糖的科學

張毓禎／嘉義市北興國小教師
林大陣／嘉義市大同國小教師

圖1：「糖」是超市內必備的商品，由左至右為白糖、紅糖、果糖。

「糖」是現代民生重要的調味品之一，而且各式各樣「糖」的種類和製品更是琳瑯滿目，例如：白糖、紅糖、果糖及糖葫蘆等(如圖1、2)。由台灣的文史資料中，可以遠溯及元朝時代，就曾經有『釀蔗漿爲酒』的記載，在十七世紀初荷蘭人統治台灣時，便開始獎勵種蔗製糖，直到日據時期，開始設置製糖株式會社並附設酒精製造廠。1970年代台灣的製糖業達到了最顛峰，爲國內賺取大量的外匯，1980年代台灣由農業社會邁進了工業社會，使得台灣製糖業不敷成本，只好轉而仰賴進口蔗糖。

一般市面所販售的白糖，就是學術上的「蔗糖」。但是，蔗糖並不一定要從甘蔗裏才能提製出來，世界各地由於緯度和氣候上的差異性，製造蔗糖的原料在熱帶和亞熱帶地區以甘蔗爲主，溫帶地區則是以耐乾燥和寒冷的甜菜（又稱爲糖蘿蔔）爲材料。甘蔗和甜菜所蘊藏的蔗糖是怎麼形成的？其實並不是只有甘蔗和甜菜才會產生蔗糖，只要是會進行光合作用的陸生植物均可以產生蔗糖，因爲植物進行光合作用時，葉片會吸收太陽光和二氧化碳並利用根部所吸收的水分，經過一連串的反應最後會產生葡萄糖和氧氣並合成水分，而且二份葡萄糖在酵

圖2：夜市常見的糖葫蘆。

圖 3：可供搾汁用的巴西蔗。

圖 4：可直接啃食的生食紅甘蔗。

素的協助下便可以合成一份蔗糖，有些植物還會將蔗糖再合成澱粉。甘蔗和甜菜所蘊藏的蔗糖量較一般植物高，而且較容易製作取得蔗糖，遂被選爲製糖原料。

台灣的氣候屬於亞熱帶季風區，全年高溫多雨，適合種植甘蔗，目前所生產的甘蔗主要有供搾汁用的巴西蔗(俗稱白甘蔗)、供直接啃食的生食紅甘蔗(俗稱紅甘蔗)及糖用甘蔗等三大類(如圖3~5)，巴西蔗的水分含量高、蔗糖的濃度低，生食紅甘蔗的纖維較少、糖分及水分適中，仍然不符合製糖成本。糖用甘蔗的蔗糖濃度高、水分含量較少，所以最適合製造蔗糖，由於本身纖維含量高不容易咬斷，不適合推廣用來直接啃食。在塑膠製品尚未量產以前，糖用甘蔗製糖剩下的蔗渣纖維是製造隔熱蔗板和造紙的主要原料，具有多方面的經濟價值，但是，目前都已經被低成本原料所取代了。

圖 5：可供製糖用的甘蔗。

甘蔗在植物的分類上屬禾本科單子葉草本植物，植物體主要是由根、莖、葉所組成，由於田間種

植大多採用扦插方式，所以甘蔗植株靠近土壤的莖，會長出許多不定根(如圖6)，莖則由節與節間及纖維化的外皮所組成，節所在的位置具有生長點可以長出側芽(如圖7)，除非是要育種，否則田間種植的甘蔗大多會去除側芽，以便減少養分的分散。節間則是由一群散生狀的維管束和具有貯存能力的薄壁細胞所組成(如圖8)。纖維化的外皮可以作爲支撐植物體之用。葉子則是由葉鞘和具有平行脈的葉片所組成(如圖9)，頂端葉鞘所包圍的正中心則是俗稱「甘蔗筍」的頂芽(如圖10)。以整棵甘蔗植株的總面積而言，葉子所佔的比例最高，依據科學家研究結果發現，甘蔗光合作用的效率相當高，甚至比熱帶雨林的平均光合作用能力還要高，對於空氣淨化的貢獻良多。

圖6：節間會長出許多不定根。

台灣的甘蔗種植則可以區分成秋植、春植和宿根等三種，至少須經一年至一年半的生長期後，才能夠加以採收利用，通常糖用甘蔗會選擇在每年十一月下旬進入少雨季節時採收，由於莖內水分減少使得蔗糖濃度升高可以減少製糖成本。

圖7：節所在的位置可以長出側芽。

由於甘蔗是我國農業社會重要的經濟作物之一，所以甘蔗的選種和育種遂成爲早期生物技術發展的重點工作。甘蔗育種家利用現有的甘蔗基因，進行植株間的雜交及回交，篩選出符合我們需要的品種，收集的種原越豐富，育種成功的機會就越大。國內的生食甘蔗以拔地拉（Badila）品系爲主，原產於新幾內亞，經農業研究機構的

圖 8：具有貯存能力的薄壁細胞

改良，目前則是以埔里種(如圖 4)和台中一號爲市場主流。至於糖用甘蔗則是改良後的品種，其血緣包含有新幾內亞的高貴蔗、細莖野生蔗、以及印度蔗，具多樣化的遺傳基因，目前則是以臺蔗十號（ＲＯＣ１０）改良而成臺蔗十六號(ROC16)爲主要栽培種。但是，優良品種在某一地區利用無性生殖種植數年之後，基因的表現會有退化的情形，加上病原菌發生變異或遭受新的病蟲害侵襲，也可能是甘蔗本身發生了突變，使品種的生產能力逐漸衰退，因此必須不斷尋找新的種原來育成新品種。近年來由於生物技術的進步，採用莖頂的分生組織進行組織培養，分離出無病毒的健康甘蔗種苗，提供民間種植利用。至於甘蔗的選種，在年長的蔗農間仍然流傳著「甘蔗梢的頭部生長旺盛、葉片開展姿態優美、葉片無病斑且糖分高，植株不高不矮、太高易傾倒不利機械採收、太矮則無產量、太粗太細都不好，分蘗的莖數多、蔗莖充實沒有空心及海綿狀的蒲心、抗風不易倒伏，葉鞘的毛群要少及枯葉能夠自動脫落」等外觀特徵的判斷方式。

圖 9：葉子為平行脈

圖 10：葉鞘包圍的正中心則是俗稱「甘蔗筍」。

圖 11：將採收的甘蔗先進行榨汁。

蔗糖除了是居家常用的調味品外，也是中醫醫療上重要的藥材，具有補血、益氣、促進血液循環、活血舒筋、健脾胃、化淤生新等功用，屬於味甘溫和良藥，但是，過量的甜食容易造成肥胖，攝取過多的糖分也會使正餐時食慾不振，導致營養不均衡，影響生長發育。粗製的黑糖俗稱爲紅糖，除了含有糖類與氨基酸外，還包含多量礦物質，如鈣、磷、鐵、鉀、鈉與維生素群中的維生素B1、B2和菸鹼酸及助消化蔗糖酵素等。

台灣的製糖方式有台糖公司的機械化製糖與民間製糖，在製糖的過程中涵蓋了許多有趣的物理與化學原理。首先介紹台糖公司的製糖流程：甘蔗採收→切段→壓搾→蔗汁收集→清淨→脫色→濃縮→結晶→分蜜→多次再結晶與分蜜→收集與乾燥→包裝。整個流程都是以機械化完成，在精密儀器控制下 10 公斤的甘蔗約可產製 1 公斤砂糖。

傳統的民間製糖沒有精密的儀器只能依賴經驗人工來製作，所以只能達到粗製糖析出，無法達到精製糖的結晶，製作的過程爲：甘蔗採收→壓搾→蔗汁收集→過濾殘渣→煮糖→糖膏形成→攪拌冷卻(炒糖)→添加調味品→結塊→收集與乾燥→包裝。

圖 12：在沸騰過程中，利用濾網撈除混合在泡沫中的雜質。

台糖公司製糖的過程中常會利用石灰法(加入石灰)、碳酸法(加入二氧化碳)與亞硫酸法(加入二氧化硫)來

圖 13：利用熱溫蒸發蔗汁的水分，濃縮成糖膏。

進行蔗汁中雜質的去除，並取得所需要的蔗糖種類，由於甘蔗原汁爲酸性，所以會先加入鹼性的石灰進行酸鹼中和，然後煮沸放入沉澱槽靜置，讓懸浮不純的物質沉澱至液體之底部，沉澱後的蔗汁導入二氧化硫氣體進行脫色形成硫酸鹽，接著再導入二氧化碳直到飽和，此時會產生大量溶解度甚差的碳酸鈣粒子，這些碳酸鈣粒子恰好可以吸附膠體、色素及其他非糖分顆粒產生沉澱，達到降低結晶的蔗糖顏色和提高清汁純度的作用。淨化與脫色過的蔗汁送至蒸發罐，利用眞空減壓來加速蒸發的方式，來進行濃縮蔗汁，然後再送至結晶罐中煮糖，讓水分持續蒸發，使得結晶析出，並抽驗檢視養晶情形，此時產生的晶體會和濃縮的蔗汁混合在一起，然後再採用離心方式進行分蜜，將蔗糖晶體分離出來。若是得到的糖晶體不合乎商業標準，則必須重新溶解製作或是充當糖種讓蔗糖作爲析出的主體，繼續重複結晶與分蜜過程，直到合乎大小標準的晶體出現爲止，由於剛收集到的蔗糖晶體會含有水份，包括表面附著的水、葡萄糖結合產生的水以及結晶顆粒間的游離水，必須加以乾燥才不會潮解。在不同的製造階段可得到顏色、顆粒大小和純度不同的糖顆粒，若是使用碳酸法可以得到台糖特砂(俗稱白糖)，利用石灰法可以得到台糖二砂(俗稱紅糖)，這兩種糖還可以送到精煉糖廠再加以純化就可形成精煉特砂、精煉細砂及二砂。

民間製糖則是採用經驗相傳，並沒有詳細的文獻紀錄，以大阿里山國家風景區的太和、瑞里和豐山地區製糖爲例，每年春天在雨季來臨之前，當地居民則開始採收製糖甘蔗，山區間的甘蔗栽種以臺蔗十號爲主，利用宿根保留的粗耕方式種植，很容易被誤以爲是在種植牧草或是雜生的芒草，採收的甘蔗會先進行搾汁的工作(如圖11)，收集的蔗汁則直接放入大鍋中煮沸，沸騰過程中雜質會混合泡沫浮於蔗汁表面，利用濾網進行撈除(如圖12)，水分一直加熱蒸發增高蔗糖的濃度，由於持續加熱，無法像台糖公司的製糖方式控制在恆溫狀態中進行，所以濃縮的蔗汁便會轉換成糖膏(如圖13)而非蔗糖晶體的析出，此時便是製糖成功與否

的關鍵，如果加熱過快就會產生大量的焦糖或是碳化現象，使得製糖的品質下降，加上製糖過程並未進行脫色，蔗汁的顏色會逐漸加深，製糖師父這時候就會使用鍋鏟，將少許糖膏翻轉測試黏稠程度(如圖14)，合乎黏稠要求時，就必須立即熄火，並且將鍋子移至炒糖的架子上，不斷地利用鍋鏟翻動糖膏降溫，此時也可以拌入調味料來增添口味，持續翻動糖膏直到快要凝固時，再迅速地將糖膏倒入模型中凝固(如圖15)。待凝固後，再利用特製的刀子將糖切塊(如圖16)，就可以進行俗稱黑糖的包裝工作，以此方式生產的糖類屬於含蜜糖。含蜜糖要在更高的過飽和狀態下，以擾動起晶的方式，瞬間產生大量的晶核，然後再利用晶核產生過程中所放出的熱量，將水分蒸乾，所以產生的晶粒微小較不規則並且會團聚成塊狀，由於糖蜜和結晶未經離心分離，甘蔗汁中的雜質、氣味、營養成分也都保留在糖中（如圖17)。

圖14：利用鍋鏟將少許糖膏舉起測試黏稠程度。

圖15：糖膏倒入模型中凝固。

除了上述的製糖方法　外，尚有一種蔗糖濃度很高的糖類它就叫--冰糖，古代的冰糖因爲沒有現代化的設備，爲當時所能得到最純的結晶糖，製作方法則是採用高濃度的蔗糖溶液充當原料，經過長時間靜置蒸發，自然形成的結晶，爲了能讓結晶長大，通常會利用一條棉線懸空，其下端浸泡在飽和的糖水中

照片16：再利用特製的刀子將糖切塊。

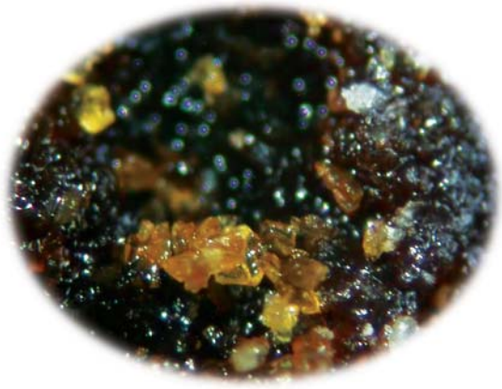

圖17：黑糖是糖蜜和結晶未經離心分離。

讓冰糖逐漸結晶和附著(俗稱爲養糖）（如圖18）。因此冰糖是長時間結晶所換來晶粒更大、純度更高的糖結晶，純度上幾乎和砂糖相同，最大的差異在於晶粒大小。

圖18：飽和的糖水失去水分就會逐漸結晶（冰糖）。

糖的製造過程除了許多物理和化學原理外，也包含了許多植物的特殊性質。由於現今社會環保意識的抬頭及資源重複利用的理念，製糖過程也盡量減少廢棄物的產生，台糖公司製糖機械首需爲動力，會先將去年保留的部分蔗渣充當鍋爐燃料(如圖19)，產生大量的高壓蒸氣來推動發電機發電，而榨汁產生的新鮮蔗渣可以繼續充當燃料，持續進行發電，發電後已經降溫的蒸氣，再做爲製糖時清淨、濃縮及結晶所需要的能源。過濾及清淨階段所產生的廢料就充當發酵肥料，至於民間製糖所產生的廢棄物則是直接送至田園做爲堆肥(如圖20)。

圖19：台糖公司會將去年的蔗渣保留一部分充當鍋爐燃料，做為機械運轉的動力。

近年來由於化石能源逐漸短缺，而且燃燒會造成空氣污染，生質能的開發已經是刻不容緩的議題。在巴西，很早就發展出以甘蔗汁利用酵母菌發酵來生產酒精，並把酒精加入汽油中使用，不僅可以減少汽油的消耗，又可增加燃燒效率，高效率的光合作用可以提升空氣品質，所以甘蔗的種植和利用，即將再進入新的里程。

圖20：民間製糖的蔗渣送至田園做為堆肥。