

平鎮養豬廢水農地再利用試驗計畫

期末報告

中華民國 99 年 12 月 16 日

平鎮養豬廢水農地再利用試驗

蔡宗烈¹、陳琦玲²、郭鴻裕²、周明顯³、徐慶霖⁴、
林楨坤¹、張瓊雲¹、廖崇億²、林建志²、張筱瑜³、蔡震達⁴

¹桃園縣政府農業發展處

²行政院農委會農業試驗所農化組

³國立中山大學環境工程研究所

⁴國立中興大學獸醫系

摘要

目前台灣畜牧業，約飼有 610 萬頭豬隻，產生之廢水相當可觀，為達到排放標準，進行之三段式處理，包括固液分離、厭氣處理以及好氣處理，過程既耗能源又損失可用資源，且所費不貲；豬糞尿富含有機質及植物所需要之養分，可做為作物生長之肥分。台灣每年需施用約 100 萬噸化肥，若能將畜牧產生之廢水再利用作為肥料施用於田間，除降低耕作施肥成本，亦可減少畜牧廢水處理成本。歐美許多國家將未經處理之畜牧廢水直接施用於農田作為肥料，已行之多年。依據我國廢棄物清理法之規範，可透過試驗計畫取得國內實績，據以申請再利用許可，乃成立本試驗計畫。

本試驗利用槽車載運固液分離後之廢水，並將其均勻分布於田區，減少化學肥料的施用，並期透過本試驗，取得國內畜牧廢水農地再利用實績。所施用之畜牧廢水來自莊玉輝牧場；一期稻作使用隨水漫灌方式，二期稻作使用注入與噴灑方式。試驗內容包含畜牧廢水施用對周界空氣品質之影響，並監測施用養豬廢水對地下水層、地面水層土壤中營養元素轉移、重金屬累積、抗生素、病原菌殘留和土壤肥力之影響；同時估算施用養豬廢水施肥之成本。

試驗結果如下：(1)異味污染：不論是隨水灌溝或是噴灑施肥方式，僅在施肥點有異味污染，在距施用點下風處約 100 公尺後，則降至標準以下。(2)地下水質：施用後之地下水質分析顯示，施用後少數井水之銨態氮與 EC 值略微增加，但 2-3 週內即恢復原來濃度，且都在第二類地下水層監測標準內，重金屬濃度則都維持在很低濃度；(3)地面水質：施用地點因田埂及河道護牆阻隔，施用之廢水不致外溢，分析結果亦顯示與地面水應無相關影響；(4)在公共衛生方面：大腸桿菌以畜牧場內土壤與地下水較高，寄生蟲及抗生素則皆未檢測出殘留。(5)土壤銅、鋅累積：土壤銅、鋅累積至監測基準至少分別需 791 年和 589 年，且無其他重金屬累積之疑慮。(6)成本分析：農田再利用成本雖高於三段式廢水處理之液體處理部分之成本，但若加上固體之堆肥處理成本，及原本農地施肥成本，

農地廢水再利用較有效率且便宜。當地農民對於栽培水稻之慣用施肥量約為每分地 2 包台肥 5 號，即每公頃約需 7,000 元/ha，相同氮量之養豬廢水成本約需要 5,760 元，或每車(5 噸)360 元。然而養豬廢水內鉀肥含量不足，如果補充養豬廢水內鉀肥至與施用化肥同量，其成本增加至 7,160 元/ha，或是 448 元/車，則養豬廢水農地再利用成本較施用化學肥料成本高。另一方面，廢水成分不穩定，管理上不方便；氮肥肥效約只有化肥之九成，且此再利用方式主要係協助養豬業者處理廢水，建議養豬業者應負擔主要費用。(7) 估算結果顯示使用養豬廢水農地再利用較三段式廢水處理溫室氣體之排放量低。

一、前言

目前台灣畜牧業，約飼有 614 萬頭豬隻，產生之廢水相當可觀，為達到排放標準，而進行三段式處理，過程既耗能源又損失可用資源，且所費不貲；豬糞尿富含有機質及植物所需要之養分，可作為作物生長之肥分。台灣每年需施用約 100 萬噸化肥，若能將畜牧產生之廢水再利用作為肥料施用於田間，除降低耕作施肥成本，亦可減少畜牧廢水處理成本、能源消耗。過去傳統農業上即有施用畜牧糞肥之情形，但因傳染病疑慮及化肥盛行、施用便利，而逐漸取代；進來年來環保意識高漲，尋求對環境友善的永續農業耕作方式蓬勃發展。

歐美許多國家將未經處理之畜牧廢水直接施用於農田作為肥料，已行之多年。本試驗擬利用槽車載運固液分離後之廢水，並將其均勻分布於田區，減少化學肥料的施用。並透過本試驗，取得國內畜牧廢水再利用實績，包含畜牧廢水施用方式對周界空氣品質之影響，並監測施用養豬廢水對地下水質、地面水質及土重金屬累積、抗生素、病原菌殘留和土壤肥力變化；同時估算施用養豬廢水施肥之成本，是否低於廢水處理成本。

本試驗係以桃園縣平鎮市莊玉輝牧場所經固液分離後之養豬廢水及附近農地，進行農地再利用之可行性探討。

二、材料與方法

本試驗農地再利用之廢水係採自桃園縣平鎮市莊玉輝畜牧場沖水式豬舍經固液分離後之廢水。該沖水式豬舍共飼養約 5,000 頭豬，每頭每日廢水量約 25 kg，每日廢水量為 125 公噸。前述廢水量擬留下 4,450 頭豬隻所產之廢水量，維持目前之三段式廢水處理運作，其餘 550 頭豬隻所產出之經過固液分離之廢水則施於農地，提供作物養分，依據經過固液分離之廢水含氮量平均為 0.17% (99/1/28~99/7/26 採樣平均) 及每年每公頃農地最大施用量為 400 kg N/ha/yr(即土壤處理之上限)計算，約可提供 21 公頃農地之施用量，而本試驗申請再利用農

地共 14.18 公頃（圖 2）。本試驗之監測將進行養豬廢水再利用之試驗地，施用後之臭味、公共衛生、地下水污染與土壤重金屬累積等問題。

（一）養豬廢水再利用試驗流程

本文以桃園平鎮市莊玉輝牧場附近農田做為試驗。本次稻作試驗，利用莊玉輝畜牧場由槽車載運至試驗田間(行經路線如圖3)，一期稻作及二期稻作分別利用隨灌溉水漫灌之方式與隨施肥車噴灑灌溉之方式，施用於田間進行再利用，並進行上述多項試驗，詳細試驗方法及材料如下：

1. 材料：莊玉輝畜牧場，沖水式豬舍固液分離後之廢水。

2. 試驗地：

(1)申請之總試驗地約 14.18 公頃，包含平鎮市福林里山子頂段 104 地號等農地（如圖 2、圖 3、圖 4 及圖 5）。但本次試驗 99 年一期作僅施作約 2 公頃；二期作共施作約 4 公頃（圖 4、圖 5），其位置與槽車行經路線如圖 3。

(2)環保署在畜牧場附近之監測井離畜牧場距離約為 3 km~7 km，上游監測井(潛龍國小)之水位監測約為 11 m，下游監測井(瑞梅與忠貞國小)之水位約介於 3~11 m（圖 1）。除現有環保署監測井外，本試驗於試驗區共設八口監測井(圖 2)，井深為 10 m。另一 9 號井為民井。

(3)由農試所土壤資料庫繪製之試驗地土壤特性圖如圖 6~11。依序為 pH 值、土壤排水等級、0-30cm 土壤質地、30-60cm 土壤質地、60-90cm 土壤質地以及 90-150cm 土壤質地。由上圖得知試驗田土壤之 pH 值大約在 4.6-5.5；牧場附近試驗田的排水不完全，而 9-9 至 9-18 號試驗田排水良好；牧場附近 0-30cm 土壤土質是砂質粘壤土，9-9 至 9-18 號地則是玢質粘壤土；畜牧場附近 30-60cm 土壤土質是砂質壤土，9-9 至 9-18 號地則是玢質粘土；畜牧場附近 60-90cm 土壤土質是石礫，9-9 至 9-18 號地則是粘土；畜牧場附近 90-150cm 土壤土質是石礫，9-9 至 9-18 號地則是粘土。本次試驗亦採取部分田區土壤進行分析，結果如表 1。其中 pH 值與土壤資料庫相近，表、底土土壤陽離子交換容量(Cation Exchangeable Capacity, CEC)則介於 4.6-10 cmole/kg 之間。

3. 試驗數量：依據水稻一期作施作前，固液分離後之廢水含氮量為 0.15 %；二期作為 0.20%，及為避免廢水再利用過程對地面與地下水體造成污染，本試驗規範每分地最多施用 8 公噸廢水。每分地施用 8 公噸，即廢水施用深度約為 0.8 cm。以根系之土壤深度約為 60 cm 計算，細砂土和玢質粘土之植物有效水分分別為 2.5 及 4.8 cm/60cm。因此每分地施用量 0.8 cm，應不致造成地下水污染。因此在水稻一期作 99 年 2 月 8 日至 11 日間，共施作約施作 2 公頃，每分地施灌 8 噸廢水，共施灌 41 部車次 164 噸廢水。水稻二期作 99 年 7 月 19 日至 8 月 20 日間，共施作約施作 4 公頃，每分地施灌 8 噸廢水，共施灌 75 部車次 300 噸廢水。

4. 再利用設施及設備：本試驗利用槽車(圖 12)載運約 4 公噸糞尿槽，其後方為附掛注入器或是噴灑器，載運廢水與施用皆用此部槽車，其最大載運量為 5 公噸，油耗量為 8km/L。
5. 再利用試驗方法：在一期作中，因連續降雨，田間太濕，無法以注入方式進行施肥，而採用隨水漫灌方式進行(圖 13)。將固液分離之廢水利用槽車載運至試驗田旁，將槽車內廢水利用黑色塑膠軟管灌入試驗田，同時配合引入灌溉水，使灌溉水可將廢水漫佈整個田區。於灌溉水水量不足之處，則利用抽水馬達抽取灌溉溝渠或溪流中的水進行灌溉，施用面積約 2 公頃。二期作採用噴灑灌溉方式進行(圖 14)，將固液分離之廢水利用槽車之噴灑器平均噴灑至試驗田。施用面積為 4 公頃，其中只有 0.32ha 是水稻田，2.37ha 為休耕地，但有種植綠肥小油菊，1.32ha 為地目變更。

(二) 豬糞堆肥與放流水施用試驗流程

本試驗參與之莊玉輝畜牧場有自行製作豬糞堆肥並施用於場內農田，並且利用放流水進行溝灌。因此本試驗之固液分離廢水再利用不再於畜牧場內農田進行，畜牧場內的農地自 98 年 7 月已開始施用豬糞堆肥及放流水，本試驗即同時監測此方式之公共衛生、地下水污染與土壤重金屬累積等問題，其施用方法及條件如下：

1. 材料：莊玉輝畜牧場之豬糞堆肥 1~3 個月（肥分 N、 P_2O_5 、 K_2O =0.59%、0.50%、0.15%）及三段式廢水處理後之放流水（N、 P_2O_5 、 K_2O =0.13%、0.03%、0.04%）。
2. 試驗地：試驗地約 0.3 公頃，位於圖 2 之 105 及 107 地號。
3. 試驗數量：豬糞堆肥做為基肥使用，每分地使用 10 m^3 ，放流水則為追肥施用，每分地使用 1.5 噸，一個月 3 次。種植作物主要為小白菜、地瓜葉和蘿蔔葉等，並行輪作，耕作間期小於 1 個月。
4. 堆肥製作：將固液分離後之固體混入木屑，將其放置於室外，發酵時間一至三個月完成。
5. 再利用設施及設備：利用卡車將豬糞堆肥載運至田間後，以挖土機將豬糞堆肥於田間混合均勻作為基肥；並利用水車將放流水噴灑至田間做為追肥施用。
6. 再利用試驗方法：豬糞堆肥於作物種植之前利用卡車載運至田區，再利用挖土機使之均勻混合後分布於田間做為基肥，接著直接於田區挖溝做畦，種植作物，作物種植期間利用水車將放流水噴灑於田間作為追肥。作物收成後作為豬隻飼料。

(三) 固液分離後養豬廢水分析

每季分析牧場固液分離後廢水之水分含量、有機質、pH、電導度及所含的營養元素及重金屬含量，所分析元素包含 N、P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Mn、

Cu、Zn、Cr、Cd、Pd、Ni、As和Hg。

1. 水分含量：將定量之樣品置於 105°C 之循環送風之乾燥箱內，並於一定時間後取出樣品，測定其損失重量，此即為水分重（環檢所，2002）。
2. 有機質：將 105°C 乾燥後之豬糞尿，採用 Walkley-Black 之溼式氧化法測定有機質（Nelson and Sommers, 1982）。
3. pH：以玻璃電極法直接測定豬糞尿（環檢所，2008）。
4. 電導度：以電導度計直接測定豬糞尿（環檢所，2000）。
5. 全氮：以硫酸分解後，以靛酚比色法測定氮氮（環檢所，2005）。
6. 其他元素：經高溫灰化，以 2N HCl 洗出灰分，定量後，以 ICP 測定各元素（環檢所，2004）。
7. 鈉吸著率(sodium adsorption ratio, SAR)

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \sqrt{meq / L}$$

農田水利會灌溉用水水質標準：鈉吸著率(SAR)：6 $\sqrt{meq / L}$

（四）堆肥分析

分析牧場固液分離後固體，製成堆肥之水分含量、有機質及所含的營養元素及重金屬含量，所分析元素包含N、P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Mn、Cu、Zn、Cr、Cd、Pd、Ni、As和Hg。

1. 水分含量：將定量之樣品置於 105°C 之循環送風之乾燥箱內，並於一定時間後取出樣品，測定其損失重量，此即為水分重（環檢所，2002）。
2. 有機質：將 105°C 乾燥後之豬糞尿，採用 Walkley-Black 之溼式氧化法測定有機質（Nelson and Sommers, 1982）。
3. 全氮：以硫酸分解後，以靛酚比色法測定氮氮（環檢所，2005）。
4. 其他元素：經高溫灰化，以 2N HCl 洗出灰分，定量後，以 ICP 測定各元素（環檢所，2004）。
5. 鈉吸著率(sodium adsorption ratio, SAR)

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \sqrt{meq / L}$$

（五）試驗土壤分析

選擇幾處試驗地於每期作施作前及採收後，採樣分析土壤特性、養分分佈及重金屬含量等。相關分析方法如下：

1. pH：以土:水=1：1（W/V），平衡半小後，用玻璃電極法測定之(環檢所，2008)。

2. 電導度：取適量土壤，加入蒸餾水，土水比為 1：5，以攪拌棒攪拌，靜置後，以電導計測定抽出液的電導度。
3. 有機質：採用 Walkley-Black 之溼式氧化法測定（Nelson and Sommers, 1982）。
4. 土壤陽離子交換容量(Cation Exchangeable Capacity, CEC)：土壤中陽離子交換容量—醋酸銨法(環檢所，1994)。
5. 土壤有效性氮：秤取 20 g 濕重之土壤，加入 100 ml 2N KCl，於 400 rpm 下震盪 1 小時後(Keeney and Nelson, 1982)，以自動分析儀分析(型號 RFA-300)。
6. 重金屬：利用王水消化後，定量過濾，以 ICP 測定鐵、錳、銅、鋅、鉻、鎘、鎳、鉛及砷等重金屬含量（環檢所，2003），汞則是使用汞分析儀測定。

(六) 地下水質及地面水分析

本試驗於試驗區增設8口監測井，監測井深度約為10公尺，每季採監測井井水測定地下水中Fe、Mn、Cu、Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、As、Hg及總有機碳含量。而本試驗區亦於試驗區周圍選定三條水系，分別於每條水系上下游各取一地面水，共取6點地面水樣，採樣點標示於圖3，每季採測前述監測井重金屬項目。除了每季採樣之外，監測井及地面水每個月亦採樣，並進行pH值、電導度、NH₃-N和NO₃-N分析，以了解養豬廢水於試驗田是否對於地下水及地面水造成污染。分析方法如下：

1. pH：玻璃電極法直接測定地下水（環檢所，2008）。
2. 電導度：以電導度計直接測定地下水（環檢所，2000）。
3. 水中總有機碳(TOC)：燃燒／紅外線測定法測定總有機碳含量（環檢所，2000）。
4. 水中 NH₃-N 和 NO₃-N 分析：以靛酚比色法測定氨氮（環檢所，2005），以鎘還原法測定硝酸鹽氮(環檢所，2004)。
5. 水中其他元素分析：地面水及地下水過濾，並經微波消化後，以 ICP 測定水中 Fe、Mn、Cu、Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、As 及 Hg 等重金屬濃度(環檢所，2004)。

(七) 異味污染物濃度測定

委託國立中山大學環工所檢測。選定二處試驗地於施用時，以嗅覺感知周界下風處。下風50M、下風100M處之臭味強度（分6級），記錄之(莊，1985)。如臭味強度超過2級（認知閾值），則以檢知管檢知氨濃度，並採氣樣，作官能測定(環檢所，2008)。

(八) 人畜共通傳染病菌及寄生蟲擴散的公共衛生評估

1. 人畜共通傳染病菌：委託財團法人中央畜產會檢測。選定三口施作附近監測井之井水、養豬廢水固液分離前及固液分離後之廢水，每季進行測驗；另選定三處試驗地施作後及耕作後之土壤進行檢測，預計共兩期耕作。檢測項目如下：
 - (1) 大腸桿菌：依據環署檢字第 096009185H 號公告 NIEA E237.52B-水中大腸桿菌群及大腸桿菌檢測方法。
 - (2) 沙門氏桿菌：依據行政院衛生署 95.09.04 署授食字第 0951800021 號食品微生物之檢驗方法-沙門氏桿菌之檢驗。
 - (3) 總生菌數：依據環署檢字第 0960091685C 號公告 NIEA E204.54B-水中總菌落數檢測方法。
 - (4) 彎曲桿菌：依據行政院衛生署 93.04.05 署授食字第 0939306569 號食品微生物之檢驗方法-彎曲桿菌之檢驗。
2. 人畜共通寄生蟲：委託中興大學獸醫系進行檢測。選定三處試驗地進行檢測，分別檢定固液分離後之養豬廢水及施作後 1、2 和 4 週的土壤。檢測內容及方法如下：將蛋白十倍稀釋之後，取 9 毫升稀釋蛋白與 1 克之土壤檢體混合均勻，直接塗抹於玻片，乾燥後使用 Modified Ziehl-Neelsen carbofuchsin stain method 染色，染色後鏡檢隱孢子蟲卵。將土壤混合均勻後，取 1g 加入 9ml 之飽和糖水，使蟲體懸浮於飽和糖水中，再以滴管吸上層取溶液置於載玻片上，蓋上蓋玻片後鏡檢蛔蟲及鞭蟲卵(Garcia *et al*, 1995)。

(九) 預防或治療用藥物殘留(含抗生素) 檢測

抗生素係委託財團法人中央畜產會檢測。選定三口施作附近監測井之井水、養豬廢水固液分離前及固液分離後之廢水，每季進行測驗；另選定三處試驗地施作後及耕作後之土壤及收穫時之植體進行檢測，預計共兩期耕作。檢測項目及方法如下：

1. 氯四環素：依據衛署食字第0939300627食品中動物用藥-四環素類抗生素之檢驗，最低檢測感度土壤為0.5ppm，植體為1.0ppm。
2. 林可黴素：依據日本畜安研法及 LC/MS/MS 檢測法，最低檢測感度土壤為 1ppb，植體為 100ppb。
3. 青黴素：依據日本畜安研法青黴素類之檢驗，最低檢測感度土壤與植體皆為 0.05ppm。
4. 雪華魯新：依據財團法人中央畜產會雪華魯新 LC/MS/MS 檢驗方法，最低檢測感度土壤為 10ppb，植體為 100ppb。

三、結果與討論

(一) 養豬廢水與堆肥特性與成分分析

莊玉輝畜牧場固液分離後廢水之特性與成分分析如表2與表3，一期作施用廢水之pH值平均值為7.2、電導度(EC)平均值為8637 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、總氮量平均值為0.15%、鈉吸著率(SAR)平均值為7.9 $\sqrt{\text{meq}/\text{L}}$ ；二期作施用廢水之pH值平均值為7.3、電導度 (EC) 平均值為9108 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、總氮量平均值為0.20%、鈉吸著率 (SAR) 平均值為4.7 $\sqrt{\text{meq}/\text{L}}$ 。該畜牧場為沖水式豬舍，夏天之沖洗水量應較冬天多，但本次試驗之夏天之廢水濃度卻較冬天更濃。

畜牧場內自98年7月起即開始在其場內農地施用豬糞堆肥及放流水，其所施用之放流水及堆肥特性如圖15、圖16、表2、表3、表4及表5，放流水pH值平均值為7.6、電導度(EC)平均值為9700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、總氮量0.13%、鈉吸著率(SAR) 10.3 $\sqrt{\text{meq}/\text{L}}$ ；豬糞堆肥分別有褐色堆肥(堆肥處理1個月)及黑色堆肥(堆肥處理3個月)兩種，SAR分別為2.3和1.2 $\sqrt{\text{meq}/\text{L}}$ ，不會造成土壤鹼化。厭氣池中之養豬廢水與放流水之電導度(EC)和鈉吸著率，皆超過灌溉水質標準750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，但因非直接作為灌溉水質施用，應無土壤鹽鹼化之慮。

牧場每日廢水產生量為125公噸，本計畫申請將550頭經固液分離之廢水載運之農地再利用，預計每日平均可減少13.75公噸廢水進入養豬場內三段式廢水處理設施運作，經由減量提升廢水處理效能，使放流水能符合現行畜牧排放標準。但依據表6得知，一期作養豬廢水施用量205公噸，二期作施用量為395公噸，換算成每日消耗量約1.64公噸，僅每日廢水產生量為125公噸之1.3%，處理量太少，故沒有達到預期的效果。

在肥分方面，養豬廢水一期作內含有肥分 N、 P_2O_5 、 K_2O 分別為 0.15%、0.07%、0.04%，1Mg 廢水含有 N、 P_2O_5 、 K_2O 分別為 1.5kg、0.7kg、0.4kg；二期作肥分 N、 P_2O_5 、 K_2O 分別為 0.2%、0.11%、0.04%，1Mg 廢水含有 N、 P_2O_5 、 K_2O 分別為 2kg、1.1kg、0.4kg；化肥以台肥 5 號(N： P_2O_5 ： K_2O =16：8：12)為例，每包重 40kg，其 N、 P_2O_5 、 K_2O 分別為 6.4kg、3.2kg、4.8kg，若以氮肥為例，則每包化肥相當於一期作4.27噸廢水或是二期作3噸廢水。此顯示一車4-5Mg之廢水，即有多於一包台肥 5 號複合肥料所含 N 與 P 之肥分，但 K 肥則不足。若作物須求如台肥 5 號之肥分比例，則農友還需另外補充 K 肥。本文以台肥生產之氯化鉀(N： P_2O_5 ： K_2O =0：0：60)為例，每包重 40kg，其 K_2O 含量為 24kg，每車大約需要補充 0.2 包氯化鉀，肥分即多於一包台肥 5 號。

當地農民對於栽培水稻之慣用施肥量約為2包台肥5號，即施用N： P_2O_5 ： K_2O =128：64：96 kg/ha。依照採集之廢水平均肥分及每分地施灌8噸計算，即一期作施用N： P_2O_5 ： K_2O =120：56：32 kg/ha；二期作則施用N： P_2O_5 ： K_2O =160：88：32 kg/ha。依據分析結果顯示，一期作施用廢水所含氮與磷之肥分，與農友之施用量相近，但鉀肥則不足。二期作則施用廢水所含氮與磷之肥分，已超過農友之

施用量，但鉀肥仍不足。各田區施氮量如表6，其中二期作在施作9-9號農地時，施肥車故障，故在插秧前只施兩車廢水。若不計鉀肥之不足，一期作施作41車次，相當於39包之台肥5號，二期作施作75車次，相當於94包之台肥5號，可減少化肥之支出。

(二) 試驗田土壤肥力分佈

在施用廢水前（採樣時間2010/1/28）對每塊農地採取10點土壤進行肥力分析，表層土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分別在 $2.5\text{ }\mu\text{g/ml}$ 和 $5.8\text{ }\mu\text{g/ml}$ 以下(表7)，施用廢水約40天後（採樣時間2010/3/15-16），土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量最高上升至 $57.9\text{ }\mu\text{g/ml}$ ，而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 則降低至 $0.02\text{ }\mu\text{g/ml}$ 以下，顯示施用廢水後40天，土壤仍維持相當肥力，但因水田狀態，氮肥主要以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 形態存在， $\text{NO}_3\text{-N}$ 形態極低。

在一期作施肥期間，因連續降雨，田間太濕，無法以注入方式進行施肥，而採用隨水漫灌方式進行。為了解此施肥方式，是否造成土壤肥力分佈不均，故在施用廢水後40天，檢測田區EC分佈。檢測結果如圖17及圖18，各施用田區中大致以施用點附近EC值較高，部份田區亦有離施用距離增加而遞減之分佈，但分佈之變異小於25.7 %。其中96號地，EC值較高，為 $214\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，其餘試驗田，EC值於 73.8 至 $81.7\text{ }\mu\text{S/cm}$ 間(如表8)。由土壤圖之質地分佈與本試驗之土壤CEC分析結果，均顯示畜牧場附近土壤較9-9至9-18號地之質地較粘，且CEC值較高，為 8.3 - 9.9 cmole/kg ，畜牧場附近試驗田土壤CEC值則介於 4.6 - 7.3 cmole/kg 之間(如表1)；但因土壤肥力之變化與諸多因素有關，因此即使在施肥量相近的情況下，9-17與9-18地號之肥力並未明顯高於其他田區之肥力。

(三) 產量

平鎮養豬廢水再利用試驗之一期稻作產量，以田間採樣估算，每田區採樣約5-8叢，主要試驗區，包含山子頂段96號等5塊農地。水稻種植行株距約為 $26\text{cm}\times 20\text{cm}$ ，每公頃約190000叢水稻，估算產量出約 $4312\text{--}5121\text{kg/ha}$ ，平均 4824kg/ha (表9)。根據94 - 98年間農業統計年報（表10），桃園縣一期作水稻產量約 $5022\text{--}5755\text{kg/ha}$ ，平均 5360kg/ha ，以平均產量計算，施用豬糞尿廢水之水稻產量約為傳統施作之90%。本次試驗一期稻作施用基肥後，遇大雨，而糞肥為液態，因此較固態的化學肥料易流失。另外，部分田區，如：9-17、9-18等地號之區域，疑似受到水稻白葉枯病之病害影響，葉尖枯黃，亦可能對產量略造成影響。

二期稻作產量，以95號農地為主，田區採樣10叢。稻種植行株距約為 $26\text{cm}\times 20\text{cm}$ ，每公頃約190000叢水稻，估算產量出約 6195kg/ha 。

根據94 - 98年間農業統計年報（表10），桃園縣二期作水稻產量約 $3591\text{--}4575\text{kg/ha}$ ，平均 3956kg/ha ，以平均產量計算，施用豬糞尿廢水之水稻產量約為傳統

施作1.57倍。此次試驗因附近農民未能配合進行化肥與糞肥之肥效比較試驗，因此前述資料僅與統計年報之平均產量進行概略比較。由於養豬廢水呈液態，較化肥易流失，因此從其他地區之肥效試驗了解廢水對水稻之氮素肥效僅為化肥之八~九成。但田間試驗亦有施用化肥與廢水的水稻產量相近者。依據本次試驗之訪談，農民認為施用廢水與化肥對水稻產量並無很大差異。

此外，為了解一期作漫灌方式是否造成田區肥力分佈不均，而影響產量，進行產量空間分佈調查，圖19表示與施肥點相對距離與穗重之關係，相對距離數字越大表示相對距離越遠，圖中各點所採集之水稻穗重隨施肥相對距離遠近無相關增減關係，其差異可能為田間肥力分佈或作物生長因素造成。顯示種植水稻應可採用漫灌方式進行廢水施肥。

(四)土壤重金屬累積

由於豬隻生長營養需求，常在養豬飼料中添加銅和鋅等金屬礦物，但豬隻吸收有限，大部份之金屬元素即隨糞便排出。而作物對金屬元素之吸收亦有限，推測金屬元素將在土壤中逐漸累積。本試驗畜牧場主要以地瓜葉飼養豬隻，只有小豬才以飼料飼養。因此從分析結果(表3)顯示，廢水所含重金屬濃度較一般以飼料飼養者低很多(陳等, 2010)。

依據本次實驗數據取得Cu、Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、As和Hg等重金屬之背景值，配合本次廢水再利用一、二期作廢水內之各項重金屬平均濃度，以每公頃表土土壤2000噸及一年兩期作下計算，將土壤之重金屬監測基準扣除背景值，在不考慮移除量下，Cu與Zn超過監測基準至少分別須要791及589年，其餘重金屬累積年限超過1000年以上，顯示短期間無重金屬累積疑慮；Hg則低於儀器偵極限，無累積疑慮。若以目前取樣取得之最高濃度計算，則Cu、Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、As超過監測基準分別需182、143、3884、780、4282、24390、1355年(表11)。此估算之可施用期限亦較施用以飼料飼養豬隻之廢水的估算值長很多(陳等, 2010)。此結果亦顯示，長期施用養豬廢水，銅和鋅較其他金屬較快達到土壤監測基準，是最需關切的兩項金屬(表11)。

在厭氣池中之廢水，一期作平均銅和鋅含量分別為1.5和3.9 mg/L；二期作則分別為3.3和15.8 mg/L，若以一期氮肥施用量108 kg/ha計算，則施入田間之銅和鋅量，一期作約為0.13 kg/ha和0.32 kg/ha；二期作約為0.27 kg/ha和1.29 kg/ha。而施用於畜牧場內農地之堆肥，其銅和鋅含量分別為褐色堆肥 14和46 mg/kg及黑色堆肥 29和125 mg/kg(表5)，放流水分別為0.8和1.59 mg/L(表3)。以本試驗為例，其每分地施用量為57.6 ton/year黑色堆肥與54 ton/year放流水，其銅與鋅投入量約為17.14 kg/ha/year與72.86 kg/ha/year。施用堆肥之重金屬總投入量，大於施用養豬廢水者，因此，施用堆肥時，更該注意土壤銅、鋅累積。

(五) 臭味檢測

針對99年施作作業選定兩處試驗田區進行臭味檢測，一期作檢測農田分別為山子頂段9-18號地及山子頂段90-1號地兩處；二期作檢測農田分別為山子頂段93與95號地兩處。檢測結果發現一期作兩處在廢水與灌溉水混合處之異味污染物濃度均超出標準，但在下風處（距施用點約60m）之異味污染物濃度則低於標準值（表12，表13），檢知管檢測之Ammonia及Amines值分別為未檢出至1 ppm和0.5 至2ppm；二期作異味檢測可能是因為採樣時，檢測地點上風處正在燃燒稻草，背景值已經超出異味污染濃度標準。因此，不論是與車同行或是下風處之異味污染濃度均超出標準（表12，表13），檢知管檢測之Ammonia及Amines值分別為未檢出至5ppm和未檢出至0.9ppm，皆低於工業區及農業區周界之異味污染物標準50 ppm（環保署，2006）。此次二期作的施用方式，是利用施肥車將畜牧廢水直接噴灑在試驗田內，相較於一期作將畜牧廢水隨水灌溉方式進行，與空氣接觸機率大，風向及風速隨季節變化，因此異味易散出，故建議農田四周100 m處無住宅（圖20）。施用區下風處約100m後，則降至標準以下（工業區及農業區周界之異味污染物標準為50；若採用新污染源之排放標準：30，亦符合標準）。

異味濃度易受採樣時氣候條件之影響，如風向、風速與氣溫之基本條件之影響。不同之大氣穩定度會影響臭氣擴散程度，而影響周界之異味濃度。因此在採樣當時之大氣條件分類，採用穩定度分類系統上使用頻率最高的Pasquill方法，此法將穩定度分成六種等級，依日照強度、雲量及風速因素決定穩定度等級，分類方式參考表14。故建議施肥時機為中等日照強度且風速大於4 m/s，臭味易垂直擴散。

從試驗結果得知（表12）平鎮異味污染值均相當高，可能因為田地過濕所造成的（糞液肥不易被土壤吸收）導致表土上積少量糞液肥，造成異味污染值較高。

(六) 人畜共通傳染病及寄生蟲擴散的公共衛生評估

1. 病原菌擴散

一期作及二期作期間所採的養豬廢水、監測井及土壤病原菌監測結果如表15。一期作施肥期間所採的固液分離前廢水之生菌數為 5.5×10^7 CFU/mL，實際施用於田間之固液分離後廢水為 3.0×10^7 CFU/mL；而監測井中，總生菌數則降至 7.0×10^4 至 1.4×10^4 CFU/mL 之間。固液分離前廢水之大腸桿菌數為 6.4×10^5 CFU/mL，實際施用於田間之固液分離後廢水為 6.2×10^4 CFU/mL；在井水檢測方面，則除畜牧場內之2號監測井之大腸桿菌達 1.9×10^2 CFU/mL，其餘監測井之大腸桿菌數都極低。在沙門氏桿菌檢測方面，雖在廢水檢測中發現沙門氏桿菌為陽性，但監測井水則皆為陰性。在彎曲桿菌檢測方面，由於廢水即檢測不到彎曲

桿菌，因此土壤與井水自然亦皆為陰性。

二期作期間所採的固液分離前廢水之生菌數為 3.2×10^6 CFU/mL，實際施用於田間之固液分離後廢水為 2.5×10^6 CFU/mL，監測井中之總生菌數則降至 8.8×10^2 至 4.4×10^5 CFU/mL 之間。固液分離前廢水之大腸桿菌數為 4.4×10^5 CFU/mL，實際施用於田間之固液分離後廢水為 3.6×10^2 CFU/mL；在井水檢測方面，則除畜牧場內之監測井 2 號大腸桿菌數達 6.0×10^3 CFU/mL，其餘監測井之大腸桿菌數都極低。在沙門氏桿菌檢測方面，雖在廢水及畜牧場內之監測井 2 號井水中發現沙門氏桿菌為陽性，其餘監測井水則皆為陰性。在彎曲桿菌檢測方面，則與一期作一樣，則皆為陰性。

土壤中總生菌數與廢水者相近，但在大腸桿菌部分，一期作畜牧場中之土壤，大腸桿菌達到 2.4×10^3 CFU/mL，其餘農地則相對低很多（表 15），顯示畜牧場旁土壤，殘留病原菌機率高，雖畜牧場農場中主要種植飼料作物，但仍須注意。沙門氏桿菌與彎曲桿菌檢測方面，則皆為陰性。

目前地下水質並未訂定生菌數或大腸桿菌數標準；但地面水體水質標準中，一般甲級處理(僅消毒即可飲用)大腸桿菌需在 50 CFU/mL 以下，乙級(過濾、消毒等才可飲用) 需在 5×10^3 CFU/mL 以下，丙級(過濾、逆滲透、活性炭等高級處理等才可飲用) 需在 10^4 CFU/mL 以下。而水肥處理廠之放流水大腸桿菌數標準，需在 3×10^5 CFU/mL 以下。分析結果顯示，固液分離後廢水大腸桿菌數已低於水肥處理廠之放流水大腸桿菌數標準。監測井 2 號可能因其位於畜牧場內，受污染之機率高，其井水中大腸桿菌僅在丙級飲用水源標準內，其餘井水均在甲級飲用水源標準內。

從以上檢測結果顯示，在畜牧場範圍內（包括地下水）感染病原菌之風險較施用廢水農地高很多。廢水固液分離過程可去除一部分病原菌。從總體分析數據顯示病原菌擴散之機率低。

2. 抗生素殘留

養豬廢水、土壤、監測井水及植體之抗生素監測結果分析如表 16，除了在一期作施肥期間所採的固液分離前、後廢水曾測得林可黴素分別為 16 ppb 及 6 ppb，其餘皆未檢測出，顯示在廢水只含低濃度之林可黴素下，林可黴素不致流入地下水，亦不致殘留於土壤或是植體中。其餘抗生素，如氯四環素、青黴素與雪華魯新等則都未檢出，無殘留疑慮。

3. 寄生蟲

在寄生蟲檢測部分，從於一期作採取施用廢水及施用養豬廢水至田間 1,2,4 週後，分別採取地號 90-1、9-18 田及畜牧場內 2 號井旁之土壤，及二期作採取

施用廢水及施用養豬廢水至田間 1,2,4 週後，分別採取地號 95、9-9 田及東勢段地號 228 與 232 田之土壤，進行寄生蟲分析。結果顯示，在土壤或廢水中皆未有檢測出隱孢子蟲、蛔蟲及鞭蟲等寄生蟲卵，顯示畜牧場已掌控寄生蟲防治工作。

(七)地下水及地面水質變化

1.地下水

本試驗新設之監測井，水位都很高；除了 7 號監測井之水深(井口至地下水面)大致在 3m 左右，其餘都在 2m 以內，8 號井水深大部分在 50cm 以內，3 號與 5 號井為自湧井，如圖 21。從圖 1 附近監測井之水深及南高北低之地型看來，大區域之地下水流方向應是由南向北流，但在本次鑿井後測得各井之水流方向，並不如預期單純，反而非常複雜，各井之水流方向如圖 3。由於鑿井後距一期作施作期時間很短，故各井都只有一次背景值測定。

今(99)年施用固液分離後養豬廢水試驗，在水田一期作前共約 2 公頃，施作時間為 2 月 8 日~11 日，為監測此時間地下水質是否受到影響，因此除每月定期監測外，選定監測井 2、3 及 8 號於 2/8~2/12 每日採集一次水樣，其他監測井及地面水亦於 2/8 及 2/11 採集水樣，分析 pH 值、EC 值、銨態氮及硝酸態氮。水田二期作前共施用約 4 公頃，施作時間為 99 年 7 月 20 日~8 月 20 日，亦於 7/22 採集所有監測井與地面水水樣，分析 pH 值、EC 值、銨態氮及硝酸態氮，

由試驗期間監測井之 pH 值變化圖（圖 22）顯示，除了 3 與 5 號井之 pH 值較高，介於 7-8 之間，其餘大都介於 5.5-7 之間，井水偏酸應是平鎮地區土壤為紅土，土壤 pH 值偏酸所致，而 3 號與 5 號井因是自湧井，其 pH 值除了受土壤 pH 影響外，應還受農事操作之影響。

井水之 EC 值表示井水中含鹽分之情形，由試驗期間之 EC 值（圖 23）顯示，大部分之 EC 都介於 200-400 μ s/cm 之間，並沒明顯因施用廢水而大幅升高之現象；井水 EC 值高於 400 μ s/cm，只有 1 號井與 4 號井，而 1 號井還是試驗區之上游井，且在 2/11 一期作施用廢水期間，曾測得接近 800 μ s/cm 之水質，但此為試驗區之上游井，顯示背景地下水質可能已有受污染之情形，可能受當地施用化肥之影響。4 號井水 EC 值都維持在較高測值，其雖是試驗區之下游井，但其距試驗區還有相當距離，且緊臨試驗區之下游井的監測井 3 號並沒有發生此種現象，表示監測井 4 號之地下水 EC 值升高，應不是施用廢水的關係，應是受附近農地施用化肥與附近住宅區家庭污水排放之影響。

由試驗期間監測井之 $\text{NH}_4\text{-N}$ 與 $\text{NO}_3\text{-N}$ 變化圖（圖 24 與 25）顯示，位於試驗區旁之 3 號與 5 號井水深雖淺，但其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量低，皆低於第二類地下水之

監測標準 0.25 mg/L， NO_3^- -N 更是亦低於監測標準 25 mg/L，顯示這 2 口井未受施用廢水之影響，1 號上游井之 NH_4 -N 則稍高，但在 1 $\mu\text{g/L}$ 以下， NO_3^- -N 則低於 0.5 $\mu\text{g/L}$ 。4 號井在 NH_4 -N 與 NO_3^- -N 都具有較高之濃度，應是受附近農地施用化肥與住戶排水的影響。畜牧場農場內之 2 號井雖然 NO_3^- -N 較低，但 NH_4 -N 濃度較高，應主要是受農場施用大量堆肥所致。

8 號井在 2 月與 8 月間分別呈現較高的 EC 值與 NH_4 -N 濃度 (圖 23 與 24)，由表 7 得知 8 號井旁農地 9-17 與 9-18 一期作施肥期間分別為 2/11 與 2/10，8 號井旁農地 9-8、9-9 與 9-10 二期作施肥期間為 7/23~28， NH_4 -N 濃度升高時，正好為施肥後一週。由圖 24 顯示 8 號井水可能為受施用廢水之影響，但由圖 2 之水流方向看來，施用廢水則未必是唯一原因；而上游監測井 7 號井亦有上升現象，與 8 號井上升時期相似，因此，推測非單純施用養豬廢水施用所致，可能原因為施作同時附近田區亦同時進行施肥及整地作業，但在 2-3 週後皆恢復監測初始值。8 月後，8 號井因 9-8~9-10 號田地目變更，農地整地施工而埋入土堆中，而未能採集井水。另外，由圖 21~25 得知降雨量與地下水水質與水位並沒有明顯的關聯性。

以 5 號井為例作地下水質之垂直觀察(圖 26 及圖 27)，其中 EC 值在施作後，有明顯增加，但約 2 週後就恢復為施作前值背景，水質中 NH_4 -N 影響時間較長在表面存留約 3 週之後才下降，水中 NO_3^- -N 則疑有向下移動之趨勢，隨時間表面含 NO_3^- -N 下降，5-10 則 NO_3^- -N 則有增加情形， NO_3^- -N 可能因淋洗進入深層地下水；但兩者皆低於第二類地下水監測基準。

圖 28 為地下水質之總有機碳(TOC)分析結果，由結果顯示，一期作施用後，於 3 月之監測結果，位於下游之 4 號、8 號井總有機碳(TOC)有較高之情形，但於試驗區旁之 3 號、5 號未有明顯變化，顯示施用廢水未對地下水質造成影響，4 號、8 號井總有機碳(TOC)偏高應非施用廢水造成，可能為區域性下游之影響。2 號井於畜牧場內，可能為收畜牧場之污染可能較高。所有監測結果皆於標準(10 mg/L)內。

2. 地面水

由於試驗區之水系複雜，為了解施用廢水是否會污染地面水質，分別監測試驗區旁三條水系之上、下游水質。各採樣點的 pH、EC、如圖 29 及圖 30 所示，地面水的監測起始背景值已高於施作後之測值，且地面水質變化在上下游皆呈現相同之趨勢，各試驗區均有田埂，施於田間之廢水應不會流入地面水，對地面水質造成影響，在監測的過程中，除了二期作 7/22 日施作當日，1 號地面水下游的 NH_4 -N 明顯上升外，且於兩週後恢復正常，其他地面水通過試驗區後並無明顯或規律之水質變化，如：EC 值、N 總量增加等。因此影響地面水質可能之因素為

降雨、流入地面水之工廠排水及附近居民之排水等其他因素，本試驗對於地面水並無明顯影響。

3.施用廢水對於水質之影響

初步監測結果表示此次畜牧廢水施作並無明顯造成環境污染，由於試驗區地下水較淺，施用廢水雖對地下水水質略有影響，但不至超過灌溉水質標準且於二至三週內排除恢復背景值，亦不造成污染累積現象。但畜牧場施用豬糞堆肥及放流水耕作方式，因施用量較大，地下水受污染可能性較高。

(八)施作成本

1.估算條件

- (1)以桃園縣平鎮市莊玉輝畜牧場為例，該畜牧場為畜養5,000頭豬之沖水式豬舍，每頭豬每日產生25公升廢水，每日產生125噸廢水，以每台載重5噸之施肥車載運，需載運25車，故需兩台施肥車，方能消耗畜舍每日產生之廢水量。
- (2)固液分離後之液體肥分N、 P_2O_5 、 K_2O 約為0.16% (0.15~0.2)、0.09% (0.075~0.125)、0.04%，相當於一車5公噸廢水之肥分N、 P_2O_5 、 K_2O 為8、4.5、2kg；化肥以台肥5號為例，每包化肥所含N、 P_2O_5 、 K_2O 為6.4、3.2、4.8kg。所以一車5噸廢水約為1包複合肥料之N與 P_2O_5 ，但 K_2O 約只有42%。
- (3)若以每公頃農地施128 kg氮肥為例，則每公頃約需16車(80噸，N、 P_2O_5 、 K_2O =128kg、72kg、32kg)或是20包化肥(N、 P_2O_5 、 K_2O =128kg、64kg、96kg)，每日廢水可提供約1.56公頃農地肥料。養豬廢水等量肥效約為90%。
- (4)假設兩台施肥車每日可處理125噸廢水，每月處理3,750噸廢水，一年處理45,000噸廢水，若以施肥車使用年限10計算，則共可處理45萬噸廢水。

2.不同處理方式成本比較

(1)三段式廢水處理方式

A.設備費

依據畜牧場提供之資料，廢水處理儲存池建造成本為1500萬元，使用年限20年，20年共處理90萬噸廢水計算，則儲存池建造成本16.7元/噸。

B.維護費

依據畜牧場提供之資料，儲存池維護成本約8,000元/月，若以每月處理3,750噸廢水為例則儲存池維護成本2.1元/噸。

C.消耗性成本

根據畜產協會資料，畜養1,000頭豬需要1台3HP的鼓風機，用電量為60

度/日。本實驗畜養數為5,000頭豬，假設需要5台3HP的鼓風機，相當於用電量為300度/日。依據臺灣電力公司公告，每度電約3.96元，每日電費約1188元，以每日處理125噸廢水計算，則電費9.5元/噸，

D.人事費

依據畜牧場提供之資料，三段式廢水處理操作人員每月工資約10000元，若以每月處理3,750噸廢水為例，則人事成本2.7元/噸。

E.堆肥製作費

養豬廢水內約有1%的固體，1公噸廢水之固液分離後之固體約為10 kg。製作堆肥時，豬糞與木屑（調整材）之體積比約為4：1，而木屑之密度約為0.4 g/cm³，故換算為重量比約為10：1，整個堆肥化過程大約損失50 %的重量，依據林（2001）資料顯示，堆肥製造成本為3.79 元/kg，故處理1 kg之畜牧廢棄物所需費用為3.79 元/kg ÷ 0.5 ÷ (10/11) = 8.3 元/kg，若要將1公噸養豬廢水製作成堆肥，則大約需要83元/噸。

F.化肥成本

台肥5號每包成本300元，假設施用化肥人員施灑每包化肥酌收50元施肥操作成本，以1公頃20包化肥計算，則每公頃成本為7000元。每公頃施用廢水量為80 Mg，則化肥成本相當於88元/Mg。

基於前述估算，三段式廢水處理之液體部份之處理成本約31元/Mg，加上製作堆肥成本83元/Mg，加上化肥成本88元/Mg，三段式廢水處理（含施用化肥）成本總合為202元。

(2)養豬廢水農地再利用方式

A.設備費

農地再利用儲存槽儲存量為7500噸，相當於2個月廢水之容量，儲存槽之建造成本約8000元/m²（深4m），7500噸造價約1500萬元，使用年限20年。20年共處理90萬噸廢水計算，養豬廢水農地再利用儲存池建造成本16.7元/噸。

依據估算條件，養豬廢水農地再利用方式需兩台載重5噸之施肥車，才能處理完每天產生之廢水，每台施肥車以150萬元計算，兩台共需300萬元，使用年限10年。10年共處理45萬噸廢水為例，則購買施肥車平均成本6.7元/噸。

B.維護費

施肥車維護費假設為購買機具之一半，故兩台施肥車維護費為150萬

元，使用年限10年。以10年處理45萬噸廢水為例，機具維護費平均3.3元/噸，

C.人事費

司機每天薪資2,000元x 2人= 4,000元，每台每日可處理62.5噸廢水，故施肥車駕駛人工資32元/噸。

D.油資

畜牧場與試驗田距離為2km，施肥車油耗量8km/L，每日載量25車共行駛100km，油耗為12.5L。油資3.2元/噸

E.地磅費

每車次地磅費50元，1250元/日，施肥車最大載重為5公噸，若以施肥車最大載重為例，則地磅費10元/噸。

G.監測成本

對於未來在利用案進行時需進行監測，監測項目與成本：地下水監測成本約 7200 元/年(監測項目：pH、EC、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 P，每六個月檢測一次)，土壤監測成本約 2800 元/年(pH、EC、P、Cu 和 Zn 每二年進行一次檢測)，監測井取 5 口，每口建造成本約 100,000，以折舊 20 估算，每年約需分攤 79,000 元，每年約施用 4.5 萬噸廢水下，每噸成本約 1.7 元。

基於前述估算，養豬廢水農地再利用處理每公噸廢水需花費 71.9 元。農田再利用成本雖高於三段式廢水處理之液體處理部分之成本，但若加上固體之堆肥處理成本，及原本農地施肥成本，農地廢水再利用較有效率且便宜（表 17）。

當地農民對於栽培水稻之慣用施肥量約為每分地 2 包台肥 5 號，即每公頃約需 7,000 元/ha，相同氮量之養豬廢水成本約需要 5,760 元，或每車(5 噸)360 元。根據養豬廢水與堆肥特性與成分分析章節中所示，養豬廢水中之 K 肥較不足，若以台肥生產之氯化鉀（N：P₂O₅：K₂O=0：0：60）補足，則每車大約需要補充 0.2 包氯化鉀，每車成本約 88 元，即補充 K 肥成本約 17.6 元/噸，以一車 5 公噸計算，則養豬廢水農地再利用每車成本增加至 448 元，每公頃 7,160 元，因此就農民的角度而言，養豬廢水農地再利用，較施用化學肥料成本高。

彙整上述各項費用如表17，綜觀農地再利用成本分析，其中除了人事成本所佔比例最高外，其次為建造鋼筋混凝土之儲存池之支出，但此部分之支出，可採用較便宜之儲存方式，如採用不鏽鋼材質或塑膠材質等方式，則可降低成本。再其次，則為地磅費用，此費用係基於環保法規必須遵行，但實務上，每次均是滿載運出，實無必要每車稱重，且當施作農地附近無地磅站時，即徒增額外之運費，

並且每日可處理量將減少，大幅增加處理成本，建議環保單位研商刪除此項規定的可能性。

(九)溫室氣體排放估算

以飼養2,000頭豬隻規模之豬舍，每天產生50 Mg廢水，施肥6分地為例，引用前人與IPCC之排放係數估算養豬廢水直接農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）之溫室氣體（Greenhouse Gas, GHG）排放量包括廢水處理過程，載運、施用與施用後農地溫室氣體排放等，並進行比較。依據估算結果，若種植形態為水田，則養豬廢水農地再利用約產生5,814 kg CO₂當量，而三段式廢水處理約產生6,539 kg CO₂當量，前者為後者之88.9 %。若種植形態為旱田，則養豬廢水農地再利用約產生2,188 kg CO₂當量，而三段式廢水處理約產生2,780 kg CO₂當量，前者為後者之78.7%(表18、19)，估算結果顯示養豬廢水農地再利用較三段式廢水處理可降低溫室氣體之排放。(詳細估算，如附錄一)

(十)試驗中遇到的困難

- 1.平鎮試驗區農地未經重劃，農路狹窄，施肥車操作不易，因此可施用廢水的農地有限，養豬場附近之農地，不足以消耗所有廢水。若載運至較遠的農地施作，則增加載運成本。
- 2.試驗區附近主要是水稻田，每期作需氮量約只有128 kg/ha，因此可消納的廢水較早作少。
- 3.農民因沒有施用廢水之經驗，因此擔心其肥效而猶豫是否施用。但此部份未來可藉由宣導或獎勵獲得改善。
- 4.因廢水肥分差異大，確實的肥分量需於分析後才告知農友，若施肥量不足推薦量，則農友還須補其不足之肥料，增加農友管理上的困擾。
- 5.試驗過程中，農友常常依據過去經驗自行追加肥分，使得試驗田的肥分難以精準地掌控。

(十一)檢討與建議

- 1.本試驗畜牧場主要以地瓜葉飼養豬隻，只有小豬才以飼料飼養，因此廢水所含重金屬濃度較一般以飼料飼養者低很多，無重金屬在土壤中累積之疑慮，且廢水中肥分高，可大幅降低施作成本，相較於其他沖水式豬舍，是較好之農地再利用材料，只是平鎮地區經常有雨，預期施作時遇到田區潮溼，施肥車無法下田施作之機率相當高，所幸農友尚能接受隨灌溉水漫灌方式，但在灌溉水流量小的地區，則可能導致肥分集中於廢水混入區，田區肥力不均的現象，使農友管理困難。

- 2.若欲完全以農地再利用的方式來處理所產生的廢水，則須評估附近是否有足夠的農地及農民意願，以了解其可行性。在平鎮地區主要栽種水稻，而其施氮量僅為128 kg/ha，兩個期作約只需256 kg/ha計算，每公頃約僅能消納36頭豬之廢水，因此較旱作區需更多的農地配合農地再利用。若僅欲將一部份廢水農地再利用，使原來三段式廢水處理之放流水達排放標準，則將增加養豬業者額外的支出。
- 3.廢水肥分不如化肥穩定，將增加農民管理上的不便，且等量氮肥之肥效約為化肥的80-90%，亦會有鉀肥不足的可能性，農友還需再補充鉀肥。因此，廢水農地再利用主要是為養豬業者解決廢水處理問題，養豬業者應負擔大部份費用。建議農友最多只負擔等量氮肥的50%，即每一車（5噸）150元。
- 4.由於廢水量大，而每一農友的農地狹小，即農地再利用須要眾多農友的配合，建議應由施肥公司或代耕中心協助處理雙方協商問題，才易執行。並建議使用訂立契約的方式，整合畜牧場附近農地，有效地控制農地施作範圍、作物種類以及施肥量。
- 5.從試驗結果得知降雨過後，建議不進行施灑糞肥；因土壤之含水率高，不易再吸收糞液肥，東勢段232試驗期間，均有間接性降雨，導致糞液肥累積於土壤表面，使得異味污染物濃度較高。建議施肥時機為中等日照強度且風速大於4 m/s，臭味易垂直擴散，異味污染濃度較低。
- 6.若經評估後許可廢水農地再利用，建議政府相關單位能協助下列事項：
 - (1)從成本分析發現，地磅費用是相當沉重的負擔，特別是農地附近無地磅站時，需載運到遠處，不僅增加成本且耗時，又影響每日可處理量。廢水農地再利用每天的處理量相當大，而農友都會以滿載處理，建議刪除每車次都需地磅之規定。
 - (2)目前「專業廢棄物管制資訊系統」並沒有記錄處理地點之設計，建議增加施作農地及施用量之記錄，如此便可追蹤每一塊農地之總施用量，以利未來環境監測與評估。
 - (3)本研究成本分析所計算之施肥車價格(150萬)，係以經過車測，可於任何道路行駛之四輪傳動貨車為基準，但施肥車大都在農業區操作，若農機工廠能開發合適機型之農用車，將可減少部分成本。但施肥車之載重量大，已超過現行搬運車之規範，建議農政單位協助此項規範擬訂。

六、誌謝

本研究經費係由桃園縣政府與農委會畜牧處提供。感謝朝陽科技大學張簡水紋主任協助地下水總有機碳分析，中央畜產會陳月娥小姐協助養豬廢水、監測井水、土壤以及植體等病原菌與抗生素分析，亦感謝桃園縣平鎮市莊玉輝牧場與參與試驗計畫的農民協助研究進行。

七、參考文獻

- 中華民國國家標準。1988。食品微生物之檢驗法—大腸桿菌之檢驗(總號：10951，類號：N6192)。中華民國經濟部標準檢驗局。台北市，台灣。
- 中華民國國家標準。2000。食品微生物檢驗法—沙門氏桿菌之檢驗(總號：10952，類號：N6193)。中華民國經濟部標準檢驗局。台北市，台灣。
- 行政院農業委員會農業試驗所。2010。網址：
<http://www.tari.gov.tw/taric/modules/icontent1/index.php?op=explore¤tDir=13>。上網日期：2010-08-31。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。1994。土壤中陽離子交換容量—醋酸銨法，1994年2月22日公告。(NIEA S201.60T)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2000。水中導電度測定方法—導電度計法。公告字號0890070017，2000年11月23日公告。(NIEA W203.51B)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2000。水中總有機碳檢測方法—燃燒/紅外線測定法。公告字號67787，2000年11月16日公告。(NIEA W530.51C)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2002。廢棄物含水份測定方法—間接測定法。公告字號0910014627，2002年3月5日公告。(NIEA R203.01T)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2002。污泥及沉積物中重金屬檢測方法—酸消化法。公告字號0910083731A，2002年2月28日公告。(NIEA R353.00C)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2003。土壤中重金屬檢測方法—王水消化法，2003年7月1日公告。(NIEA S321.63B)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2004。水中金屬及微量元素檢測方法—感應耦合電漿原子發射光譜法。公告字號0930030309，2004年4月29日公告。(NIEA W311.51B)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2006。水中總硬度檢測方法—EDTA滴定法。公告字號0950058417，2006年10月15日公告。(NIEA W208.51A)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2006。水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法—103℃～105℃乾燥法。公告字號0950043953，2006年6月15日公告。(NIEA W210.57A)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2004。水中硝酸鹽氮及亞硝酸鹽氮檢測方法—鎘還原法。公告字號0930057378，2004年8月9日公告。(NIEA W452.5)。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2005。水中氨氮檢測方法—靛酚比色法。公告字號0940035925A，2005年5月12日公告。(NIEA W448.51B)。

行政院環境保護署環境檢驗所。2000。水中硫酸鹽檢測方法—濁度法。公告字號 0890075015，2000 年 12 月 14 日公告。(NIEA W430.51C)

行政院環境保護署環境檢驗所。2002。水中氯鹽檢測方法—硝酸汞滴定法。公告字號0910065071，2002年9月23日公告。(NIEA W407.51C)。

行政院環境保護署。2006。空氣污染防治法-固定污染源空氣污染物排放標準。中華民國91年7月修訂。

行政院環境保護署環境檢驗所。2007。水中大腸桿菌群檢測方法—多管發酵法。公告字號0960091685，2007年11月29日公告。(NIEA E201.54B)。

行政院環境保護署環境檢驗所。2008。土壤酸鹼值(pH值)測定方法—電極法。公告號0970075579，2008年10月2日公告。(NIEA S410.62C)

行政院環境保護署環境檢驗所。2008。水之氫離子濃度指數(pH值)測定方法—電極法。公告號0970071940，2008年9月18日公告。(NIEA W424.52A)

行政院環境保護署環境檢驗所。2008。異味污染物官能測定法—三點比較式嗅袋法。公告字號0970087754，2008年12月15日公告。(NIEA A201.13A)。

行政院經濟部能源局。2010。98年度車輛油耗指南。

莊萬發。1985。惡臭之儀器測定。復漢出版社。

畜試所。1996。豬糞尿處理與利用。畜試所特刊49號。

呂秀英。1997。台灣養豬農家污染防治成本之探討。台灣農業 33(2)：2-15。

林嘉政。2001。禽畜糞堆肥處理經驗談。豬糞尿低污染管理及再利用技術研討會論文集。pp.23-29。民國九十年二月十五-十六日。明志技術學院。

趙震慶。2003。中南部水稻田、旱田及堆肥施用對氧化亞氮排放量之影響。溫室氣體通量測定及減量對策 (IV)(楊盛行- 109 -編)，pp.107-120。

陳琦玲、范揚廣、朱戢良、廖崇億。2010。豬糞肥銅鋅在土壤中之累積與飼料規範。第五屆海峽兩岸土壤和地下水污染與整治研討會論文集。台北。p.246-255。

林俊雄。2004年10月。黑黝黝的液體黃金石油提煉。科學發展，382期：24-29。

洪肇嘉。2009。我國農業部門畜產業溫室氣體排放統計方法情境分析及管理策略研究。科技計畫研究報告。農委會計畫編號：98 農科-7.2.1-牧-U1(3)。

曾世廷。2009。水稻田碳通量觀測：隨意渦流累積法、flux-variance之可行性研究。碩士論文。中興大學環境工程學系所，臺中。

楊盛行、賴朝明、陳文雄、李春芳。2003。水田及早田甲烷減量對策及對環境永續發展之影響評估。國立臺灣大學農業化學系暨研究所，臺北。

經濟部能源局。2009。燃料燃燒及電力使用之二氧化碳排放係數。

趙子明。2007。煉油廠CO₂排放現狀及回收應用分析。安全、健康和環境，2007 (7)：29~30。

譚鎮中、王銀波。2000。畜產廢棄物堆積及施用之甲烷釋放及減量對策。溫室氣體通量測定及減量對策 (II) (楊盛行編)，pp.95-109。國立臺灣大學全球變遷中心、國立臺灣大學農業化學系和國立臺灣大學農業陳列館，台北，臺灣。

- Cakir, F.Y. and M.K. Stenstrom. 2005. Greenhouse gas production: Acomparision between aerobic and anaerobic wastewater treatmenttechnology, *Wat. Res.*, 39(17) : 4197-4203.
- Cheng, Y. F., C. M. Hong, C. H. Hsieh, M. T. Koh, S. Y. Leu, T. W. Lin and S. Y. Sheen. 1996. Research and counselling on livestock waste treatment of Taiwan Livestock Research Institute. Dept. Livestock Management, Taiwan Livestock Research Institute.
- Farmer J.J. 1995. Enterobacteriaceae: introduction and identification. In: Murray PR et al., eds. *Manual of clinical microbiology* 8/e(vol.1). ASM Press, Washington, DC. 450-456.
- Garcia L.S., Bullock-Iacullo S, Palmer J, Shimazu RY. 1995.Diagnosis of parasitic infections: collection, processing, and examination of specimens. In: Murray PR et al., eds. *Manual of clinical microbiology* 6/e. ASM Press, Washington, DC. 1145-1158.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2006) . 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use , from : <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2007. IPCC Fourth Assessment Report . Climate Change 2007: Synthesis Report .
- Keeney, D. R., and D. W. Nelson, 1982. Nitrogen-inorganic forms. pp. 643-689. In A. L. Page et al. *Methods of soil analysis, Part 2*. 2nd ed. Agron. Monoger. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. p.149-157. In A. L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis, Part II* 2nd ed. ASA and SSSA, Madision, WI.
- Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. p. 167-179. In A. L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis, Part II* 2nd ed. ASA and SSSA, Madision, WI.
- Santamaria J, Toranzos GA.2003. Enteric pathogens and soil: a short review. *Int Microbiology* 6: 5-9.
- Su, J.J., B.Y. Liu, and Y.C. Chang. 2003. Emission of greenhouse gas from livestock waste and wastewater treatment in Taiwan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95: 253-263
- Yang S.-S., Liu C.-M., Lai C.-M., Liu Y.-L. Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990-2000 in Taiwan (2003) *Chemosphere*, 52 (8), pp. 1295-1305.
- Yang S.-S., Chang H.-L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil (1998) *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 69 (1), pp. 69-80.



圖 1、試驗區位置及鄰近地下水監測井

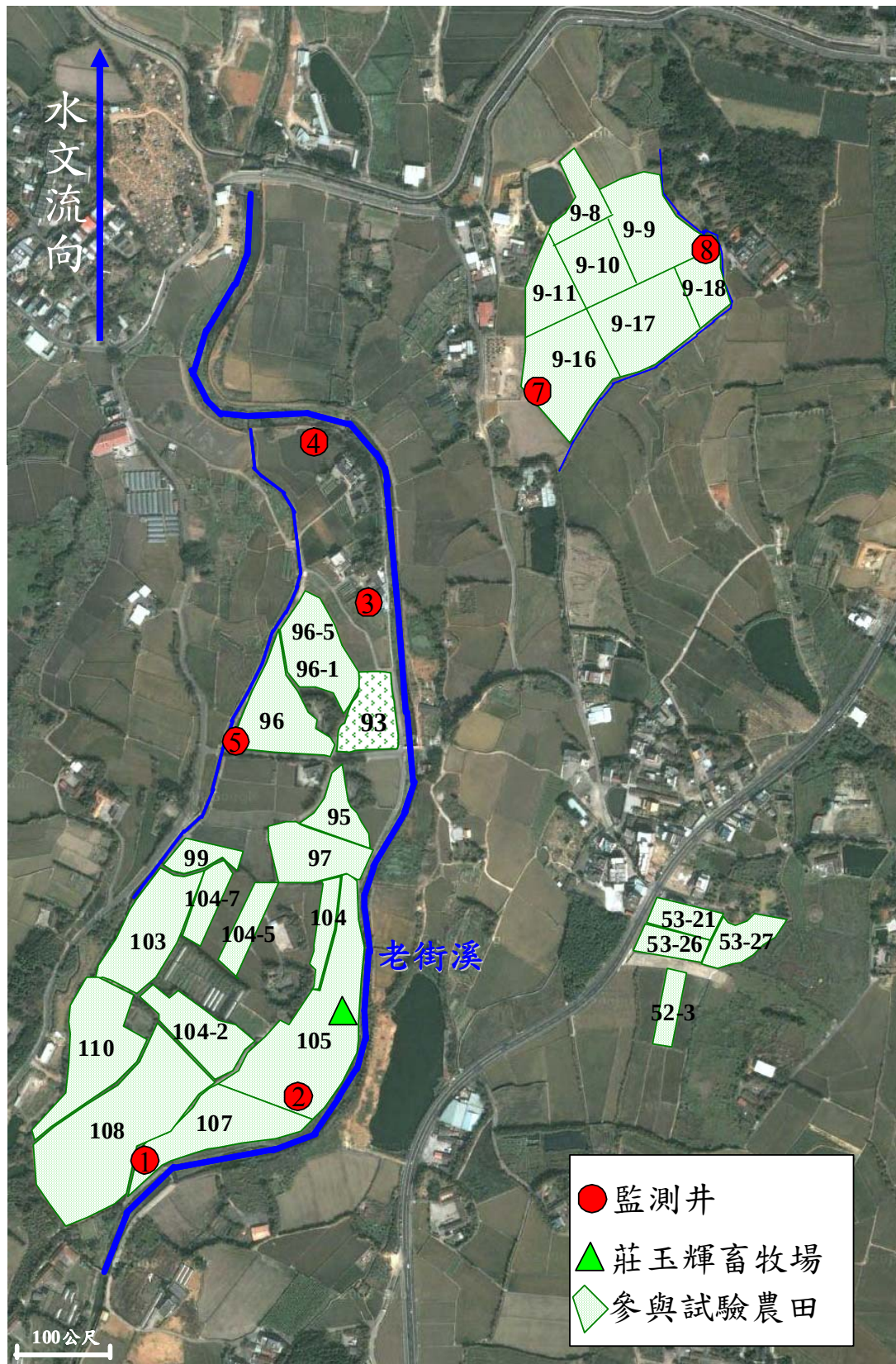


圖 2、申請試驗區地號及監測位置

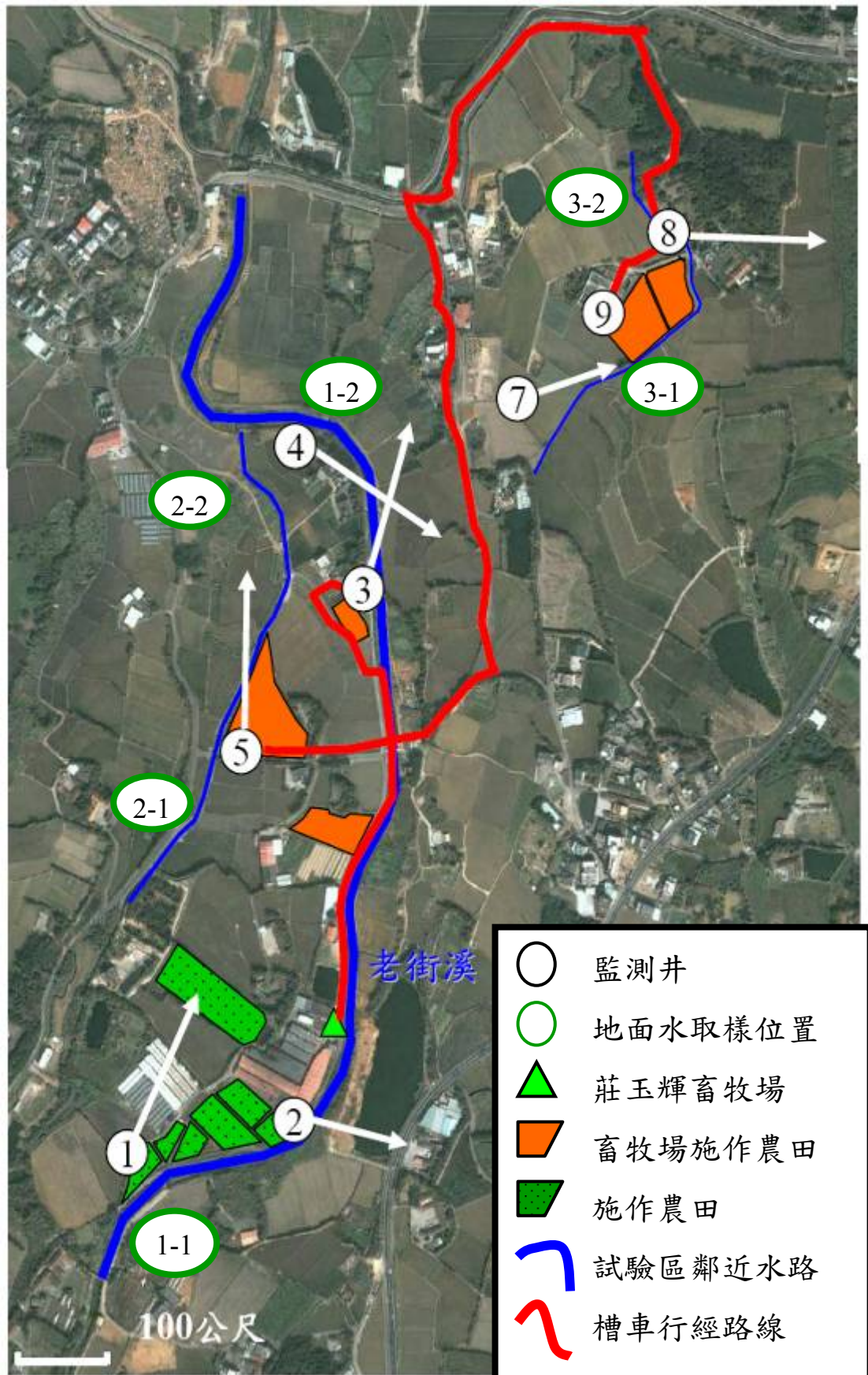


圖 3、99 年一期作施作田區、槽車行經路線及地下水流方向

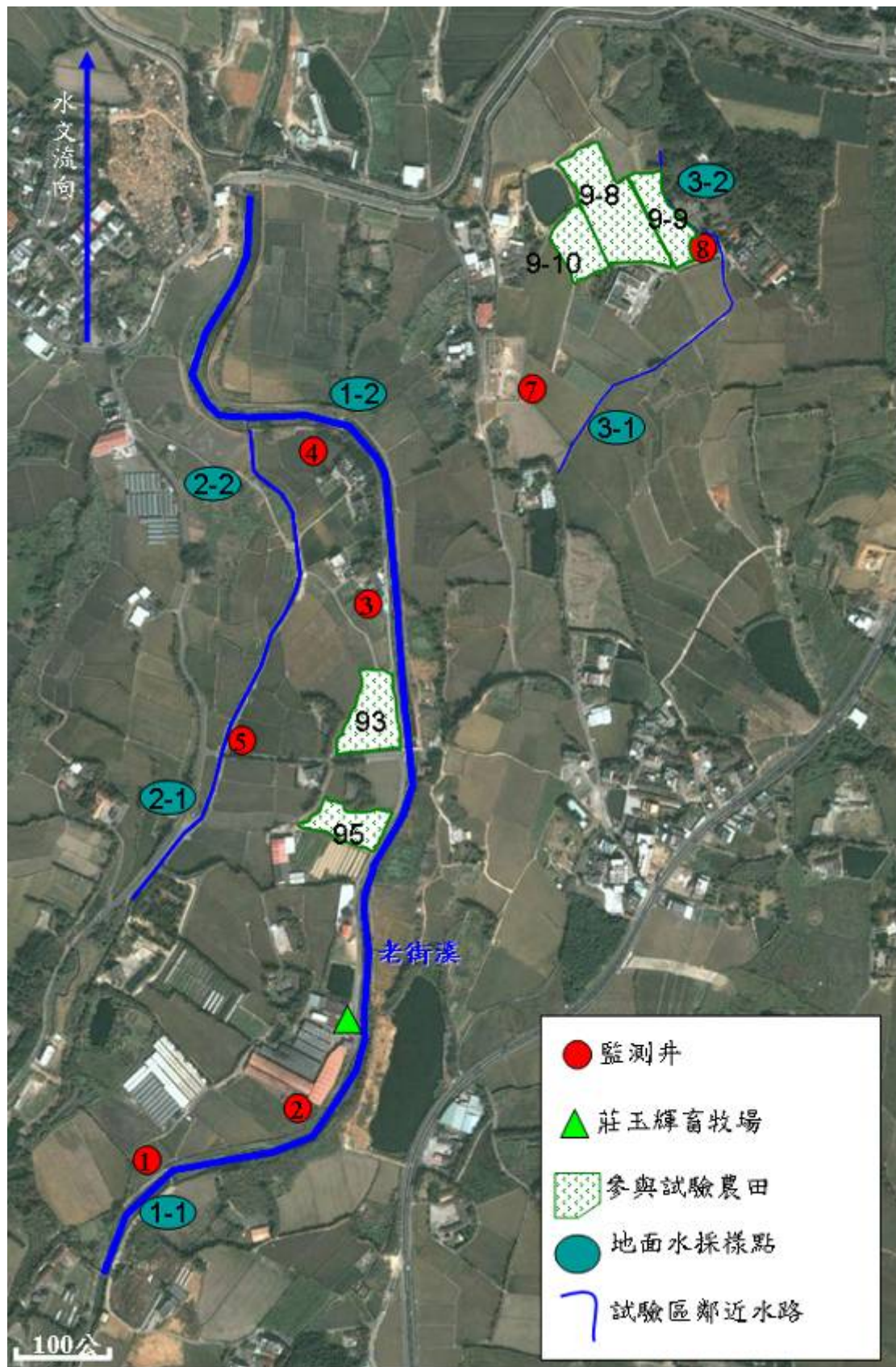


圖 4、99 年二期作施作田區及監測位置



圖 5、99 年二期作施作田區及監測位置（續）

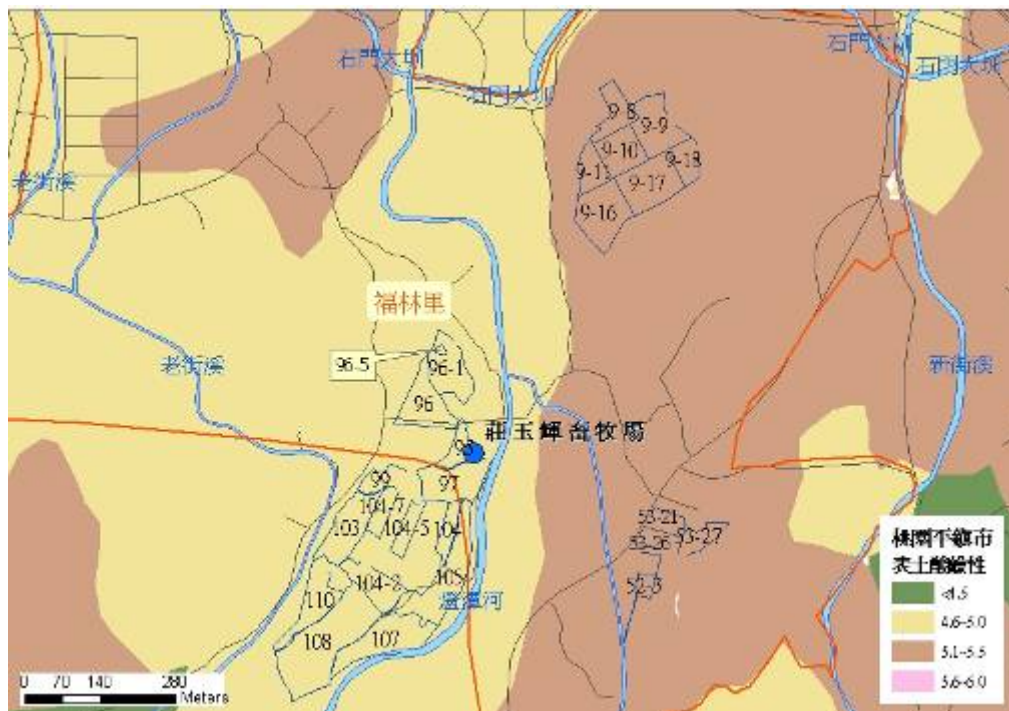


圖 6、桃園平鎮市莊玉輝畜牧場附近表土 pH 值



圖 7、桃園平鎮市莊玉輝牧場附近土壤排水等級

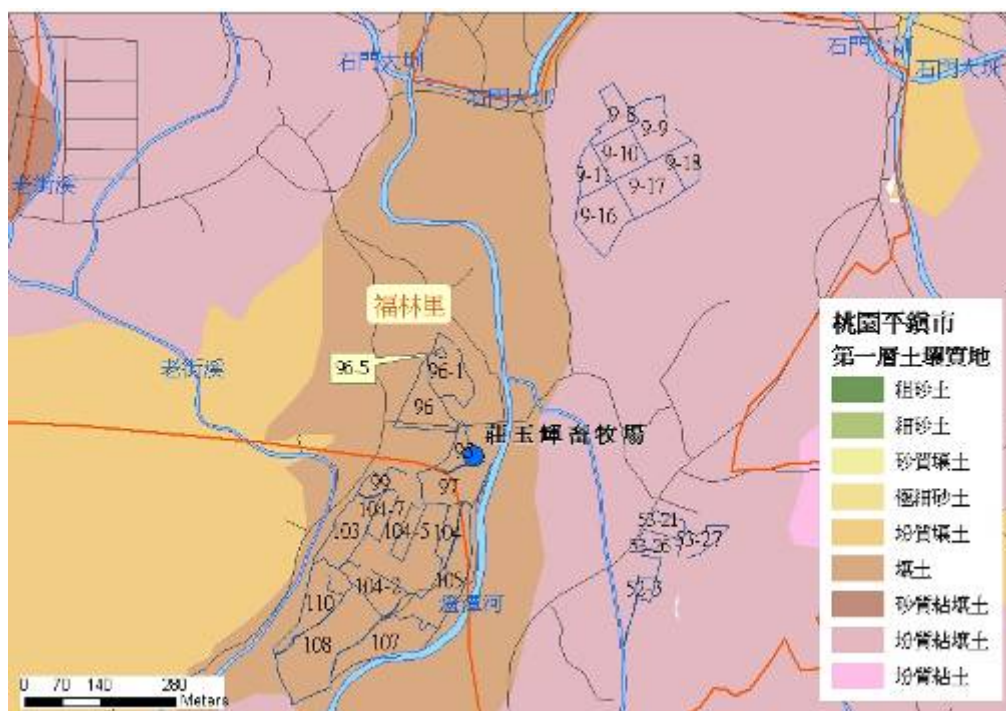


圖 8、桃園平鎮市莊玉輝牧場附近 0-30cm 土壤質地



圖 9、桃園平鎮市莊玉輝牧場附近 30-60cm 土壤質地

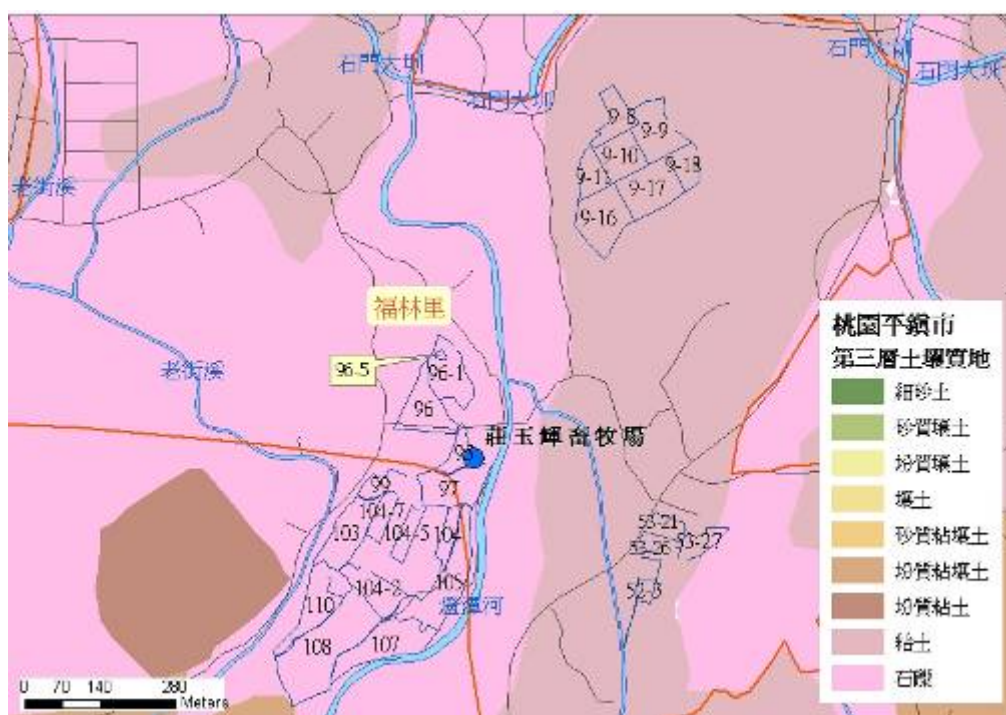


圖 10、桃園平鎮市莊玉輝牧場附近 60-90cm 土壤質地

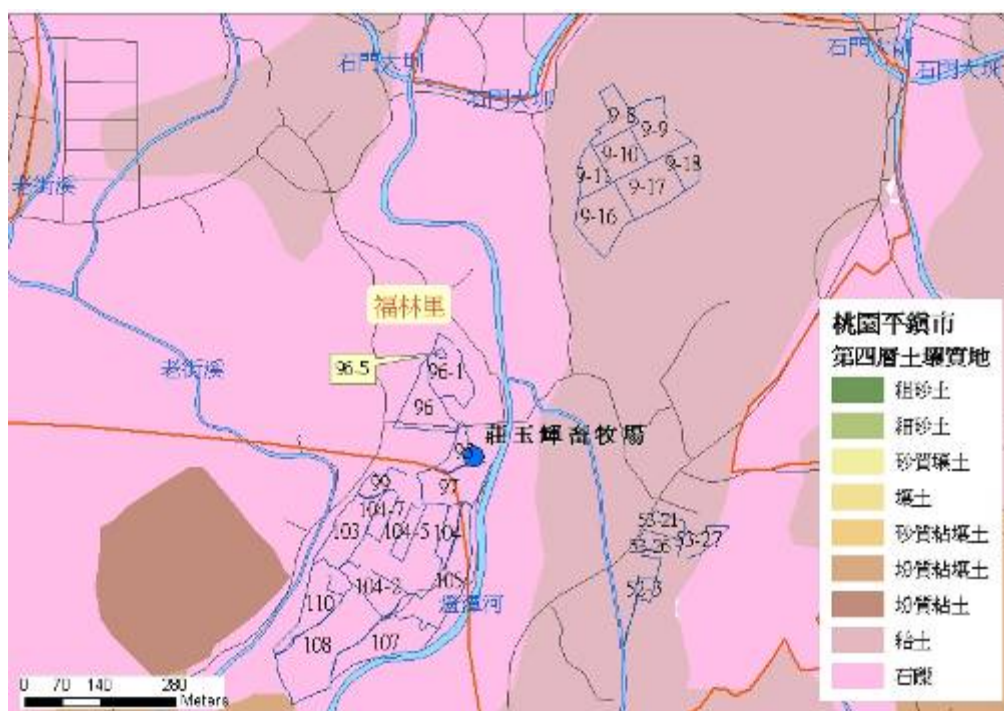


圖 11、桃園平鎮市莊玉輝牧場附近 90-150cm 土壤質地



圖 12、注入式槽式施肥機



圖 13、隨水漫灌施肥



圖 14、噴灑灌溉施肥

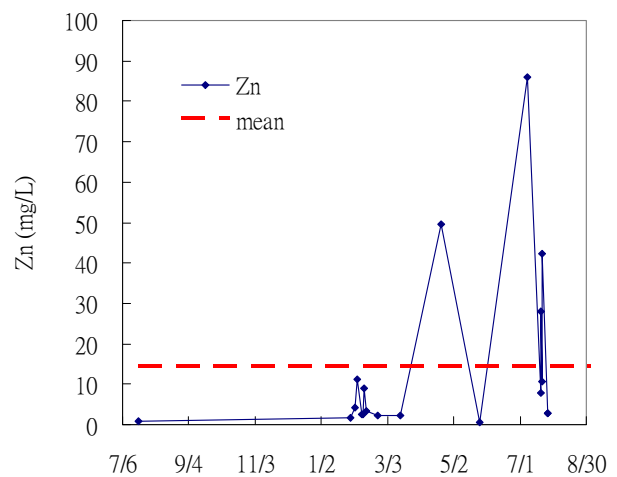
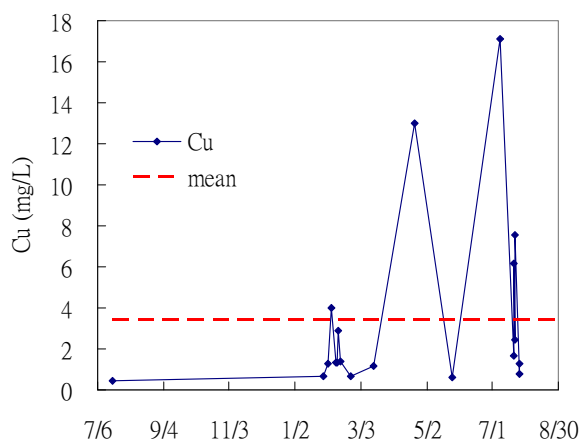
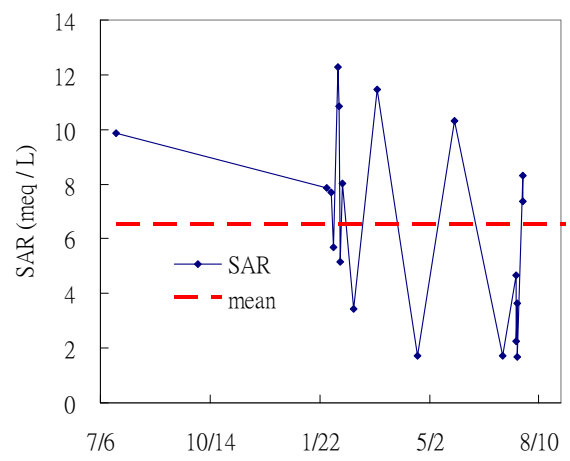
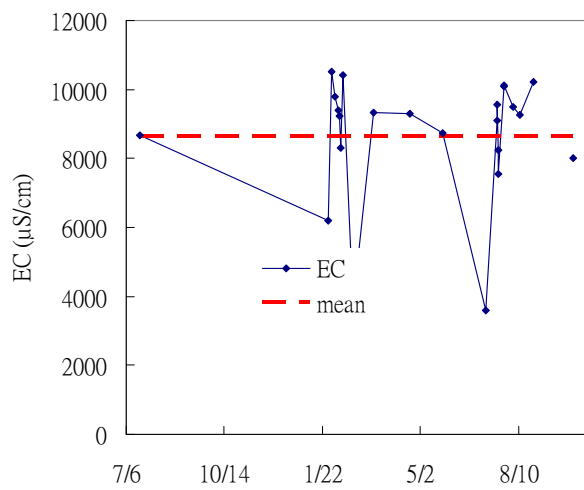
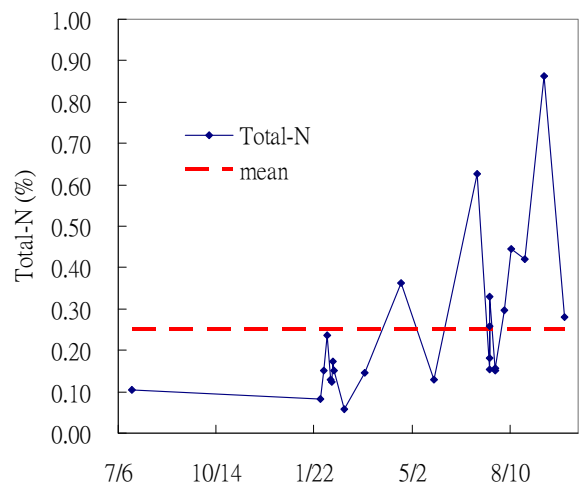
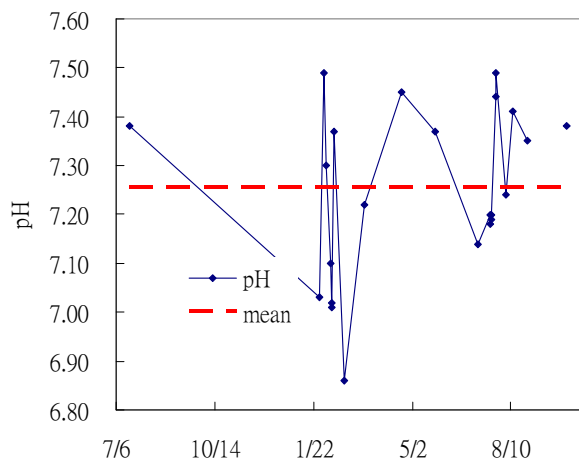


圖15、莊玉輝畜牧場固液分離厭氣池成分變化

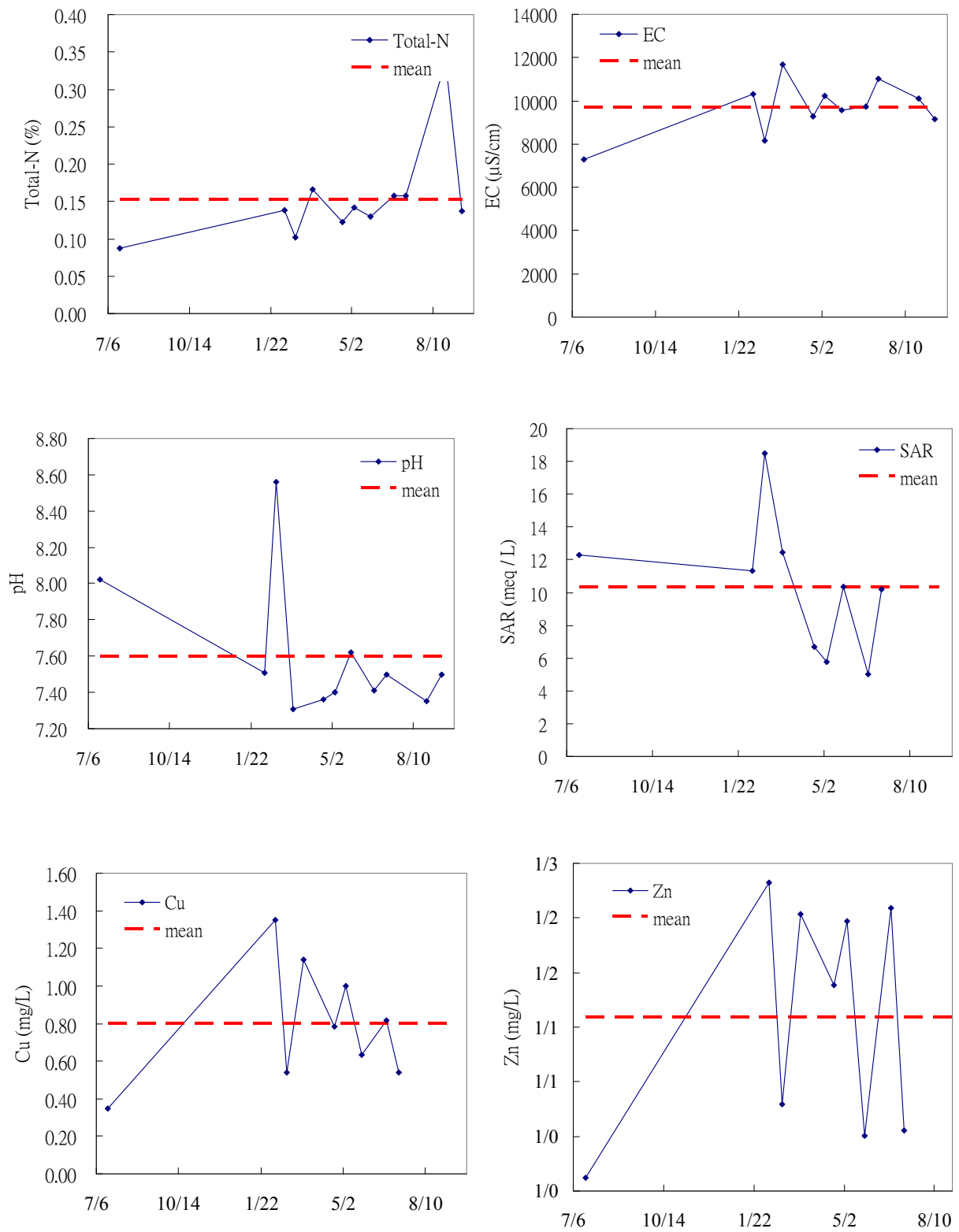


圖16、莊玉輝畜牧場放流水成分變化

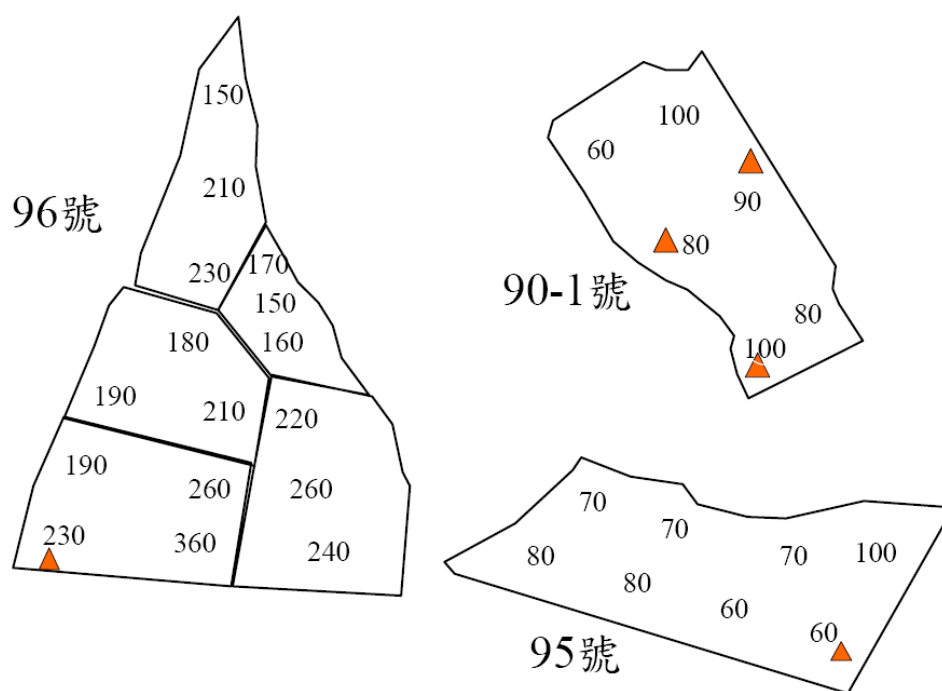


圖 17、一期作 96、90-1、95 號地肥力分佈
(圖內數值為 EC 值 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，標示為施用點)

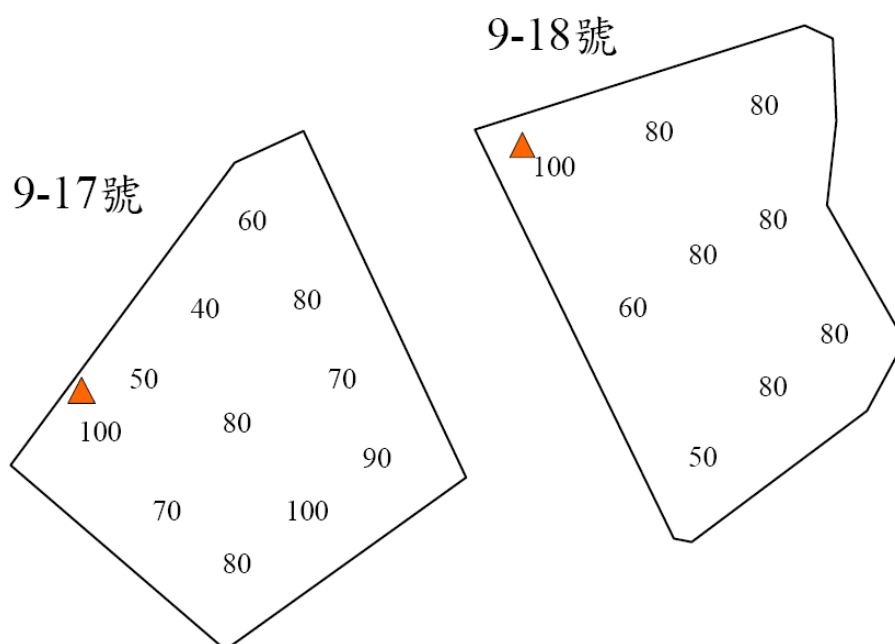


圖 18、一期作 9-17、9-18 號地肥力分佈
(圖內數值為 EC 值 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，標示為施用點)

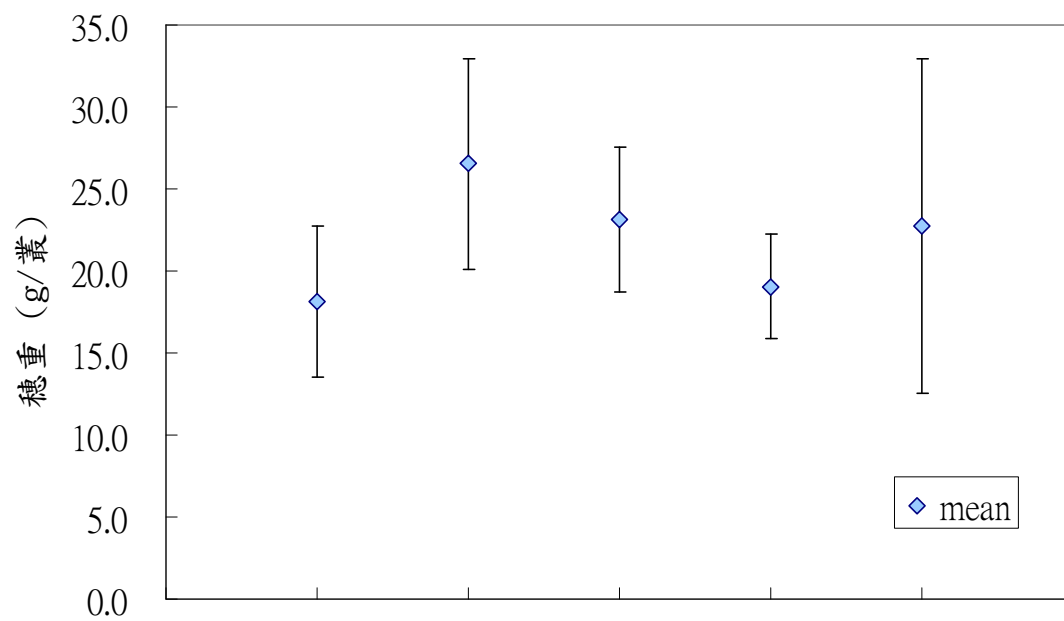


圖 19、施肥點相對距離與產量之關係

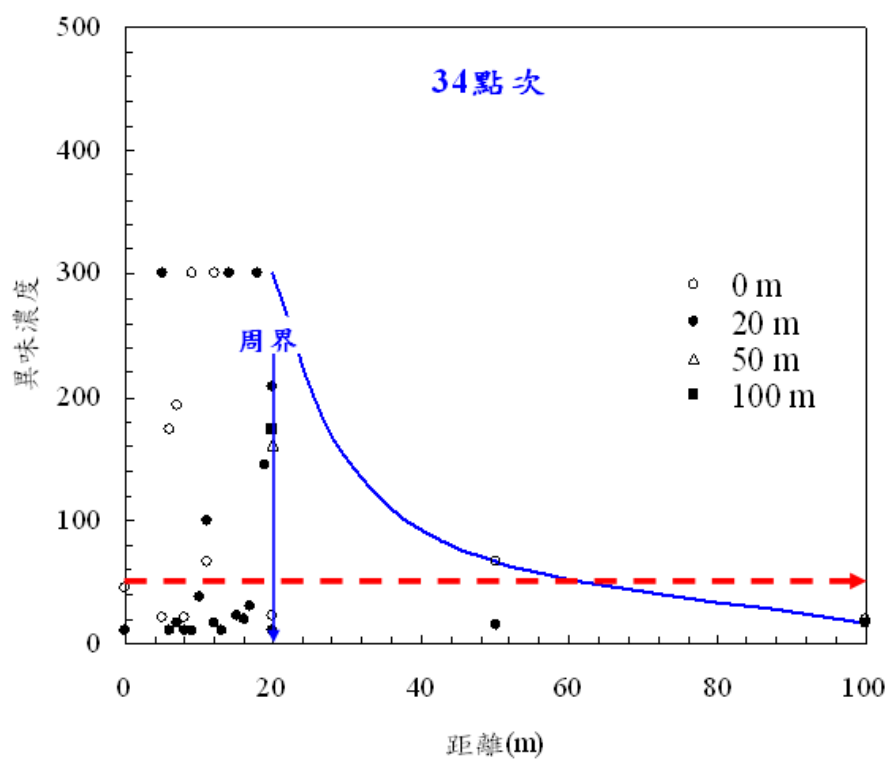


圖 20、採樣距離與異味濃度關係

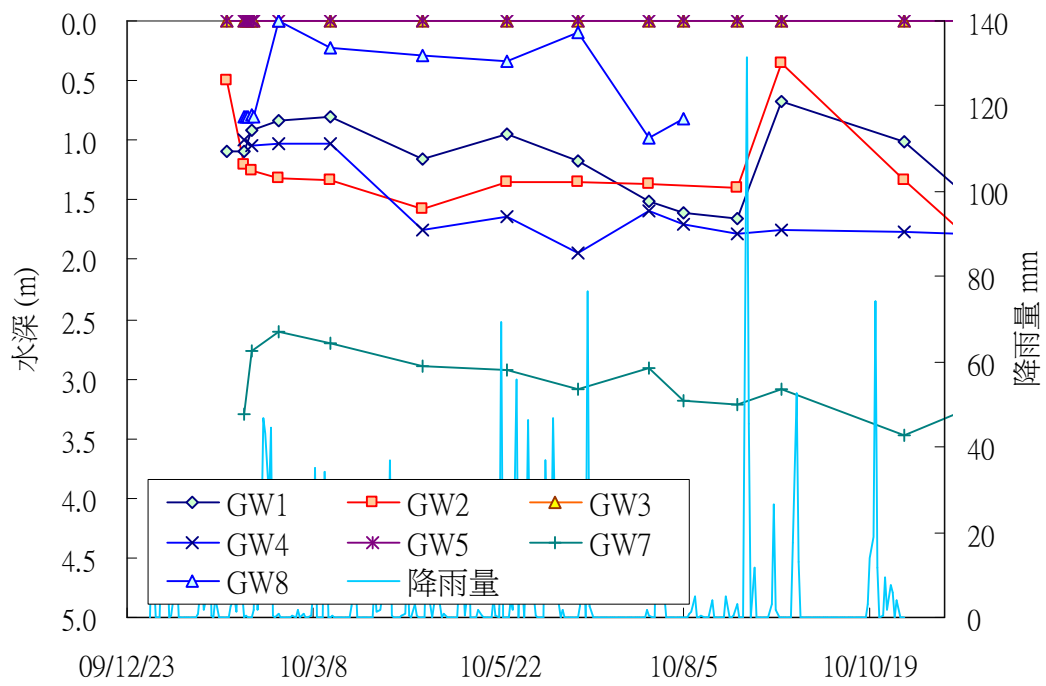


圖 21、試驗區地下水位(井口至地下水面)變化

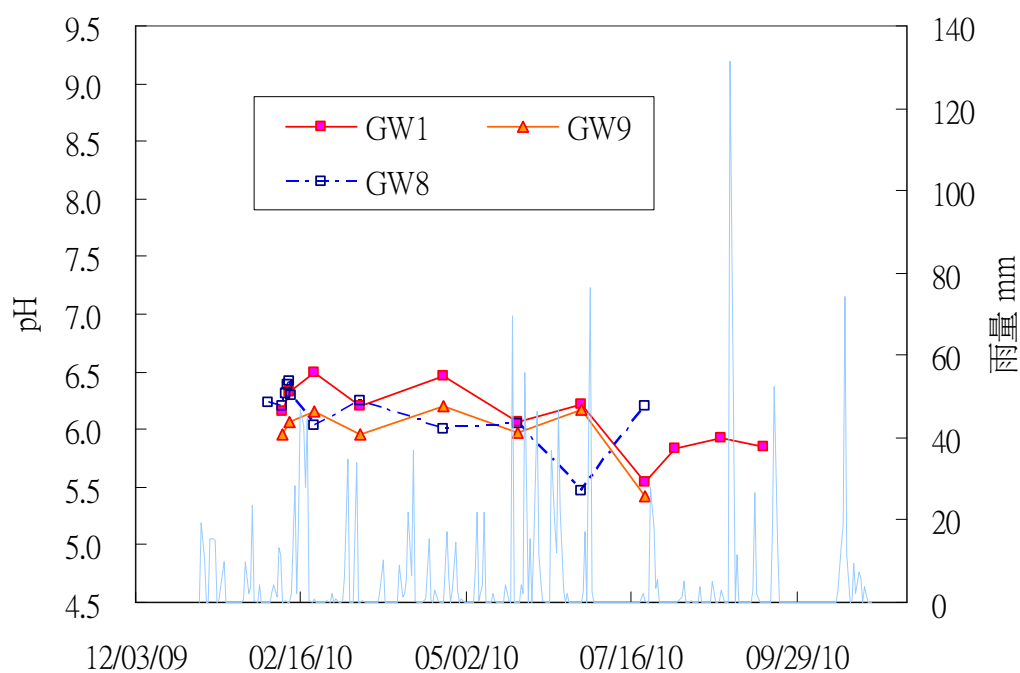
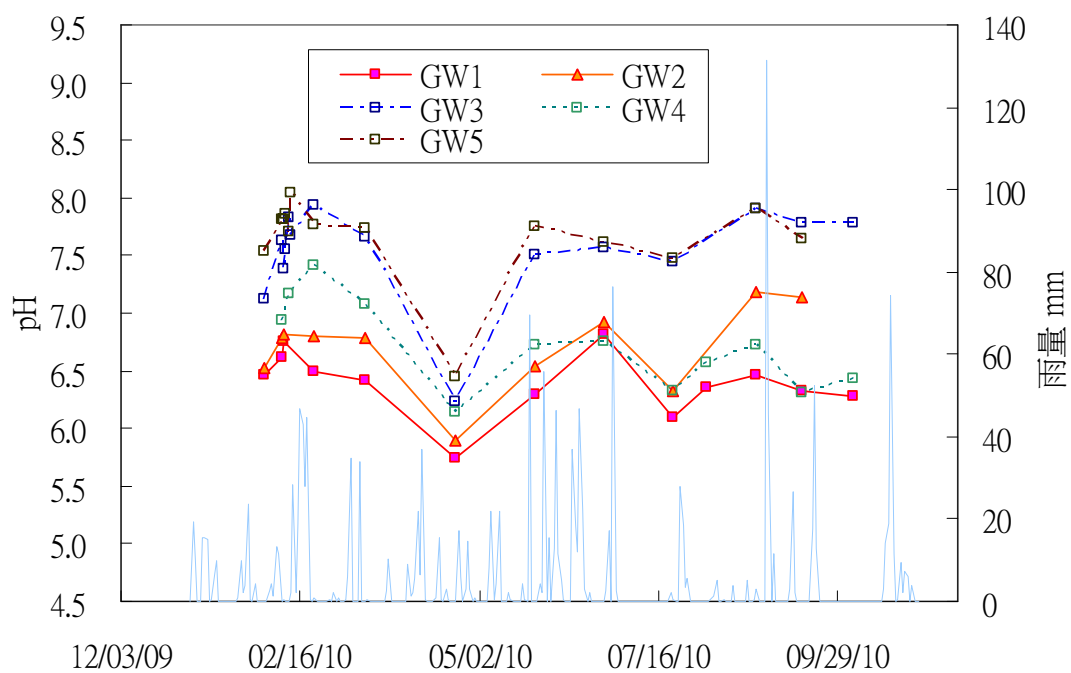


圖 22、試驗區監測井 pH 值變化。
 (灌溉水質標準 pH 值 6-9)
 (GW1-8 分別為監測井，GW9 為民宅住家用井)

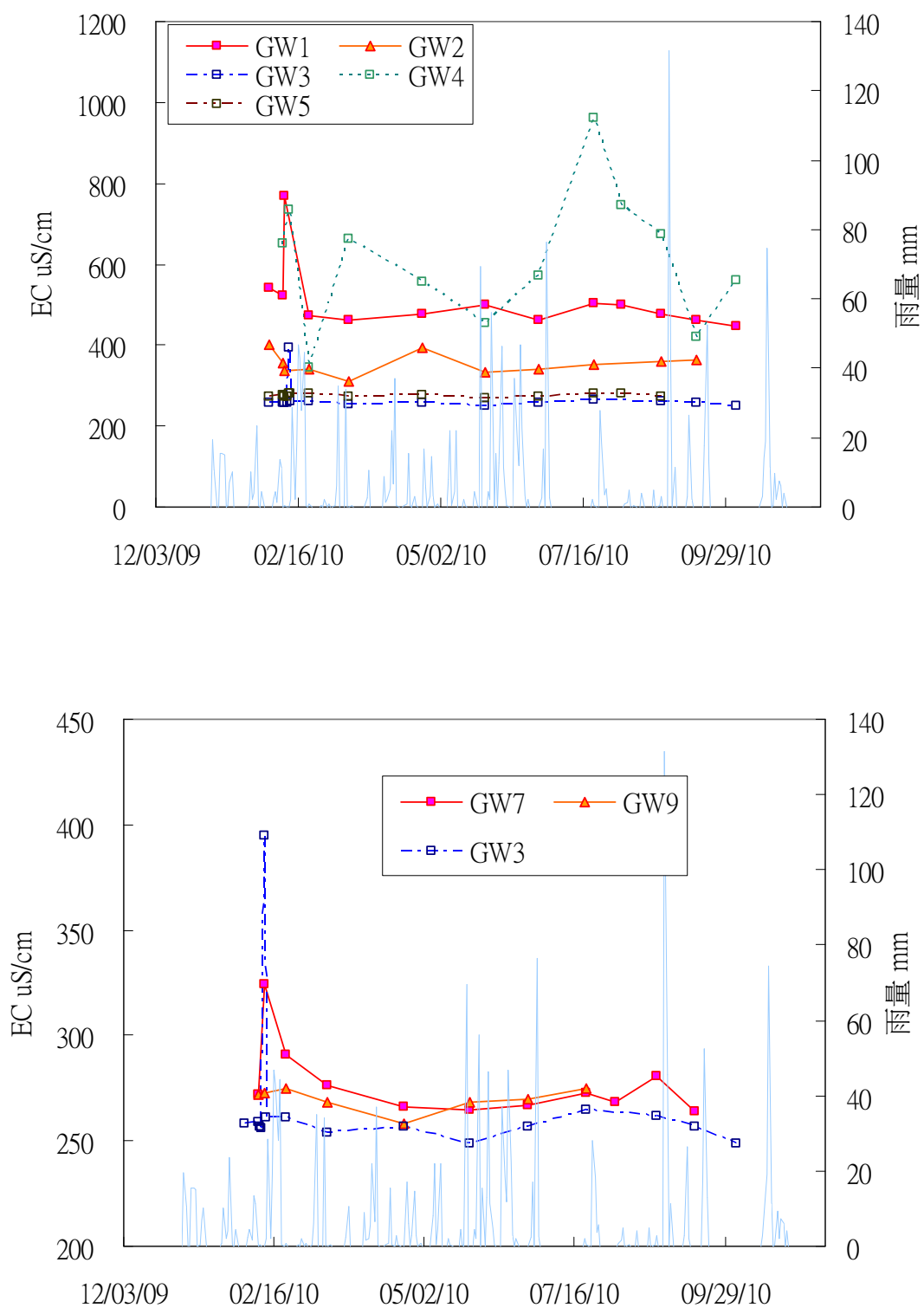


圖 23、試驗區監測井 EC 值變化。
 (灌溉水質標準 EC 值 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$)
 (GW1-8 分別為監測井，GW9 為民宅住家用井)

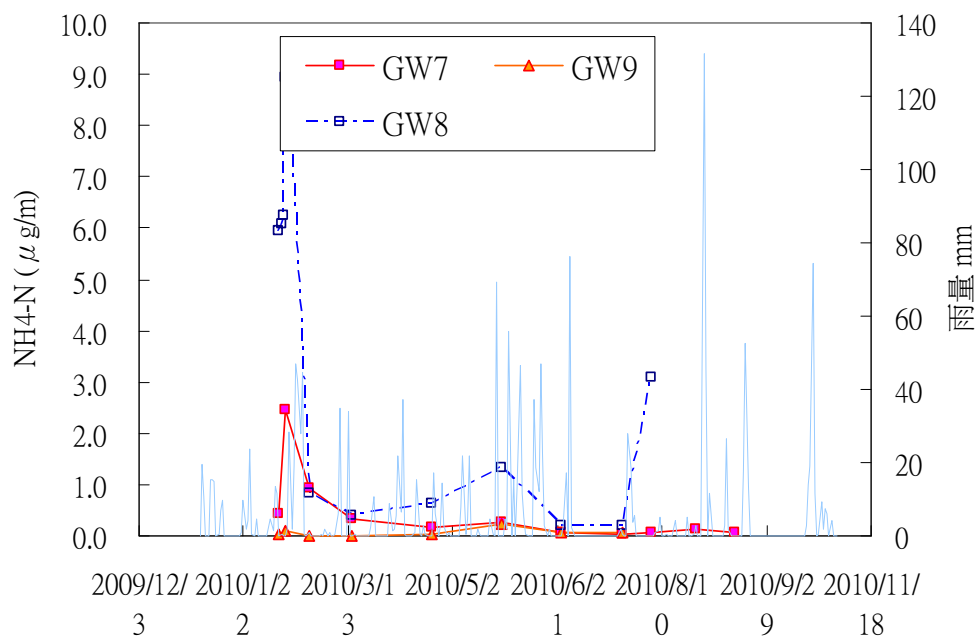
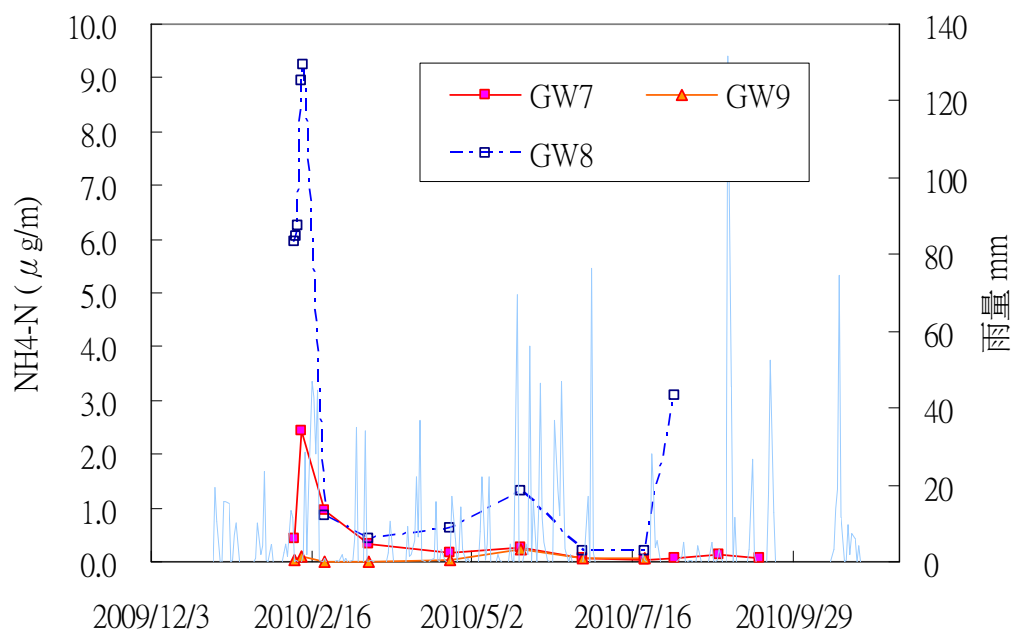


圖 24、試驗區監測井銨態氮($\text{NH}_4\text{-N}$)變化。
(第二類地下水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 監測基準 $0.25 \mu\text{g/ml}$)

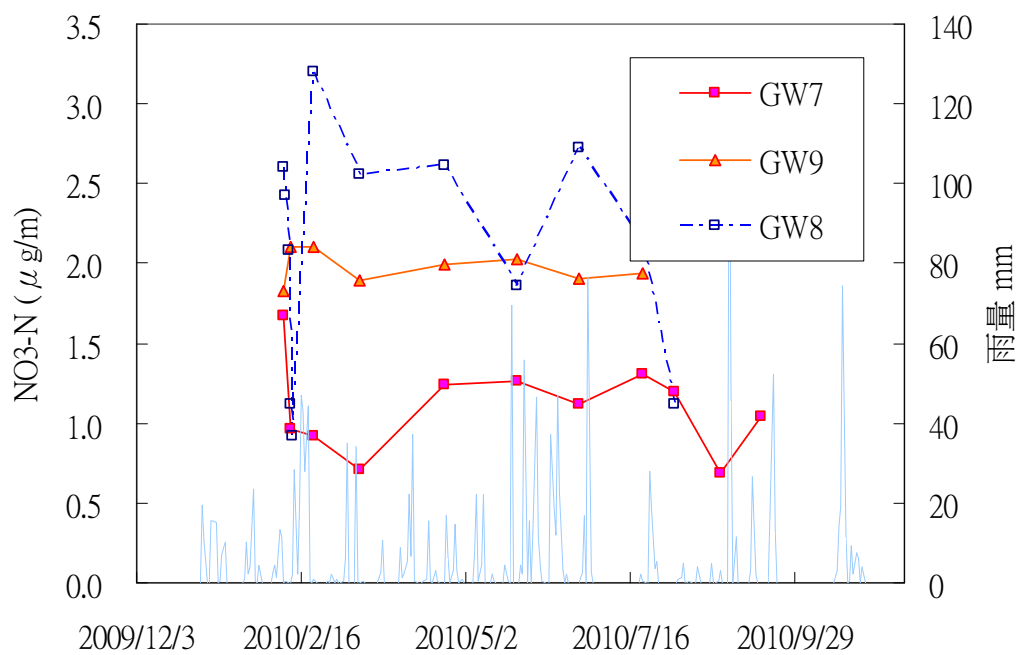
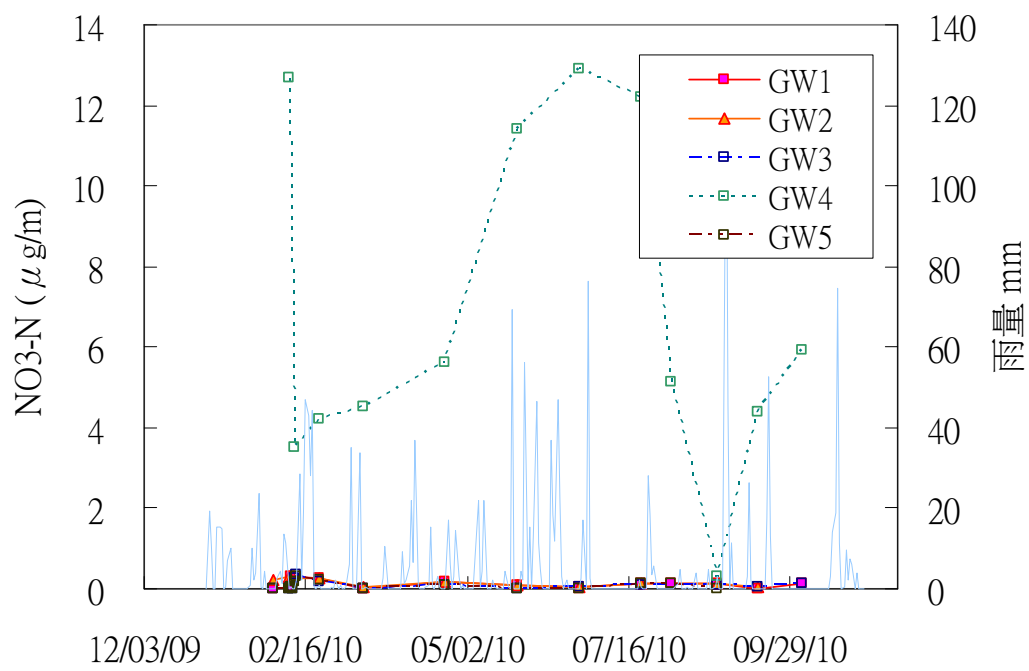


圖 25、試驗區監測井硝酸態氮(NO₃-N)變化。
(第二類地下水NO₃-N監測基準 25 μg/ml)

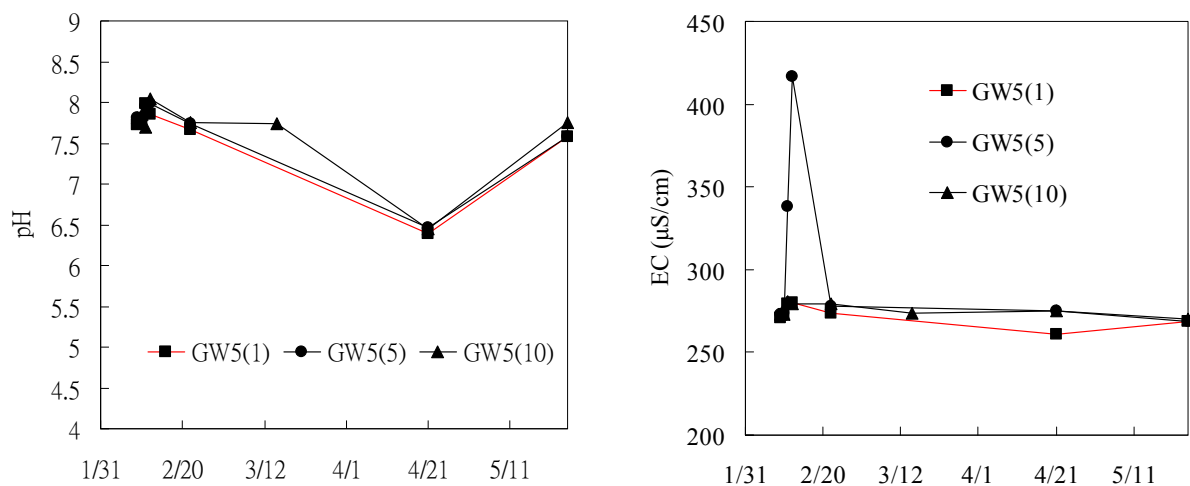


圖 26、試驗區 5 號監測井不同深度 pH 及 EC 值變化。

(灌溉水質標準 pH 值 6-9，灌溉水質標準 EC 值 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

GW5 (1)：5 號井 1m 深水樣，GW5 (5)：5m 深水樣，GW5 (10)：10m 深水樣。

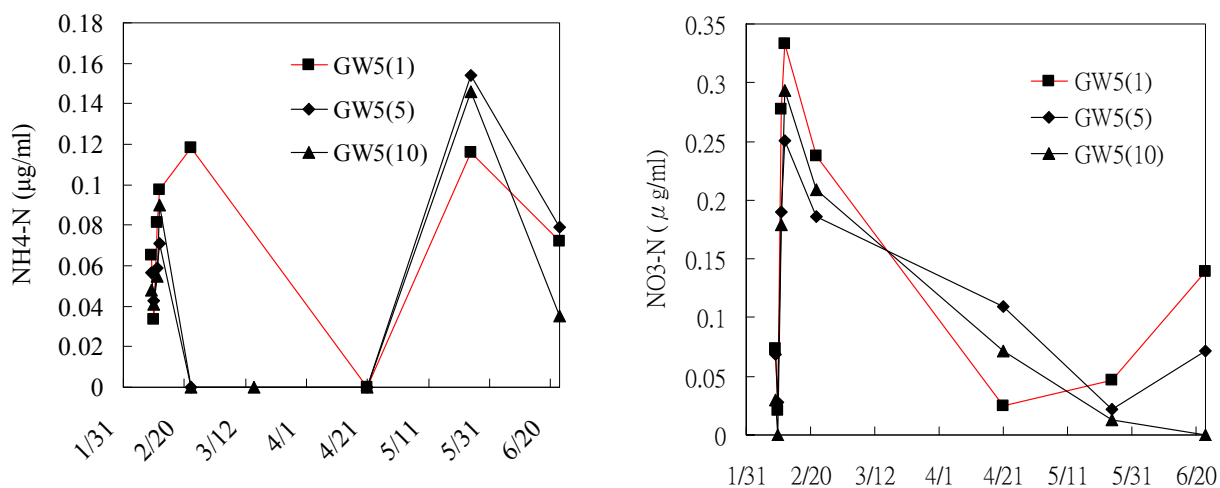


圖 27、試驗區 5 號監測井不同深度銨態氮(NH₄-N)及硝酸態氮(NO₃-N)變化。

(第二類地下水 NH₄-N 監測基準 0.25 $\mu\text{g}/\text{ml}$ ，第二類地下水 NO₃-N 監測基準 25 $\mu\text{g}/\text{ml}$)

GW5 (1)：5 號井 1m 深水樣，GW5 (5)：5m 深水樣，GW5 (10)：10m 深水樣。

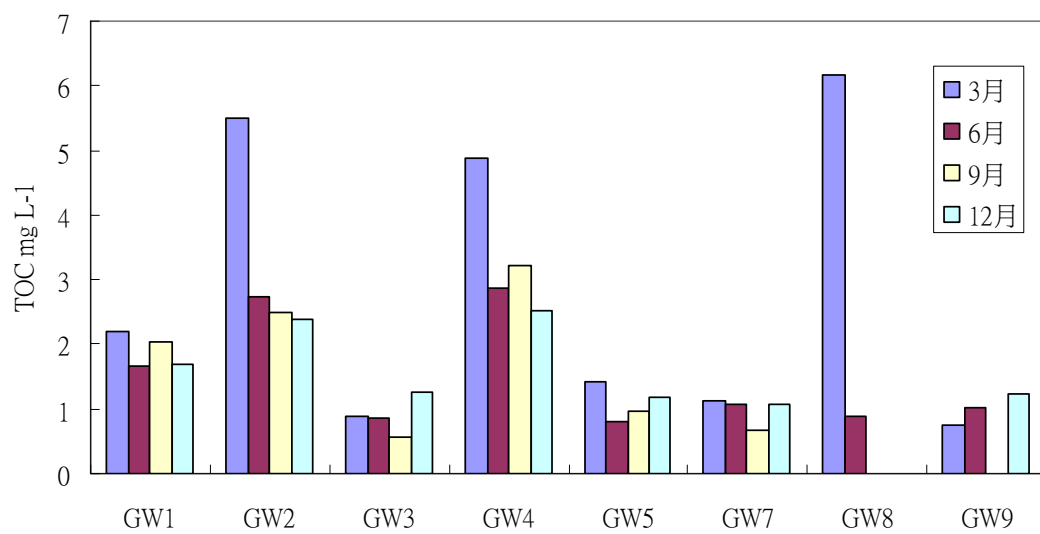


圖 28、試驗區地下水質總有機碳監測結果

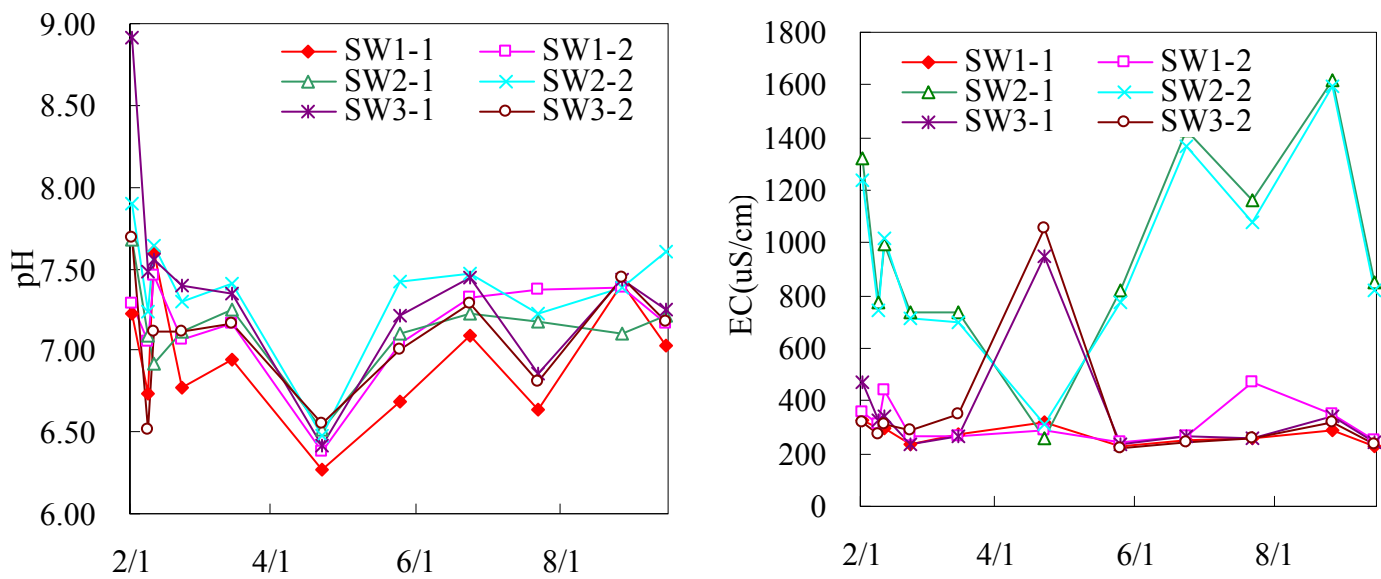


圖 29、試驗區地面水 pH 及 EC 值變化。(灌溉水質標準 pH 值 6-9，灌溉水質標準 EC 值 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$)

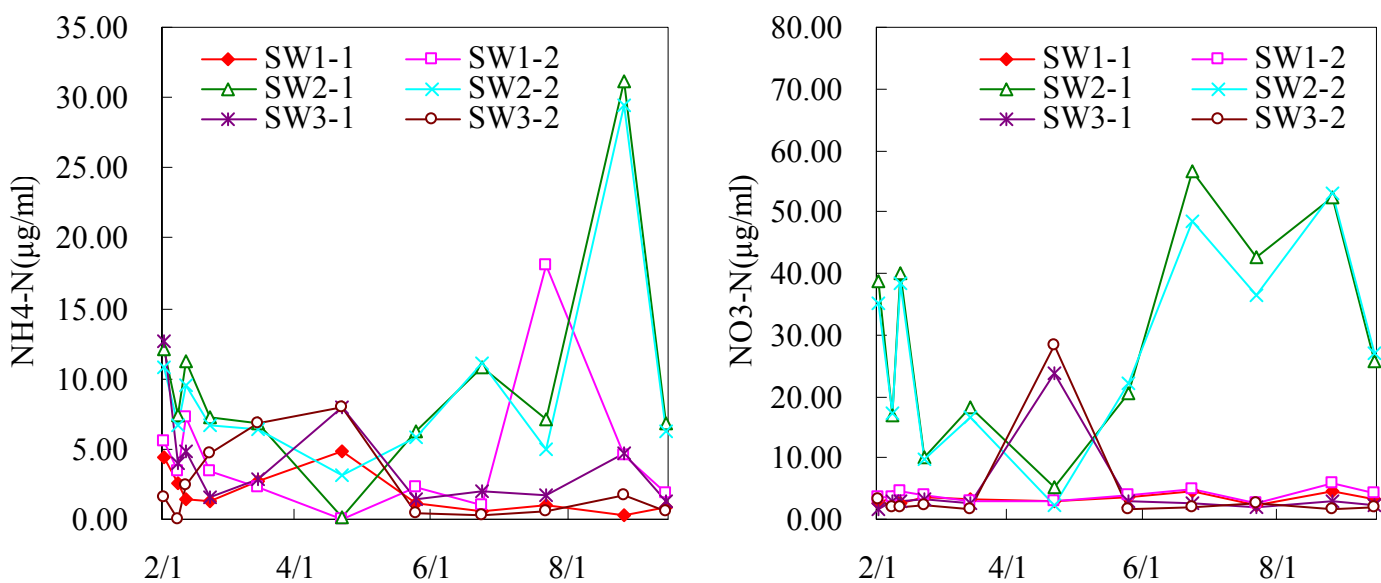


圖 30、試驗區地面水銨態氮($\text{NH}_4\text{-N}$)及硝酸態氮($\text{NO}_3\text{-N}$)變化。
(第二類地下水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 監測基準 $0.25 \mu\text{g}/\text{ml}$ ，第二類地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 監測基準 $25 \mu\text{g}/\text{ml}$)

表1、試驗地土壤特性

地號	pH	CEC		排水等級
		cmole/kg		
		0-15cm	15-30m	
山仔頂 108(1 號井旁)	4.8	5.6	7.3	不完全
山仔頂 90-1(3 號井旁)	5.3	5.2	4.9	良好
山仔頂 96(5 號井旁)	4.8	7.5	6.5	不完全
平安段 68(6 號井旁)	5.3	4.6	5.6	良好
山仔頂 9-9 (7 號井旁)	5.3	9.9	8.3	良好

表 2、莊玉輝畜牧場養豬廢水成分分析

採樣 地點	時間	項目 單位	水分 %	pH	EC μS/cm	O.M. %	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	Na %	SAR √meq/L
厭氣池 ¹	一期作	平均	99.0	7.2	8637	0.003	0.15	0.03	0.03	0.044	0.01	0.035	7.86
		標準差	1.5	0.21	1900	0.003	0.08	0.04	0.009	0.083	0.012	0.008	3.32
		最大值	99.7	7.5	10510	0.012	0.36	0.15	0.045	0.30	0.047	0.043	12.3
		最小值	94.4	6.9	3760	0.001	0.06	0.01	0.014	0.005	0.003	0.015	1.71
	二期作	平均	98.5	7.3	9108	0.004	0.20	0.05	0.029	0.082	0.017	0.037	4.65
		標準差	1.3	0.14	1039	0.003	0.07	0.04	0.004	0.085	0.016	0.002	2.69
		最大值	99.6	7.5	10120	0.009	0.33	0.11	0.034	0.22	0.043	0.039	8.29
		最小值	96.3	7.2	7550	0.002	0.15	0.02	0.024	0.011	0.004	0.033	1.68
放流水 ²		平均	99.6	7.63	9700	0.002	0.13	0.015	0.032	0.011	0.003	0.036	10.29
		標準差	0.1	0.41	1354	0.000	0.03	0.006	0.006	0.006	0.002	0.006	4.15
		最大值	99.8	8.56	11670	0.002	0.17	0.022	0.042	0.020	0.005	0.046	18.47
		最小值	99.5	7.31	7300	0.001	0.09	0.004	0.025	0.004	0.001	0.029	5.03

¹厭氣池採樣期間為99/01/28至99/07/26，其中一期作採樣期間是99/01/28至99/05/25，二期作是99/07/20至99/07/26。

²放流水採樣期間為99/02/08至99/07/08。

表 3、莊玉輝畜牧場養豬廢水金屬含量分析

採樣 地點	時間	項目 單位	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Cd	Ni	Pb	As	Hg
			-----ppm-----									ppb
厭氣池 ¹	一期作	平均	44.8	3.97	2.39	7.43	0.11	0.01	0.13	0.06	0.06	N.D.
		標準差	83.7	7.10	3.50	13.6	0.17	0.01	0.15	0.07	0.13	N.D.
		最大值	297	25.7	13.0	49.5	0.65	0.05	0.45	0.23	0.46	N.D.
		最小值	1.9	0.18	0.43	0.50	0.03	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.
	二期作	平均	77.3	7.43	3.32	15.8	0.16	0.01	0.12	0.12	0.07	N.D.
		標準差	85.1	8.09	2.85	16.0	0.15	0.02	0.11	0.06	0.06	N.D.
		最大值	215	20.78	7.58	42.3	0.40	0.04	0.30	0.19	0.17	N.D.
		最小值	8.5	1.03	0.79	2.80	0.03	N.D.	0.02	0.04	N.D.	N.D.
放流水 ²		平均	7.7	0.76	0.80	1.59	0.04	N.D.	0.04	0.07	0.05	N.D.
		標準差	5.8	0.57	0.32	1.08	0.02	N.D.	0.03	0.07	0.05	N.D.
		最大值	15.2	1.39	1.35	2.83	0.07	0.01	0.08	0.20	0.12	N.D.
		最小值	1.3	0.15	0.35	0.12	0.00	0.00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

¹厭氣池採樣期間為99/01/28至99/07/26，其中一期作採樣期間是99/01/28至99/05/25，二期作是99/07/20至99/07/26。

²放流水採樣期間為99/02/08至99/07/08。

³N.D. = non-detected。

表 4、豬糞堆肥成分分析

項目 單位	水分	O.M.	N	P	K	Ca	Mg	Na	SAR
-----%-----									√meq/L
褐色堆肥	68.8	0.06	0.91	0.14	0.05	0.32	0.03	0.05	2.3
黑色堆肥	54.8	0.30	0.59	0.22	0.12	1.41	0.20	0.06	1.2

表 5、豬糞堆肥金屬含量分析

項目 單位	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Cd	Ni	As	Hg
-----mg/kg-----									
褐色堆肥	1107	34	14	46	1.4	0.19	1.3	3.0	N.D.
黑色堆肥	8378	154	29	125	8.7	1.17	7.9	33	N.D.

¹N.D. = non-detected。

表 6、各試驗田施肥量

期作	時間	地號	面積 ha	作物	車次	施氮量 kg-N	相當於複合 肥料量(包)	施氮量 kg-N/ ha
一期作	2/11	9-17	0.58	水稻	10	60	9	103
	2/10	9-18	0.33	水稻	7	42	7	127
	2/9	95	0.32	水稻	7	42	7	131
	2/8	96	0.71	水稻	14	84	13	118
	2/10	90-1	0.12	水稻	3	18	3	150
	合計/平均		2.06		41	246	39	126
二期作	7/21~22	93	0.41	休耕 (小油菊)	8	64	10	156
	7/19~20	95	0.32	水稻	6	48	7.5	150
	7/23 及 7/26	9-8	0.7	地目變更	14	112	17.5	160
	7/28	9-9 ²	0.38	地目變更	2	16	2.5	42
	7/27	9-10	0.24	地目變更	6	48	7.5	200
	8/9~13	228	1.42	休耕 (小油菊)	28	224	35	158
	8/16~17	232	0.49	休耕 (小油菊)	10	80	12.5	163
	8/20	233	0.05	休耕 (小油菊)	1	8	1.3	160
	合計/平均		4.01		75	600	93.8	149

¹地目變更後即沒有種植。²施作時施肥車故障。

表 7、試驗農地施用廢水前後土壤氮量變化

氮含量 $\mu\text{g/ml}$ /地號		96	90-1	95	9-17	9-18
施用前	$\text{NH}_4\text{-N}$	0.01	0.01	0.0	1.4	0.9
(土層 0-15 cm)	$\text{NO}_3\text{-N}$	1.6	1.8	1.6	1.5	1.6
施用前	$\text{NH}_4\text{-N}$	2.5	N.D.	2.5	1.0	N.D.
(土層 15-30 cm)	$\text{NO}_3\text{-N}$	0.3	1.0	0.3	5.8	0.5
施用後約 40 天	$\text{NH}_4\text{-N}$	27.9	35.1	32.5	62.3	57.9
(0-30 cm)	$\text{NO}_3\text{-N}$	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	N.D.
接連或鄰近之監 測井號		GW5	GW3	GW5	GW7	GW8

表8、施用廢水後試驗農地肥力狀態(EC值)

地號	96	90-1	95	9-17	9-18
取樣點數	16	6	8	11	9
EC平均值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	214	81.7	73.8	74.6	76.7
標準差	54.8	13.3	13.0	19.2	14.1
變異係數(%)	25.6	16.3	17.7	25.7	18.5

表9、平鎮一期稻作產量

地號(山子頂段)	96	90-1	95	9-17	9-18	平均
平均穗重(g)	23.9	18.6	21.4	25.6	21.2	22.1
每公頃產量* (kg/ha)	5121	4312	4932	4758	4998	4824

量測行株距約為26cm×20cm 每公頃約190000叢

平均施肥量126 kg-N/ha

表 10、統計參考數據-桃園縣每公頃水稻產量

年度	一 期	二 期	平 均
94	5022	3721	4372
95	5319	4575	4947
96	5288	3591	4440
97	5416	3720	4568
98	5755	4171	4963
MEAN	5360	3956	
MIN	5022	3591	
MAX	5755	4575	

農業統計年報 94-98

表 11、土壤重金屬含量累計至監測基準值所需年限

重金屬 單位	Cu	Zn	Cr	Cd	Ni	Pb	As	Hg
	-----mg/kg-----							
背景值	17.5	48.5	21.6	0.12	15	16	8.9	0.2
管制值	200	600	250	5	200	500	60	5
年輸入量 ⁽²⁾	5.7	23	0.27	0.02	0.26	0.19	0.13	¹ N.D.
年限	791	589	20932	6025	17569	63188	9715	---
最大濃度 ⁽³⁾	13	49.46	0.65	0.05	0.45	0.23	0.46	N.D.
年限	182	143	3884	780	4282	24390	1355	N.A.

¹N.D. = non-detected。²年輸入量：每年投入農地之廢水所含重金屬濃度，以每期作施用 110 kg N/ha 計算。³最大濃度：實驗過程中，檢測重金屬含量最高值。

表 12、養豬廢水農地再利用之異味污染物濃度監測結果

採樣期間	採樣地點	施肥方式及採樣時機	採樣點	異味污染物濃度
一期作	山子頂段 9-18 號	隨水灌	混合處	67 ^{1.4.}
		隨水灌	下風處，距施用點約 60m	17 ^{3.}
	山子頂段 90-1	隨水灌	混合處	300 ^{1.4.}
		隨水灌	下風處，距施用點約 48m	<10 ^{3.}
二期作	山子頂段 95 號 ^{2.}	噴灑前		174 ^{1.3.}
		噴灑時第一車	與車同行	615 ^{1.5.}
		噴灑時第一車	下風處	300 ^{1.}
	山子頂段 93 號	噴灑時第三車	與車同行	1000 ^{1.3.}
		噴灑時第三車	下風處	22 ^{5.}

¹工業區及農業區周界之異味污染物標準為 50。²7 月 19 日已施糞肥，共 4 車(4 噸/車 × 4 車 = 16 噸)，注入式。

7 月 20 日 11:49 分，於山子頂段 95 號下風處採樣。

³周界：下風處採樣，採樣人員站立採樣，採樣點離地約 1 公尺。⁴混合處：糞液肥與灌溉水混合處，於液面上 10-20 公分處取樣檢測。⁵田地：糞液肥與灌溉水混合處，於液面上 5-10 公分處取樣檢測。

表 13、養豬廢水農地再利用之氨氣(Ammonia)和胺(Amines)濃度監測結果

採樣期間	採樣地點	施肥方式及採樣時機	採樣點	氨氣 mg/L	胺 mg/L
一期作	山子頂段 9-18 號	隨水灌	混合處	1 ^{4.}	0.5 ^{4.}
		隨水灌	下風處，距施用點約 60m	未檢出 ^{1.}	0.5 ^{1.}
	山子頂段 90-1	隨水灌	混合處	1 ^{4.}	2 ^{4.}
		隨水灌	下風處，距施用點約 48m	未檢出 ^{1.3.}	未檢出 ^{1.3.}
二期作	山子頂段 95 號 ^{2.}	噴灑前		未檢出 ^{1.3.}	未檢出 ^{1.3.}
		噴灑時第一車	與車同行	4.6 ^{5.}	0.9 ^{5.}
		噴灑時第一車	下風處		
	山子頂段 93 號	噴灑時第三車	與車同行	未檢出 ^{1.3.}	未檢出 ^{1.3.}
		噴灑時第三車	下風處	5 ^{5.}	0.5 ^{5.}

^{1.}檢知管最小刻度 Ammonia 為 1 ppm、Amines 為 0.5 ppm。

^{2.}7 月 19 日已施糞肥，共 4 車(4 噸/車 × 4 車 = 16 噸)，注入式。

7 月 20 日 11:49 分，於山子頂段 95 號下風處採樣。

^{3.}周界：下風處採樣，採樣人員站立採樣，採樣點離地約 1 公尺。

^{4.}混合處：糞液肥與灌溉水混合處，於液面上 10-20 公分處取樣檢測。

^{5.}田地：糞液肥與灌溉水混合處，於液面上 5-10 公分處取樣檢測。

表 14：Pasquill 大氣穩定度分類表

風速 (m/s)	白天 日照強度				晚上 雲量
	強烈日照	中等日照	輕微日照	多雲	無雲
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A：最不穩定 B：中度不穩定 C：輕微不穩定 D：中性不穩定

E：輕微穩定 F：最穩定

表 15、養豬廢水、監測井及土壤之病原菌監測結果

採樣時間	樣品	大腸桿菌 CFU/ml	沙門氏桿菌	總生菌數 CFU/g	彎曲桿菌
2010/2/5 (一期作)	固液分離前廢水	6.4×10^5	陽性	5.5×10^7	陰性
2010/2/5 (一期作)	固液分離後廢水	6.2×10^4	陽性	3.0×10^7	陰性
2010/2/9 (一期作)	2 號井水 (畜牧場內)	1.9×10^2	陰性	2.0×10^4	陰性
2010/2/9 (一期作)	3 號井水 (90-1 號田)	<1	陰性	1.4×10^4	陰性
2010/2/9 (一期作)	8 號井水 (9-18 號田)	<1	陰性	7.0×10^4	陽性
2010/9/14 (二期作)	固液分離前廢水	4.4×10^5	陽性	3.2×10^7	陰性
2010/9/14 (二期作)	固液分離後廢水	3.6×10^2	陽性	3.4×10^7	陰性
2010/9/14 (二期作)	2 號井水 (畜牧場內)	6.0×10^3	陽性	2.6×10^6	陰性
2010/9/14 (二期作)	3 號井水 (90-1 號田)	<1	陰性	1.6×10^3	陰性
2010/9/14 (二期作)	8 號井水 (9-18 號田)	<1	陰性	1.4×10^3	陰性
2010/12/9 (二期作收穫後)	固液分離前廢水	7.8×10^5	陽性	3.1×10^7	陰性
2010/12/9 (二期作收穫後)	固液分離後廢水	2.4×10^4	陽性	6.4×10^6	陰性
2010/12/9 (二期作收穫後)	2 號井水 (畜牧場內)	12	陰性	2.8×10^3	陰性
2010/12/9 (二期作收穫後)	3 號井水 (90-1 號田)	<1	陰性	8.2×10^2	陰性
2010/12/9 (二期作收穫後)	7 號井水	<1	陰性	1.7×10^2	陰性
2010/3/9 (一期作)	畜牧場內土壤 (2 號井旁)	2.4×10^3	陰性	6.7×10^7	陰性
2010/3/9 (一期作)	90-1 號田土壤 (3 號井旁)	43	陰性	6.4×10^6	陰性
2010/3/9 (一期作)	9-18 號田土壤 (8 號井旁)	3.6	陰性	1.0×10^7	陰性
2010/7/23 (一期作收穫後)	9-18 號田土壤 (8 井號旁)	<10	陰性	4.5×10^5	陰性
2010/7/23 (一期作收穫後)	93 號田土壤	<10	陰性	9.8×10^5	陰性
2010/7/23 (一期作收穫後)	96 號田土壤	<10	陰性	5.8×10^5	陰性
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田土壤 1	<10	陰性	5.2×10^5	陰性
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田土壤 2	<10	陰性	4.9×10^5	陰性
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田土壤 3	45	陰性	2.0×10^5	陰性
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田土壤 4	35	陰性	2.1×10^5	陰性
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田土壤 5	<10	陰性	3.1×10^5	陰性

表 16、養豬廢水、土壤、施用前監測井及採收時植體之抗生素監測結果

採樣時間	樣品	氯四環素	林可黴素	青黴素	雪華魯新
		ppm	ppb	ppm	ppb
2010/2/5 (一期作)	廢水-固液分離前	未檢出	16	未檢出	未檢出
2010/2/5 (一期作)	廢水-固液分離後	未檢出	6	未檢出	未檢出
2010/2/5 (一期作)	2 號井水 (畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/2/5 (一期作)	3 號井水 (90-1 號田)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/2/5 (一期作)	8 號井水 (9-18 號田)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/9/14 (二期作)	固液分離前廢水	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/9/14 (二期作)	固液分離後廢水	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/9/14 (二期作)	2 號井水 (畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/9/14 (二期作)	3 號井水 (90-1 號田)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/9/14 (二期作)	8 號井水 (9-18 號田)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/12/9 (二期作收穫後)	固液分離前廢水	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/12/9 (二期作收穫後)	固液分離後廢水	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/12/9 (二期作收穫後)	2 號井水 (畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/12/9 (二期作收穫後)	3 號井水 (90-1 號田)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/12/9 (二期作收穫後)	7 號井水	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/5/5 (一期作)	2 號井旁土壤 1(畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/5/5 (一期作)	2 號井旁土壤 2(畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/5/5 (一期作)	2 號井旁土壤 3(畜牧場內)	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田 1	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田 2	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田 3	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田 4	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田 5	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/7/12 (一期作收穫時)	90-1 號田植體	未檢出	未檢出	陰性	未檢出
2010/7/12 (一期作收穫時)	95 號田植體	未檢出	未檢出	陰性	未檢出
2010/7/12 (一期作收穫時)	96 號田植體	未檢出	未檢出	陰性	未檢出
2010/7/12 (一期作收穫時)	9-17 號田植體	未檢出	未檢出	陰性	未檢出
2010/7/12 (一期作收穫時)	9-18 號田植體	未檢出	未檢出	陰性	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田植體 1	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田植體 2	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田植體 3	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田植體 4	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
2010/11/18 (二期作收穫時)	95 號田植體 5	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出

表 17、不同處理方式成本比較

	農地再利用	元/噸	廢水處理	元/噸
硬體成本	儲存池	17.8	儲存池	16.7
	施肥車 2 台	6.7		
機具維護成本	施肥車維護	3.3	處理設備	2.1
人事成本		32.0		2.7
消耗性成本	油資	3.2	電費	9.5
其它	地磅費	10.0		
總和		71.9		31.0
肥料	補充鉀肥	17.6	堆肥製作	83.0
監測成本		1.7	化肥	87.5
總和		91.2		202

表 18、養豬廢水農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）CO₂ 當量排放量

處理方式	過程	項目	排放之溫室 氣體	CO ₂ 當量 排放量	單位
養豬廢水農 地再利用	儲存過程	儲存槽	CH ₄	1,334	kg/year
			N ₂ O	177	kg/year
	載運廢水	柴油煉製	CO ₂	5.9	kg/6L ¹
		柴油燃燒	CO ₂	15.6	kg/6L ¹
		小計		1,735	kg
	施肥後農 地產生	水田	CH ₄	3,957	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	324	kg/0.6ha/year ²
		旱田	CH ₄	0	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	655	kg/0.6ha/year ²
		合計（水田）		5,814	kg
		合計（旱田）		2,188	kg
三段式廢水 處理 （含施用化 肥）	廢水處理	厭氣處理	CH ₄	1,398	kg/50Mg/12~15day ³
			N ₂ O	74.4	kg/50Mg/12~15day ³
		好氣處理	CH ₄	0	kg/2day
			N ₂ O	146	kg/2day
		鼓風機用電量	CO ₂	149	kg/120 度/2day ⁴
		放流水產生	N ₂ O	164	kg/year
	堆肥化		CH ₄	0.24	kg/0.5Mg/60day ³
			N ₂ O	1.74	kg/0.5Mg/56day ³
	載運堆肥	柴油煉製	CO ₂	0.49	kg/0.5L ⁵
		柴油燃燒	CO ₂	1.3	kg/0.5L ⁵
	施肥	肥料生產	CO ₂	222	kg/0.6ha ²
		汽油煉製	CO ₂	0.73	kg/0.8L ⁶
		汽油燃燒	CO ₂	1.8	kg/0.8L ⁶
		小計		2,160	kg
	施肥後農 地產生	水田	CH ₄	3,490	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	289	kg/0.6ha/year ²
		旱田	CH ₄	0	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	620	kg/0.6ha/year ²
		合計（水田）		5,939	kg
		合計（旱田）		2,780	kg

1. 農用施肥車耗油量 8km/L，每天施作距離 48km，故每天耗油量 6L。

2. 每日施肥 6 分地。

3. 畜養規模 2,000 頭豬的豬舍，每天產生 50Mg 養豬廢水，0.5Mg 的豬糞。

4. 使用 2 台 3hp 鼓風機處理 2,000 頭豬產生的廢水，每天用電量 120 度，共 2 天。

- 5.貨車耗油量 8km/L，每天載運距離 2km，故每天耗油量 0.25L。
- 6.噴霧機耗油量 0.4L/hr，每日施肥 6 分地，每分地耗時 20min，故每天耗油量 0.8 L。

表 19、不同處理方式之二氧化碳當量排放

方式	施用於水田	施用於旱田
	kg	kg
養豬廢水農地再利用	5,814	2,188
三段式廢水處理 (含施用化肥)	6,539	2,780
比例	88.9%	78.7%

附錄 一

不同養豬廢水處理方式之溫室氣體排放比較

陳琦玲¹、林建志¹、廖崇億¹、周明顯²

¹行政院農委會農業試驗所農化組

²國立中山大學環境工程研究所

摘要

養豬廢水三段式處理雖可降低養豬業對環境的污染，但處理過程既耗能源又損失可用資源，所費不貲，而豬糞尿富含有機質及植物所需要之養分，可取代化肥做為作物生長之肥分。臺灣每年需施用約 100 萬噸化肥，若能將養豬產生之廢水再利用作為肥料施用於田間，除降低耕作施肥成本，減少化肥施用量，亦可減少養豬廢水處理成本、能源消耗與資源消耗。本研究則以飼養 2,000 頭豬隻規模之豬舍，每天產生 50 Mg 廢水，施肥 6 分地為例，引用前人或 IPCC 之排放係數估算養豬廢水直接農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）之溫室氣體（Greenhouse Gas, GHG）排放量包括廢水處理過程，載運、施用與施用後農地溫室氣體排放等，並進行比較。依據估算結果，若種植形態為水田，則養豬廢水農地再利用約產生 5,814 kg CO₂ 當量，而三段式廢水處理約產生 6,539 kg CO₂ 當量，前者為後者之 88.9 %。若種植形態為旱田，則養豬廢水農地再利用約產生 2,188 kg CO₂ 當量，而三段式廢水處理約產生 2,780 kg CO₂ 當量，前者為後者之 78.7%，估算結果顯示養豬廢水農地再利用較三段式廢水處理可降低溫室氣體之排放。但因前人量測結果差異大，前述估算數據仍有相當程度的不確定性，尚需更多量測數據以提高準確性。

一、前言

目前臺灣養豬業，約飼養 610 萬頭豬隻，產生之廢水相當可觀。為達到排放標準，進行之三段式處理，包括固液分離、厭氣處理以及好氣處理，過程既耗能源又損失可用資源，且所費不貲；豬糞尿富含有機質及植物所需要之養分，可做為作物生長之肥分。臺灣每年需施用約 100 萬噸化肥，若能將養豬產生之廢水再利用作為肥料施用於田間，除降低耕作施肥成本，亦可減少養豬廢水處理成本。過去傳統農業上即有施用畜牧糞肥之情形，但因傳染病疑慮及化肥施用便利，而逐漸取代。歐美各國將養豬廢水貯存於貯存槽後，利用大型機械施用於農地，作為肥料行之多年。依據我國廢棄物清理法之規範，可透過試驗計畫取得國內實績，據以申請再利用許可，國內正進行養豬廢水直接農地再利用可行性探討。

本研究則在比較養豬廢水農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）等兩種不同處理方式之間的 GHG 排放量，評估何者對氣候暖化影響較少，較符合節能減碳。

二、材料與方法

本研究係比較養豬廢水農地再利用以及三段式廢水處理（含施用化肥）等兩種不同處理方式之間的 GHG 排放量，探討項目包括載運過程、肥料製造與施肥過程之耗碳量、三段式廢水處理與施用後農地之 GHG 排放等。

（一）分析情境

本文以飼養 2,000 頭豬的豬舍為例，每天產生 50 Mg 廢水，其中固液分離後之固體約佔 1%，相當於 0.5 Mg 固體/day。試驗中使用排氣量 3,500 c.c. 的農用施肥車進行養豬廢水的載運與農地的施肥，該車耗油量為 8 km/L，每次載運量為 4.2 Mg 的養豬廢水，因此每日需要 12 車方能處理每天產生的養豬廢水。假設再利用農地距離豬舍約 2 km，則載運距離為 48 km/day，耗油量為 6 L/day。

固液分離後之固體製成堆肥後，體積約為原本之一半（0.25Mg/day），使用與施肥車同規格之貨車載運，假設堆肥廠至再利用農地距離約 2 km，則耗油量為 0.25 L/day。

（二）肥分比較

根據水稻施肥手冊一期作氮素推薦量為 110-140 kg N/ha，二期作氮素推薦量為 90-120 kg N/ha，本試驗之施氮量為 126 kg N/ha，每分地為 12.6 kg。在肥分方面，養豬廢水含有肥分 N、P、K 分別為 0.1%~0.2%、0.015%~0.03%、0.024%~0.037%，即 N、P₂O₅、K₂O 分別為 0.1%~0.2%（平均值約為 0.15%）、0.034%~0.069%、0.029%~0.045%；自製堆肥含有肥分 N：P：K = 2：0.68：0.44，即 N：P₂O₅：K₂O = 2：1.62：0.53；化肥以台肥 5 號(N：P₂O₅：K₂O = 16：8：12) 為例（表 1），每包重 40 kg，其 N、P₂O₅、K₂O 分別為 6.4 kg、3.2 kg、4.8 kg，若需要達至水稻生長所需氮肥量，則每分地大約需要 8.4 Mg 廢水，相當於 2 台車（肥分為 N、P₂O₅、K₂O = 12.6 kg、5.9 kg、3.4 kg）；化肥則需要約 1.8 包（肥分為 N、P₂O₅、K₂O = 11.8 kg、5.9 kg、8.8 kg），配合施用堆肥量 41.7 kg（N、P₂O₅、K₂O = 0.8 kg、0.68 kg、0.22 kg），方能達至水稻生長一期所需施肥量（表 2）。

根據上述資料，我們可以得知每天需要 12 台車方能消耗豬舍產生的養豬廢水量，1 分地需要施灑 2 台車的養豬廢水，故每天大約可以施灑 6 分地。

（三）養豬廢水農地再利用之溫室氣體排放

養豬廢水農地再利用之溫室氣體排放分成儲存與載運過程之 GHG 排放。儲

存過程是利用蓄水池，將每日產生之養豬廢水置入其中，並在一年內施灑入農地，產生之溫室氣體為 CH₄ 與 N₂O；載運過程則是農用施肥車載運養豬廢水至農地所燃燒柴油排放的 CO₂，包括柴油煉製以及柴油燃燒等兩個部份的排放。

1. 儲存過程

溫室氣體排放會依糞尿處理方式而異，IPCC 將一般動物飼養之糞尿處理分成厭氣池（Anaerobic Lagoon）、液態系統（Liquid System）、每日噴灌（Daily Spray）、固態儲存（Solid Storage & Dry lot）、牧草區（Pasture Range & Paddock）、燃料使用（Used Fuel）與其它系統（Other System）等七項。本文的養豬廢水儲存屬於液態系統（Liquid System）。

(1) CH₄ 排放量

依據 IPCC（2006b）處理系統 CH₄ 排放公式（式 1）得知，儲存過程只與排放因子 EF_P 與數量 N_P 有關。其中排放因子 EF_P 可由豬隻排放因子計算公式（式 2）求得。

$$CH_{4 \text{ pigwaste}} = \sum_{\text{Pig}} \left(\frac{EF_P \cdot N_P}{10^6} \right) \dots\dots\dots (1)$$

CH_{4 pigwaste}：豬隻糞便處理系統中的 CH₄ 排放，Gg CH₄/year。

EF_P：豬隻的排放因子，kg CH₄/head/year。

N_P：畜養豬隻數量。

$$EF_P = (VS_P) \cdot T \cdot \left[B_{OP} \cdot 0.67 \cdot \sum_{S,K} \frac{MCF_{S,K}}{100} \cdot MS_{(P,S,K)} \right] \dots\dots\dots (2)$$

EF_P：豬隻的 CH₄ 排放因子，kg CH₄/head/year。

VS_P：豬隻的揮發性固體排泄物，即為豬隻糞便中的有機質，kg mass/head/day，預設值為 0.3。

T：計算每年 VS_P 產生的天數，day/year。

B_{OP}：豬隻糞便的最大 CH₄ 排放量，m³ CH₄/kg VS waste，預設值為 0.29。

MCF_{S,K}：氣候區 K 每種糞便管理系統 S 的 CH₄ 轉換因子，%。

MS_(P,S,K)：使用氣候區 K 糞便管理系統 S 管理豬隻糞便比例。

(2) N₂O 排放量

依據 IPCC（2006b）處理過程引起之 N₂O 排放量計算分成直接與間接兩種。直接排放是透過糞肥中所含氮素共同的硝化和反硝化作用產生；間接

排放則是由糞肥內的氮素以 NH_3 和 NO_x 的形式揮發產生。

由處理過程引起之 N_2O 直接排放可由公式 (式 3) 求得；間接排放則由公式 (式 4) 求得。糞肥內 N 以 NH_3 與 NO_x 形式揮發至大氣所損失的 N 含量可由公式 (式 5) 求得。

$$N_{2O_{D(\text{pigwaste})}} = \sum_S (N_P \cdot Nex_{(P)} \cdot MS_{(P,S)}) \cdot EF_{3(S)} \cdot \frac{44}{28} \dots\dots\dots (3)$$

$N_{2O_{D(\text{pigwaste})}}$ ：豬糞便的 N_2O 直接排放量，kg $\text{N}_2\text{O}/\text{day}$ 。

N_P ：畜養豬隻數量。

$Nex_{(P)}$ ：豬隻的排泄物內含 N 量，kg N/head/day。

$MS_{(P,S)}$ ：糞便處理系統 S 處理的豬隻糞便比例。

$EF_{3(S)}$ ：處理系統 S 的豬隻 N_2O 直接排放因子，預設值為 0。

S：糞便處理系統。

$$N_{2O_{G(\text{pigwaste})}} = N_{E-PW} \cdot EF_4 \cdot \frac{44}{28} \dots\dots\dots (4)$$

$N_{2O_{G(\text{pigwaste})}}$ ：糞便處理系統中 N 揮發引起的 N_2O 間接排放，kg $\text{N}_2\text{O}/\text{year}$ 。

N_{E-PW} ：以 NH_3 和 NO_x 揮發引起的豬糞肥之 N 損失量，kg N/year。

EF_4 ：土壤和水面大氣氮沉積中產生的 N_2O 排放的排放因子，kg $\text{N}_2\text{O}-\text{N}/(\text{kg } \text{NH}_3-\text{N} + \text{NO}_x-\text{N}_{\text{ev}})$ (表 3)。

$$N_{E-PW} = \sum_S \left((N_{(P)} \cdot Nex_{(P)} \cdot MS_{(P,S)}) \cdot \left(\frac{\text{Frac}_{\text{GasMS}}}{100} \right)_{(P,S)} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$N_{(P)}$ ：畜養豬隻數量。

$Nex_{(P)}$ ：豬隻的排泄物內含 N 量，kg N/head/year。

$MS_{(P,S)}$ ：糞便處理系統 S 所處理的豬隻糞便比例。

$\text{Frac}_{\text{GasMS}}$ ：糞便處理系統 S 中，處理豬糞便含 N 量以 NH_3 和 NO_x 揮發的比例，%，預設值為 48。

2. 載運過程

(1) 柴油煉製

提煉 1 kg 原油大約產生 0.2 kg 的 CO_2 (趙, 2007)，柴油比重約為 0.82，利用林 (2004) 原油分餾分表 (表 4) (林, 2004) 的數據計算出，提煉 1 L 的柴油需要 4.92 kg 的原油，產生 0.98 kg 的 CO_2 。

(2) 柴油燃燒

依據經濟部能源局公佈各種燃料的碳排量，顯示燃燒 1L 的柴油會產生 2.6 kg 的 CO_2 。根據前文，每日從豬舍載運養豬廢水至農地耗油量為 6L/day，故在載運過程中每天產生 15.6 kg 的 CO_2 。

(四) 三段式廢水處理之溫室氣體

按目前國內法規，養豬廢水需經過三段式廢水處理後才能放流至地面水體；而農地栽培作物所需養分，除了固液分離後之固體製成堆肥，可施於農地外，尚需另外購買化肥並施肥。本文從三段式廢水處理與施用化肥等兩方面探討溫室氣體 CO_2 當量排放量。

1. 三段式廢水處理

養豬廢水經過固液分離後，固體將經過堆肥化後再利用，液體則是經過厭氣與好氣等過程之後放流至地面水體中，因此本文估算厭氣處理、好氣處理以及堆肥等部份之 GHG 排放量。

三段式廢水處理過程中，厭氣處理產生 CH_4 、 N_2O 與 CO_2 ，好氣處理產生 CH_4 、 N_2O 與 CO_2 ；堆肥化過程中則產生 CH_4 、 N_2O 與 CO_2 等溫室氣體。及放流水排放於地面水後 N_2O 排放，其中處理過程中產生之 CO_2 屬於短期循環，因此不列入計算。

Bouwnan (1991)，EPA (2001) 和 IPCC (2007) 皆對 CH_4 以及 N_2O 的全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP) 有所解釋，其中 CH_4 之 GWP 為 21-30； N_2O 之 GWP 為 296-310。本文以依 IPCC (2007) 定義： CH_4 之 GWP 為 21； N_2O 之 GWP 為 310。

(1) 厭氣處理過程之溫室氣體排放

厭氣處理是利用厭氧菌在缺氧狀態下為了得到生活和繁殖時所需之能量，而將養豬廢水內的有機物質分解轉變為低能量成分，而放出能量以供代謝之用，處理過程大約需要 12~15 天，有機物分解過程會產生 CH_4 與 N_2O 。

A. CH_4

本研究計算厭氣處理過程產生之 CH_4 分別是從實際量測數據、消耗 COD 所產生之生物氣體 (biogas)、 CH_4 氧化過程以及 IPCC 之 CH_4 排放量估算公式等四部分進行比較取得。

實際量測的數據是根據 Su *et al.*, (2003) 實驗所得之數據；根據 Hou *et al.*, (2006) 指出 CH_4 排出量總合與 COD 有相關性，通常 1kg 的 COD 可以產生大約 0.35m^3 的生物氣體，其成分為 60% 的 CH_4 與 40% 的 CO_2 ，本文利用理想氣體公式(式 6)計算配合體積與莫爾數之間的關係公式(式

7)，便可以求得消耗 1kg COD 產生之生物氣體 (biogas)，其中 $P=1\text{atm}$ ， $V=350\text{L}$ ， $R=0.082$ ， $T=25^{\circ}\text{C}$ (278K)。

$$PV = nRT \text{ ----- (6)}$$

$$n = \frac{W}{M} \text{ ----- (7)}$$

P：大氣壓力，atm。

V：體積，L。

n：莫耳數。

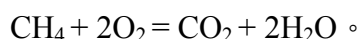
R：氣體常數 0.082。

T：絕對溫度，K。

W：重量，kg。

M：分子量。

根據 CH_4 氧化過程需消耗 COD，而消耗 COD 轉化成 CH_4 式子如下：



$$2 \times 32 / 16 = 64 / 16 = 4。$$

CH_4 的原子量為 16， O_2 的原子量為 32，1 kg CH_4 氧化需要 2 kg O_2 ，故理論上消耗 1 kg COD 可轉化成 0.25 kg CH_4 。 CH_4 之 GWP 約 21，故 0.25 kg CH_4 相當於 5.25 kg CO_2 。

根據 IPCC 不同的糞肥處理過程引起 CH_4 排放量估算公式 (式 1)，即求得厭氣處理過程中的 CH_4 排放量，但我國豬隻糞肥處理方式-三段式廢水處理，不屬於 IPCC 公佈的七種糞肥處理方式之一，因此需要引用本土排放係數進行估算。

B. N_2O

依據 IPCC (2006a) 處理過程引起之 N_2O 排放量計算分成直接與間接兩種。直接排放是透過糞肥中所含氮素共同的硝化和反硝化作用產生；間接排放則是由糞肥內的氮素以 NH_3 和 NO_x 的形式揮發產生。

根據 IPCC 不同的糞肥處理過程引起 N_2O 直接 (式 3) 與間接排放量估算公式 (式 4)，即求得厭氣處理過程中， N_2O 的直接排放量與間接排放量，但我國豬隻糞肥處理方式-三段式廢水處理，不屬於 IPCC 公佈的七種糞肥處理方式之一，因此需要引用本土排放係數進行估算。

(2) 好氣處理過程產生之溫室氣體排放

我國好氣處理過程屬於 IPCC 公佈的七種糞肥處理方式中其它系統（耗氧處理），養豬廢水在處理過程中產生之 GHG 為 CH₄、N₂O 與 CO₂，計算式如下：

A. CH₄

依據 IPCC (2006b) 處理系統 CH₄ 排放公式（式 1）得知，好氣處理過程只與排放因子 EF_P 與數量 N_P 有關。其中排放因子 EF_P 可由豬隻排放因子計算公式（式 2）求得。

B. N₂O

由處理過程引起之 N₂O 直接排放可由公式（式 3）求得；間接排放則由公式（式 4）求得。糞肥內 N 以 NH₃ 與 NO_x 形式揮發至大氣所損失的 N 含量可由公式（式 5）求得。

（3）好氣處理之鼓風機耗電之排碳

好氣處理分成鼓風機耗電產生係以用電量來計算排碳量。

（4）放流水排放至地面水體中產生之 N₂O 排放量

IPCC 對於排放畜牧廢水至地面水體中產生之溫室氣體部分並沒有說明，然而養豬廢水之放流水的 N 含量依然很高，容易產生氣體，故本文利用 IPCC(2006b)內家庭廢水排放至地面水體後引起之溫室氣體排放公式(式 9)，估算放流水排放至地面水體中，導致地面水體產生之 N₂O 排放。依據家庭廢水排放至地面水體後引起之 N₂O 排放公式（式 9）得知，廢水產生之 N₂O 排放量與廢水中的氮素含量有關。而排放廢水之 N₂O 排放因子，本文以 IPCC 預設值為 0.0075 (0.0005-0.25) 估算排碳量。

$$N_{2O_{Emissions}} = N_{EFFLUENT} \bullet EF_{EFFLUENT} \bullet 44/28 \dots\dots\dots(9)$$

N₂O EMISSIONS：每年的N₂O排放量，kg N₂O/year。

N_{EFFLUENT}：排放廢水中的氮素含量，kg N/year（0.13%）。

EF_{EFFLUENT}：排放廢水之N₂O排放因子，kg N₂O-N/Kg N（0.0075）。

（5）堆肥

堆肥化作用是堆肥材料由微生物消化、分解、利用這些生質能源來繁殖、生長和新陳代謝，所得產品可做為土壤改良劑和有機肥料。依據譚與王（2000）研究得知豬糞堆積 60 天時，堆肥化過程可以釋出 22.1 g/Mg 的 CH₄；根據趙震慶（1999）研究得知豬糞肥堆積 56 天時，每天 N₂O-N 釋出量介於 89.9 ± 34.7 ~ 486.1 ± 87.6 mg/Mg，堆積期間每公噸豬糞肥共釋出 11.14 g

N₂O-N。

2. 化肥製造與施用

施用化肥產生的 CO₂ 排放量分成製造化肥的 CO₂ 排放量與施肥產生的 CO₂ 排放量等兩部份。

(1) 製造化肥的 CO₂ 排放量

依據 Kongshaug (1998) 研究 1978-1998 年全世界生產氮素平均約為 82.7 百萬噸，每年平均產生的 CO₂ 當量為 260 百萬噸，因此生產 1 kg 的氮素大約會產生 3.14 kg 的 CO₂。本試驗每分地需要施灑 12.6 kg 的氮素，產生 39.6 kg 的 CO₂。

(2) 施肥產生的 CO₂ 排放量

根據農業委員會農業試驗所網站(2010)公佈的各種背負式高壓動力噴霧噴粉機(以下簡稱噴霧機)性能測試表，得知噴霧機的耗油量大約 0.3 L/hr~0.6 L/hr (本文以 0.4 L/hr 計算)；噴霧機的噴灑量為 0~4 kg/min (本文以 3.7 kg/min 計算)。本試驗以六分地為例，每分地施肥量約為 11.8 kg 氮素(相當於 74 kg 的化肥)，一分地作業時間約 20 min，作業六分地耗時約為 2 hr。

A. 汽油煉製

噴霧機的燃料是汽油，汽油比重約為 0.78，從原油分餾分表(表 4)(林，2004)中得知，提煉 1 L 的汽油大約需要 4~7.69 L 的原油(本文以 5.85 L 計算)。因此提煉 1 L 汽油需要 4.56 kg 的原油，產生 0.91 kg 的 CO₂。

B. 汽油燃燒

燃燒 1L 的汽油產生 2.26 kg 的 CO₂，因此從汽油的煉製直到燃燒產生動力，每公升汽油會產生 3.2 kg 的 CO₂。

(五) 施肥後農地產生之溫室氣體

無論施用養豬廢水或化肥，均以 IPCC (2006a) N₂O-N 與 CH₄ 排放公式，及其預設值進行 GHG 排放量估算。

1. N₂O 排放

IPCC (2006a) 將農地排放 N₂O-N 分成直接與間接兩種，直接是因為土壤有效氮增加，提高土壤硝化率與反硝化率，產生 N₂O 排放。可以通過施灑氮素、改變土地利用或是管理方式等，增加有效氮；間接是因為(1)管

理土壤施灑氮肥及燃燒生物量 (biomass) 產生的 NH_3 和 NO_x 揮發後，這些氣體以及其產物 NH_4^+ 和 NO_3^- 隨後再次沉降下來，進入土壤和水中；(2) 氮素經溶淋和逕流後，主要以 NO_3^- 的形式從管理土壤中釋放。

(1) N_2O 直接排放

公式 (式 10) 為直接排放公式，由此公式中得知， N_2O -N 直接排放與氮肥的投入量、有機土壤的管理與排水方式以及禽畜糞內的氮含量有關。IPCC (2006a) 將 N_2O -N 直接排放計算公式分成氮肥投入量 N_2O - $N_{\text{N inputs}}$ 公式 (式 11)、有機土壤的管理與排水 N_2O - N_{OS} 公式 (式 12) 以及禽畜糞內的氮含量 N_2O - N_{PRP} 公式 (式 13) 等三種，其中，因為土壤中施用氮肥造成 N_2O 排放之因子可從表 5 查得， F_{SOM} 是因為土地變化造成 N_2O -N 排放，可以根據公式 (式 14) 求得，在此假設該試驗田只做農地用，故此項為 0。公式 (式 15) 與公式 (式 16) 為間接排放公式，由此公式中得知， N_2O -N 間接排放只與氮肥種類 (化肥或是有機肥) 以及投入量有關，其排放因子可從表 5 中查得。將土壤中 N_2O -N 直接與間接排放公式求得數值代入公式 (式 17) 內可求得每年土壤中 N_2O 排放量。

$$N_{2O_{\text{Direct}}} - N = N_{2O} - N_{N \text{ inputs}} + N_{2O} - N_{OS} + N_{2O} - N_{PRP} \quad (10)$$

$N_{2O_{\text{Direct}}}$ -N：土壤中直接產生之 N_2O -N 排放量，kg N_2O -N/year。

N_2O - $N_{\text{N inputs}}$ ：土壤中的施用氮造成 N_2O -N 排放量，kg N_2O -N/year。

N_2O - N_{OS} ：有機土壤中直接產生之 N_2O -N 排放量，kg N_2O -N/year。

N_2O - N_{PRP} ：糞便或是尿液施灑於土壤中造成之 N_2O -N 排放量，kg N_2O -N/year。

$$N_{2O} - N_{N \text{ inputs}} = \left[\frac{\left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \bullet EF_1 \right] + \left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \bullet EF_{1FR} \right]}{\left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \bullet EF_{1FR} \right]} \right] \quad (11)$$

F_{SN} ：施用於土壤的化肥氮肥量，kg N。

F_{ON} ：施用於土壤的處理性畜糞肥、堆肥、污水污泥和其它添加的有機氮量，kg N。

F_{CR} ：作物殘餘物 (地上部和地下部) 中的年氮量，包括氮固定作物和從飼草/牧草翻耕返回土壤中的氮量，kg N/year。

F_{SOM} ：每年土地利用變化或管理引起的礦質土壤中土壤碳損失所導致的礦化的淨氮量，kg N。

EF_1 = 施用氮引起 N_2O 排放之排放因子，kg N_2O -N/kg N (表 5)。

EF_{1FR}：施用氮到稻田引起 N₂O 排放之排放因子，kg N₂O-N/kg N_{inputs}（表 5）。

$$N_2O - N_{OS} = \left[\begin{aligned} & \left(F_{OS,CG,Temp} \bullet EF_{2CG,Temp} \right) + \left(F_{OS,CG,Trop} \bullet EF_{2CG,Trop} \right) + \\ & \left(F_{OS,F,Temp,NR} \bullet EF_{2F,Temp,NR} \right) + \left(F_{OS,F,Temp,NP} \bullet EF_{2F,Temp,NP} \right) + \\ & \left(F_{OS,F,Trop} \bullet EF_{2F,Trop} \right) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

F_{OS}：管理/排水有機土壤的年度面積，公頃（PS.下標 CG，F，Temp，Trop，NR 和 NP 分別指農田及草地、林地、溫帶、熱帶、富營養和貧營養）

EF₂=排水/管理有機土壤中 N₂O 排放的排放因子，kg N₂O-N/公頃/年（表 5）
（PS.下標 CG，F，Temp，Trop，NR 和 NP 分別指農田及草地、林地、溫帶、熱帶、富營養及貧營養）。

依據 IPCC（2006a）有機土壤定義：1、厚度大於或等於 10mm。當混合土壤達到 20 cm 深度時，小於 20 cm 的土層必須含 12%或更多的有機碳；2、從未被水浸透幾天以上的土壤並含超過 20%的有機碳重量（即約 35%的有機質）；3、如果土壤易被水浸透，並（1）如果土壤不含粘土，至少要含 12%的有機碳重量（即大約 20%的有機質）；或者（2）如果土壤含 60%或更多的粘土，至少要含 18%的有機碳重量（即大約 30%的有機質）；或者（3）對於含中等量粘土的土壤，含中等比例量的有機碳。

$$N_2O - N_{PRP} = \left[\left(F_{PRP,CPP} \bullet EF_{3PRP,CPP} \right) + \left(F_{PRP,SO} \bullet EF_{3PRP,SO} \right) \right] \text{-----} \quad (13)$$

F_{PRP}：放牧牲畜每年排泄堆積在牧場、草原和圍場上的尿液和糞便氮量，kg N/year（PS.下標 CPP 指家牛、家禽、豬，SO 指綿羊及其它動物）。

EF_{3PRP}：放牧牲畜排泄堆積在草場、牧場和圍場上所引起的 N₂O 排放的排放因子，kg N₂O-N/kg N 投入（表 5）（PS.下標 CPP 指家牛、家禽與豬，SO 指綿羊及其它動物）。

$$F_{SOM} = \sum_{LU} \left[\left(\Delta C_{Mineral,LU} \bullet \frac{1}{R} \right) \bullet 1000 \right] \text{-----} \quad (14)$$

R：土壤有機質的碳-氮比。在土地利用從林地或草地變為農田的情況下，如果缺乏關於該區域更詳細的數據，可採用預設值為 15（不確定性範圍為 10-30）的碳-氮比（R）。在仍為農田的農田上管理發生變化的情況下，可

採用的預設值為 10（範圍為 8-15）。碳-氮比可隨著時間、土地利用或管理做法而變化。如果各國可以將碳-氮比變化成記錄成文，則不同的值可用于整個時間序列、土地利用或管理做法。

LU：土地利用和/或管理系統類型。

$\Delta C_{\text{Mineral,LU}}$ ：每種土地利用類型（LU）土壤碳的年均損失量，噸碳（PS. 所有土地利用和管理系統將具有單一的 $\Delta C_{\text{Mineral,LU}}$ 值）。

（2）N₂O 間接排放

N₂O 之間接排放量由公式（式 15）與公式（式 16）來估算。公式（式 17）係估算土壤施用氮肥後，揮發氮至大氣中，由大氣沉積產生的 N₂O-N；公式（式 18）係估算溶淋和逕流發生地區溶淋和逕流中產生的 N₂O-N 排放。

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} \bullet \text{Frac}_{GASF}) + ((F_{ON} + F_{PRP}) \bullet \text{Frac}_{GASM})] \bullet EF_4 \text{ ----- (15)}$$

N₂O_(ATD)-N：管理土壤中揮發氮大氣沉積產生的 N₂O-N 的量，kgN₂O-N。

Frac_{GASF}：以 NH₃ 和 NO_x 形式揮發的化肥氮比例，kg 揮發 N/kg 施用 N（表 3）。

Frac_{GASM}：以 NH₃ 和 NO_x 形式揮發的，施用的有機氮肥物質比例（F_{ON}）和放牧牲畜排泄的尿液和糞便氮比例（F_{PRP}），kg 揮發 N/kg 施用 N 或排泄 N（表 3）。

EF₄：土壤和水面氮大氣沉積的 N₂O 排放的排放因子，N₂O-N/（揮發的 kg NH₃-N+NO_x-N）（表 3）。

$$N_2O_{(L)} - N = (F_{SN(L)} + F_{ON(L)} + F_{PRP(L)} + F_{CR(L)} + F_{SOM(L)}) \bullet \text{Frac}_{\text{LEACH-(H)}} \bullet EF_5 \text{ (16)}$$

N₂O_(L)-N：溶淋/逕流發生地區每年施加到管理土壤中氮溶淋和逕流產生的 N₂O - N 的量，kg N₂O - N /year。

Frac_{LEACH-(H)}：溶淋/逕流發生地區，管理土壤中通過溶淋和逕流損失的所有施加氮/礦化氮的比例，kg N/kg 施氮量（表 3）。

EF₅：氮溶淋和逕流引起的 N₂O 排放的排放因子，kg N₂O - N/kg 溶淋和逕流氮（表 3）。

$$N_2O = N_2O - N \bullet 44 / 28 \text{ -----(17)}$$

2.CH₄ 排放

本試驗將農田之 CH₄ 排放分成水田與旱田兩個部分進行探討。依據

IPCC (2006a) CH₄ 排放公式 (式 18) 與 CH₄ 日排放因子公式 (式 19) 得知, CH₄ 的排放與種植期間、種植面積、種植期的水分狀況、種植期前農田之水分狀況、添加有機物的類型與數量、土壤類型與水稻品種等因子。本文種植期間以 130 天, 種植面積 1ha 為例, 根據 IPCC (2006a), 種植期的水分狀況分成旱地、灌溉以及深水等三種, 換算係數可從表 6 得知; 種植期前農田之水分狀況分成種植前 180 天內不灌水、種植前超過 180 天不灌水與季前灌水多於 30 天等三種, 換算係數可從表 7 得知; 添加有機物的類型分成種植前不久進行稻稈翻耕、種植前很久進行稻稈翻耕、堆肥、農場糞肥與綠肥等五種, 換算係數可從表 8 得知; 依據 IPCC (2006a) 若不知道土壤類型與水稻品種的因子, 可以不列入計算。其中水田的條件: 種植期水分狀況為灌溉, 種植期前農田之水分狀況為季前灌水少於 30 天, 添加有機物的類型有種植前不久進行稻稈翻耕以及農場糞肥等兩種, 以公式 (式 20) 計算取得。

$$CH_{4, \text{rice}} = \sum_{i,j,k} EF_{i,j,k} \cdot t_{i,j,k} \cdot A_{i,j,k} \cdot 10^{-6} \text{-----} (18)$$

CH_{4 rice} = 稻子種植期的年度 CH₄ 排放, Gg CH₄ /year。

EF_{i,j,k}: CH₄ 的日排放因子, kg CH₄/ha/day。

t_{i,j,k}: 水稻生長期, day。

A_{i,j,k}: 水稻的年收穫面積, ha/year。

i,j,k: 分別代表不同的生態系統水分狀況和有機添加量以及其他可以引起水稻 CH₄ 排放變化的條件。

$$EF_{i,j,k} = EF_C \cdot SF_W \cdot SF_P \cdot SF_O \cdot SF_{S,r} \text{-----} (19)$$

EF_C: 不含有機添加物的持續性灌水稻田的基準排放因子, kg CH₄/ha/day。

SF_W: 種植期不同水分狀況的換算係數 (表 6)。

SF_P: 種植期前不同水分狀況的換算係數 (表 7)。

SF_O: 有機添加物類型和數量變化的換算係數。

SF_{S,r}: 土壤類型、水稻品種等的換算係數 (可以不列入計算)。

$$SF_O = \left(1 + \sum_i ROA_i \cdot CFOA_i \right)^{0.59} \text{-----} (20)$$

ROA_i: 有機添加物的施用比率 i, 稻稈為乾重, 其他為鮮重, ton/ha。

CFOA_i：有機添加物的轉換系數（相對於種植前不久使用稻稈的相對影響形式）（表 8）。

三、結果與討論

（一）養豬廢水農地再利用之溫室氣體排放

1. 儲存過程

（1）CH₄

本文以畜養數 2,000 頭豬隻之畜舍為例。臺灣年平均溫度在 23 °C，根據 IPCC (2006b) 內預設值，亞洲畜養豬隻，溫度 23 °C 時，VS_P 為 0.3，B_{OP} 為 0.29，MCF_{S,K} 為 55，由於本文假設每日產生養豬廢水僅經過液態系統處理，故 T 為 1 day/year，MS_(P,S,K) 為 1。將上述預設值代入豬隻排放因子計算公式（式 2）便可求得 EF_P 為 0.032，將 EF_P 代入公式（式 1）內即求得 CH₄ pigwaste 為 64 kg/year。

（2）N₂O

A. 直接排放

依據 IPCC (2006b) 由處理過程引起之 N₂O 直接排放可由公式（式 3）求得，本文的養豬廢水儲存屬於液態系統，依據 IPCC 預設值，EF_{3(S)} 為 0，故由處理過程引起之 N₂O 直接排放量為 0。

B. 間接排放

本文以畜養數 2,000 頭豬隻之畜舍為例，N_(P) 為 2,000，每頭豬每日產生廢水量為 25 L，含氮量為 0.15 %，則 NEX_(P) 為 0.038 kg N/head/day，由於處理過程只有液態系統，故 MS_(P,S) 為 1，依據 IPCC 內糞便處理過程產生的 NH₃ 和 NO_x 揮發引起的氮損失預設值，經過液態系統處理的豬糞肥其 Frac_{GasMS} 為 48，將上述數據代入公式（式 5）內，即求得 N_{E-PW} 為 36.48 kg N/day。將 N_{E-PW} 代入公式（式 4）內，其中 EF₄ 為 0.01（表 3），即得到由處理過程引起 N₂O 間接排放值為 0.57 kg N₂O/year。

將處理系統引起 N₂O 直接排放與間接排放數值相加，得到的數據即為儲存過程產生 N₂O 排放量 0.57 kg N₂O/year。

2. 載運過程

農用施肥車載運養豬廢水至農地所燃燒柴油排放的 CO₂，包括柴油煉製以及柴油燃燒等兩個部分的排放。將資料彙整後可以發現，從柴油的煉製直到燃燒產生動力，燃燒每公升柴油會產生 2.64 kg 的 CO₂。若依據本文條件，則每天農用施肥車從豬舍載運養豬廢水至農地耗油量為 6 L，因此，每天會產生 15.8 kg 的 CO₂。

(二) 三段式廢水處理（含施用化肥）之溫室氣體

1. 厭氣過程

(1) CH₄

厭氣處理過程產生之 CH₄ 排放量分別以實際量測數據、消耗 COD 所產生的生物氣體量、CH₄ 氧化過程與 IPCC 之 CH₄ 排放量估算公式等方式估算。實際量測的數據是根據 Su *et al.*, (2003) 實驗所得之數據，得到每頭豬每年在厭氣處理過程中產生 CH₄ 量為 12.16kg，2,000 頭豬共產生 24,320 kg CH₄，平均分攤於每日的量為 66.6 kg CH₄。

從 Cheng *et al.*, (1996) 研究報告得知，飼養 2,000 頭豬的畜舍產生的養豬廢水在三段式廢水處理過程中每個階段的 BOD₅（生化需氧量）、COD（化學需氧量）和 SS（懸浮固體）等值（表 9），由於 BOD₅ 值包括在 COD 內，因此只計算 COD 產生的 CO₂ 排放量。養豬廢水經厭氣處理後，每公升約去除 3,617 mg（去除率為 90%），每日處理 50 Mg 養豬廢水，則去除 181 kg COD。

根據 Hou *et al.*, (2006) 指出 GHG 排出量總合與 COD 有相關性，通常 1 kg 的 COD 可以產生大約 0.35 m³ 至 0.4 m³ 的生物氣體，其成分為 60% 的 CH₄ 與 40% 的 CO₂，代入理想氣體公式（式 6）計算，其中 P = 1 atm，V = 350 L ~ 400 L（CH₄ 為 210 L ~ 240 L），R = 0.082，T = 25 °C（298 K）。計算式子如下：

$$PV = nRT \Rightarrow 1 \times 210 = n \times 0.082 \times 298$$

$$\Rightarrow 1 \times 240 = n \times 0.082 \times 298$$

$n = 8.59 \sim 9.82$ ---莫耳數 n 代入公式（式 7）內計算，其中其分子量 M 為 16。

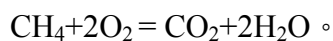
$$n = \frac{W}{M} \Rightarrow 8.6 = \frac{W}{16}$$

$$\Rightarrow 9.8 = \frac{W}{16}$$

$$W = 138 \sim 157g$$

由上述結果得知，消耗 1 kg COD 約產生 0.14~0.16 kg CH₄，將表 9 的數據代入，求得每日產生 CH₄ 量為 25.34~28.96 kg。

根據 CH₄ 氧化過程需消耗 COD，而消耗 COD 轉化成 CH₄ 式子如下：



$$2 \times 32 / 16 = 64 / 16 = 4。$$

CH₄的原子量為 16，O₂的原子量為 32，1 kg CH₄ 氧化需要 2 kg O₂，故理論上消耗 1 kg COD 可轉化成 0.25 kg CH₄。然而 CH₄ 氧化過程是假設厭氣處理過程中，全部生物氣體皆轉換成 CH₄，若依據 Hou *et al.*, (2006) 研究，生物氣體內 CH₄ 只有 60%，故理論上消耗 1 kg COD 可轉化成 0.15 kg CH₄。將表 9 的數據代入求得每日產生之 CH₄ 量為 27.15 kg。

本文以畜養數 2,000 頭豬隻之畜舍為例，故 N_p 為 2,000。依據洪等(2009) 研究顯示，三段式廢水處理之厭氣處理過程，本土 CH₄ 排放因子 EF_p 為 0.768 kg/head/year，將上述數據代入 IPCC 之 CH₄ 排放量估算公式（式 1），即求得 CH₄ 排放量 1,536 kg/year，換算成每日排放量即為 63 kg。

故厭氣處理過程產生之 CH₄ 實際量測數據為 66.6 kg CH₄、COD 為 25.34~28.96 (27.15) kg CH₄、CH₄ 氧化過程 27.15 kg CH₄ 以及 IPCC 估算值 63 kg CH₄。結果顯示，以本土 CH₄ 排放因子代入 IPCC 之公式（式 1）內求得的數據，最接近 CH₄ 實際排放量。

(2) N₂O

本文以畜養2,000頭豬隻之豬舍為例，每日每頭豬排泄N量為37.5 g，故 N_p為2,000，N_{ex}為37.5 g，MS_(P,S)為1，依據洪等（2009）研究顯示，本土三段式廢水處理之厭氣處理過程的N₂O排放因子EF_{3(S)}為0.002，將上述數據代入公式（式3），即求得N₂O排放量為0.24 kg N₂O。

2.好氣處理過程產生之溫室氣體排放

(1) CH₄

本文以畜養數 2,000 頭豬隻之畜舍為例。臺灣年平均溫度在 23 °C，根據 IPCC (2006b) 內預設值，耗氧處理的 MCF_{S,K} 為 0，故 EF_p 為 0，好氣處理過程 CH₄ 排放量為 0。

(2) N₂O

本文以畜養數 2,000 頭豬隻之畜舍為例，N_(p)為 2,000，每頭豬每日產生廢水量為 25 L，經過三段式廢水處理之厭氣處理後，廢水含氮量為 0.12 %，則 NEX_(p)為 0.03，由於處理過程只有耗氧處理，故 MS_(P,S)為 1，依據 IPCC 內養豬廢水經耗氧處理的 N₂O 排放因子預設值為 0.01（自然通風系統）與 0.005（強制通風系統），臺灣的三段式廢水處理過程中好氣處理屬於強制通風系統，故 EF_{3(S)}為 0.005。將上述數據代入公式(式 3)內，即取得 N₂O_{D(pigwaste)} 為 0.47 kg N₂O /year。

IPCC 內並沒有豬糞肥因為耗氧處理過程，引起廢水內的 N 以 NH₃ 和 NO_x 形式揮發損失之預設值，故無法確認三段式廢水處理過程中好氣處理

是否有 N_2O 間接排放量，未來應量測廢水內是否有 N 揮發損失，本研究先依據 IPCC 之估算，假設廢水經過耗氧處理之 N_2O 間接排放量為 0。

根據上述，好氣過程之 N_2O 排放量為直接排放量與間接排放量之和，即 N_2O 排放量為 $0.47 \text{ kg } \text{N}_2\text{O} / \text{year}$ 。

3. 好氣過程中鼓風機耗電產生之 CO_2

根據畜試所資料，處理 1,000 頭豬產生之廢水需要使用 3HP 的鼓風機，每天耗電量 60 度，假設 2,000 頭豬需要使用 2 台 3HP 的鼓風機，每天耗電量 120 度。依據經濟部能源局公佈的 98 年用電碳排放量（表 10）計算，每日約產生 74.4 kg 的 CO_2 。而好氣處理約需要 2 天，合計排放 148.8 kg 的 CO_2 。

4. 放流水排放至地面水體中產生之 N_2O 排放量

畜養 2,000 頭豬畜舍每日排放 50 Mg 放流水至地面水體，根據本次試驗，以平鎮莊玉輝牧場內產生之放流水為例，其放流水內氮素含量約為 0.09% ，則排放至地面水體的氮素為 45 kg N/day ，故 $\text{N}_{\text{EFFLUENT}}$ 為 45。IPCC 之 $\text{EF}_{\text{EFFLUENT}}$ 預設值為 0.0075，將上述數據代入廢水產生之 N_2O 排放公式（式 9）內，求得 $\text{N}_2\text{O}_{\text{EMISSIONS}}$ 為 $0.53 \text{ kg } \text{N}_2\text{O} / \text{year}$

5. 堆肥製作與載運

每天處理 50 Mg 的養豬廢水，其中約有 1% 是固體，也就是每天要處理 0.5 Mg 的豬糞，在堆積約 2 個月時間產生 $11 \times 10^{-3} \text{ kg CH}_4$ 和 $5.6 \times 10^{-3} \text{ kg } \text{N}_2\text{O}$ 。其中 CH_4 之 GWP 為 21； N_2O 之 GWP 為 310，因此堆積約 2 個月時間產生之 CH_4 相當於 0.27 kg CO_2 當量； N_2O 約為 1.74 kg CO_2 當量。

本文使用貨車將豬糞堆肥從堆肥廠運至農地，柴油從煉製過程至燃燒每公升約產生 3.6 kg CO_2 ，以貨車耗油量 8 km/L 計算，來回畜牧場與田間，其需 4 km ，則每日耗油 0.5 L ，故載運堆肥每日產生 1.8 kg CO_2 。

6. 化肥製造與施用

依據 Kongshaug (1998) 資料，生產 1 kg 的氮素約產生 3.14 kg CO_2 ，每分地施灑 11.8 kg 氮素（相當於 74 kg 的化肥），每分地產生 37 kg CO_2 ；施灑每分地大約需時 20 min ，產生排放量 CO_2 為 0.42 kg ，若施灑六分地則化肥製造產生 222 kg CO_2 ，化肥施用產生 2.52 kg CO_2 。

（三）施肥後農地產生之溫室氣體

我們將此部分分為養豬廢水農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）等兩部分進行探討，比較兩種方式在旱田與水田中的 N_2O 與 CH_4 排放量。其中 N_2O 分成直接排放與間接排放兩種； CH_4 排放方面，依據 IPCC (2006a) CH_4 排放

因子估算公式（式 19），旱田之 SF_W （種植期不同水分狀況的換算係數）為 0，因此旱田的 CH_4 排放量為 0。

1. 養豬廢水農地再利用

(1) 水田

A. N_2O

(A) 直接排放

依據 IPCC (2006a) N_2O 直接排放公式（式 10）， N_2O 直接排放分成 $N_2O-N_{N\text{ Input}}$ 、 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 等三項。

$N_2O-N_{N\text{ Input}}$ ：農地施用氮素為有機肥，每公頃施用量為 126 kg，因此 $F_{SN}=0$ ， $F_{ON}=126\text{ kg/ha}$ 。根據行政院農業委員會（2010）得知 2000 - 2009 年稻米平均產量 5,738 kg/ha，本文以 6000 kg/ha 為例，臺灣稻米地上部殘餘部含氮量為 0.6%，得到 $F_{CR}=36\text{ kg/ha}$ 。由於本文以農地作為對象，假設 20 年不曾用做它途，故 $F_{SOM}=0$ 。從表 5 可以得知 EF_{IFR} ，將上述數據代入公式（式 11）求得 $N_2O-N_{N\text{ Input}}=0.49\text{ kg }N_2O-N/\text{ha/year}$ 。

N_2O-N_{OS} ：臺灣氣候南部屬於熱帶，北部屬於亞熱帶，從農業試驗所臺灣土壤肥力資料庫（2010）得知臺灣各地土壤有機質未達到 IPCC 標準，故 $N_2O-N_{OS}=0$ 。

N_2O-N_{PRP} ：本文假設該農地僅作種植水稻用，不開放畜牧用，故此項為 0。

將 $N_2O-N_{N\text{ Input}}$ 、 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 數據代入公式（式 10）求得養豬廢水農地再利用 $N_2O_{\text{Direct}}-N=0.49\text{ kg }N_2O-N/\text{ha/year}$ ，將其代入公式（式 17）得到 $N_2O_{\text{Direct}}=0.77\text{ kg }N_2O/\text{ha/year}$ 。

(B) 間接排放

依據 IPCC (2006a) N_2O 間接排放估算， N_2O 間接排放分成 (a) 施用氮揮發至大氣中，由大氣沉積產生之 N_2O-N 量（式 15）；(b) 土壤中氮溶淋和逕流產生之 N_2O-N 量（式 16）。

施用氮素來源為養豬廢水（有機肥），每公頃施氮量 126 kg，故 $F_{SN}=0\text{ kg N}$ ， $F_{ON}=126\text{ kg N}$ 。

從表 3 可以得知， $Frac_{GASF}=0.1$ ， $Frac_{GASM}=0.2$ ， $EF_4=0.01$ 將上述數據代入公式（式 15）， $N_2O_{(ATD)}-N=0.25\text{ kg }N_2O-N/\text{ha/year}$ ，將其代入公式（式 17）得到 $N_2O_{(ATD)}=0.4\text{ kg }N_2O/\text{ha/year}$ 。

F_{CR} 是作物殘餘物（地上部和地下部）中的年氮量，由於條件相同，故 F_{CR} 為 36；從表 3 可以得知， $Frac_{LEACH-(H)}=0.3$ ， $EF_5=0.0075$ ，將上述數據代入公式（式 16）得到 $N_2O_{(L)}-N$ 為 $0.36\text{ kg }N_2O-N/\text{year}$ ，將其代入公式（式 17）得到 $N_2O_{(L)}=0.57\text{ kg }N_2O/\text{ha/year}$ 。

將 $N_2O_{(ATD)}$ 和 $N_2O_{(L)}$ 數據相加得到 N_2O 間接排放量為 $0.97\text{ kg }N_2O/\text{ha/year}$ 。

水田農地施肥後產生之 N_2O-N 排放量為直接與間接排放相加，故施肥後產生 N_2O-N 排放量合計為 $1.74 \text{ kg } N_2O/\text{ha}/\text{year}$ 。

B. CH_4

水田 CH_4 排放部分，IPCC (2006a) 係以水稻種植前 180 天內未灌水的田地以及種植期內無有機添加物的連續水灌田的基準排放因子 EF_C 作為起點， EF_C 的預設值為 $1.30 \text{ kg } CH_4/\text{ha}/\text{day}$ (誤差範圍為 0.80-2.20)，再考慮其它因子。臺灣目前種植水稻方式：種植期水分狀況為間歇性灌水-多次曬乾，從表 3 內得知 SF_W 預設值為 0.52，種植期前農地之水分狀況為季前灌水少於 30 天，我們可以不將此因子列入考量，即 $SF_P = 1$ ，添加有機物的類型有種植前不久進行稻稈翻耕以及農場糞肥等兩種，從表 9 得知 CFOA 轉換係數分別為 1 以及 0.14。

根據行政院農業委員會 (2010) 得知 2000-2009 年稻米平均產量 $5,738 \text{ kg}/\text{ha}$ ，本研究以 6 ton 計算，因此翻耕進入農地的稻稈重 $6 \text{ ton}/\text{ha}$ ；農場糞肥部分為豬糞肥，本研究施用之廢水量為 $84 \text{ ton}/\text{ha}$ ，是沖水式豬舍廢水與 IPCC 所提之未經加水稀釋之糞肥不同。沖水式豬舍每頭豬每日廢水量為 25L，高床式每頭豬每日排泄物為 3.5 L，故本研究以稀釋 7 倍反推施用量為 $11.75 \text{ ton}/\text{ha}$ 來估算。將上述數據與表 7 取得轉換係數代入公式 (式 20) 內求得 SF_O 為 3.06。

將前述 $EF_C = 1.3$ 、 $SF_W = 0.52$ 以及 $SF_O = 5.64$ 代入公式 (式 19) 內求得水田 EF 值為 $3.81 \text{ kg}/\text{day}$ 。

臺灣水稻生長期大約 130 天，故 $t = 130$ ，將上述數據代入公式 (式 18)，得到每公頃水田之 $CH_{4,\text{rice}} = 496 \text{ kg } CH_4/\text{ha}/\text{year}$ 。

(2) 旱田

A. N_2O

(A) 直接排放

N_2O 直接排放分成 $N_2O-N_{N \text{ Input}}$ 、 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 等三項。

$N_2O-N_{N \text{ Input}}$ ：農地施用氮素為有機肥，每公頃施用量為 126 kg ，因此 $F_{SN} = 0$ ， $F_{ON} = 126 \text{ kg}/\text{ha}$ 。 F_{CR} 是作物殘餘物 (地上部和地下部) 中的年氮量，由於條件相同，故 F_{CR} 為 36。由於本文以農地作為對象，假設 20 年不曾用做它途，故 $F_{SOM} = 0$ 。從表 5 可以得知 EF_1 ，將上述數據代入公式 (4) 求得 $N_2O-N_{N \text{ Input}} = 1.62 \text{ kg } N_2O-N/\text{ha}/\text{year}$ 。將其代入公式 (式 17) 得到 $2.55 \text{ kg } N_2O/\text{ha}/\text{year}$ 。

本文假設農地條件一樣，故 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 為 0，因此 $N_2O_{\text{Direct}} = 2.55 \text{ kg } N_2O/\text{ha}/\text{year}$ 。

(B) 間接排放

間接排放與水田或是旱田無關，旱田之 N_2O 排放量應與水田同，故

N_2O 間接排放量為 $0.97 \text{ kg N}_2\text{O/ha/year}$ 。

旱田農地施肥後產生之 $\text{N}_2\text{O-N}$ 排放量為直接與間接排放相加，故施肥後產生 $\text{N}_2\text{O-N}$ 排放量為 $3.52 \text{ kg N}_2\text{O/ha/year}$ 。

2. 施用化肥

(1) 水田

A. N_2O

(A) 直接排放

公式(式 11~13)顯示，當每公頃農地施用氮素量固定時， $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{Input}}$ 、 $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{OS}}$ 以及 $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{PRP}}$ 不會因為施用化肥或是有機肥而改變，故 $\text{N}_2\text{O}_{\text{Direct}} = 0.77 \text{ kg N}_2\text{O /ha/year}$ 。

(B) 間接排放

施用氮素來源為化肥與固液分離後之固體經過堆肥化產生之堆肥，以畜養數 2,000 頭豬畜舍為例，則每天產生固液分離後之固體為 0.5Mg ，堆肥化過程質量約損失 50%，故堆肥量約為 0.25Mg ，其氮素含量約為 2%，供 6 分地農地用，故每公頃 $F_{\text{ON}} = 8 \text{ kg N}$ ， $F_{\text{SN}} = 118 \text{ kg N}$ ，從表 6 可以得知， $\text{Frac}_{\text{GASF}} = 0.1$ ， $\text{Frac}_{\text{GASM}} = 0.2$ ， $\text{EF}_4 = 0.01$ 將上述數據代入公式(式 15)， $\text{N}_2\text{O}_{(\text{ATD})-\text{N}} = 0.134 \text{ kg N}_2\text{O-N/ha/year}$ ，將其代入公式(式 17)得到 $\text{N}_2\text{O}_{(\text{ATD})} = 0.21 \text{ kg N}_2\text{O /ha/year}$ 。

F_{CR} 是作物殘餘物(地上部和地下部)中的年氮量，由於條件相同，故 F_{CR} 為 36；從表 3 可以得知， $\text{Frac}_{\text{LEACH-(H)}} = 0.3$ ， $\text{EF}_5 = 0.0075$ ，將上述數據代入公式(式 16)得到 $\text{N}_2\text{O}_{(\text{L})-\text{N}}$ 為 $0.36 \text{ kg N}_2\text{O - N/year}$ ，將其代入公式(式 17)得到 $\text{N}_2\text{O}_{(\text{L})} = 0.57 \text{ kg N}_2\text{O/ha/year}$ 。

將 $\text{N}_2\text{O}_{(\text{ATD})}$ 和 $\text{N}_2\text{O}_{(\text{L})}$ 數據相加得到 N_2O 間接排放量為 $0.78 \text{ kg N}_2\text{O/ha/year}$ 。

農地施肥後產生之 N_2O 排放量為直接與間接排放相加，故水田施肥後產生 N_2O 排放量為 $1.55 \text{ kg N}_2\text{O/ha/year}$ 。

B. CH_4

在水稻種植條件相同情形下，農地 CH_4 排放量只與有機肥種類有關，在此添加有機物的類型有種植前不久進行稻稈翻耕以及堆肥等兩種，從表 7 得知其轉換係數分別為 1 以及 0.05。

從上述章節中得知，翻耕進入農地的稻稈重 6 ton/ha ，豬糞堆肥 0.84 ton/ha ，將上述數據與表 7 取得轉換係數代入公式(式 20)內求得 SF_0 為

3.06。

將 $EF_C = 1.3$ 、 $SF_W = 0.52$ 以及 SF_O 代入公式（式 19）內求得水田 EF 值為 2.13 kg/day。

臺灣水稻生長期大約 130 天，故 $t = 130$ ，計算 1 ha 之排放量， $A=1$ ，將上述數據代入公式（式 18），得到水田 $CH_{4, rice} = 277 \text{ kg } CH_4 / \text{ha/year}$ 。

（2）旱田

A. N_2O

（A）直接排放

N_2O 直接排放分成 $N_2O-N_{N \text{ Input}}$ 、 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 等三項，本文假設農地條件一樣，故 N_2O-N_{OS} 以及 N_2O-N_{PRP} 為 0。

$N_2O-N_{N \text{ Input}}$ ：農地施用氮素為化肥與堆肥混合使用，每公頃施肥量為 126 kg，其中化肥使用量為 118 kg/ha，堆肥使用量為 8 kg/ha。因此 $F_{SN}=118 \text{ kg/ha}$ ， $F_{ON}=8 \text{ kg/ha}$ 。 F_{CR} 是作物殘餘物（地上部和地下部）中的年氮量，由於條件相同，故 F_{CR} 為 36。由於本文以農地作為對象，假設 20 年不曾用做它途，故 $F_{SOM}=0$ 。從表 5 可以得知 EF_1 ，將上述數據代入公式（式 11）求得 $N_2O-N_{N \text{ Input}} = 1.62 \text{ kg } N_2O-N/\text{ha/year}$ 。將其代入公式（式 17）得到 $N_2O_{\text{Input}} = N_2O_{\text{Direct}} = 2.55 \text{ kg } N_2O/\text{ha/year}$ 。

（B）間接排放

間接排放與水田或是旱田無關，旱田之 N_2O 排放量應與水田同，故 N_2O 間接排放量為 $0.78 \text{ kg } N_2O/\text{ha/year}$ 。

旱田農地施肥後產生之 N_2O 排放量為直接與間接排放相加，故施肥後產生 N_2O 排放量為 $3.33 \text{ kg } N_2O/\text{ha/year}$ 。

綜合本章節之估算，不同肥料在水、旱田之溫室氣體排放量表列如表 11。由計算結果顯示水田的 CH_4 排放量較 N_2O 排放量的暖化潛勢高很多，而施用養豬廢水者，總 CH_4 排放量為施用化肥（含少量堆肥）者之 1.8 倍。

依據本試驗廢水分析結果其有機質含量約只有 0.994 %，即 84 Mg 廢水只含 835 kg 之有機質，以平鎮土壤有機質含量為 5 %，假設每公頃表土重量為 2000 Mg，即每公頃有 100,000 kg 之有機質，此次分析僅增加 0.84 % 之有機質，顯示所提供之碳源相當有限。

化肥的有機質來源為翻耕進入農地的稻稈量 6 Mg/ha，施入有機質碳含量為 2.4 Mg/ha，造成土壤產生之 CH_4 排放量為 277 kg/ha/130day （相當於 $208 \text{ kg } C/\text{ha/130day}$ ），就比例而言，施入 $1 \text{ kg } C/\text{ha/130day}$ ，約產生 $0.12 \text{ kg } CH_4/\text{ha/130day}$ ；而養豬廢水的有機肥來源為翻耕的稻稈量與養豬廢水量，施入 84 Mg 養豬廢水內有機質含量為 835 kg，假設廢水內有機質碳含量為 40 %，

則廢水內碳含量為 334 kg，估算 CH₄ 排放量為 496 kg/ha/130day（相當於 372 kg C/ha/130day）。施用養豬廢水之 CH₄ 排放量比施用化肥多了 219 kg/ha/130day（相當於 164 kg C/ha/130day），即表示施用 1 kg C/ha 約產生 0.66 kg CH₄/ha/day，為施用稻稈之 CH₄ 排放量的 5.5 倍。

造成上述情形的原因可能為國外畜舍都未經沖水，廢水之有機質含量較高；而本文所使用的農場糞肥是沖水式畜舍產生之廢水，每頭豬每日產生之廢水量為 25 L，有機質含量較低，若是改以高床式畜舍，則每日每頭豬產生之排泄物為 3.5 kg，有機質含量較高，可能較符合國外農場糞肥。假設在處理過程中，肥分沒有流失，則每公頃農地施入沖水式之養豬廢水為 84 Mg，換算成高床式之排泄物約為 11.76 Mg/ha，將此數值代入有機質投入量計算公式（式 20）內，求得 SF_O 為 3.57，將計算所得之 SF_O 代入 CH₄ 的日排放因子計算公式（式 19）內，求得 EF_i 為 2.4，再將 EF_i 代入農田 CH₄ 排放量計算公式（式 18）內，求得 CH₄ 排放量降至 314 kg/ha/130day（236 kg C/ha/130day），比施用化肥多 37 kg/ha/130day（28 kg C/ha/130day），即表示施用 1 kg C/ha 約產生 0.11 kg CH₄/ha/day，與施用稻稈之 CH₄ 排放量相近，此結果應較合理。但未來仍應實際量測以提高準確性。

（四）前人農地溫室氣體排放量測值比較

GHG 排放量量測方式主要分成通量室法（Chamber）、隨意渦流法（REA）與通量變異法（F_{VAR}）等三種。

依據 Tseng *et al.*, (2010) 比較前人研究結果顯示（表 12），利用 Chamber 法量測水稻生長時之 CH₄ 排放量，以中國量測水稻生長時 CH₄ 排放量 9.36 μg/m²/s 最高，其次是臺灣 3.042 μg/m²/s，最少的是日本 0.864 μg/m²/s，中國水稻 CH₄ 排放量明顯比其它各國高。

臺灣已有多人進行本土 GHG 排放量測，種植水稻之 CH₄ 排放量以 Chamber 法量測到的數據分別為 3.042 μg/m²/s（表 12）、55.49 kg/ha/136 day（0.47 μg/m²/s）與 116 kg/ha/124 day（1.08 μg/m²/s）（表 13），量測地點皆在臺大校園內；F_{VAR} 量測到的數據為 5 μg/m²/s（表 12），量測地點在農試所 82 號田，差異相當明顯，可能是因為量測地點、量測方式與作物生長期不同，導致結果不同，其 CH₄ 排放量範圍為 0.47 ~ 5 μg/m²/s。

另外本試驗利用 IPCC(2006a)公式估算 CH₄ 排放量為 277 kg/ha/130 day(2.47 μg/m²/s)（表 11）。為了能與國內研究（Yang *et al.*, (2003)，楊盛行等，2003）進行比較，本試驗以水稻一期作施肥量為 120 kg-N/ha，水稻二期作施肥 90 kg-N/ha，施作期分別為 136 天、124 天進行計算，求得一期作 CH₄ 排放量為 314 kg/ha/136 day（2.67 μg/m²/s），二期作為 317 kg/ha/124 day（2.96 μg/m²/s）（表 13）。我們發現不論是一期作或是二期作，IPCC 之 CH₄ 排放量估算值皆比我國實際量測到的數據高估很多。

根據 Yang *et al.*, (2003)與楊盛行等（2003）研究，以通量室法（Chamber）

量測結果，種植水稻之 N_2O 排放量，一期作為 2.71 kg/ha，二期作為 1.76 kg/ha（表 13），皆是屬於 N_2O 直接排放；另外本試驗利用 IPCC（2006a）公式估算 N_2O 排放量一期作為 0.77 kg/ha，二期作為 0.57 kg/ha（表 13）。由表 13 得知，IPCC 估算之 N_2O 排放量比實際量測的數據低。

N_2O 排放量與施氮量有關，本文以每期 126 kg/ha 計算旱田 N_2O 排放量，為了與國內研究（Yang *et al.*, (2003)，楊盛行等，2003）進行比較，本研究以旱作固氮作物，施肥約 50 kg-N/ha，旱作非固氮作物，施肥約 200 kg-N/ha，代入 N_2O 直接排放公式計算，分別得到 1.88 與 3.71 kg/ha，皆比實際量測到的數據低。

由表 12 與表 13 得知，不同的氣候、土壤類型、作物生長期與量測方式對 GHG 的排放量會有顯著的影響。本土排放係數須再進一步確認。

四、結論

根據本文之估算結果如表 11、表 14 以及表 15 所示，以飼養 2,000 頭豬隻規模之豬舍，每天產生 50 Mg 廢水，施肥 6 分地為例，種植形態為水田，則養豬廢水農地再利用約產生 5,814 kg CO_2 當量，而三段式廢水處理約產生 6,539 kg CO_2 當量，前者為後者之 88.9 %。種植形態為旱田，則養豬廢水農地再利用約產生 2,188 kg CO_2 當量，而三段式廢水處理約產生 2,780 kg CO_2 當量，前者為後者之 78.7%。顯示不論施用於旱田或水田，養豬廢水農地再利用之溫室氣體排放量皆低於三段式廢水處理。

由本文可知，最大的溫室氣體排放過程發生在施肥後農地產生之溫室氣體，其中以施用養豬廢水之水田的 CH_4 排放量最高，若是改以旱田，則可以有效改善此情況。

養豬廢水農地再利用中，儲存過程產生之 CH_4 量僅次於施肥後農地產生之 CH_4 量，在水田約佔全部溫室氣體排放量的 23%，在旱田則為 61%。三段式廢水處理過程中，厭氣處理過程之溫室氣體排放量約佔處理過程產生之溫室氣體量的 64.7%，因此若能收集 CH_4 再利用，將可大幅減少溫室氣體排放量。

參考文獻

- 行政院農業委員會。2009。農業統計年報。
- 行政院農業委員會農業試驗所。2010。臺灣土壤肥力資訊系統。
- 行政院農業委員會農業試驗所。2010。歷年新型農機性能測定報告。
- 林俊雄。2004 年 10 月。黑黝黝的液體黃金石油提煉。科學發展，382 期：24-29。
- 洪肇嘉。2009。我國農業部門畜產業溫室氣體排放統計方法情境分析及管理策略研究。科技計畫研究報告。農委會計畫編號：98 農科-7.2.1-牧-U1(3)。
- 曾世廷。2009。水稻田碳通量觀測：隨意渦流累積法、flux-variance 之可行性研究。碩士論文。中興大學環境工程學系所，臺中。

- 楊盛行、賴朝明、陳文雄、李春芳。2003。水田及早田甲烷減量對策及對環境永續發展之影響評估。國立臺灣大學農業化學系暨研究所，臺北。
- 經濟部能源局。2009。燃料燃燒及電力使用之二氧化碳排放係數。
- 趙子明。2007。煉油廠CO₂排放現狀及回收應用分析。安全、健康和環境，2007（7）：29~30。
- 趙震慶。1999。畜產廢棄物堆積及施用之氧化亞氮釋出及減量對策。溫室氣體通量測定及減量對策（I）（楊盛行編），pp.128-146。國立臺灣大學農業化學系和國立臺灣大學全球變遷中心，台北，臺灣。
- 譚鎮中、王銀波。2000。畜產廢棄物堆積及施用之甲烷釋放及減量對策。溫室氣體通量測定及減量對策（II）（楊盛行編），pp.95-109。國立臺灣大學全球變遷中心、國立臺灣大學農業化學系和國立臺灣大學農業陳列館，台北，臺灣。
- Bouwnan, A.F. 1991. Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emission. *Biochemistry* 15:65-88.
- Cakir, F.Y. and M.K. Stenstrom. 2005. Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology, *Wat. Res.*, 39(17) : 4197-4203.
- Cheng, Y. F., C. M. Hong, C. H. Hsieh, M. T. Koh, S. Y. Leu, T. W. Lin and S. Y. Sheen. 1996. Research and counselling on livestock waste treatment of Taiwan Livestock Research Institute. Dept. Livestock Management, Taiwan Livestock Research Institute.
- EPA. 1999. U.S. Methane emissions 1990-2020: Inventories, projections, and opportunities for reductions, U.S. EPA office of Air and Radiation; Washington DC.
- Hou, J., Y. Xie, F. Wang and R. Dong. 2006. Greenhouse gas emissions from livestock waste: China evaluation, *Int Congress Ser* 1293 : 29-32.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 1995. IPCC Second Assessment Report. Climate Change 1995 : Synthesis Report.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2001. IPCC Third Assessment Report. Climate Change 2001: Synthesis Report.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2006a. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2006b. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5. Waste.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2007. IPCC Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Synthesis Report.
- Kongshaug, G. 1998. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer

- production. 18pp. IFA Technical Conference, Marrakech, Morocco, 28 September-1 October.
- Su, J.J., B.Y. Liu, and Y.C. Chang. 2003. Emission of greenhouse gas from livestock waste and wastewater treatment in Taiwan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95: 253-263
- Kuo-Hsin Tseng, Jeng-Lin Tsai, Arumugam Alagesan, Ben-Jei Tsuang,, Ming-Hwi Yao, Pei-Hsuan Kuo. 2010. Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in Taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 150 : 852–859.
- Yang, S. S., Liu, C. M., Lai, C. M. and Liu, Y. L. 2003. Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990-2000 in Taiwan. *Chemosphere* 52 : 1295-1305.

表 1、不同肥料內成分

肥料種類	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
養豬廢水	0.15	0.07	0.04
化肥(台肥 5 號)	16	8	12
豬糞堆肥	2	1.62	0.53

表 2、每分地施肥量

肥料種類	施肥量	N (kg)	P ₂ O ₅ (kg)	K ₂ O (kg)
(1) 養豬廢水	8.4 ton/0.1ha	12.6	5.9	3.4
(2) 化肥*	73.6 kg/0.1ha	11.8	5.9	8.8
(2) 豬糞堆肥	41.7kg/0.1ha	0.8	0.68	0.22

化肥：台肥 5 號

表 3、土壤 N₂O 間接排放之排放、揮發和溶淋因子的預設值

因子	預設值	不確定性範圍
EF ₄ [N 揮發和再沉降]，kg N ₂ O-N/ (kg NH ₃ -N+揮發 NO _x -N) ²²	0.01	0.002-0.05
EF ₅ [溶淋/徑流]，kg N ₂ O - N/(kg 溶淋/徑流 N) ²³	0.0075	0.0005-0.025
Frac _{GASF} [化肥揮發]，(kg NH ₃ - N + NO _x - N)/(kg 施用 N)	0.1	0.03-0.3
Frac _{GASM} [所有施用有機氮肥中的揮發，和放牧牲畜排泄的尿液和糞便]，(kg NH ₃ - N + NO _x - N)/(kg 施用或排泄 N)	0.2	0.05-0.5
Frac _{LEACH-(H)} [Σ(雨季的降雨) - Σ(相同時期中的 PE) > 土壤持水能力，或者進行灌溉 (除了滴灌) 的地區，通過溶淋/徑流的氮損失], kg N/(kg 施 N 或 放牧牲畜排泄氮)	0.3	0.1-0.8

(資料來源：IPCC，2006a)

表 4、原油分餾餾分表

餾分	沸點範圍 (°C)	相當碳數	體積 (%)
氣體	-164~30	C ₁ ~C ₅	1~4
汽油	30~210	C ₅ ~C ₁₂	13~25
煤油	175~280	C ₁₁ ~C ₁₆	9~13
柴油	235~350	C ₁₅ ~C ₂₀	13~23
蒸餘油 (燃料油)	350	C ₂₀ +	43~64

(資料來源：林，2004)

表 5、管理土壤中 N₂O 直接排放的排放因子之預設值(Default value)

排放因子	預設值	不確定性範圍
EF ₁ ：礦肥施氮、有機添加物和作物殘餘物以及土壤碳損失引起的礦質土壤中氮礦化的排放因子 (kg N ₂ O-N/kg N)	0.01	0.003-0.03
EF _{1FR} ：灌水稻田的排放因子 (kg N ₂ O-N/kg N)	0.003	0.000-0.006
EF _{2CG,Temp} ：溫帶有機作物和草地土壤的排放因子 (kg N ₂ O-N/ha)	8	2-24
EF _{2CG,Trop} ：熱帶有機作物和草地土壤的排放因子 (kg N ₂ O-N/ha)	16	5-48
EF _{2F,Temp,Org,R} ：溫帶和北溫帶富營養有機森林土壤的排放因子 (kg N ₂ O-N/ ha)	0.6	0.16-2.4
EF _{2F,Temp,Org,P} ：溫帶和北溫帶貧營養有機森林土壤的排放因子 (kg N ₂ O-N/ ha)	0.1	0.02-0.3
EF _{2F,Temp} ：熱帶有機森林土壤的排放因子 (kg N ₂ O-N/公頃)	8	0-24
EF _{2PRP, CPP} ：家牛(奶牛、非奶牛和水牛)，家禽和豬的排放因子 (kg N ₂ O-N/kg N)	0.02	0.007-0.06
EF _{3PRP,SO} ：綿羊和其它牲畜的排放因子 (kg N ₂ O-N/kg N)	0.01	0.003-0.03

(資料來源：IPCC，2006a)

表 6、連續灌水稻田種植期中水分狀況的 CH₄ 排放換算係數預設值

水分狀況	總體情況		分類情況	
	換算係數 (SF _W)	誤差範圍	換算係數 (SF _W)	誤差範圍
旱地 (a)	0	-	0	-
灌溉 (b)				
連續性灌水			1	0.79-1.26
間歇性灌水-單次曬乾	0.78	0.62-0.98	0.6	0.46-0.80
間歇性灌水-多次曬乾			0.52	0.41-0.66
深水 (c)				
常規			0.28	0.21-0.37
易旱	0.27	0.21-0.34	0.25	0.18-0.36
深水			0.31	ND

ND：沒有確定

(a) 多數時期從不灌水的田地

(b) 多數時期都進行灌水並且充分控制水分狀況的田地

連續性灌水：在整個水稻生長季節都含水，並僅可能在收穫時乾透的田地（一季結束時進行排水）。

間歇性灌水：在種植季節裡，田地至少有一次大於三天的曬乾期。

單次曬乾：在種植季節的任何生長階段，田地有一次曬乾（除了季節末的排水之外）。

多次曬乾：在種植季節中，田地有多次曬乾（除了季節末的排水之外）。

(c) 多數時期田地都進行灌水。並且水分狀況僅取決於降雨量。

常規：雨季在種植季節裡，水面可能上升到 50mm。

易旱：乾旱期發生在每個種植季節中。

深水水稻：種植季節中，多數時期灌水面積超過 50mm。

（資料來源：IPCC，2006a）

表 7、種植期前水分狀況的 CH₄ 排放換算係數預設值

種植期前水分狀況	總體情況		分類情況	
	換算係數 (SF _P)	誤差範圍	換算係數 (SF _P)	誤差範圍
季前 180 天內不灌水			1	0.88-1.14
季前超過 180 天不灌水	1.22	1.07-1.40	0.68	0.58-0.80
季前灌水（多於 30 天）			1.9	1.65-2.18

1. 季前少於 30 天的灌水期，不考慮選擇 SF_P。

（資料來源：IPCC，2006a）

表 8、不同類型有機添加物的轉換係數預設值

有機添加物	轉換係數 (CFOA)	誤差範圍
種植前不久進行稻稈翻耕	1	0.97-1.04
種植前很久進行稻稈翻耕	0.29	0.20-0.40
堆肥	0.05	0.01-0.08
農場糞肥	0.14	0.07-0.20
綠肥	0.5	0.30-0.60

1. 稻稈翻耕指的是利用翻土性農機具將收割後稻稈翻入土中做有機堆肥用。
(資料來源：IPCC，2006a)

表 9、養豬廢水在三段式廢水處理之效率

	PH	BOD ₅		COD		SS	
		數據 (mg/L)	去除%	數據 (mg/L)	去除%	數據 (mg/L)	去除%
經固液分離後	7.23	1,570	-	4,010	-	2,550	-
經厭氣處理後	6.89	85	95	393	90	60	93
經喜氧處理後	7.60	42	51	182	54	20	67

1. 畜養規格：2,000 頭。

(資料來源：Cheng *et al.*, 1996)

表 10、95-98 用電的碳排量

類別	年度	CO ₂ 排放量 (kg/度)
電力使用	95 年度	0.64
	96 年度	0.64
	97 年度	0.64
	98 年度	0.62

(資料來源：經濟部能源局，2010)

表11、農地施肥後產生之溫室氣體

方式	GHG 項目	排放方式	GHG 排放量	CO ₂ 排放當量	總合	單位
養豬廢水農地再利用	N ₂ O	水田	直接	0.77	239	540 kg/ha/year
			間接	0.97	301	kg/ha/year
		旱田	直接	2.55	791	1,092 kg/ha/year
			間接	0.97	301	kg/ha/year
	CH ₄	水田		314	6594	6594 kg/ha/130day
		旱田		0	0	0 kg/ha/130day
施用化肥 (含堆肥)	N ₂ O	水田	直接	0.77	239	481 kg/ha/year
			間接	0.78	242	kg/ha/year
		旱田	直接	2.55	791	1,033 kg/ha/year
			間接	0.78	242	kg/ha/year
	CH ₄	水田		277	5817	5817 kg/ha/130day
		旱田		0	0	0 kg/ha/130day

表 12、田間 CH₄ 釋放量

實驗位置	方法	實驗期	甲烷平均通量	一期釋放量	CO ₂ 當量
			μg/m ² /s	kg/ha/130 day	kg/0.6 ha/130 day
印度	Chamber	整季	1.62	109	1373
中國	Chamber	整季	9.36	631	7951
日本	Chamber	整季	0.864	58.2	733
臺灣	Chamber	整季	3.042	205	2583
臺灣	REA	開花期	1		0
(TARI 82 號田)	F _{VAR} 法	整季	5	337	4246

(資料來源：Tseng *et al.*, 2010)

表 13、臺灣與 IPCC 的 CH₄ 與 N₂O 排放量測與估算

耕作型態/釋放量	甲烷釋放量		氧化亞氮釋放量	
	kg/ha		kg/ha	
	Taiwan ^{1,2,4}	IPCC ^{3,4}	Taiwan ^{1,2,4}	IPCC ^{3,4}
水稻(一期作)	55.49	314	2.71	0.77
水稻(二期作)	116	317	1.76	0.57
旱田-固氮	0.31	-	6.91~14.00	1.88
旱田-非固氮				3.71
綠肥	0.1	-	3.67	0.22

1. Yang *et al.*, (2003)

2. 楊盛行等，2003。

3. IPCC，2006a

4. 水稻一期作施肥 120 kg-N/ha，水稻二期作施肥 90 kg-N/ha，施作期分別為 136 天、124 天；旱作固氮施肥約 50 kg-N/ha，旱作非固氮約 200 kg-N/ha，旱作與綠肥施作期以 90 天計。

表 14、養豬廢水農地再利用與三段式廢水處理（含施用化肥）CO₂ 當量排放量

處理方式	過程	項目	排放之溫室 氣體	CO ₂ 當量 排放量	單位
養豬廢水農地再利用	儲存過程	儲存槽	CH ₄	1,334	kg/year
			N ₂ O	177	kg/year
	載運廢水	柴油煉製	CO ₂	5.9	kg/6L ¹
		柴油燃燒	CO ₂	15.6	kg/6L ¹
		小計		1,735	kg
	施肥後農 地產生	水田	CH ₄	3,957	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	324	kg/0.6ha/year ²
		旱田	CH ₄	0	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	655	kg/0.6ha/year ²
		合計（水田）		5,814	kg
		合計（旱田）		2,188	kg
三段式廢水處理 （含施用化肥）	廢水處理	厭氣處理	CH ₄	1,398	kg/50Mg/12~15day ³
			N ₂ O	74.4	kg/50Mg/12~15day ³
		好氣處理	CH ₄	0	kg/2day
			N ₂ O	146	kg/2day
		鼓風機用電量	CO ₂	149	kg/120 度/2day ⁴
			N ₂ O	164	kg/year
		堆肥化	CH ₄	0.24	kg/0.5Mg/60day ³
			N ₂ O	1.74	kg/0.5Mg/56day ³
	載運堆肥	柴油煉製	CO ₂	0.49	kg/0.5L ⁵
		柴油燃燒	CO ₂	1.3	kg/0.5L ⁵
	施肥	肥料生產	CO ₂	222	kg/0.6ha ²
		汽油煉製	CO ₂	0.73	kg/0.8L ⁶
		汽油燃燒	CO ₂	1.8	kg/0.8L ⁶
		小計		2,160	kg
	施肥後農 地產生	水田	CH ₄	3,490	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	289	kg/0.6ha/year ²
		旱田	CH ₄	0	kg/0.6ha/year ²
			N ₂ O	620	kg/0.6ha/year ²
		合計（水田）		5,939	kg
		合計（旱田）		2,780	kg

1. 農用施肥車耗油量 8km/L，每天施作距離 48km，故每天耗油量 6L。

2. 每日施肥 6 分地。

3. 畜養規模 2,000 頭豬的豬舍，每天產生 50Mg 養豬廢水，0.5Mg 的豬糞。

- 4.使用 2 台 3hp 鼓風機處理 2,000 頭豬產生的廢水，每天用電量 120 度，共 2 天。
- 5.貨車耗油量 8km/L，每天載運距離 2km，故每天耗油量 0.25L。
- 6.噴霧機耗油量 0.4L/hr，每日施肥 6 分地，每分地耗時 20min，故每天耗油量 0.8 L。

表 15、不同處理方式之二氧化碳當量排放

方式	施用於水田	施用於旱田
	kg	kg
養豬廢水農地再利用	5,814	2,188
三段式廢水處理 (含施用化肥)	6,539	2,780
比例	88.9%	78.7%