

豬隻能消化多少纖維？ 使用美國玉米乾酒粕的優勢

前言

豬隻雖然是單胃動物，但是其大腸存在的胃後發酵（**post-gastric fermentation**）系統是不可否認也不容忽視的。在這個議題上有兩個層次的問題需要討論，第一個層次的問題是在胃和小腸不能消化的剩餘物進入大腸之後，到底有那些營養成份可以在胃後發酵系統被分解消化？第二個層次的問題是這個發酵系統對豬隻消化生理和實際營養貢獻的影響，以及如何維持這個系統的正常運作來提昇豬隻的生產效率。針對第二個層次的問題，台灣前旅美豬隻營養專家顏榮增博士生前所主持的實驗室曾經對胃後發酵所產生的短鏈揮發性脂肪酸(**short-chain volatile fatty acid**)對豬隻維持能需求的貢獻多所著墨。但是對於第一個層次的問題則很少被關注。

豬隻的飼糧配方必然會決定什麼營養份和多少營養份會在胃和小腸被消化吸收，當然也影響未消化剩餘物進入大腸的成份，大腸的發酵作用和營養意義也就和飼糧配方息息相關。從飼料成份分析的角度來看，飼糧提供碳水化合物、蛋白質（含氮化合物）、脂肪、維生素、和礦物質等營養成份；假設配方精準的平衡，豬隻的健康狀態和消化能力也完美無暇，理論上碳水化合物中的糖和澱粉應該完全被消化，留下來進入大腸發酵系統的碳水化合物剩下果膠、半纖維素、纖維素、和木質素，因為豬隻消化道本身並沒有酵素系統來分解這些纖維性的碳水化合物，必需藉由大腸微生物的酵素來分解。當然飼糧、豬隻和管理系統都不可能毫無瑕疵，所以一定會有部份澱粉進入大腸消化系統，尤其是以玉米為主要原料的飼糧，因為玉米澱粉週邊蛋白質骨架(**protein matrix**)和澱粉顆粒本身結構的問題會有一部份澱粉（**resistant starch**）不會在小腸被消化，所以進入大腸發酵系統的碳水化合物也包括少量的澱粉。

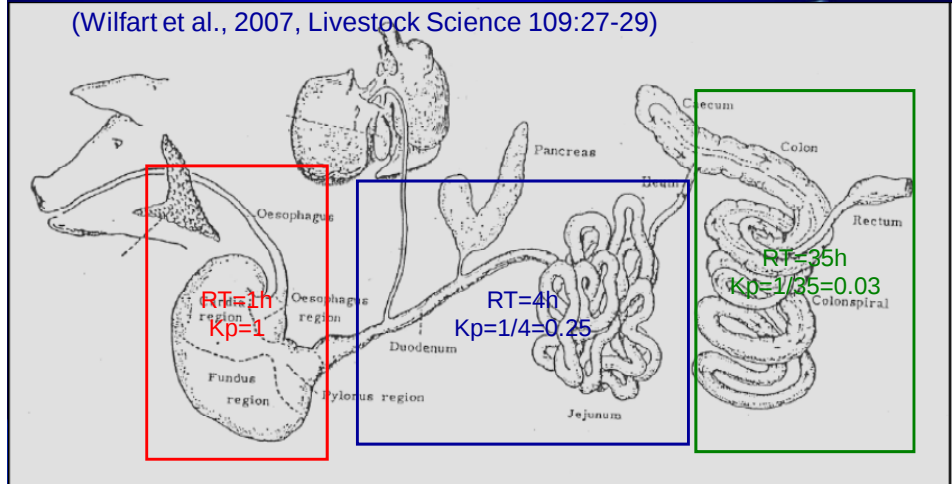
本文的主要目的是以玉米酒粕的纖維消化做為範例來探討到底有多少進入大腸發酵系統的碳水化合物可以在這段腸道被消化，及其對飼糧配方的影響。

豬隻大腸發酵系統的理論架構

豬隻屬於雜食性動物（**omnivore**），[圖一]呈現的是豬隻消化系統及其內容物的滯留時間，業界對胃和小腸的消化生理已經瞭若指掌，在此不多贅述；本文主要討論的對象是大腸部位的消化生理。大腸因為沒有源自豬隻本體的消化酵素注入，所以主要的消化作用來自微生物的發酵作用，微生物的酵素系統可以分解五碳醣和 β 結構的六碳醣，因此可以消化部份的植物性纖維。大腸的微生物發酵系統和反芻動物的瘤胃發酵系統十分接近，這兩個發酵系統進行的都是厭氧性發酵（**Anaerobic fermentation**），兩個系統都依靠糖、澱粉、和可消化纖維（果膠、半纖維素、和纖維素）做為營養來源來維持系統的運作；發酵的主要產物都是乙酸、丙酸、和丁酸，還有少量的乳酸和酒精。兩個系統的主要差異在瘤胃發酵系統有含重碳酸鈉（小蘇打）的唾液作為緩衝劑，系統內的酸鹼值比較穩定，厭氧性和嫌氣性細菌是主要的微生物，原蟲和真菌也在系統中共生；大腸發酵系統沒有外來的緩衝機制，所以酸鹼值變化較大，因此原蟲不易存活。

[圖一] 豬隻消化道內容的滯留時間(retention time, RT)
通過速度(Passage rate, Kp, %/h) = $1/RT$

(Wilfart et al., 2007, Livestock Science 109:27-29)



我們必需從化學成份和實驗室化學分析兩個面向來探討植物的碳水化合物[圖二]。植物細胞分為細胞質和細胞壁，細胞質所含的碳水化合物是糖和澱粉（葡萄糖以 α 鍵鍵結而成），細胞壁的主要成份則包括：果膠、半纖維素、纖維素、和木質素。果膠如同砌磚牆所用的水泥，主要作用是將細胞結合在一起，其化學成份主要是五碳醣，結構鬆散，所以很容易被分解，因為可以溶於水，所以稱為“水溶性纖維”；半纖維素和纖維素是細胞壁的主要結構，半纖維素由多種五碳和六碳醣組成，結構不規則，所以並不緊密，是容易分解的非水溶性纖維，但是隨著植物的成熟老化，木質素的形成穿梭在半纖維素之間，讓半纖維素的消化受到阻礙；纖維素的組成份是由葡萄糖以 β 鍵結整齊排列而成，因此消化速度緩慢。從化學分析的角度來看，細胞質和果膠會溶解在中性洗劑（neutral detergent solution），不溶解的部份稱為中洗纖維（neutral detergent fiber, NDF）；如果進一步以酸性洗劑處理，半纖維素會被溶解，剩下纖維素和木質素。結構上，果膠是屬於細胞壁，但是在分析上，果膠並不在中洗纖維中，而且它的消化速度（%/小時）並不亞於澱粉（[圖二]）。

[圖二] 碳水化合物的消化速度

■ 細胞質

■ 糖 (200-350%/小時)

■ 澱粉 (10-40%/小時)

■ 細胞壁

■ 果膠 (40-60%/小時)

■ 半纖維素 (8-10%/小時)

■ 纖維素 (0.5-2%/小時)

■ 木質素 (0%/小時)

酸洗纖維
(ADF)

中洗纖維
(NDF)

描述動態發酵系統的數學模式

發酵系統是動態的非線性模式，而不是靜態的線性模式。當一個化學成份實體進入發酵系統，有三個變數會影響這個成份在系統內會被分解消化的量：進食量（ K_i ，公斤/天）、消化速度（ K_d ，%/小時）、和通過速度（ K_p ，%/小時）。每一種碳水化合物的消化速度都不同（[圖二]）。進食量越高通過速度越快；所以消化速度和通過速度是兩種相互競爭的行為，通過速度越快的成份越沒有機會在系統中被消化，消化速度越快的成份可能在離開系統之前就已經被完全消化。因此某一種碳水化合物成份在一個發酵系統中可以被消化的總量可以用下列的數學模式來描述：

總可消化量（ R_d ，公斤/天）= 進食量（ K_i ，公斤/天） $\times$ [消化速度 K_d ，%/小時 / (消化速度， K_d ，%/小時 + 通過速度， K_p ，%/小時)]

如果我們援用碳水化合物在瘤胃發酵系統的消化速度（[圖二]），通過速度的數據則根據 Wilfart et. Al., (2007, Livestock Science 107:27-29) 文獻中消化道內容物在各段消化道的滯留時間(retention time, RT)，理論上，通過速度（ K_p ，%/小時）等於滯留時間的倒數（[圖三]）。將這些理論數據套入上述公式中就可以分別計算出果膠、半纖維素、和纖維素在豬隻大腸可能被消化的百分比（[表一]）。由這個試算結果，可以發現這些纖維事實上在大腸有被消化的可能性；大部份（93-95%）進入大腸的果膠都會在被微生物發酵利用，半纖維素的消化率約在 72-77% 左右，纖維素的消化率則顯然偏低（14-40%）。這些纖維成份發酵所產生的揮發性脂肪酸經由大腸腸壁細胞吸收後的營養貢獻和生理功能留待下回詳細探討。

[表一] 豬隻大腸發酵可能消化纖維的潛力。

碳水化合物	最低值 (%)	最高值 (%)
果膠	$0.4/(0.4+0.03)=93$	$0.6/(0.6+0.03)=95$
半纖維素	$0.08/(0.08+0.03)=72$	$0.1/(0.1+0.03)=77$
纖維素	$0.005/(0.005+0.03)=14$	$0.02/(0.02+0.03)=40$

美國玉米乾酒粕的纖維消化率

玉米乾酒粕含有很多纖維，這些纖維的來源是玉米穀粒的外皮，其主要的化學成份是半纖維素。這些半纖維素在豬隻大腸發酵系統被消化分解是不可否認的事實，但卻常常被忽略。這個問題在部份酒精工廠將部份脂肪移除之後更為重要，因為纖維含量相對提高，這些含更高量纖維的玉米乾酒粕對豬隻的營養意義和飼糧配方勢必有一定程度的影響。

筆者在 1999 年所發表的文獻 (Journal of Animal Science 1999:3077) 曾收集不同品系的玉米穀粒，將纖維部份純化分離，與瘤胃液在試管中發酵，紀錄其發酵過程的動態數據。儘管所收集的玉米品系特性有很大的差異，但是中洗纖維的含量差異很小，消化率和消化速度的變異也很小；依此推論，即使玉米乾酒粕來源不同，其中洗纖維的消化率和消化速度應該差異不大。根據該文獻的結果，玉米中洗纖維的平均消化速度是每小時 11%，如果我們引用這個數據，而通過速度也同樣採用 Wilfart et. Al., (2007, Livestock Science 107:27-29) 的數據，則玉米乾酒粕的中洗纖維在豬隻大腸的預估消化率是 78.5%。