

新農業：糧食、能源、科技

文・圖／石家興

20世紀將近結束前，曾有許多關於農業的討論，如農業發展方向在哪裡？21世紀農業趨勢是什麼？雖然農業是歷史最悠久的產業，它的發展卻好像沒有跟上社會的腳步。當時，農業經濟學家曾提出四大趨勢：

第一，商業化（Commercialization）。農業將從勞力為主的小型農戶轉型為資本與技術為重（capital and technology intensive）的大型農業，越來越需要大規模的經營，才能降低糧食價格、滿足膨脹人口的需要；小型農業則被大型農企業整合為“一條龍”產業，在歐美稱之為垂直整合（vertical integration），經營者以成本、利潤、效率為考量，以養雞業為例：由飼料、種雞、飼養、屠宰、加工、上市、甚至到快餐，全部由一個公司完成，以降低成本，達到最高效率。農業既已商業化，就免不了造成公司與公司、地區與地區間的競爭，政府的保護勢微，企業影響增強。同時，家庭農業轉型為鄉村風格的休閒農業。

第二，國際化（Internationalization）。農產品不再是一個國家自己享受，全球市場和國際貿易越來越重要，如以色列的橘子行銷全歐洲，在臺灣能吃到各國的蘋果，臺灣蘭花也可能像電子產品一樣暢銷全球，甚至WTO、FTA及國內討論的ECFA都是熱門議題。地區性的共同市場（common market）將扮演重要角色，達到調和保護的目的，同時在市場、價格、技術發展方面，

大型跨國農企業將舉足輕重。

第三，重視科技（Science and Technology）。特別是生物科技（biotechnology）的發展已在醫藥界掀起革命，在農業界也將大展身手；基因轉殖（GMO）及非基因轉殖（non-GMO）產品爭論不休，但面對世界人口壓力、耕地面積減少，要解決糧食問題，不用GMO也難。科技發展出的智慧產權，如專利等，也像工業界一樣將刻意保護，知識性農業（knowledge-based agriculture）日受重視。

第四，環境保護（Environmental Protection）。由於大量開發農地，造成水土流失；濫用化學肥料、殺蟲劑及殺草劑，嚴重污染環境；大型養殖場對動物廢料處理不當污染空氣、土壤與水源。要解決上世紀所留下的問題，必須開發有利於環境（environmentally friendly）的經營新方式、新技術和新產品。

第五，21世紀開始不到10年，石油價格飆升和地球暖化，造成全世界的緊張和警惕，於是挹注龐大經費，開發非化石的清潔能源，以避免被石油綁架，並可降低排放二氧化碳。目前發展最快的有太陽能、風能、及生質能。生質能包括生質酒精（bioethanol）、生質柴油（biodiesel）和生質沼氣（biogas）。生質燃料的最大好處就是碳平衡，所有動植物體的碳元素皆來自於大氣中的二氧化碳，經光合作用而固定，經呼吸作用或燃燒後，再回歸大氣層循環。農業既有大量的

農畜廢料，又能生產能源作物，也只有農業系統才能大規模地生產、倉儲、運輸，來供應能源的需求量。要開發生質能源，沒有農業參與是無法成功的，因此，應該將能源生產（Energy Production）列為新世紀農業第五大趨勢。

沼氣能源

在無氧環境下，有機廢料經過水解變成小分子，透過小分子之間的分解轉換，最後由甲烷菌生成甲烷和二氧化碳的混和氣體，俗稱沼氣，沼氣含60~70%甲烷，是可燃燒的氣體能源。

30年前，我們在實驗室建立了小型沼氣瓶，有系統地進行試驗，為了找出由雞糞料生產沼氣的最佳條件，最後發現，在高溫（50~60℃）下，出氣率非常高，甚至在瓶內即可看見微細氣泡冒升，其出氣率是中溫（30~40℃）的3~4倍，常溫（10~20℃）的10~20倍。換句話說，同量的廢棄物，能用較小的消化槽進行反應而達到高產氣率；因此在工程上，消化槽的建造成本可以減少很多，而且較小的槽體，熱散失率亦較低。若用實驗室的結果來估算，100萬隻蛋雞的農場，其每日產生約100噸廢棄物，則每日可以產生12,000度電（kWh），一年約可產生400萬度的電。中國近日建造的超大型沼氣廠，位於北京德青源生態園區，利用300萬蛋雞的廢棄物發電，每年可產出1,400萬度電，與實驗室數據依比例量化後相當接近。

臺灣早期將紅泥塑料袋設在豬舍旁邊坑內，將豬糞料沖入袋內，自上方抽出沼氣，另一端流出反應後廢水，因為簡易，當年風行一時，只是常溫發酵，效率不高。在臺南的畜產試驗所，曾將一紅泥塑料袋裝置在車頂，充氣後一個袋子約

圖1：將一袋紅泥塑料裝在車頂，充氣後可跑7公里。



可跑7公里（圖1）。現在瑞典的公共汽車已使用生質沼氣作燃料，在中國的某城市正在建造大型沼氣廠，集中處理全市的垃圾、人畜糞料、食物廢料及汗水，產生的沼氣純化後，利用地下管道輸送至全市各處加氣站，供應所有汽車燃料；如果成功，這將是第一個城市清潔能源。

1981-1984年，我們曾建造一座高溫沼氣槽，又稱高溫厭氧消化器（thermophilic anaerobic digester, 簡稱 TAnD），連接一座雞房（有4千隻蛋雞、每日產生400公斤雞糞），設計為推塞式，也用紅泥塑膠袋，採高溫操作（圖2），目的在試



圖2：1981-1984年建造的高溫沼氣槽，經3年實驗，證實高溫沼氣可行。



圖3：沼液富含營養成分。



圖4：添加沼液的魚肥大很多。

探實驗室成果擴大的可行性，使用3年即達到與相近實驗室的結果，證實了高溫沼氣正確可行，也對以後建立更大型的發酵系統帶來信心。

農場上有了較大型的TAnD，便可研究其他副產品的利用，包括了沼液及沼渣。我們挖了兩個魚池，將吳郭魚苗放入魚籠飼養，將沼氣發酵後所產生的沼液導入其中一池，對照池不加沼液，由於沼液含豐富養分，池水碧綠，5月魚肥，不含沼液的對照池則是無藻、無草、魚苗細小（圖3&圖4）。將沼渣乾燥後分析其營養成分，含粗蛋白質（10%）及多種B群維生素，其中B12含量非常高，因為B12是甲烷菌的產物。氮、磷、鉀的成分分別占3、6及3%，是優良的肥料元素成分比。我們也試著在沼渣內加入飼料，替代磷源，結果小雞成長正常，沼渣不含毒性。

對於高溫沼氣槽內可能的微生物病原，我們也做了一系列的測試，包括大腸桿菌（coliforms）、真菌（fungi）、原生蟲（protozoa）與病毒（virus）的測試，發現高溫沼氣槽可滅絕所有測試過的病原；這對農場衛生、產品安全、工作人員，甚至消費大眾的健康都有莫大的助益。

整合型農業 （Holistic Farming）

天地之間，各類物質分解合成循環不息，是自然界的大循環。在農畜場上的各樣產物，包括廢物，如果都能充分利用，這種小循環便是整合型農業。我們發現，在高溫厭氧消化操作之下，效率高、環境衛生好，確實有整合的可行性。厭氧消化將廢棄物轉化為固態、液態及氣態三類產物，固體可以做為作物的肥料，液體可以養魚，而氣體便是沼氣能源，可發電並取熱（圖5）。

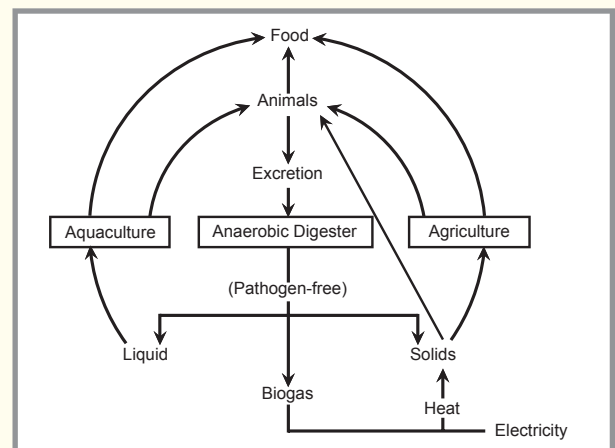


圖5：整合型農業。

■實例一：



1985年，在中國廣東第一次見識到整合型農業。一個農村70戶，養了700頭豬，豬糞尿沖入地下沼氣池進行常溫消化，所得沼氣通過鋼管傳輸至共用的大餐廳及廚房，村民在此用餐並取熱水，沼氣即全村的熱源，部分沼液進池塘養魚，而大部分沼液、沼渣作為全山柑橘園的灌溉及施肥。因為發酵效率低，沼氣池積甚大，地表面積有一個籃球場大。

■實例二：

1992年，我被邀請協助設計建造中國第一座大型高溫沼氣設備，地點在北京市留民營村，由聯合國UNDP資助，基本設計與北卡州大所建相



似，惟材料改用鋼筋水泥，糞料每天約5噸，來自5萬隻蛋雞，發酵槽僅100m³，約為一節火車廂長度，日產沼氣300m³，除硫後供給200百戶村民煮食、熱水、取暖；沼液供稻田灌溉施肥；沼渣乾燥後出售為有機肥。有機肥價格甚高，建造成本3年內回收，經過18年，現仍在使用中。

■實例三：

北京長城外德青源生態農業擁有一座大型養雞場，飼養蛋雞300萬隻，每日產生約250噸糞料，2008年建立了沼氣發電廠，轉化雞糞為電力及熱源，主要設備有4座沼氣發酵槽，每座3千立方米，雙層的球形儲氣設備，2台大型發電機，沼氣發電每年約1,400萬千瓦上輸電網，除供應養雞場外，也供給附近鄉鎮民生用電。發電共生熱水回收為沼氣發酵加熱；沼渣及沼液則用來灌溉葡萄園、蘋果園及蔬菜大棚，是筆者所見最大型的Holistic Farming。

綜合上述，可見厭氧消化是一種平台技術（platform technology），有多重功能：

1. 生產清潔的沼氣能源，沼氣來自動植物廢料，可燃燒取熱或發電以代替化石能源，產生的碳權（carbon credit）有經濟價值，可進入國際碳市場交易。



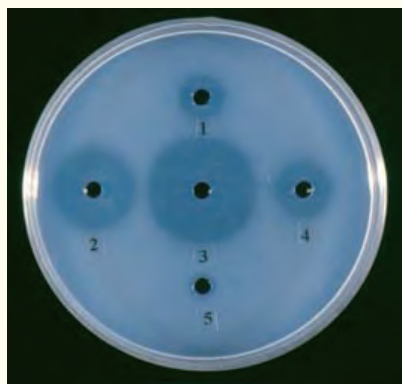


圖6：發現角蛋白酶，並利用近代遺傳工程技術，提高產量。

2. 除臭減廢、防治污染、優化環境。
3. 殺滅病菌病毒、改良環境衛生，有益公眾健康。
4. 沼渣沼液保留氮、磷、鉀元素，並富含有機養分，可開發為高價值肥料，也避免二次污染環境。

為了達到以上綜合功能，除了改進單項技術外，必須整合多種技術才能成功，包括改進工程設計以達到簡易高效；生物技術開發在改良菌種菌相，突破產氣上限；肥料工業合作，開發新型有機肥；水處理技術，有效循環利用沼液。最後還有意外的紅利，便是開發沼氣槽中全新的生物或生化產品。沼氣槽是一座微生物學大黑箱，微生物無數，寶藏也無數，仔細追究，必有所獲。以下試舉角蛋白酶為例說明，同時也作為新科技改進農業參考實例。

角蛋白酶（Keratinase）之發現

在農場操作厭氧消化時，發現羽毛在經過沼氣槽處理後即找不到蹤影，因為羽毛的結構類似毛髮、指甲，90%是角蛋白（keratin），結構堅密而難以分解，因此猜測槽內可能有細菌能夠分解羽毛角蛋白。花了2年時間，終於成功篩選

出一株細菌有能力消化並生長在羽毛上，將它定名為 *Bacillus licheniformis* PWD-1（圖6）。接著幾年，我們純化出分解酵素，稱為角蛋白酶；分離出它的基因，作DNA定序；並利用近代遺傳工程技術，提高酶產量。這一連串的探索贏得7項國際專利，近年其他研究室也發現了不少新的角蛋白酶。

角蛋白酶之應用

獲北卡生技中心資助，研究室裝設了一套150公升中型發酵設備，從此，可自行生產角蛋白酶，從數十毫克提升到數百公克，得以進行相關的應用研究。

第一項應用是利用酵素來處理羽毛，全世界每年大約可收集羽毛4~5百萬噸，是家禽業主要的副產品。羽毛在高壓蒸煮之後，經乾燥、磨碎為羽毛粉，可用做飼料添加物，補充蛋白質，但是消化率不高，營養價值不大，而利用角蛋白酶加工羽毛粉，便可提高消化率，增加營養價值。對角蛋白酶而言，是一個特有用途。

第二項應用是意外發現，當嘗試直接添加角蛋白酶於飼料當中，竟提高了小雞在動物室裡的生長效率，後來在農場上進行試驗，也得到同樣

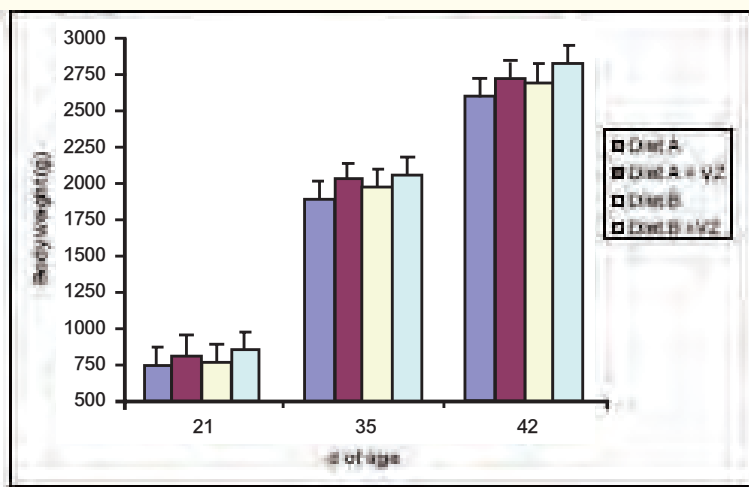


圖7：試驗證明角蛋白酶可替代部分飼料蛋白。

的效果。肉雞在農場飼養42日達上市年齡，利用高蛋白質含量及低蛋白質含量的飼料進行添加角蛋白酶，結果在低蛋白含量的飼料添加角蛋白酶的一組，雞隻可以成長得跟高蛋白飼料組相等，而高蛋白飼料添加酶則可增加更多的體重（圖7），對農戶而言，使用角蛋白酶可替代部分飼料蛋白，這代表非常可觀的利潤。

後來在大學農場、商用農場分別進行連續試驗，再次確定角蛋白酶能提高飼料消化率及蛋白質利用率，有助動物成長。目前，每一公噸的飼

料添加半公斤的酵素可節省10%的蛋白質；以大豆市場價格計算，每噸飼料可節省約20~30元美金，以全球3億噸飼料來估計，每年可節省60~90億美元。

為了開發角蛋白酶產業，個人與長子石全博士於2000年在美國共同創辦了BioResource International 生物科技公司，將該項技術朝向商業開發，經過10年努力，終於將當年實驗室的發現研發成為商業產品，工業化大量生產角蛋白酶，產品已進入全球市場，深受使用者歡迎。

結語：經驗與淺見

應用和基礎之間，應該是沒有界限的，從實驗室走向農場，到產業開發，從個人的經驗來看，這是一條基礎研究和應用研究互相交流的雙向道（two-way Street）。當初，如果自限於某個領域，如今，這條道路恐怕還在等待開發之中。

致謝： 本文緣起於2010年6月9日在中央研究院的演講，感謝中央大學黃雪莉教授，陳新同學代為錄音、打字、整理初稿。☺



石家興小檔案

1963年畢業於國立臺灣大學，1966年獲生化研究所碩士學位，在東海大學任教3年後，1969年獲康乃爾大學獎學金赴美進修，完成營養生化學博士學位。於伊利諾大學（U. Illinois）任博士後研究，1976年赴北卡羅來納州立大學（North Carolina State U.）家禽學系任教。現任北卡羅來納州立大學榮譽教授、中央研究院特聘講座教授、中央大學國鼎講座教授、BioResource International 創辦人暨董事長。鑽研生物科技於家畜業上的應用，首先開創高溫厭氧發酵，高效率轉化糞料為沼氣能源，並因此首先分離出分解羽毛的細菌菌種，純化角蛋白酶，可提高飼料中蛋白質消化率，降低飼料成本，近年更發現此一酵素可分解導致狂牛病的普昂蛋白（prion protein）。以前述研究成果獲9項世界專利。