西至臺灣西海岸，海拔高度 2 ~ 20 公尺之間，地下水之流向，由東往西流。

觀測井，分佈在仕安、中營、公塭、西港、永吉、湖山、林鳳營、太康、歡雅、七股、下中、中洲、海寮、佳里、安溪、重溪、下營、六分寮、麻豆及大屯等二十個地方。

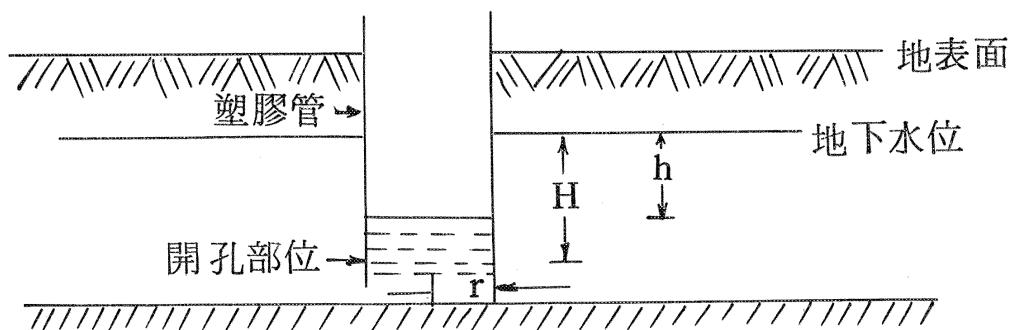
(二) 觀測井設置與土壤性質

各觀測井之深度為五公尺，口徑十公分，係用三公厘厚之塑膠管，沒入土壤中當井壁，井底下端十公分開孔，其設置如圖一。

H : 塑膠管底至地下水位距離

h : 抽水後從新水位至地下水位高度

r : 塑膠管內半徑



圖一 觀測井設置圖

四、研究方法

(一)水質研究：

1 採樣與貯藏：

臺灣氮肥之消耗，主要用於提高水稻產量，故本調查研究以水稻作物為主。嘉南三年輪作區水稻之種植，一年最多只能種一期，這一期通常在下半年，因此調查研究之時間為下半年之水稻期。自水稻期。自水稻種植前（即肥料尚未施用以前，也就是七月上旬）開始，每隔二十至三十天採集地下水一次，直至水稻收穫。

水樣採集之前，先記錄地下水位。採集時，用抽水唧筒抽取水樣，裝入二公斤塑膠筒，加蓋後，立刻送回實驗室，以 Whatman No. 50 濾紙過濾，收集約 100 ml 後，送入低溫（約 4°C）冰箱冷凍保存，以供化學分析，水樣中，未加入生化抑制劑，避免介入其他化學反應。

2 化學分析：

化學分析項目與方法，各為如后：

- (1) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之測定：利用馬錢子鹼方法。
- (2) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之測定：利用納氏試劑反應方法。
- (3) PH 值之測定：利用玻璃電極方法。
- (4) 電導度之測定：利用鹽橋電極方法。

3. 氮素在水中型態轉變之觀測：

選擇部份水樣各到盛入兩支一公升量筒內，一支量筒加入硫酸銨，使其含 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度為 20 mg/l ，另一支當作對照，將此兩支量筒放置室溫內，觀測 NH_4^+ 離子在地下水中轉變為 NO_3^- 離子之速率。

(二)施肥調查：施肥量及施肥時期之調查，係由臺灣省嘉南水利會
學甲旱作試驗站協助訪問農民。

五、結果與討論

本初步調查研究之結果指出，嘉南平原地區在水稻生長期間，75 % 之觀測井其地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度超過 40 mg/l ，各觀測井在水稻生長期間地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之濃度範圍及平均值。全地區水稻生長期內之平均 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度範圍約為 $1 \sim 14 \text{ mg/l}$ ，而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度幾乎各觀測井間，沒有差別，其平均值約為 1 mg/l 。依美國衛生處 1962 年釐定之飲用水標準， $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之最大容許限界濃度為 10 mg/l ，則嘉南平原地區在水稻生長期間，部份地下水之污染程度，已甚明顯。然而此地下水之污染，並非全水稻生長期內皆呈嚴重程度，其污染程度嚴重與否，似乎決定於施肥量與施肥時期，但土壤性質與農田灌溉，也有相當大之影響力。茲將各個影響因子列下討論。

(一) 施肥量與水質污染

調查各觀測井所在地區作物之施氮肥量，得知水稻每公頃為 $80 \sim 220$ 公斤氮氣，平均每公頃為 130 公斤氮素，其他作物如甘蔗、甘藷或玉米施肥量略比水稻為高。若以 130 公斤氮素為界，可將該地區之水稻氮素施用量分為二級，即 $80 \sim 130$ 公斤及 $130 \sim 220$ 公斤，前者在此稱之為“低”肥料量，而後者稱為“高”肥料量。此分級法適與地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度有密切關係。

水稻種植區若氮素施用量每公頃低於 130 公斤時，則其地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度高於 10 mg/l ，在甘蔗種植區裏，相同的施肥量對於地下水質有明顯之影響，甘蔗之平均施肥量比水稻略高，但其地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之濃度並未比較高，乃因甘蔗種植區裏之質地較黏，例如低施肥量之重溪觀測井， NO_3^- 離子被黏粒之正電荷所吸附而未能淋洗到地下水中；乃因土壤滲透性較差。例如高施肥量之大屯觀測井， NO_3^- 離子隨動水之下移作用受制所致。

可見施肥量高低對地下水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度無太大之影響，同時，作物種類對於地下水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度也無影響。有

些報告，也同樣指出表面逕流之 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度與施肥量及作物種類無關。

(二)施肥時期與水質污染

因林鳳營觀測井為例，說明水稻施肥時期與水質污染之關係。因林鳳營觀測井之水田，其水稻種植期間無間作，又該農戶對水稻之管理比較良好，故選其為例。

林鳳營觀測井之水田，於七月七日插秧，十月十八日收穫，其間除基肥外，共施肥兩次，一次於七月二十二日，另一次於八月六日，而施基肥是於插秧之七月七日。每次施肥量相同，其施肥方法使用撒施法。

地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度於插秧後約四十天最高，水稻全生長期內，地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度由插秧後慢慢升高，直至四十天後則再降低，其降低之速率，初期比後期快，至於 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度，其趨勢恰恰與 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 者相反，水稻插秧後， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度高，而後慢慢下降，至四十天，後濃度又再回升。

以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度而言，水稻插秧後四十天，其地下水污染之程度最嚴重，而該四十天前後，地下水並無污染之慮。但以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度而言，插秧後一個月以內與收穫前一個半月以後，地下水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 離子之污染最嚴重。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之最大容許限界為 0.5 mg/l 。

地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度於插秧後約四十天最高之理由，乃由於施肥時期與水稻田管理法兩種因素配合之結果。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度最高之時間，約在八月六日第二次施肥後十二天，這一段時間，正好是水田半曬田後再灌水，因此N以 NO_3^- 型態被淋洗到地下水而聚集，另一方面部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可能隨著重力水而向下移動到地下水，然後再行硝化作用，而增加 NO_3^- 之濃度，此一假定之說法，可用氮素在水中型態轉變之觀測加以說明。

地下水樣 Groand Woters.	(NH ₄) ₂ SO ₄ 處 理	反 應 時 間 天			
		0	5	10	20
下 營 (PH=8.8)	不 加 No add.	0.13	6.36	2.78	2.60
	加 add.	0.24	3.60	10.50	7.70
六 分 寮 (PH=8.2)	不 加 No add.	2.55	3.51	2.10	2.65
	加 add.	1.40	4.30	11.06	15.70

氮素在土壤中之轉變，發表之文獻很多，其在地下水中轉變率也需要了解。無論地下水 PH 值之高低，加入硫酸銨後十天，其NO₃⁻—N 濃度大增，PH 值較低之地下水，其 N 之硝化速率比較慢。林鳳營觀測井，其水稻生長期間地下水 PH 值之變化，當水稻插秧後約四十天，其 PH 值約為 8.5，此值適介於 8.8 與 8.2 之間，NH₄⁺離子在地下水中硝化作用達最高峯之時間，約需 128 天，再加上由土壤導水度估計獲得約一天之NH₄⁺離子向下移動之時間，合計正好是 11.8 天，與八月六日施肥後地下水中NO₃⁻離子濃度達最高所需之十二天，互相吻合，此證明部分NH₄⁺離子隨著重力水向下移動到地下水，再行硝化作用等過程，在水稻田裏是可能的，換句話說，在水稻田地下水裏之NO₃⁻離子，除 Davis 等氏 (1969) Syluester 與 Seabloom 氏 (1963) 及 Thomas 氏 (1970) 所謂由NO₃⁻型態淋洗下來而外，尚可由NH₄⁺離子淋洗下來。這些學者所以提出NO₃⁻離子之淋洗為地下水中NO₃⁻離子所以增加之理由，乃因彼等研究之對象為旱作地區。Alexander (1965) 指出，水田在浸水狀態下土壤剖面中，呈氧化還原兩層，當表土中形成之NO₃⁻離子下移到下層時，則將被還原，此種解說更加重了上面假說之正確性。

地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度在水稻收穫期附近降低之原因，乃由於：一者當田間土壤蒸乾時， NO_3^- 離子自地下中往上層土壤中移動，而降低了地下水中之濃度，二者因脫氮作用而消失，三者部份行銨化作用。

地下水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度，在水稻插秧四十天後慢慢提高之原因，乃由於有機 N 行礦質化作用，此可由於其高 PH 值而得證明，因水田灌溉後，許多有機 N 被重力水帶入地下水中所致。

(三) 土壤性質與水質污染

土壤剖面性質與作物根區以下 NO_3^- 濃度有顯著關係。土壤剖面性質，可以土壤導水度來表示，嘉南平原各觀測井之田間測定之飽和土壤導水度可分為五等級，即 $0 \sim 1$ ， $1 \sim 2$ ， $2 \sim 4$ ， $4 \sim 6$ 及 $6 \sim 8 \text{ cm/hr}$ 。飽和土壤導水度與嘉南平原地區地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度與鹽分量之關係。

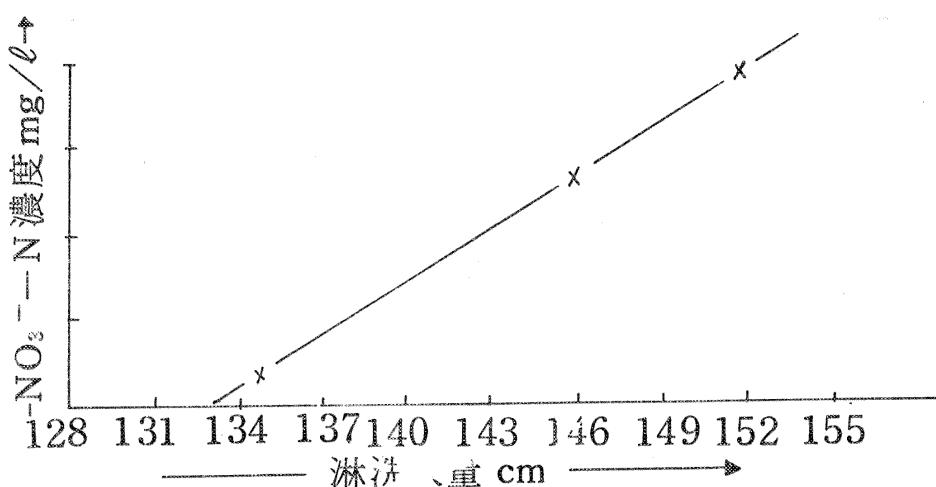
飽和土壤導水度在第三級時，其地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度最高，在第一級至第三級間， $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度，隨著飽和土壤導水度之增加而增加，其濃度皆在 100 mg/l 以上，此意謂，飽和土壤導水度在 4 cm/hr 以下，其造成 NO_3^- 水質污染之程度隨著飽和導水度之增加而加大，若在 4 cm/hr 以上則造成水質污染之程度反而減小。其所以會如此之理由為：一者在高飽和導水度時，地下水之橫向滲透性可能很強，因此， NO_3^- 離子不易聚存在觀井附近，而流向坡度較低處；二者乃高飽和導水度皆發現在質地較粗鬆之土壤，例如公塭觀測井，因此 NO_3^- 離子很容易自地下水中往往上移動，故地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度減少；三者乃由於脫氮作用。

(四) 灌溉與水質污染

地下水中 NO_3^- 濃度與土壤之灌溉，排水與地下充水有密切的關係。地下充水量在此是以測定地下水位之變化量而決定，以林鳳營觀測井為例，水稻生長期間地下充水量或稱淋洗水量之變化。

林鳳營觀測井在水稻插秧後四十天其淋洗水量最大，可見淋洗水量與 NO_3^- 濃度間有密切之正相關，其關係表示於圖二，由圖二可以估計造成 NO_3^- 水質污染之淋洗水量大約為 145 cm，總而言之，灌溉水量中，包括淋洗水量愈少，則造成水質污染之程度愈低。

灌溉除產生肥料向地下水中淋洗外，對於表面肥料之逕流也有很大之影響，以插秧後一個月之水稻為例，田表面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之濃度平均為 2.4 mg/l ，但灌溉水為 1.5 mg/l ，由此估計該時期 N 肥從土壤表面之流失量大約為 40 %。



圖二 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度與淋洗水量之函數曲線

六、結論

八掌溪與鹽水溪間之嘉南平原，在水稻生長期間，其地下水之中之平均 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度範圍為 $1 \sim 14 \text{ mg/l}$ ，而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度為 1 mg/l ，故部分區域之地下水已呈現 NO_3^- 與 NH_4^+ 之污染，其污染程度決定於作物之施肥量，施肥時期、土壤性質及農田灌溉等因子。水稻對污染而言之臨界施肥量為每公頃平均 130 公斤，水稻曬田並加施肥十二天後，地下水之 NO_3^- 污染最嚴重，而 NH_4^+ 污染之嚴重時期是在水稻生長初期以及成熟期兩端。土壤對污染而言之飽和導水度為 4 cm/hr ，地下水之污染

潛在性，可以淋洗水量估計，灌溉可導致氮肥之表面流失及向下淋洗，水稻田表面流失主要為 NH_4^+ 離子之損失，其插秧後一個月之流失量為 40%，向下淋洗可以 NO_3^- 及 NH_4^+ 兩種離子型式進行。

評語：農業施用肥料，由引用肥料售價偏低，故一般農民施肥量溢量，是以氮肥之 NO_3^- 離子溶入地下水造成水質污染的研究頗有意義。作者任教於嘉南，利用授課之餘至八掌溪與鹽水溪間從事水質測定工作，對於觀測井的採樣及位置選擇尚具代表性，在土壤分析及化學分析限於設備，至國立中興大學土壤學系請求支援，實驗結果硝態氮與銨態氮之測定與消長變化均甚合理。惟研究之記錄，測定方法以及參考文獻不會影響成績。