



綠色化學

Green Chemistry

基礎與應用

Fundamentals and Applications

梁碧峯 編著



滄海書局

Tsang Hai Book Publishing Co.



綠色化學

Green Chemistry

基礎與應用

Fundamentals and Applications

梁碧峯 編著



滄海書局

Tsang Hai Book Publishing Co.

綠色化學：基礎與應用 / 梁碧峯編著. -- 初版. --

臺中市：滄海，民 100.11

面：公分

ISBN 978-986-6184-71-0 (平裝)

1. 化學工業 2. 環境化學

460

100020750

版權所有



翻印必究

滄海書碼 CE0202

綠色化學：基礎與應用

編著者 / 梁碧峯

發行人 / 張麗紅

出版者 / 滄海書局

總經銷 / 滄海書局

地 址：40757 台中市西屯區台中港路二段 122-19 號 11 樓

電 話：(04) 2708-8787

傳 真：(04) 2708-7799

網 址：<http://www.tsanghai.com.tw>

E-mail：thbook@tsanghai.com.tw

中華民國 101 年 6 月初版一刷

本書所有內容，未經編著者及本公司事前書面授權，不得以任何方式作全部或局部之

翻印、複印、仿製或轉載。

ISBN 978-986-6184-71-0

1
1A

18
8A

1 氫 1.008	24 鉻 52.00	原子序	原子量
-----------------	------------------	-----	-----

3 鋰 6.941	4 鈹 9.012	5 硼 10.81	6 碳 12.01	7 氮 14.01	8 氧 16.00	9 氟 19.00	10 氖 20.18
11 鈉 22.99	12 鎂 24.31	13 鋁 26.98	14 矽 28.09	15 磷 30.97	16 硫 32.07	17 氯 35.45	18 氬 39.95
19 鉀 39.10	20 鈣 40.08	21 鈦 44.96	22 鈦 47.88	23 釩 50.94	24 鉻 52.00	25 錳 54.94	26 鐵 55.85
37 銣 85.47	38 鎳 87.62	39 鈷 88.91	40 鎳 91.22	41 鎳 92.91	42 鎳 95.94	43 鎳 (98)	44 鎳 101.1
55 銻 132.9	56 鋇 137.3	57 鐳 138.9	72 鋁 178.5	73 鋁 180.9	74 鎢 183.9	75 錒 186.2	76 鐵 190.2
87 銻 (223)	88 鐳 226.0	89 鐳 227.0	104 鐳 (265)	105 鐳 (268)	106 鐳 (271)	107 鐳 (270)	108 鐳 (277)
13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A	19 3A	20 4A
31 鎵 69.72	32 鎵 72.63	33 鎵 74.92	34 鎵 78.96	35 鎵 79.90	36 鎵 83.80	37 鎵 85.47	38 鎵 87.62
49 銦 114.8	50 錫 118.7	51 銻 121.8	52 碲 127.6	53 碘 126.9	54 氙 131.3	55 銻 132.9	56 鋇 137.3
81 銩 204.4	82 鉛 207.2	83 鉍 209.0	84 鉍 (209)	85 鉍 (210)	86 氬 (222)	87 銻 (223)	88 鐳 226.0
113 (113)	114 (114)	115 (115)	116 (116)	117 (117)	118 (118)	119 (119)	120 (120)

金屬

類金屬

非金屬

58 鈰 140.1	59 鐳 140.9	60 釷 144.2	61 釷 (145)	62 釷 150.4	63 釷 152.0	64 釷 157.3	65 釷 158.9	66 釷 162.5	67 釷 164.9	68 釷 167.3	69 釷 168.9	70 釷 173.0	71 釷 175.0
90 釷 232.0	91 釷 231.0	92 釷 238.0	93 釷 237.0	94 釷 (244)	95 釷 (243)	96 釷 (247)	97 釷 (247)	98 釷 (251)	99 釷 (252)	100 釷 (257)	101 釷 (258)	102 釷 (259)	103 釷 (262)

編序

「綠色革命」是美國國際開發署 (united states agency for international development, USAID) 於 1968 年 3 月在國際開發年會上首先提出的概念，現在「綠色」已成為少污染或無污染的代名詞。一連串有關綠色的詞彙，綠色化學、綠色化工、綠色食品、綠色藥物、綠色農業、綠色工業、綠色產品、綠色建築、綠色塗料、綠色材料、綠色纖維、綠色紡織品、綠色能源、綠色管理和綠色貿易等紛紛面世，並在全球迅速的形成了「綠色浪潮」。其中「綠色化學」是一個廣被認同的術語，用來描述對生態環境生產更加無害的化學過程和產品。它涵蓋了貫穿於整個化學品供應鏈中的教育、研究，以及商業應用領域。通過運用某些改良舊的或新的環境友好技術，可以實現綠色化學的目的。雖然綠色化學的應用在實際化學領域中僅占了很小的一部分，然而在化學與製藥工業生產中，它已被廣泛地認為是一種基本且必要的發展趨勢，尤其對於環境友好與可持續發展是至關重要的。因此，必須意識到綠色化學在開發中與已開發國家中是必須受到重視。

綠色化學是 20 世紀 90 年代人們認識到傳統化學的不足，由美國環保署 (EPA) 提出化學工業的產品必須清潔生產，而產生了這一門新學科。傳統化學似乎總和環境污染聯繫在一起。傳統的化學、化工關注如何通過化學的方法得到更多的物質，而此過程中對環境生態的影響則考慮較少，即使有考慮也只是著眼於事後的治理而不是事前的預防。而綠色化學是對傳統化學和傳統化學工業進行的革命，是以環境生態友好意識為最高準則，研究對環境無害或無(或盡可能小的)副作用，而在技術上和經濟上可行的化學品和化學過程，所以綠色化學又稱環境無害化學或清潔化學。具體來講，綠色化學就是用化學原理和方法，來減少或完全消除對生態環境有害的原料、催化劑、溶劑、試劑、副產物等的新興學科，是從源頭上阻止環境污染的化學，它不僅是化學工業未來發展的方向，也是其他工業與貿易的發展準則。

這 20 年來，綠色化學與綠色產品已受到世界各國的高度注目。美國最先由總統柯林頓與副總統高爾發起，並於 1995 年 3 月 16 日設立了「總統綠色化學挑戰

獎」，創建了獨樹一格的綠色化學專項獎勵，這是一項新的里程碑。同時，也大大地推動了綠色化學在美國化學與製藥工業的新發展。美國在國家實驗室、大學與企業間，也建立了多個綠色化學研究機構。接著歐洲的德國也於 1997 年底正式通過「為環境而研究」的計畫，把「可持續發展的化學」確定為固定的研究主題之一。

首先，澳大利亞皇家化學研究所 (RACI) 於 1999 年設立了綠色化學挑戰獎，此獎項旨在推動綠色化學在澳洲的發展，獎勵為防止環境污染而進行的各種易推廣的化學革新及改良，表彰為綠色化學教育的推廣做出重大貢獻的單位和個人。其次，日本在 21 世紀實施重建綠色地球的「新陽光計畫」，該計畫提出了「簡單化學」(simple chemistry) 的概念，即採用最大程度節約能源、資源和減少排放廢棄物的簡化生產工藝過程，來實現未來的化學工業和相關工業的發展，其方向是化學的發展要適應於改善人們健康和保護生態環境的要求。

而後，英國所設立的綠色化學獎也在 2000 年開始頒獎，此獎用意是在鼓勵更多的學者、專家投入於綠色化學研究工作，協助推動工業界新的綠色化工發展，並有了多項新的成果發表。特別是 2005 年的諾貝爾化學獎授予提出「換位合成法」的法、美兩國的三位科學家。瑞典皇家科學院諾貝爾委員會在授獎文告中稱，「換位有機合成法使人們向著綠色化學邁出了重要一步，大大減少了有害廢棄物對人們所造成的危害。」至此，綠色化學的重要性已確實受到世人的矚目。

面對國際上興起的綠色化學與清潔生產技術浪潮，各國政府也必須有決心貫徹實施可持續性發展戰略。尤其是開發中的國家，目前正在迅速建設新的化工廠，而這些國家特別具有極好的環境機遇，可從根本上貫徹實行綠色化學「無害化設計」這個口號。能夠更容易的建設一個「從無到有」新的且具有環境生態友好的工廠，而已開發國家則必須推動在重建新工廠之前一定要銷毀會污染的舊工廠。

眾所皆知，當今 21 世紀的開端，「綠色浪潮」已經席捲全球，不僅僅是一種新的消費浪潮，更重要的是它已指明了當代人類今後發展必走的方向，它對人們的生活觀念和產業發展的思路必將產生深遠的影響。儘快在高等學府的大專院校相關專業中，設置綠色化學課程，已顯得尤為迫切需要，好讓學生們能了解和掌握綠色化學的基本原理和方法應用。

綠色化學原理與方法完全可適用於指導綠色化學品的設計和生產，它對諸如材料、能源、塗料、藥物、食品、生物、光電、建築等產品的設計和生產，都具有很好的指導準則。儘管目前相關的科技書已有多種版本，但適合做為教科書的版本仍然較少。所以，作者按照教材規劃原則，根據化學類教學「具有不同風格和特色的專業教材」的精神，依據在化學類教學內容上，意旨在編輯出能合乎與滿足高等教育的應用化學專業要求的教科書。

本教材編輯都本著品質至上、面向未來的原則進行，廣泛聽取了有關學者、專家的寶貴意見，並參閱了國內外有關教材和資料。本教材在編寫過程中主要掌握了以下原則：

1. 首先，把綠色化學做為一門新興的交叉性的學科，介紹其誕生的背景和過程，同時重點介紹綠色化學基本原理、相關研究與綠色產品的應用，將其做為後續有關綠色課程內容的理論基礎，體現高等教育重視基礎理論的教育傳統。
2. 本著學以致用，綠色化學的理念最終要落在綠色產品及應用上。由於綠色化學是一門新的學科，實現綠色化的思路和途徑頗多，並且不斷產生新的途徑和方法，所以，本書盡可能地介紹目前綠色產品的評價方法和應用的思路與途徑。
3. 由於綠色產品的範圍頗為廣泛，同時考慮到各校的相關優勢學科和區域經濟性的不同，所以本書盡可能的納入數個領域綠色產品及設計思路。一方面體現滿足本科教育對知識的應用需求，另一方面也考慮滿足不同大專院校的不同特色與方向的側重性需求。

由於本教材體系實屬創新的建立，筆者學識有限，不可避免的會有疏漏及欠妥之處，敬請各位讀者先進，多多批評指正，不勝感激。

編者 梁碧峯

目錄

1

CHAPTER

緒論 1

- ✈ 1.1 環境問題 2
- ✈ 1.2 資源問題 7
- ✈ 1.3 健康問題 8
- ✈ 1.4 可持續發展問題 9
- ✈ 1.5 綠色化學的興起和發展 12
- ✈ 1.6 綠色化學的內涵 16
- ✈ 1.7 綠色化學和環境友好技術 18
- ✈ 1.8 綠色化學發展趨勢 29

2

CHAPTER

綠色化學的基本原理 37

- ✈ 2.1 環境與可持續發展 38
- ✈ 2.2 綠色化學的界限 56
- ✈ 2.3 化學實驗綠色化的途徑 59
- ✈ 2.4 綠色化學、化工過程的評估 69

綠色化學的研究 75

3
CHAPTER

- ✈ 3.1 綠色化學研究的緣由 76
- ✈ 3.2 為什麼要大力發展綠色化學研究 78
- ✈ 3.3 綠色化學的原子經濟性 80
- ✈ 3.4 原子經濟性與環境效益 84
- ✈ 3.5 綠色化學研究的任務 85
- ✈ 3.6 綠色化學十二原則 99

綠色的有機合成 111

4
CHAPTER

- ✈ 4.1 綠色有機化學緣由 113
- ✈ 4.2 綠色化學與綠色有機合成 121
- ✈ 4.3 綠色化學合成與可持續發展 134

綠色化學的應用 145

5
CHAPTER

- ✈ 5.1 綠色化學反應 146
- ✈ 5.2 綠色原料 155
- ✈ 5.3 綠色溶劑 163
- ✈ 5.4 改變反應方式和反應條件 167
- ✈ 5.5 綠色化學產品 173

6

CHAPTER

綠色化學品的設計 183

- ✈ 6.1 設計綠色化學品的準則 184
- ✈ 6.2 設計安全有效化學品的方法 188
- ✈ 6.3 用矽對碳進行等電排置換設計更加安全的化學品 212
- ✈ 6.4 設計可生物降解的化學品 215
- ✈ 6.5 設計對水生生物更加安全的化學品 222

7

CHAPTER

綠色的化學工業 239

- ✈ 7.1 綠色化學、化工的定義、特點及發展 240
- ✈ 7.2 綠色化工生產技術中的原料綠色化 246
- ✈ 7.3 從美國「總統綠色化學挑戰獎」看發展綠色精細化工的意義和趨勢 253
- ✈ 7.4 美國總統綠色化學挑戰獎介紹 262

8

CHAPTER

精細化工中的綠色溶劑及無溶劑體系 281

- ✈ 8.1 水 282
- ✈ 8.2 超臨界流體 284
- ✈ 8.3 離子液體 293
- ✈ 8.4 碳酸二甲酯 302

✈ 8.5 無溶劑體系 303

綠色催化 321

9

CHAPTER

- ✈ 9.1 綠色催化的研究 322
- ✈ 9.2 綠色催化劑種類及應用實例 326
- ✈ 9.3 仿酶催化劑 358

綠色材料 375

10

CHAPTER

- ✈ 10.1 綠色材料的意涵 376
- ✈ 10.2 綠色高分子材料 379
- ✈ 10.3 綠色奈米材料 390
- ✈ 10.4 綠色能源材料 398
- ✈ 10.5 綠色生物材料 417

綠色農業、食品與藥物 429

11

CHAPTER

- ✈ 11.1 綠色農業 430
- ✈ 11.2 綠色農藥 432
- ✈ 11.3 綠色肥料 440

✧ 11.4 綠色食品添加劑 450

✧ 11.5 綠色藥物 455

12

CHAPTER

綠色產品的評價體系與方法 471

✧ 12.1 綠色產品的意涵 473

✧ 12.2 綠色產品的評價體系 476

✧ 12.3 生命週期清單分析 (LCI) 485

✧ 12.4 LCA 數據庫與 LCA 評估軟體 495

✧ 12.5 與 LCA 有關的研究 505

✧ 12.6 LCA 的局限性與困難 509

■ 參考書目 513

■ 索引 515

1

CHAPTER

緒論

- ✧ 1.1 環境問題
- ✧ 1.2 資源問題
- ✧ 1.3 健康問題
- ✧ 1.4 可持續發展問題
- ✧ 1.5 綠色化學的興起和發展
- ✧ 1.6 綠色化學的內涵
- ✧ 1.7 綠色化學和環境友好技術
- ✧ 1.8 綠色化學發展趨勢



20世紀 80 年代，包括英國、美國、法國和日本等一些已開發國家都展開了某些綠色化學先驅性的研究，但是直到 20 世紀 90 年代，才由美國環保署 (USEPA) 創造了「綠色化學」這個術語，它對於包括歐洲、澳洲、印度和中國大陸及台灣在內的許多其他國家的研究和工業應用，都是一個很好的藉鑑。

20 世紀 90 年代中期，美國柯林頓總統於 1995 年設立「總統綠色化學挑戰獎」(Presidential Green Chemistry Challenge Awards)，並由其親自頒發，確實有效地展現了某些涵蓋製程、產品和工藝的優秀案例研究。另外，在這之前就有許多更好的綠色化學的例子，例如：德國商業化的無溶劑過程，和在生產過程中英國使用可再生催化劑等，但是它們都沒有像美國那樣公開化。

一般認為，現代世界各國面臨的重大社會問題集中在糧食、能源、人口、資源和環境五個方面。其中環境問題主要是由於人類社會迅速發展所引起的，它是人類社會現代化進程中必然會出現，又必須加以妥善解決的課題。因此，化學本來就是一門「中心、實用、創造性」的科學，從其誕生至今，已取得了巨大的成就。化學的原理和方法以及化學反應方面的研究，目前仍在主導其他學科；它在開發天然資源，以滿足人類的生活需要方面，已做出了巨大的貢獻。

基於化學的產業，利用天然資源來製造大量的化肥、農藥、醫藥、塑膠、鋼鐵、水泥等產品和材料，並生產大量的合成纖維 (fibers) 和橡膠 (rubbers) 等，以彌補農業、漁業、林業的不足；能源的開發利用，尤其是新材料的開發利用、醫藥衛生等均離不開化學。可以說，人類的食、衣、住、行、日用品，以及保持健康之醫藥品等，沒有一項是可以離開化學的，化學在這些領域中，直接或間接地發揮著不可替代的作用。但是，隨著人類社會的發展，我們已發現整個人類社會產生許多的問題，正面臨著嚴峻的多方挑戰。

1.1 環境問題

現今，全世界的人都深切感受到環境的壓力，尤其是環境污染已經不分種族、國界、文化、意識型態。從 20 世紀 50 年代所出現震驚世界的八大污染事故，到 80 年代的重大惡性環境事件一再發生，以致近年來，大家都在關注的酸雨、臭氧層耗蝕、溫室效應等全球性環境問題，無一不是由化學物質及其變化所造成的。

目前，從世界看人們普遍所關注的事件，包括以下幾個大問題：(1) 大氣污染；(2) 臭氧層破壞；(3) 全球氣候暖化；(4) 海洋污染；(5) 淡水資源匱乏和污染；(6) 土地酸化

和沙漠化；(7) 森林銳減；(8) 生物多樣性減少；(9) 環境公害；(10) 有毒化學品和危險廢棄物。其中七個直接與化學相關，另外三個間接和化學有關。人類在向大自然不斷索取以滿足自身需要的同時，也造成了嚴重的環境污染。

✧ 1.1.1 全球氣候暖化

全球氣候暖化是大氣中溫室氣體濃度升高所引起的。這些溫室氣體是人類在尋找食物、生活日用品、取暖熱源……等滿足基本生活要求的過程中，以及工業生產活動過程中排放到大氣中的。尤其是工業革命以來，由於人類學會轉變和使用各種不同的能源，使得這種排放不斷加劇。溫室氣體主要有二氧化碳、氮氧化物、天然氣、鹵化烴類等。

據估計，如果按照現在各國二氧化碳排放量增加的速度繼續排放，到了 21 世紀中葉，地球表面的平均溫度將升高 $1.4\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ，兩極冰雪將會快速融化，海平面將上升 $0.25\sim 0.65\text{ m}$ 。由於海平面的上升，勢必使風暴、潮害加劇、洪水威脅增大，導致海水倒流內侵、海岸內縮，這不僅會增大排污的難度，而且使現有的江海堤防工程不能滿足需要，因而減災能力不斷降低。大洋中的一些島嶼和大陸沿海的低窪地就會被海水淹沒。另外，氣候變化還會對農業、林業、水資源、生態環境和人類的的生活、健康等，造成廣泛、長遠而深刻的影響。

✧ 1.1.2 酸雨

酸雨是由於空氣中的酸性氣體，隨雨水的形成而下至地面。這些酸性氣體主要來自於交通運輸、火力發電、家庭生活等燃燒化石燃料的過程而形成，其主要有 SO_x 與 NO_x 等。人類活動排向大氣的 SO_2 及其氧化產物 SO_3 ，在下雨時可能轉化為亞硫酸、硫酸或亞硫酸鹽、硫酸鹽，而 NO_x 則可能轉化為硝酸、硝酸鹽，再加上工業上排放的 HCl 等酸性物質，這對整個大氣層將構成了酸雨的主要成分。幾乎 90% 以上的酸雨是由人類排放的 SO_x 、 NO_x 所生成的。

酸雨對環境與生物體的危害是極為明顯的，受酸雨污染後，湖水、江水、河水甚至連地下水也將呈酸性(由其 pH 值可降至 5.0 以下)，水生生物將受到很大的威脅，甚至會大量死亡。若把酸雨灑在植物上，植物葉子的表皮將直接受到破壞，使植物生長受到妨礙甚至死亡。酸雨落到土壤中，鉀、鈣、磷等一類鹼性營養物質將被沖走，導致土壤肥力下降，影響作物生長。酸雨還嚴重腐蝕建築物、車輛、電線和市政設施等，加速設施的老化，縮短使用壽命甚至造成嚴重的事故。