

水田甲烷排放監測較適取樣時間及量測方法初探¹

倪禮豐²、簡梓丞²、張琇妍^{3*}、嚴國恩⁴、李明霞⁴、
蔡昀珊⁵、黃浩銓⁵

摘要

目前國際上量測溫室氣體大多使用密閉罩法 (Closed chamber method)，此方法限制為採樣次數及採集樣品需送實驗室進行分析。然而溫室氣體排放量受氣溫及水分等環境因子影響，排放速率也並非呈現線性關係，故須釐清水田甲烷排放情形及建立較適採樣時間，提高量測數據具代表性。本篇研究透過密閉罩法搭配痕量氣體分析儀連續監測水田甲烷排放情形，探討水田甲烷排放方式、氣泡貢獻度及甲烷排放日變化量，並建立水田甲烷較適取樣時間及量測方法。結果指出，痕量氣體分析儀可實際驗證水田甲烷排放，水稻田內種植水稻區域與未種植區域甲烷排放通量相近，惟透過不同排放途徑而有不同排放情形。種植水稻區域甲烷主要透過水稻通氣組織排放至大氣，並具有穩定的排放通量；無種植水稻區域，約有 65% 的觀測數據顯示，氣泡排放對甲烷總量的貢獻度超過 50%，因氣泡逸散無規則，故不具穩定的甲烷排放通量。休耕水田甲烷排放方式大多以為甲烷氣泡為主，少部份為氣體擴散。而上午 9 點至 12 點為宜花地區水田甲烷排放較適取樣時間，並可透過轉換公式 (R^2 為 0.982) 將該時段的甲烷排放通量換算為日平均的甲烷排放通量，以增進碳排放計算之準確性。

關鍵字：水田、甲烷、氣泡、密閉罩法、溫室氣體量測

-
1. 農業部花蓮區農業改良場研究報告 320 號。
 2. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科助理研究員。
 3. 農業部農業試驗所農業化學組助理研究員。*通訊作者 hychang@tari.gov.tw
 4. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科研究助理。
 5. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科前研究助理。

前 言

因應全球暖化及氣候變遷，國際上為回復自然系統平衡，許多國家宣示推動淨零排放政策，未來各國將透過碳足跡來設立碳關稅，藉由貿易外交手段影響其他國家加強氣候治理強度，促使各國朝 2050 淨零排放邁進（陳琦玲，2022）。為順應國際趨勢，臺灣也宣示在 2050 年達到淨零排放，因此建立完善碳足跡及碳排放量之計算方法為當務之急。依據 IPCC 指南，溫室氣體排放計算方式為活動數據乘以碳排放係數，方法 1 (Tier1) 的排放係數採用 IPCC 建議值，方法 2 (Tier2) 的排放係數採用本土數值，方法 3 (Tier3) 的排放係數採用本土數值並設定情境模型及投入參數環境、經營管理方式等。

採用 Tier2 本土數值之排放係數較能符合溫室氣體真實排放情形，溫室氣體排放深受氣溫、雨量、土壤水分、土壤有機質、氮素之種類及含量等眾多環境因子影響 (Le Mer and Roger 2001, Brye *et al.*, 2013, Humphreys *et al.*, 2019)，因此須建立各項作物之本土排放係數，以提升我國碳排放計算之準確性。2024 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告指出，2022 年農業部門溫室氣體排放源占比，水稻種植即占 18.13%。國內各地氣候、土壤、肥料和農業操作各區域有所差異，因此甲烷排放亦隨各地特性而有空間變異，故水稻種植之甲烷排放計算，將依地理特性分為八個區域，採用各區域本土排放係數進行估算。然而，隨氣候變遷影響氣溫、雨量等環境因子，及農民栽培制度改變，如宜蘭地區因氣候條件目前已無栽培二期稻作及推行合理化施肥等，故須更新水稻本土排放係數，以提升碳排放計算之準確性，因此建立溫室氣體標準量測方法極為重要。

目前國際上量測溫室氣體大多使用密閉罩法 (closed chamber method)，因其初始設置費用便宜且在田間易於操作，因此廣泛運用在溫室氣體排放之測定。但此方法最大的缺點為受採樣次數限制及採集之樣品需再送實驗室進行分析。然而溫室氣體排放量受氣溫及水分等環境因子影響，排放速率也並非呈現線性關係，故須建立較適採樣時間，以使量測數據具代表性。雖然已有文獻指出，於上午 9 點至 12 點取樣，該時段之氧化亞氮排放量與日平均排放量具有最佳之相關性 (Reeves and Wang 2015)，但各地之氣溫及雨量等氣候條件皆不相同，因此仍需建立本土地區最佳採樣時間。

此外，文獻指出水田甲烷可藉由水稻植株及甲烷氣泡方式排放 (Katayanagi *et al.*, 2012)，鑒於宜蘭慣行栽培模式為一期作水稻栽培、二期湛水休耕，因此需探討在有無水稻植株下，密閉罩法取樣時間長短對觀測到之甲烷排放量的影響，瞭解實際甲烷排放方式及排放量，以建立符合實際田間狀況之量測方法，使量測數據具代表性。

過去文獻測定溫室氣體多以密閉罩法搭配氣相層析儀 (Gas Chromatography) 進行分析，然而近年發展出的痕量氣體分析儀 (LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O Trace Gas Analyzer) 具有分析快速、可連續監測之優點，可計算更精確之溫室氣體排放通量。本篇研究透過痕量氣體分析儀連續監測水田甲烷排放情形，預期釐清 (1) 水田甲烷排放方式、(2) 氣泡貢獻度及 (3) 甲烷排放日變化量，以建立水田甲烷較適取樣時間及量測方法。

材料與方法

一、水田甲烷排放方式

(一) 試驗地點

本試驗於花蓮區農業改良場試驗田進行，為探討水稻田及湛水休耕水田之甲烷排放方式，本試驗選取兩塊試驗田進行試驗，一為栽培水稻之田區，並設置兩種量測處理：(1) 有水稻植株之處理 (2) 無水稻植株之處理；二為休耕湛水之田區。

(二) 甲烷量測

以密閉罩法進行甲烷測定。以長 60 cm、寬 40 cm 及高 120 cm 之透明壓克力箱分別罩住上述三種處理。為避免擾動土壤，壓克力箱分為上下兩層，下層長期安插於試驗田，欲測定時再將上層蓋上以形成密閉空間。以壓克力箱之進、出氣口連接痕量氣體分析儀 (LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O Trace Gas Analyzer)，如圖所示。每處理分別連續測定 30 min 以上。

痕量氣體分析儀以 OF-CEAS (Optical Feedback-Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy) 為測量技術，每秒可測得一筆數據，甲烷測定範圍為 0 至 100 ppm。

(三) 數據分析

分別以下列兩種方式計算甲烷通量。

1. 斜率法

將原始數據單位由濃度 ppb 轉換為 nmol m⁻²，轉換公式如式一所示：

$$X = (S \times V \times P) / [R \times (273 + T) \times 1000 \times A] \quad \text{式一}$$

X：單位面積下之甲烷氣體莫耳數 (nmol m⁻²)

S：溫室氣體濃度 (ppb)

V：壓克力箱體積 (mL)，須扣除水面下體積

P：標準大氣壓，1 (atm)

R：理想氣體常數，0.082 (atm L mol⁻¹ K⁻¹)

T：溫度 (°C)

1000：體積轉換常數 (mL L⁻¹)

A：壓克力箱面積 (m²)

原始數據經單位轉換後，再以 X (單位面積下之甲烷氣體莫耳數，nmol m⁻²) 對時間 (second) 作圖，其線性斜率即為甲烷排放通量 (nmol m⁻² s⁻¹)。

2. 始末濃度法

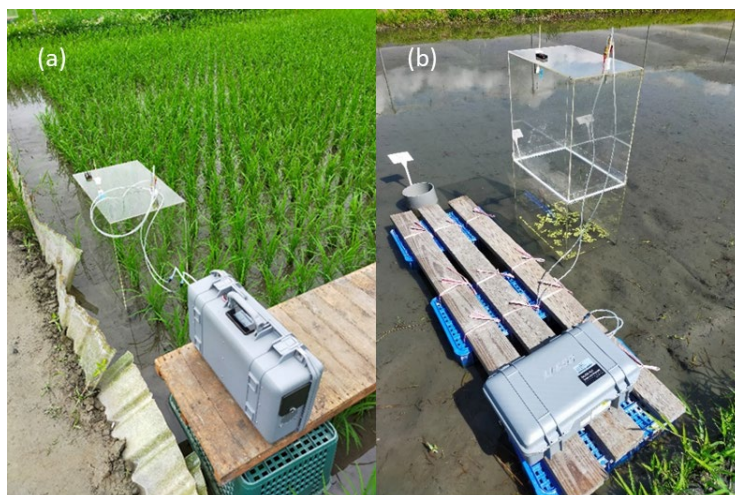
計算公式如下所示：

$$F = \frac{[(S_{t=initial} - S_{t=end}) \times V \times P] / [R \times (273 + T) \times 1000 \times A]}{t} \quad \text{式二}$$

F：甲烷排放通量 (nmol m⁻² s⁻¹)

S_{t=initial}：測量起始時間之溫室氣體濃度 (ppb)

- $S_{t=end}$ ：測量結束時間之溫室氣體濃度 (ppb)
 V：壓克力箱體積 (mL)
 P：標準大氣壓，1 (atm)
 R：理想氣體常數，0.082 (atm L mol⁻¹ K⁻¹)
 T：溫度(°C)
 1000：體積轉換常數 (mL L⁻¹)
 A：壓克力箱面積 (m²)
 t：壓克力罩收集氣體之時間 (second)



圖一、以透明壓克力箱連接痕量氣體分析儀分別量測水稻栽培田區 (a) 及休耕湛水田區 (b) 的甲烷排放
 Fig. 1. Methane emissions were measured using a chamber connected to a trace gas analyzer
 in (a) a rice cultivation field and (b) a fallow flooded field.

二、 甲烷氣泡貢獻度計算

(一) 試驗地點

於休耕湛水田區設置長期監測試驗，測量期間為 5 月 18 日至 7 月 11 日，共進行 16 日，每日測量 12 個監測點，共收集 186 筆數據。

(二) 甲烷量測

以密閉罩法 (closed chamber method) 進行測定，並連接痕量氣體分析儀 (LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O Trace Gas Analyzer) 分析甲烷濃度，每個監測點分別於第 0 min 及第 20 min 個別量測 2 min。

(三) 數據分析

1. 甲烷總排放通量，以始末濃度法 (詳式二) 計算。
2. 甲烷擴散通量，以斜率法計算 2 min 內未有濃度驟升及突波之平穩區段之通量，即定義為甲烷擴散通量。

3. 甲烷氣泡貢獻度

以下列公式計算甲烷氣泡貢獻度：

$$B = \left(1 - \frac{F_D}{F_T}\right) \times 100 \quad \text{式三}$$

B：甲烷氣泡貢獻度(%)

F_D ：甲烷擴散通量($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

F_T ：甲烷總排放通量($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

三、水田甲烷排放較適取樣時間

(一) 試驗地點

本試驗於花蓮區農業改良場栽培水稻的試驗田進行，測量時包含水稻植株。

(二) 取樣時間

於 111 年 3 月 8、15、24、29 日，4 月 19、28 日，5 月 12、19 日進行測定，當日 3、6、9、12、15、18、21、24 點進行甲烷量測，並記錄該時段之氣溫及土壤溫度。

(三) 甲烷量測：同二(二)節所述。

(四) 數據分析

以始末濃度法計算甲烷排放通量(式二)。以 3、6、9、12、15、18、21、24 點之甲烷通量對甲烷日平均通量進行相關性分析，以找出與甲烷日平均通量最具相關性之量測時段。

結果與討論

一、水田甲烷排放方式

(一) 水稻田甲烷排放方式

1. 涵蓋水稻植株之量測處理

圖二為涵蓋水稻植株量測之甲烷排放情形，以始末濃度法，得出甲烷通量為 $7.34 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ 。以斜率法計算，得出第 13 s 到第 250 s 區間的甲烷排放通量為 $18.8 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ ；於第 250 s 時甲烷濃度迅速上升，推測可能為偶發性之甲烷氣泡排放，使甲烷濃度急遽上升。以斜率法計算，得出第 280 s 至第 1,950 s 區間的甲烷排放通量為 $1.7 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ 。綜合以上結果可得知，在浸水田區有種植水稻植株之處理，其甲烷會透過植株的通氣組織釋放，而具有穩定之甲烷排放通量。許多文獻也指出，在厭氧之水稻田土壤，甲烷產生主要透過水稻通氣組織運輸至大氣 (Nouchi *et al.*, 1990, ButterbachBahl *et al.*, 1997)，佔全期甲烷排放 48-85% (Wassmann and Aulakh 2000)。而在有水稻植株之田區，不同水稻生育期下，以氣泡形式排放甲烷之比例不同，於水稻生長初期因施用有機質資材及水稻通氣組織尚未發育完全，使以氣泡形式排放甲烷之比例較高；生育晚期水稻根圈分泌有機物質，亦會增加氣泡產生及逸散 (Vandergon and Neue 1995, Watanabe and Kimura 1995, Wassmann *et al.*, 1996)。Tokida 等人指出，在幼穗形成期以氣泡形式排放甲烷之比例為 26-45%，抽穗期及穀粒充實期則佔 60-68% (Tokida *et al.*, 2013)。

上述過去文獻皆以收集甲烷氣體，再藉由氣相層析儀分析甲烷濃度之方式計算水稻田甲烷排放量及甲烷排放方式，本研究則藉由痕量氣體分析儀即時且連續監測甲烷濃度，以驗證水稻田之甲烷真實排放情形。

2. 無涵蓋水稻植株之量測處理

圖三為無涵蓋水稻植株量測之甲烷排放情形，於測量時間內觀測到約 5 個甲烷濃度迅速增加之突波（圖三 (a)），分別於第 72、165、325、569、1,402 s，推測突波為甲烷氣泡所致。以始末濃度法計算得出的甲烷通量為 $7.2 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ 。以斜率法計算平穩區段的甲烷排放通量（圖三 (b)），可得出該區間之甲烷排放通量趨近於零，故在無水稻植株之區域，甲烷釋出主要以甲烷氣泡為途徑，極少藉由擴散方式排放甲烷，故無穩定的甲烷排放速率。因此，若測定時間過短，其通量結果變異極大，無法代表實際甲烷釋放情形。於 30 min 內的觀測結果顯示，甲烷氣泡排放並無固定頻率。

由於氣泡對水稻田甲烷排放影響不容小覷，Huang 等人修正水田甲烷逸散模型，將甲烷氣泡計算納入模型中，使該模型更符合實際甲烷排放情形，並以模型預估，單期作以氣泡形式排放甲烷之比例占總甲烷逸散量 11%-27% (Huang *et al.*, 2004)。

有/無涵蓋水稻植株之量測處理的總甲烷通量相近，分別為 7.34 及 $7.2 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ ，在本研究顯示，有/無涵蓋水稻植株之量測，在量測 30 min 下不影響甲烷排放量，惟透過不同方式排放甲烷。Komiya 等人使用同位素進行分析，指出在有水稻植株之土壤，醋酸醱酵為主要之反應，而在行間土壤則以 H_2/CO_2 還原反應為主導，且由於水稻根系會泌氧，使有植株之土壤氧化還原電位高於行間土壤，而使其甲烷排放較低 (Komiya *et al.*, 2020)。然而，本研究中有/無涵蓋水稻植株之量測處理的甲烷排放相近，與上述文獻結果不同，推測為量測水稻不同生育期、不同水稻品種之泌氧能力或不同田區條件與氣候環境所致。

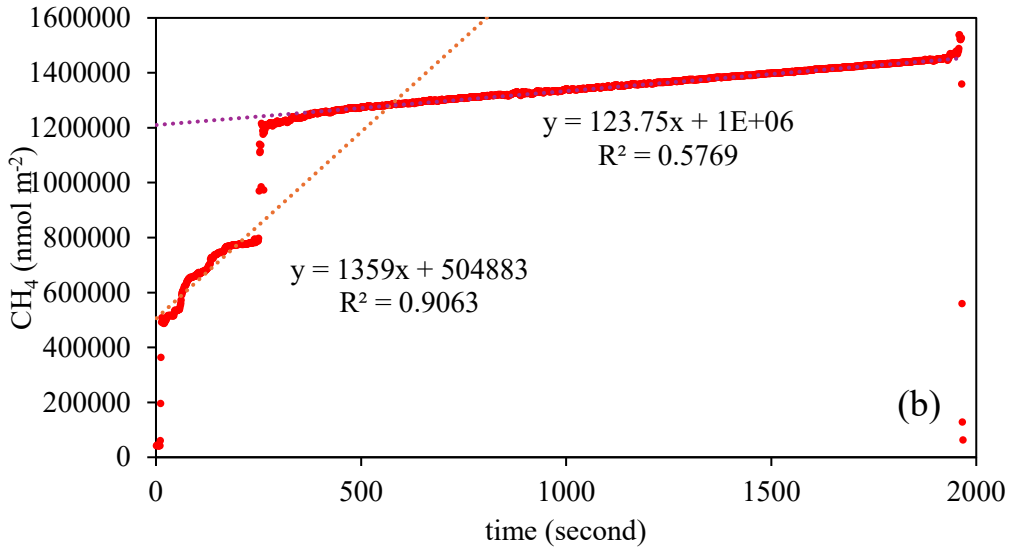
(二) 休耕水田甲烷排放方式

為探討宜蘭地區休耕湛水下的甲烷排放情形，須建立湛水田區甲烷量測之標準方法。圖四為休耕水田量測 30 min 之甲烷排放情形，休耕湛水田區與無水稻植株處理之結果相同，皆觀察到數個甲烷濃度迅速增加之突波。以始末濃度法計算得出之甲烷通量為 $0.74 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})$ 。將平穩區段之數據分別以斜率法計算，得出該區間之甲烷排放通量趨近於零，驗證在無水稻植株下，湛水田區甲烷排放方式皆以氣泡為主。

文獻指出，甲烷在水田土壤主要透過兩個方式由水體運輸至大氣，一為土壤及大氣間之擴散，二為氣泡逸散 (Schutz *et al.*, 1989)，藉由氣泡逸散之甲烷佔總甲烷日逸散量 95-96%，擴散則佔 3.7-4.7% (Komiya *et al.*, 2015)。因甲烷具低溶解度、無離子型態之特性及其擴散速率緩慢，使其通常藉由氣體形式存在於底泥，當超過底泥氣體儲存容量時，氣體會藉由形成氣泡離開底泥 (Liu *et al.*, 2016)，因此由水面逸散至大氣之氣泡，通常含有高濃度之甲烷，在水田土壤構成主要的甲烷匯池 (Tokida *et al.*, 2013)。底泥氣泡形成主要藉由毛細管作用且取決於土粒大小，微小氣泡（小於土粒大小）生成發生在粗質地底泥，而在細質地底泥則藉由伸縮變形生成較大氣泡 (Wheeler 1988)。甲烷氣泡逸散取決於大氣壓力、土壤溫度及水位高度 (FechnerLevy and Hemond 1996, Kellner *et al.*, 2006, Tokida *et al.*, 2007)，氣壓與氣泡之甲烷逸散量的對數具有顯著負線性相關，氣壓降低使氣泡體積擴大，因此增加氣泡浮力而造成氣泡上升至水面；土壤溫度及氣泡之甲烷逸散量的對數則具有顯著正相關，指出土壤溫度上升也會增加浮力及提高甲烷生成菌活性，造成甲烷逸散量增加 (Komiya *et al.*, 2015)。因此，由於氣壓降低及土溫增高，使白天之甲烷氣泡逸散較夜間高 (Komiya *et al.*, 2015)。Wu 等人也指出，河流之甲烷排放通量與水溫及可溶性有機碳具有相同趨勢，與可溶性氧具有相反趨勢，甲烷氣泡佔總排放量 44-58%，擴散佔總排放量 42-56% (Wu *et al.*, 2019)。

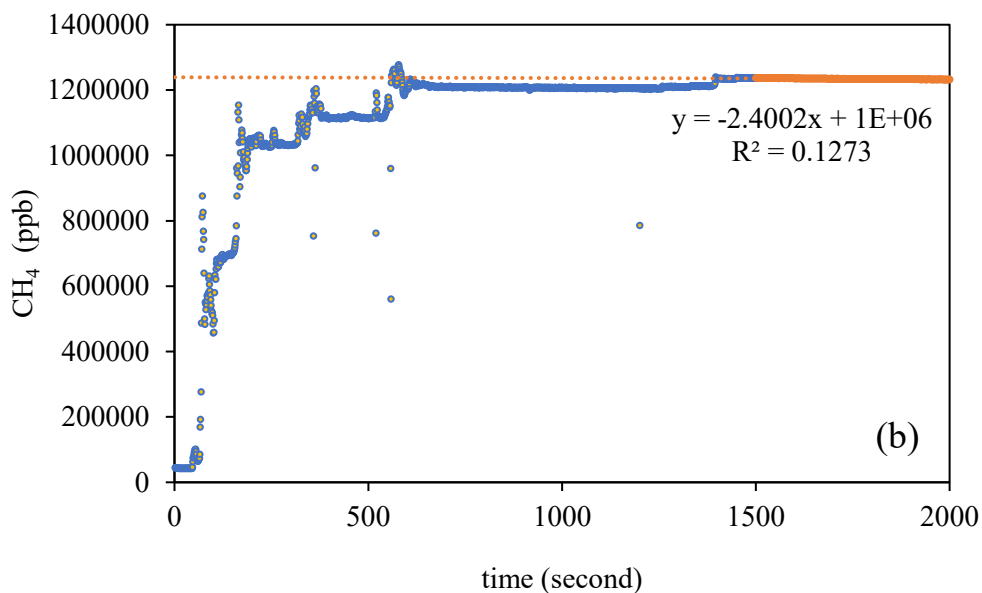
因此為探討得以反應實際甲烷釋放情形所需的密閉時間，本試驗於湛水休耕田區延長甲烷量測時間至 120 min（圖五），分別以第 2、5、10、15、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 min 下，以始末濃度法及斜率法計算的甲烷通量進行比較（圖六）。綜合以上結果可知，休耕湛水之水田因為沒有水稻植株，其甲烷排放並非呈穩定之線性關係，而

是藉由甲烷氣泡方式釋放，故第 2、5、10、15 min 測得之甲烷通量無法代表該監測點之實際甲烷通量，至少需監測 20 min 以上，才可使其量測數據具代表性（圖六）。

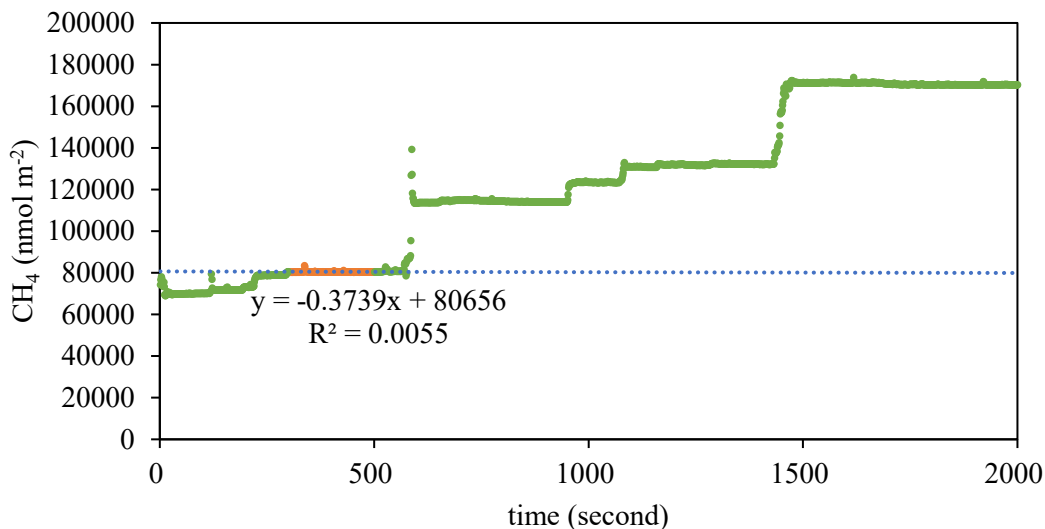


圖二、水稻田區有水稻區域隨時間變化之甲烷濃度，並以斜率法計算第 13 s 至第 250s 區間及第 280 s 至第 1,950 s 區間之甲烷通量

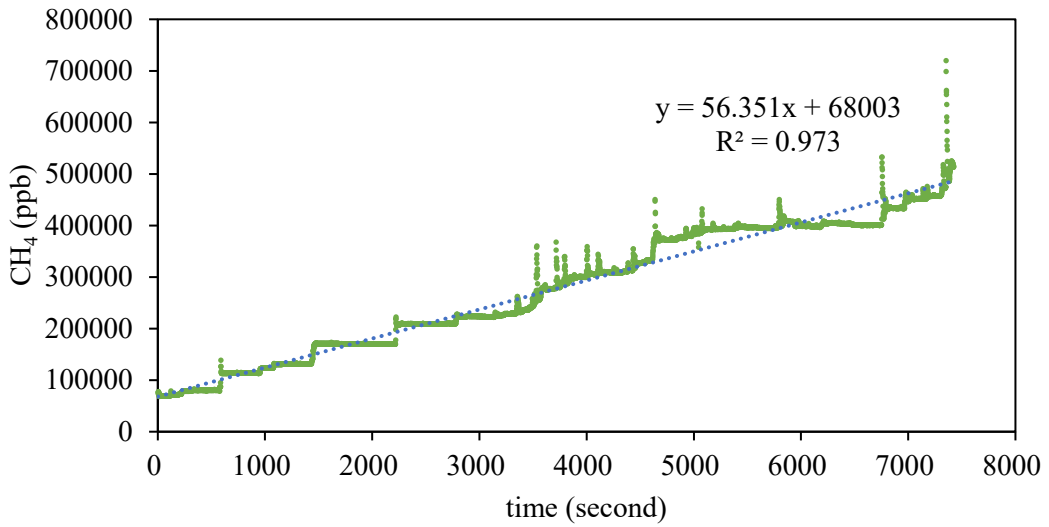
Fig. 2. Temporal variation of methane concentration in the rice-planted area of the paddy field, methane flux calculated using the slope method for the intervals from 13 to 250 seconds and from 280 to 1950 seconds.



圖三、水稻田區無水稻區域隨時間變化之甲烷濃度以斜率法計算第 1,500 s 至第 1,900 s 區間之甲烷通量
 Fig. 3. Temporal variation of methane concentration in the non-rice-planted area of the paddy field and methane flux calculated using the slope method for the interval from 1,500 to 1,900 seconds.

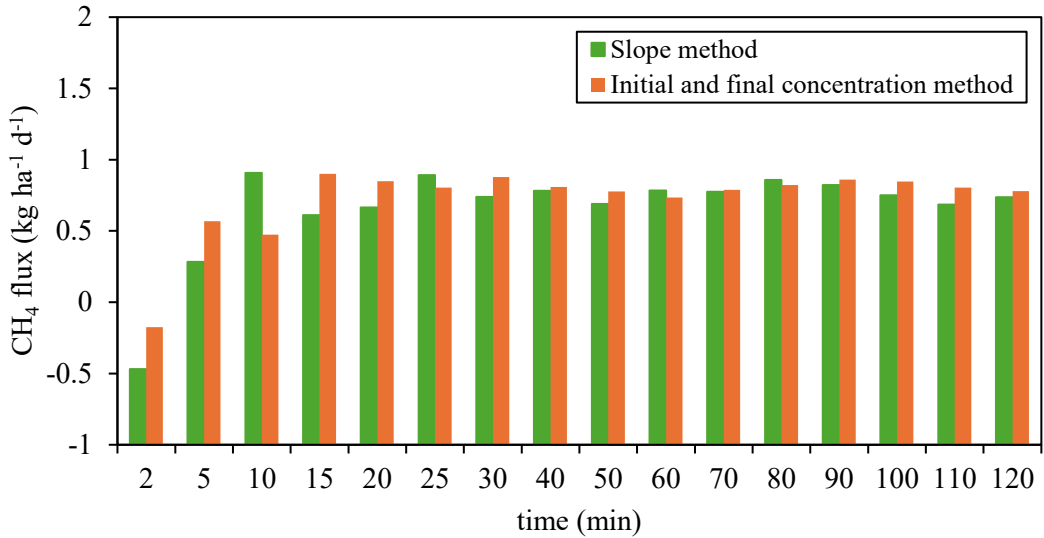


圖四、休耕湛水田區隨時間變化之甲烷濃度及以斜率法計算第 300s 至第 500s 區間之甲烷通量
 Fig. 4. Temporal variation of methane concentration in the fallow flooded field and methane flux calculated using the slope method for the interval from 300 to 500 seconds.



圖五、休耕湛水田區連續監測 120 min 隨時間變化之甲烷濃度

Fig. 5. Temporal variation of methane concentration over 120 minutes of continuous monitoring in the fallow flooded field.



圖六、比較不同量測時間內以始末濃度法及以斜率法計算的甲烷通量

Fig. 6. Comparison of methane fluxes calculated by the end-point concentration method and the slope method across different measurement durations.

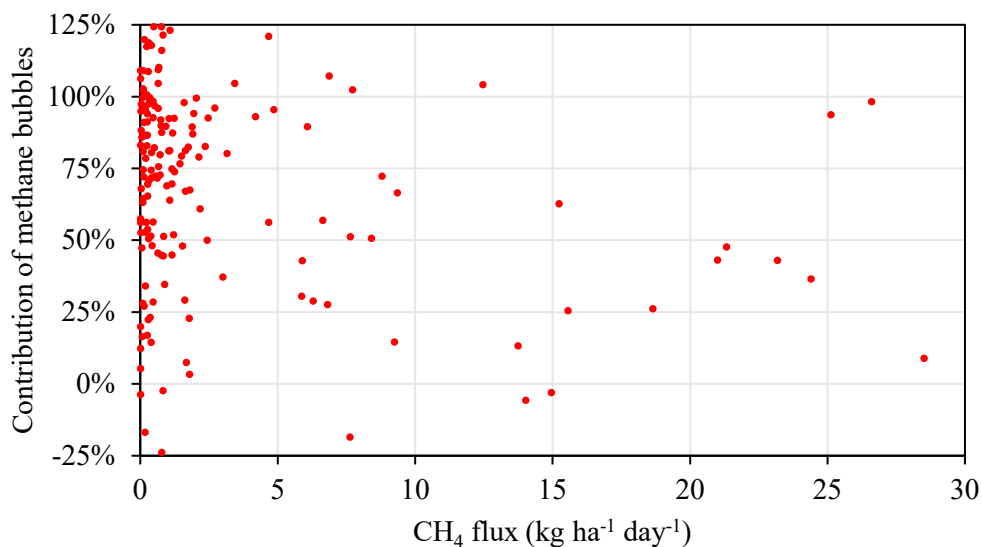
二、 甲烷氣泡貢獻度

在休耕湛水田區 186 筆數據中，甲烷氣泡貢獻度大於 50%者佔 65%（表一），顯示休耕水田甲烷排放通量大多經由甲烷氣泡途徑排放，而非以擴散途徑排放。為釐清甲烷氣泡貢獻度是否受甲烷通量影響，將甲烷通量與甲烷氣泡貢獻度作圖如圖七，可得知甲烷氣泡貢獻度與甲烷通量並無線性相關。

表一、在監測樣點中不同甲烷氣泡貢獻度所佔的比例

Table 1. Proportion of methane flux contribution from different methane bubbles at the monitoring sites.

Contribution of methane bubbles	Number	Proportion (%)
<0%	24	13
0~25%	15	8
25~50%	25	13
50~75%	38	20
75~100%	53	28
>100%	31	17
Total	186	100



圖七、不同甲烷通量下的甲烷氣泡貢獻度

Fig. 7. Contribution of methane bubbles to total methane flux under different flux levels.

三、 水田甲烷排放較適取樣時間

為釐清宜花地區較適取樣時間，本研究監測水田甲烷通量為期 8 週，各取樣時段收集 25 筆數據進行相關性分析。一天中各時段甲烷排放通量，與氣溫及土壤溫度具有相同之趨勢（圖八），且於中午 12 點具有最高之甲烷通量，顯示甲烷排放通量受氣溫及土壤溫度影響。以日平均分別與各時段之甲烷通量進行相關性分析（圖九），上午 9 點至 12 點的甲烷通量與甲烷日平均通量具有最佳之相關性（ R^2 為 0.982），該趨勢線方程式如式四所示。

$$Y=0.9677X-67.949 \quad \text{式四}$$

Y：甲烷日平均通量 ($\text{g ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)
 X：實際量測之甲烷通量 ($\text{g ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)

以上結果顯示上午 9 點至 12 點為宜花地區測量水田甲烷排放較適取樣時間，實際量測之甲烷通量經由式四可換算為甲烷日平均通量。圖九中 1:1 線代表實際量測之甲烷通量與甲烷日平均通量相同，其斜率為 1，因此當各時段之趨勢線斜率越趨近於 1 即表示該時段實際量測之甲烷通量越符合甲烷日平均通量。由圖九可得知，上午 9 點至 12 點取樣，其實際量測之甲烷通量亦最符合甲烷日平均通量。

圖八、一天中隨時間變化之甲烷通量、氣溫及土壤溫度

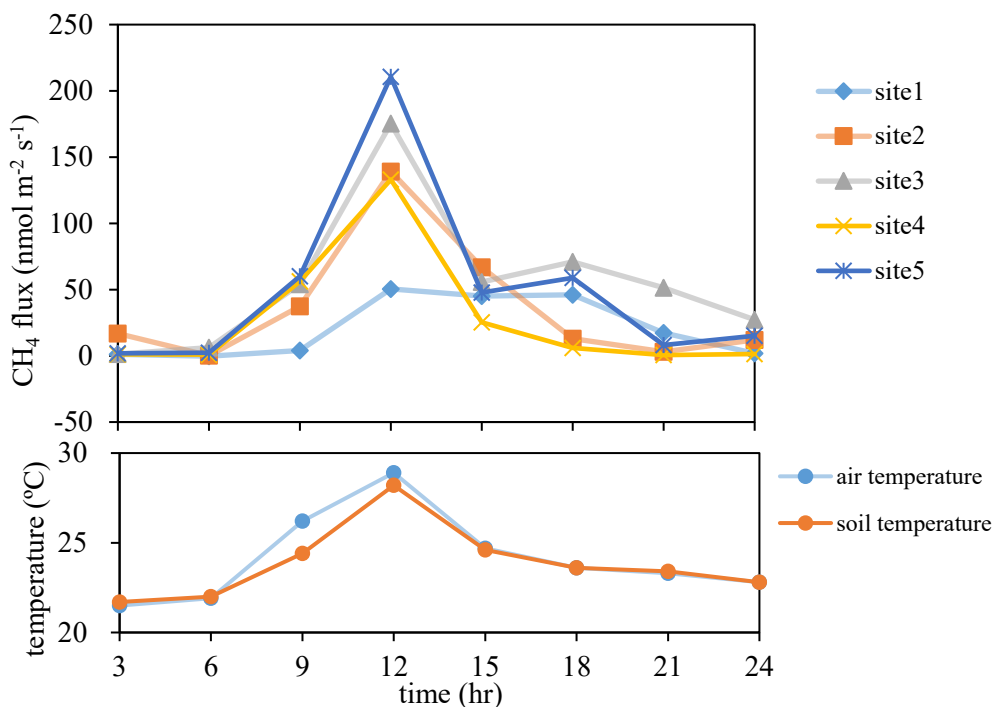
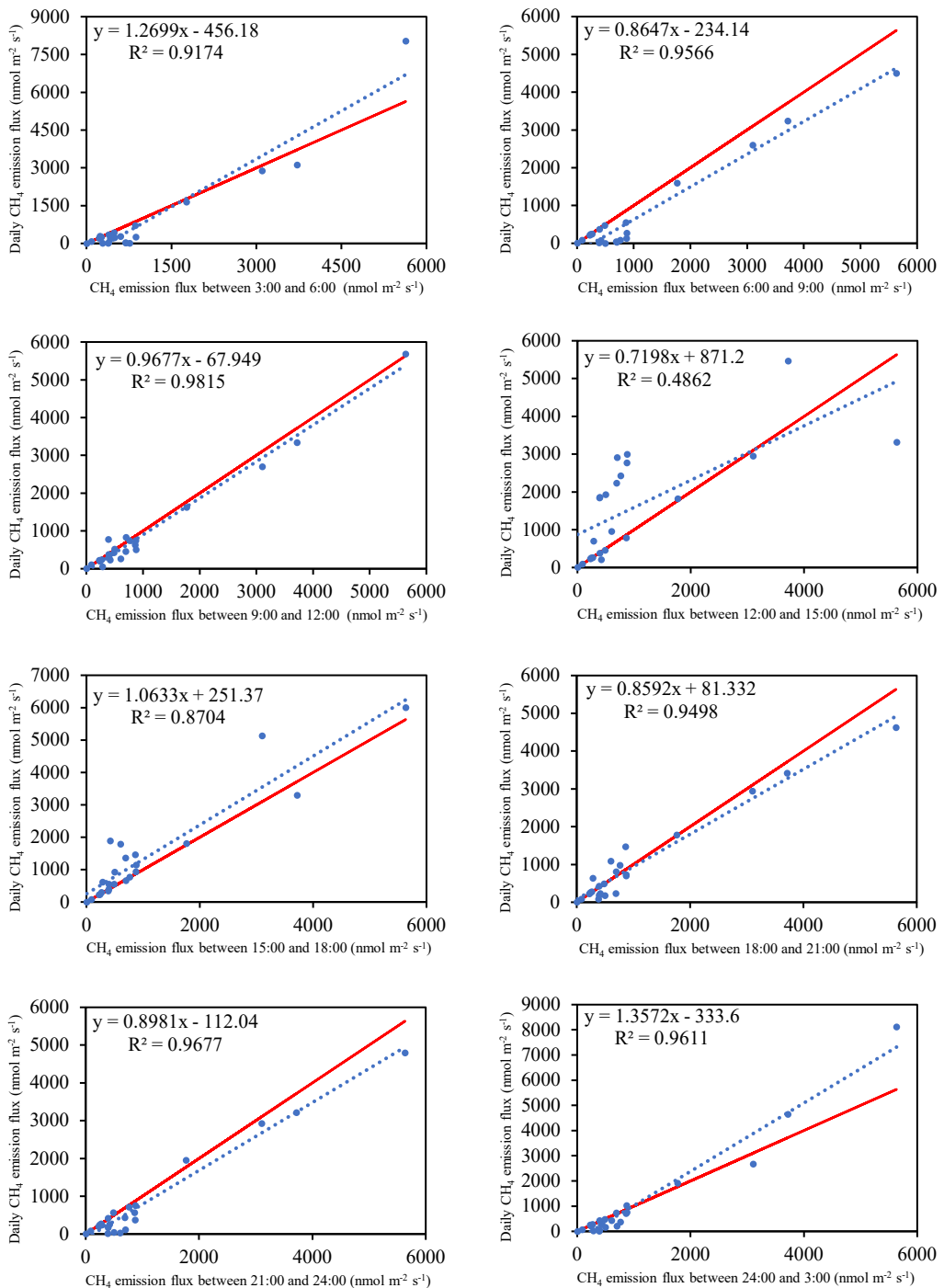


Fig. 8. Diurnal variation of methane flux, air temperature, and soil temperature.



圖九、甲烷全日平均通量與各時段甲烷通量之相關性分析（紅線為 1:1 線）

Fig. 9. Correlation analysis between daily average methane flux and methane flux at different time intervals.

(The red line represents the 1:1 line)

結 論

本篇研究透過密閉罩法搭配痕量氣體分析儀量測水田甲烷排放，以釐清水田甲烷排放情形、休耕水田氣泡貢獻度及建立宜花地區較適採樣時段。

水田甲烷排放情形部分，在種植水稻的水田中，是否種植水稻區域的甲烷排放通量相近，惟透過不同排放途徑而有不同排放情形：種植水稻區域其甲烷主要透過水稻通氣組織排放至大氣，並具有穩定的排放通量；無種植水稻區域其甲烷主要透過氣泡方式排放至大氣，而氣泡逸散無規則、不具穩定的甲烷排放通量，故需至少量測 20 min 以上，其取樣時間才符合實際排放通量。休耕水田氣泡貢獻度大於 50% 者占 65%，顯示休耕水田甲烷排放方式大多為以甲烷氣泡形式排放（表一）。藉由分析各時段甲烷排放通量與甲烷日平均通量的相關性，可得知上午 9 點至 12 點為宜花地區水田甲烷排放較適取樣時間，且該時段實際量測之甲烷通量也最符合甲烷日平均通量，實際量測之甲烷通量可經由線性回歸公式換算為甲烷日平均通量。

本篇研究以痕量氣體分析儀實際驗證水田甲烷排放情形，並找出宜花地區較適採樣時段及建立日平均通量轉換公式，且針對宜蘭地區休耕湛水田區提出具代表性的採樣時間長度，以利水田甲烷量測更符合實際排放情況，使水田甲烷量測有所依據，以精進碳排放計算之準確性。

致 謝

本研究承蒙國立東華大學自然資源與環境學系張世杰教授及賴正偉研究助理給予指導與協助。試驗期間承蒙本場杜前場長麗華、楊場長大吉、宣副場長大平、葉秘書育哲、邱研究員淑媛及陳分場長季呈之指導與指正，謹此申謝。

參考文獻

1. 陳琦玲 2022 碳足跡概念及計算說明 邁向農業淨零排放教育訓練工作坊 台北市：農業部。
2. Brye, K.R., C.W. Rogers, A.D. Smartt and R.J. Norman 2013 Soil texture effects on methane emissions from direct-seeded, delayed-flood rice production in Arkansas. *Soil Science* 178(10):519-529.
3. ButterbachBahl, K., H. Papen and H. Rennenberg 1997 Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields. *Plant Cell and Environment* 20(9):1,175-1,183.
4. FechnerLevy, E.J. and H.F. Hemond 1996 Trapped methane volume and potential effects on methane ebullition in a northern peatland. *Limnology and Oceanography* 41(7):1,375-1,383.
5. Huang, Y., W. Zhang, X.H. Zheng, J. Li and Y.Q. Yu 2004 Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 109(D8).
6. Humphreys, J., K.R. Brye, C. Rector and E.E. Gbur 2019 Methane emissions from rice across a soil organic matter gradient in Alfisols of Arkansas, USA. *Geoderma Regional* 16:e00200.
7. Katayanagi, N., Y. Furukawa, T. Fumoto and Y. Hosen 2012 Validation of the DNDC-Rice model by using CH₄ and N₂O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management. *Soil Science and Plant Nutrition* 58(3):360-372.
8. Kellner, E., A.J. Baird, M. Oosterwoud, K. Harrison and J.M. Waddington 2006 Effect of temperature and atmospheric pressure on methane (CH₄) ebullition from near-surface peats. *Geophysical Research Letters* 33(18).
9. Komiya, S., K. Noborio, K. Katano, T. Pakoktom, M. Siangliw and T. Toojinda 2015 Contribution of ebullition to methane and carbon dioxide emission from Water between plant rows in a tropical rice paddy field. *International Scholarly Research Notices* 2015: 623,901.
10. Komiya, S., T. Yazaki, F. Kondo, K. Katano, J.V. Lavric, I. McTaggart, T. Pakoktom, M. Siangliw, T. Toojinda and K. Noborio 2020 Stable carbon isotope studies of CH₄ dynamics via water and plant pathways in a tropical Thai Paddy: insights into diel CH₄ Transportation. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 125(9).
11. Le Mer, J. and P. Roger 2001 Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37(1):25-50.
12. Liu, L., J. Wilkinson, K. Koca, C. Buchmann and A. Lorke 2016 The role of sediment structure in gas bubble storage and release. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 121(7):1,992-2,005.
13. Nouchi, I., S. Mariko and K. Aoki 1990 Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiology* 94(1):59-66.
14. Reeves, S. and W.J. Wang 2015 Optimum sampling time and frequency for measuring N₂O emissions from a rain-fed cereal cropping system. *Science of the Total Environment* 530:219-226.
15. Schutz, H., W. Seiler and R. Conrad 1989 Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochemistry* 7(1):33-53.
16. Tokida, T., W.G. Cheng, M. Adachi, T. Matsunami, H. Nakamura, M. Okada and T. Hasegawa 2013 The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air CO₂ enrichment and soil warming experiments. *Plant and Soil* 364(1-2):131-143.
17. Tokida, T., T. Miyazaki, M. Mizoguchi, O. Nagata, F. Takakai, A. Kagemoto and R. Hatano 2007 Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland. *Global Biogeochemical Cycles* 21(2).
18. Vandergon, H. and H.U. Neue 1995 Influence of organic-matter incorporation on the methane emission from

- a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles* 9(1):11-22.
19. Wassmann, R. and M.S. Aulakh 2000 The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. *Biology and Fertility of Soils* 31(1):20-29.
 20. Wassmann, R., H.U. Neue, M.C.R. Alberto, R.S. Lantin, C. Bueno, D. Llenaresas, J.R.M. Arah, H. Papen, W. Seiler and H. Rennenberg 1996 Fluxes and pools of methane in wetland rice soils with varying organic inputs. *Environmental Monitoring and Assessment* 42(1-2):163-173.
 21. Watanabe, A. and M. Kimura 1995 Methane production and its fate in paddy fields .8. seasonal-variations in the amount of methane retained in soil. *Soil Science and Plant Nutrition* 41(2):225-233.
 22. Wheeler, S.J. 1988 A conceptual-model for soils containing large gas-bubbles. *Geotechnique* 38(3):389-397.
 23. Wu, S., S.Q. Li, Z.H. Zou, T. Hu, Z.Q. Hu, S.W. Liu and J.W. Zou 2019 High methane emissions largely attributed to ebullitive fluxes from a subtropical river draining a rice paddy watershed in China. *Environmental Science & Technology* 53(7):3,499-3,507.