

綠色化學於生活層面之應用

一、綠色化學簡述

在現代社會中，隨著化學工業技術的日新月異，不僅帶動了化學產業的蓬勃發展，成千上萬種的化學物質更由實驗室中被合成研發產生，並廣泛的應用於我們周遭的日常生活領域中。然而不幸的是，繁榮的進步生活，其所伴隨的代價，是全體人類的健康、以及全球共同的環境，均已遭受到了肉眼無法察覺的威脅。我們的身體每日大量的暴露在合成工業化學物質中，其中許多已知具有毒性和致癌性，而有其他更多物質至今尚仍無法確認對健康是否有所影響；與化學物質大量接觸的食物被毫不知情的人們吃下肚，而孕婦若攝入受持久性有機污染物污染的空氣及飲水，也將使體內的胎兒暴露在致癌及畸形的風險中。更令人為之驚心的是，現今許多釋放進入環境中的化學物質，其足跡已隨著全球的生態食物鏈遍布於世界各處：例如於熱帶地區所經常使用的農藥卻在北極被檢驗出現，而用於家具和電子產品中的阻燃劑則普遍於海洋哺乳動物中被檢出。由於清除環境中的污染物將花費大量的時間與驚人的費用，因此若要有效解決化學物質對於人體危害及環境污染的問題，「綠色化學」概念的應用與落實是不可避免的。

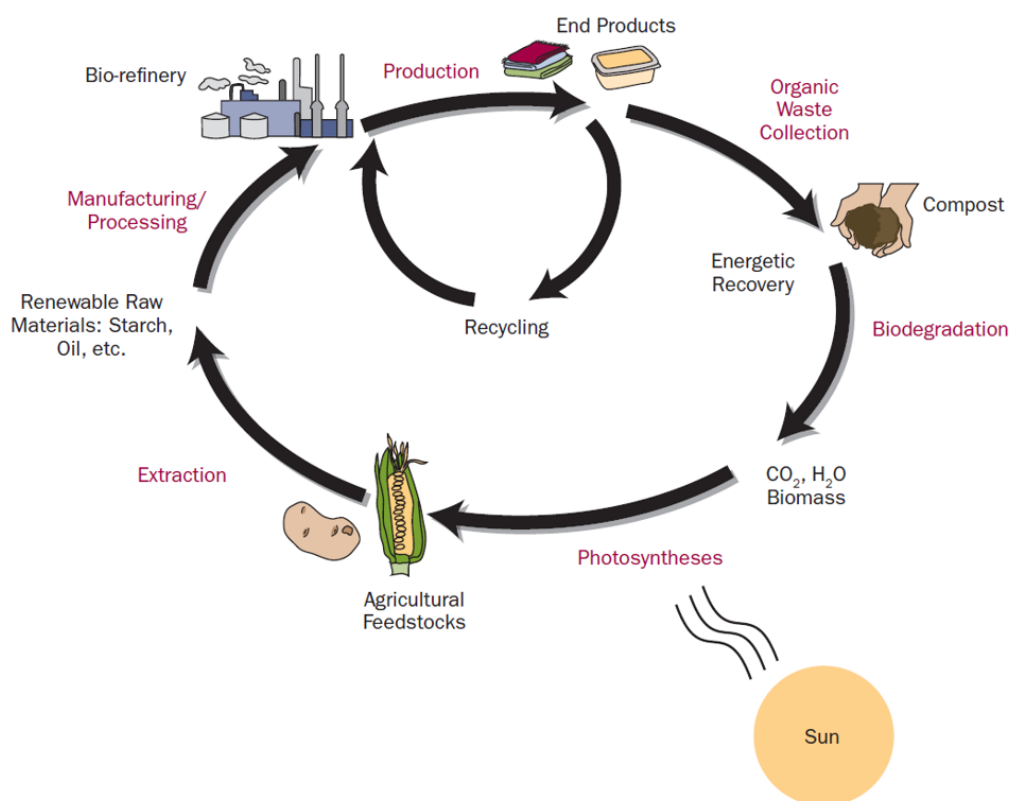
那麼什麼是綠色化學呢？根據美國環境保護署（Environmental Protection Agency, USEPA）之定義，綠色化學的主要精神在於針對工業製造過程及產生的化學產品進行重新再設計，以減少或消除有害物質的使用，這也意味著綠色化學將同時涉及減少廢棄物、無毒成分及提高化學反應效率等原則。此外，約翰·華納（John C. Warner）博士與保羅·阿納斯塔斯（Paul Anastas）博士於1998年共同出版了綠色化學發展領域最重要且最具開創性的教科書-綠色化學：理論與實踐（Green Chemistry: Theory and Practice）。該書中定義並闡述了綠色化學在於以「原子經濟性」為原則，研究如何在產生目的產物的過程中充分利用原料及能源，減少有害物質的釋放；在反應的效率達到最高的同時，損耗亦會降到最少，使得對環境的傷害降到最低，並從源頭到最終產物的過程中減少廢物的產生，最終降低對環境的污染或衝擊。

二、綠色化學於生活層面之應用

身為現今最熱門的研究領域之一，綠色化學的主要研究旨在減少或消除有害化學副產物的產生，並盡可能以生態友好的方式生產人類各項所需產品。作為化學領域的新興分支，綠色化學的研究開端始於科學對減少人為破壞環境的需求的回應。在化學材料生產及其使用過程中，綠色化學包括減少浪費、甚至以正確的方式處置廢棄物。這意味著所有廢棄物都應盡可能以最佳的方式進行處置，而不會對環境和生活造成任何損害。

圖 1 即為綠色化學應用於農業廢棄原料之案例，綠色化學科學家們從木材、雜草等植物或其他農業原料中，提煉生物質材料並轉化為清潔燃料、工業用新化學品和新型動物飼料等。這項措施符合了綠色化學中從源頭開始充分利用原料和能源，減少、甚至零有害物質釋放，降低對環境衝擊之精神。

本文以下將列舉各項綠色化學於生活中不同產業之應用案例，以說明綠色化學此一概念如何深遠的影響了從家庭用品到藥品的廣泛領域，以及綠色化學如何為環境永續發展的營造提供了可行的途徑。



資料來源：Clean Production Action, www.cleanproduction.org

圖 1 綠色化學原則實例應用

（一）衣物乾洗

作為一種極為常見的化學材料，四氯乙烷（Tetrachloroethylene, PERC）目前廣泛的被用作於乾洗劑、金屬除油溶劑與航太工業製程中。然而目前四氯乙烷已被美國衛生及公共服務部（DHHS）列為可合理預期的人類致癌物質，同時美國環境保護署（USEPA）與國際癌症研究中心（IARC）皆認為四氯乙烷可能對人類致癌。因此，約瑟夫·德·西蒙斯（Joseph De Simons）、提莫西·雷馬克（Timothy Romark）和詹姆斯·麥克萊恩（James McClain）藉由一種稱為微胞技術（Micell Technology）的創新化學技術，以液態二氧化碳進行衣物表面乾洗，從而替代了四氯乙烷的使用。而除了衣物乾洗外，微胞技術目前也已經發展應用於金屬表面清洗處理，有效降低或消除了表面處理業對鹵化溶劑之需求。

（二）漂白劑

在現今的工業造紙程序中，為了盡可能去除木材中的木質素以製造高品質的白色紙張，木材通常將會放入由氫氧化鈉和硫化鈉混合之槽體中，並且通入氯氣與其進行化學漂白反應。然而在此漂白過程中，氯氣將可能與木質素中的芳香環反應形成氯化二噁英（Chlorinated Dioxins）和氯化呋喃（Chlorinated Furans），而這些戴奧辛類化合物已被廣泛證實具有致畸與致癌作用。因此，卡內基·梅隆大學（Carnegie Mellon University）的特雷斯·柯林斯（Terrence Collins）教授開發了一種綠色漂白劑，該漂白劑以過氧化氫為材料，並以特定活化劑（例如 TAML）催化過氧化氫轉化為會導致漂白的羥基自由基。由於這種漂白劑可在更低的溫度及更短的時間內分解木質素，從而同時將可用水量進一步減少。

（三）環保塗料

在工業上，傳統的鹼性塗料會釋放出大量的揮發性有機化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs），這些揮發性化合物會在油漆乾燥和固化時從油漆中蒸發掉，進而遷移到空氣中，而其中許多揮發性物質會對環境產生一種或多種影響。為了逐步降低傳統塗料對於人體健康與環境的衝擊，寶鹼公司（Procter & Gamble, P&G）

和庫克複合材料與聚合物公司（Cook Composites and Polymers, CCP）研發了大豆油和糖的混合物，這種混合物與傳統化石燃料來源製成的塗料樹脂和溶劑相比，可降低 50% 左右的有害揮發物。

此外，宣威-威廉斯公司（Sherwin-Williams）開發了具有低揮發性有機化合物含量的水性丙烯酸醇酸樹脂塗料，該塗料可由回收的汽水瓶塑膠原料（PET）、丙烯酸樹脂和大豆油製成，這些塗料結合了醇酸樹脂的性能優勢和丙烯酸酯的低 VOCs 含量。在 2010 年，宣威-威廉斯公司製造了大量的新式塗料，並透過這些塗料消除了超過 800,000 磅（約 362,874 公斤）的 VOCs 逸散。

（四）可生物降解的塑膠

近年來，許多公司一直致力於開發可生物降解、或由可再生來源所製成的塑膠。例如位於美國明尼蘇達州（Minnesota）明尼通卡市（Minnetonka）的 NatureWorks 公司，該公司主要使用聚乳酸原料製造食品容器。近期 NatureWorks 的科學家發現了一種方法，該方法可利用微生物將玉米澱粉轉化為樹脂，而該種生物來源樹脂的強度，與目前常用於水瓶和優格瓶等容器的硬質石化來源塑膠相同。

此外，德國巴斯夫（BASF）公司也開發了一種廢棄後可用於堆肥的聚酯薄膜，稱為“Ecoflex®”，並使用這種聚酯薄膜製造和銷售完全可生物降解的袋子，稱為“Ecovio®”。Ecoflex® 這種聚酯薄膜由木薯澱粉和碳酸鈣製成，並經過生物可降解產品研究所

（Biodegradable Products Institute）的認證，可以在工業堆肥系統中完全分解成水，二氧化碳和生物質。而 Ecovio® 這種袋子在機能上可以抗撕裂、抗刺穿、防水、表面可印刷且具有彈性。若未來工業上推廣使用這些袋子來代替傳統的塑膠袋，將可使我們周遭大量的塑膠垃圾在環境中迅速分解，降低對環境的衝擊與危害。

（五）電腦中的積體電路

工業上為了製造電腦中的積體電路，需要使用到許多的化學藥品、大量的水以及高度的能源消耗。根據 2003 年進行的一項研究顯示，製造電腦中的積體電路其所需要的化學藥品及化石燃料總工業

估算值 (Industrial Estimate) 為 630 : 1 ! 這意味著單單光是製造一個積體電路, 其所需要消耗原始材料之重量是積體電路重量的 630 倍! 而與之相比, 製造汽車所需消耗原始材料之重量, 就僅僅為汽車重量的 2 倍而已。

有鑑於積體電路的高耗能及高原料消耗特性, 美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory) 的科學家們開發了一種在積體電路製造步驟中使用超臨界二氧化碳的技術, 該技術可顯著減少生產積體電路所需的化學物質、能源和水。此外, 美國德拉瓦大學 (University of Delaware) 進行了一項計畫 - “由再生資源中尋找經濟可行之複合材料 (Affordable Composites from Renewable Resources, ACRES)”, 該計畫的計畫主任、同時也是德拉瓦大學化學與生物分子工程教授 - 理查·伍爾 (Richard P. Wool) 博士找到了一種方法, 該方法可以使用雞毛製造電腦中的積體電路! 理查·伍爾博士透過動物羽毛中蛋白質的角蛋白 (Keratin) 物質, 製成既輕、韌性又足以承受機械和熱應力的纖維物質。經過測試, 這種由羽毛中角蛋白物質所製成的印刷電路板, 其工作速度實際上是傳統電路板的兩倍! 儘管這項技術仍在為了可商業化而努力, 然而將羽毛作為原材料這項技術已逐步應用於許多其他研究領域, 包括用於生質燃料 (Biofuel) 之原料等。

(六) 醫學與藥品

從過去以來, 製藥工業就一直致力於尋找及開發副作用或是毒性較小的藥物。近期美國藥品商默克 (Merck) 公司和 Codexis 公司合作開發了西格列汀 (Sitagliptin) 的第二代綠色合成方式。這種新式的酶催化反應減少了無用物質的產生, 提高了反應的產量和安全性, 並且消除了對金屬催化劑的需求。(注: 西格列汀為 Januvia™ (佳糖維, 一種第 2 型糖尿病的治療方法) 中的活性成分)

除了西格列汀之外, 在早期的研究中也顯示了新的生物催化劑亦可用於製造其他藥物, 例如著名的學名藥辛伐他汀 (Simvastatin)。辛伐他汀最初以商品名 Zocor® 出售, 是治療高膽

固醇的常用處方藥之一，傳統上製造這種藥物的多步驟化學反應方法使用了大量的有害試劑，並在此過程中產生了大量的有毒廢棄物。因此加州大學（University of California）的 Yi Tang 教授使用酶反應工程（Enzyme engineering）和低成本原料合成了一種合成物，並由生物催化公司 Codexis 對酶和化學過程進行了改善，其結果顯示新的合成物及合成方式大大減少了藥物製造過程中產生的危害和浪費，且價格上具有正向的成本效益，可實際投入於第一線的藥品生產。

三、結論

綜合而言，作為一顆新興的科學研究領域，綠色化學為科學家和工程師們在設計化學原料和化學工程反應方法時提供了另一種思考方式。這種嶄新的觀念同時也超出了我們傳統環保觀念中僅僅對化學毒性危害的關注，進而擴大納入了節能、減少廢棄物和化學物質生命週期等考慮因素，例如使用更具永續性或可再生的原料以及設計最終用途等概念。這種創新的思維使綠色化學和工程實踐相較於傳統環保概念，不僅同樣可以使地球更為清潔以及永續發展，更進一步的更可以在經濟上帶給我們更多積極的社會影響，從藥品到家庭用品，綠色化學在不同產業領域的廣泛應用，為地球上的人類通往更美好的世界提供了途徑。

然而，儘管綠色化學精神已逐步應用並落實到許多產業領域中，但科學家們仍然面臨著更多的挑戰。許多高污染化學製品至今仍無法開發使用低毒性或低危害的原料，或是仍然無法設計出更安全無害的化學合成反應。現今許多化學製品在製造過程中仍會產生許多有害的副產物或廢棄物，且廢棄的產品也無法再生利用。此外，推動綠色化學最大的挑戰，則是在於一般人民還沒有意識到我們必須將綠色化學融入日常生活中。因此若要提高全民的綠色化學素養，我們除了通過培訓和教育新一代的化學家之外，綠色化學精神也必須導入到各級學生的學習課程，如此方能使每個人都意識到在自己的日常生活中必須選擇更綠色的道路。

四、參考文獻

1. Clean Production Action. *Why We Need Green Chemistry*. from www.cleanproduction.org
2. Manoj K S Chhangani and Sofia I. Hussain (2018) *Green Chemistry in Everyday Life: A Healthy Way of Life*. Govt. Meera Girls' College, Udaipur-(Raj.) India.
3. Martin J. Mulvihill, Evan S. Beach, Julie B. Zimmerman, and Paul T. Anastas (2011) *Green Chemistry and Green Engineering A Framework for Sustainable Technology Development*. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2011. 36:271–93.
4. Rummi Devi Saini (2018) *Green Chemistry in Daily Life*. Department of chemistry, S.M.D.R.S.D. College, Pathankot, India.
5. Suresh D. Dhage (2013) *Applications Of Green Chemistry Principles In Every Day Life*. Department of Chemistry, SSJES, Arts, Commerce and Science College.