

畜牧廢棄資源之循環利用技術與展望

文・圖／蘇忠楨

關於維護糧食安全（food security）主要有四個面向，包括：糧食種類與數量之供給性（food availability）、糧食可取得性（food access）、健康與安全的利用糧食（food safety）及糧食供應種類、數量、取得及利用之穩定性（food stability）。所謂糧食種類與數量之供給性，指的是使動物性與植物性糧食能充足供應個人的營養需求，面對全球環境氣候變遷與溫室效應衝擊，畜牧業除積極改良畜產動物品種，培育生產效率高之動物品種，減少蓄養數量並提升畜牧生產量之外，還可將所產生之有機廢棄物轉換為再生資源，如沼氣生產、生質柴油製作、微生物燃料電池應用、直接沼氣產生冷水或空調、直接燃燒沼氣產熱保溫及作為樹苗或是食用菇類介質等，為環境永續盡力。

畜牧沼氣生產技術

依農委會公告之2018年綠色國民所得帳「農業固體廢棄物歷年表」顯示，畜產廢棄物總量為2,362,121公噸，其中包括：禽畜糞2,255,423公噸、禽畜屠宰後廢棄物61,271公噸及死廢禽畜45,427公噸（<http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/common/Download.aspx>）。禽畜糞主要處理方式仍為耗時的傳統堆肥。其次是化製處理，主要為禽畜屠宰後廢棄物56,101公噸與死廢禽畜44,100公噸；接著是資源回收（禽畜糞6,000公噸）與焚燒掩埋處理（禽畜屠宰後廢棄物5,170公噸與死廢禽畜440公噸）。

動物糞便中含有有機物質，約每公斤揮發性固體的豬糞及牛糞約可產生356-148 L的甲烷氣體。牛糞的單位甲烷產生量遠低於豬糞，原因為牛糞含有較高的纖維木質素，而豬糞含有更多的蛋白質與脂肪量（Møller *et al.*, 2004）。

目前國內畜牧場普遍使用「濕式」厭氧消化系統，為慣行之畜舍清洗方式，係利用高壓噴水槍將糞尿一起沖入廢水溝渠再進行處理，所以廢水量高但固形物含量偏低

(Su and Chen, 2018)。由於全球氣候變遷，產業產生之碳足跡與水足跡都受到重視，本研究團隊完成國內生乳生產之水足跡研究，有效提醒政府相關部門重視水資源匱乏及對環境之衝擊 (Liao and Su, 2019)。針對畜牧場內含水率較低的有機廢棄物，本團隊成功研發出低廢水量的「固態厭氧消化系統 (Solid-state anaerobic digestion system, SSAD)」，可大幅減少廢水的產生，並回收利用「沼氣」資源。目前本團隊已開發出國內適用的技術平台，可應用於豬糞渣、牛糞渣及雞糞渣之資源化處理；並結合黑水虻 (Black soldier fly) 幼蟲之後續生物處理模式 (先生產沼氣，再進行黑水虻幼蟲之生物堆肥化)，在沼氣、飼料用蛋白質及生物有機肥之經濟誘因下，可達到有機廢棄物妥善處理及產物資源回收利用之目的 (Wee and Su, 2019)。

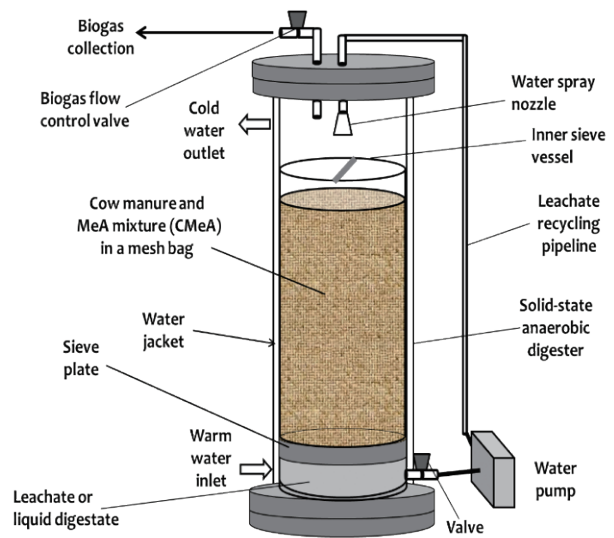


圖1：本研究團隊開發出的固態厭氧消化反應槽系統 (Wee and Su, 2019)

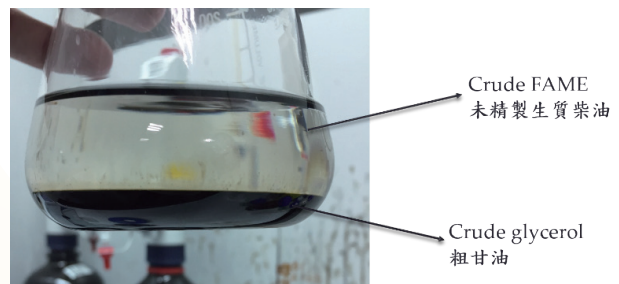


圖2：正己烷萃取後生質柴油與粗甘油外觀。

生物性污泥產製生質柴油與沼氣

隨著使用時間增加，屠宰場之廢水處理系統所產生之過剩生物污泥會沉積於槽底，進而影響處理廢水的效率。一般會抽出脫水形成污泥餅，但後續並無有效率的去化方法。污泥中含有一定比例的可溶性油脂及脂肪，亦含有以廢水有機質為能量來源的微生物，其細胞膜的主成分磷脂質及體內蓄積之聚羥基烷酯 (PHA) 可藉由轉脂化反應轉化為脂肪酸甲基脂，即生質柴油的主要成分。根據內政部營建署資料顯示，臺灣2013-2014年平均每天產出145噸，一年產生約52,800噸的污泥餅，約有64%以土地掩埋處置，16%用於材料化再利用，15%以燃燒焚毀。本研究團隊於2016年在55°C下進行污泥之酸催化轉酯化 (8%之硫酸或鹽酸) 程序，以甲醇與屠宰場污泥餅比25:1 (v/w)，進行經

乾燥與粉碎之轉脂化反應，其產物脂肪酸甲酯（FAME）之最高累積產率（w/w）分別為 $2.51 \pm 0.08\%$ 及 $2.27 \pm 0.09\%$ （Su and Chou, 2019）。污泥轉酯化過程之副產物（粗甘油）再與養牛廢水進行厭氧共消化以生產沼氣，試驗結果顯示添加4%粗甘油之養牛廢水厭氧消化試驗組，其最高沼氣產量為對照組之226%（Chou and Su, 2019）。污泥資源化的處理技術能提升產物附加價值，並使污泥得以妥善處理。

生物性污泥作為菇類培養介質

畜牧場厭氣槽內生物污泥（沼渣）需要定期抽除，以維持穩定的水力停留時間與處理後廢水水質。本研究團隊於2018年成功利用重力濃縮與重力除水方式，以現行普遍使用於樹木與花卉移植之不織布袋，進行畜牧場沼渣沼液重力濃縮除水試驗，將脫水後之沼渣與椰子纖維以不同比例混合，成為菇類培養介質，亦可應用於非食用類樹苗或花卉種植（蘇等，2018）。

秀珍菇種植試驗之介質以椰子纖維（長度2至6公分）添加30%（v/v）重力濃縮除水後之污泥，混合均勻後填入PP塑膠罐（有效容積360 mL），使用土壤感測器測定含水率60至65%後，再放入滅菌釜以121°C高溫高壓殺菌，進行無菌接種。放入培養箱以23°C無照光，使用自動水霧機維持在最適濕度65至70%，菌絲佈滿介質呈現白色即完成菌絲體走菌。再將培養箱溫度調整至25°C，濕度維持在最適濕度85至95%，成功種出秀珍菇（圖3）。



圖3：重力濃縮與除水後污泥與椰子纖維成功種出秀珍菇（蘇等，2018）

沼氣吸收式製冷與產熱應用

脫硫後之沼氣除應用於發電與直接燃燒鍋爐或保溫燈，還可以經提純程序成為生物天然氣（沼氣中甲烷濃度達到98%以上），又稱生質甲烷。本團隊利用臺大畜牧場沼氣作為吸收式冰櫃的燃料，成功將脫硫後沼氣直接燃燒製冷，惟國內尚無廠商生產吸收式製冷設備（圖4），故轉而尋求國內沼氣生物脫硫（Su *et al.*, 2013; 2014; 2015）或光觸媒脫硫技術設備（Su and Hong, 2020）。本團隊採用低壓中空纖維吸附模組，將沼氣中二氧化碳吸附

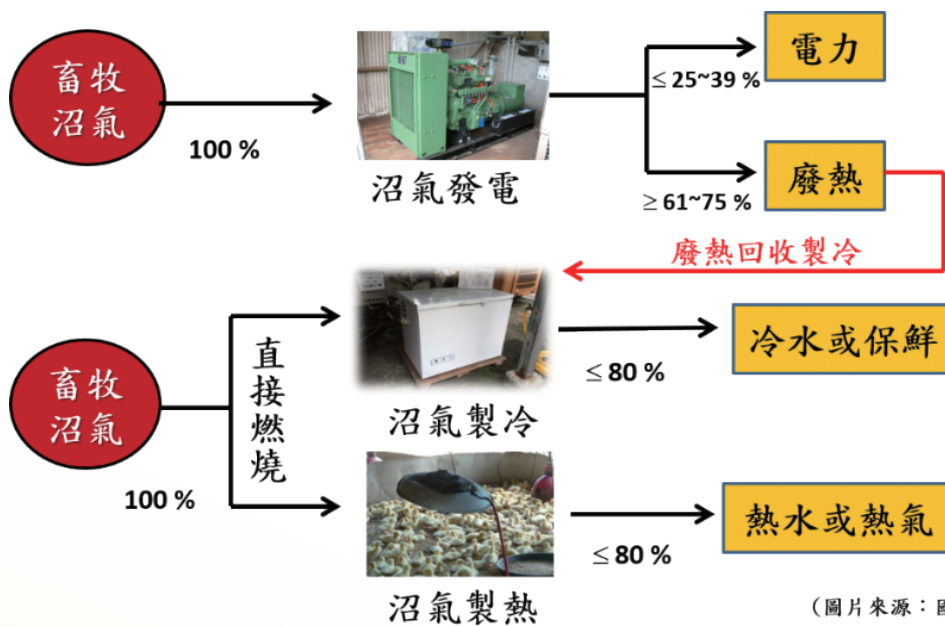


圖4：國內畜牧場沼氣之應用模式規劃

於材質內，透過高溫再生將二氧化碳回收，同時達到提純之目的，目前正積極進行試驗與經濟效益評估（蘇與鍾，2019）。

畜牧廢水燃料電池

微生物燃料電池（microbial fuel cell, MFC）係利用異營性微生物對有機質的降解與氧化在陽極槽（厭氧環境）內進行，理論上會產生二氧化碳與電子，電子進入微生物之電子傳遞鏈以產生ATP。而燃料電池係使用電極連結外電路，使所產生之電子循外電路通過以產生電流與電壓；有機質進行厭氧消化時也會同時產生質子，質子則經由質子交換膜或鹽橋與陰極槽（有氧環境）流通，當質子由陽極槽通過交換膜後，會與電子與氧氣結合後還原成水（圖5A）。一般典型MFC設計皆為橫式設計，一邊為陽極槽，另一邊為陰極槽，中間以質子交換膜或鹽橋分隔。

沉積物微生物燃料電池（sediment microbial fuel cell, SMFC）可以透過沉積於環境水體之底泥微生物將有機質氧化之電子，經由裝在環境水體表面與空氣接觸之外電路，以產生微電流，也可為水平式地面下人工濕地模式之SMFC（Xu *et al.*, 2015）。臺灣大學與臺灣科大研究團隊研究將SMFC應用於養豬廢水厭氧處理，結果顯示可去除約85%以上之有機質，也會產生沼氣與微電力（Su *et al.*, 2019; Huang and Su, 2019），所產生之微電力電壓與太陽光電相符，可啟動太陽光電模型車。其實廢水微生物燃料電池是一種沉積物燃料電

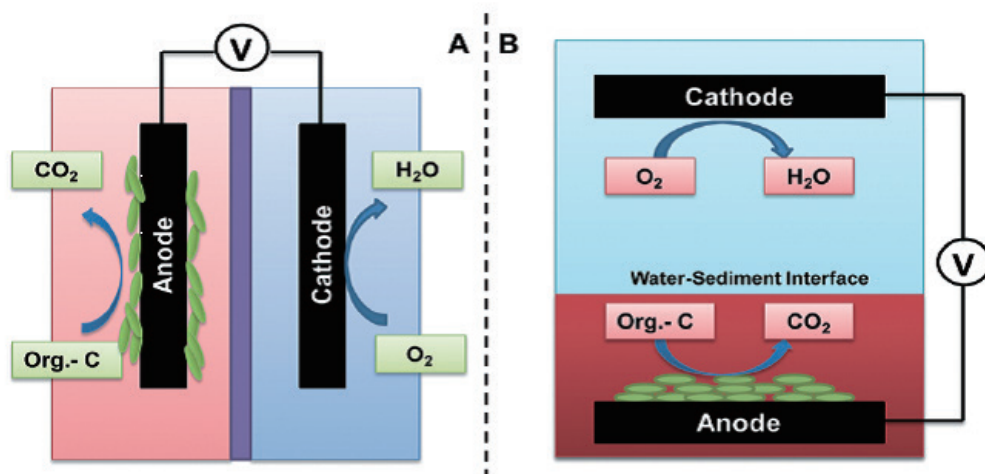


圖5：微生物燃料電池（A）與沉積物微生物燃料電池（B）比較（Xu et al., 2015）

池，陽極槽即為廢水厭氧消化槽，陰極槽為接觸空氣之液體槽體（圖5B）。

結語

畜牧業提供國人之動物性蛋白質來源，生產過程中所產生之有機廢棄物可以充當生產再生能源的原料，透過各種轉換技術將其轉變成沼氣、生質柴油及微生物燃料電池等，達到畜牧業循環經濟之目標，減少畜牧生產對環境之衝擊，使畜牧產業能在產業獲利、環保及永續經營達到三贏。（本期專題策畫／農化系李達源教授&生物能源中心周楚洋主任）

參考書目：

- [1]蘇忠楨、鍾昕承（2019）脫硫畜牧沼氣應用於產製生物天然氣之可行性研究。農委會108年度科技計畫研究報告[計畫編號108農科-17.2.1-牧-U3（4）]。
- [2]蘇忠楨、洪于雅、王佳興（2018）畜牧場沼渣沼液重力除水與再利用於菇類或樹苗種植之技術系統研發。農委會107年度科技計畫研究報告[計畫編號107農科-2.4.2-牧-U1]。
- [3]Su JJ and Hong YY（2020）Removal of hydrogen sulfide using a photocatalytic livestock biogas desulfurizer. *Renewable Energy* 149:181–188.
- [4]Su JJ and Chou YC（2019）Biodiesel production by acid methanolysis of slaughterhouse sludge cake. *Animals* 9: 1029（total 15 pages）.
- [5]Liao WT and Su JJ（2019）Evaluation of Water Scarcity Footprint for Taiwanese Dairy Farming. *Animals* 9: 956（total 14 pages）.
- [6]Chou YC and Su JJ（2019）Biogas production by anaerobic co-digestion of dairy wastewater with the crude glycerol from slaughterhouse sludge cake transesterification. *Animals* 9: 618（total 17 pages）.
- [7]Su JC, Tang SC, Su PJ and Su JJ（2019）Real time monitoring of micro-electricity generation through the voltage across a storage capacitor charged by a simple microbial fuel cell reactor with Fast Fourier Transform. *Energies* 13: 2610（total 15 pages）.

- [8]Wee CY and Su JJ (2019) Biofuel produced from solid-state anaerobic digestion of dairy cattle manure in coordination with black soldier fly larvae decomposition. *Energies* 12: 911 (total 19 pages) .
- [9]Su JJ and Chen YJ (2018) Monitoring of greenhouse gas emissions from farm-scale anaerobic piggery waste-water digesters. *Journal of Agricultural Science* 156 (6) : 739-747.
- [10]Su JJ and Chen YJ (2015) Monitoring of sulfur dioxide emission resulting from biogas utilization on commercial pig farms in Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 187 (1) : 4109 (total 8 pages) .
- [11]Su JJ, Chen YJ, and Chang YC (2014) A study of a pilot-scale biogas bio-filter system for utilization on pig farms. *Journal of Agricultural Science* 152 (2) : 217-224.
- [12]Su JJ, Chang YC, Chen YJ, Chang CK, and Lee SY (2013) Hydrogen sulfide removal from livestock biogas by a farm-scale bio-filter desulfurization system. *Water Science and Technology* 67 (6) : 1288-1293.
- [13]Huang YT and Su JJ (2019) Applied study of piggery wastewater treatment process in coordination with sediment microbial fuel cells (SMFC) . Communicate 2019: Green Biotechnology, Green Technology, and Environment Sustainability. *Proceedings of the 7th International Conference on Life Science and Biological Engineering*, Kyoto, Japan, p. 43.
- [14]Xu B, Ge Z, and He Z (2015) Sediment microbial fuel cells for wastewater treatment: challenges and opportunities. *Environmental Science Water Research & Technology* 1: 279–284.
- [15]Møller HB, Sommer SG, and Ahring BK (2004) . Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy* 26: 485-495.



蘇忠楨小檔案

現任動科系副教授，曾於 1994-2011 年服務於臺灣養豬科學研究所與臺灣動物科技研究所，從事畜牧污染防治與資源化技術研發及推廣逾 20 年，2003 與 2001 年分別榮獲中華農學會與中國畜牧學會學術獎。獨立研發之沼氣生物脫硫技術設施於 2010 年榮獲國家新創獎，有技術移轉及專利產出。2011 年 8 月轉任本校專任教職，於 108 與 105 學年度分別榮獲教師社會服務優良獎與校教學優良獎。於 2012 年協助輔導屏東縣大型養豬場建置沼氣發電相關設施，使其成為國內首座畜牧沼氣發電示範場域。2018 年協助自動化養豬廢水處理設施之設計規劃與建置，2019 年結合物聯網 (IoT) 技術，完成國內首座電腦控制自動化畜牧場廢水處理系統及水質遠端監測與紀錄系統建置，2020 年將完成智慧化養豬廢水處理遠端監控系統建置。