

物過水留痕

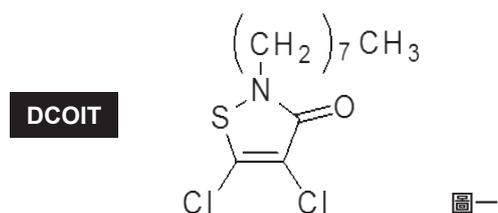
劉廣定

不久前報載一項統計，臺灣每人每年飲用 94.3 杯咖啡。換言之，平均約有四分之一的居民每天喝 1 杯咖啡。也許很多讀者不知道，據估算，全球平均喝的每杯咖啡曾用水 132 公升。也就是說，每天 1 杯咖啡，一年 365 天用了約 48 噸的水！很可觀吧。

不僅是咖啡，其他飲料也用很多水。實際上，製成任何產物都曾消耗水，只是一般多不注意罷了。就如人常說：「船過水無痕」，果真如此嗎？船駛過後一段時間，水面上看起來波平浪靜，色澤如常。然而，這水或多或少都可能被汙染了。另一方面，水中所含的某些雜質也可能或多或少附著在船身上。

舉個實例：通常為了保護船身而在底部上漆，又因防止停泊時水產藻菌等生物集聚而在漆中添加防垢劑（antifouling agent）。早期用的防垢劑為氧化雙三丁錫（ $[(C_4H_9)_3Sn-O-Sn(C_4H_9)_3]$ ，簡稱 TBTO）。後來發現，只要有微量溶於水，濃度達約每公升 1 奈克（1 ng/L）就會有害於蠔類與貝類的生長，特別是外殼有缺陷。改用銅的化學品，其毒性亦有爭議。美國環保署之「永續化學總統挑戰獎」（參閱《科學月刊》33 卷：第 3 期 254-261 頁、第 4 期 344-351 頁，2002 年）第一屆（1996 年）的「設計安全產品獎」是頒給現已與道氏化學公司合併之羅門哈斯（Rohm and Haas）公司，表揚該公司以 4,5-二氯-2-辛基-4-異噻唑啉-3-酮（4,5-dichloro-2-octyl-4-isothiazolin-3-one, DCOIT，圖一，商品名稱為 Sea-Nine 211N）

代替有機錫化合物，因其溶解於水的部分能分解成無毒成分。



因此，凡物過水都是會留痕的。

水痕量—耗水之量

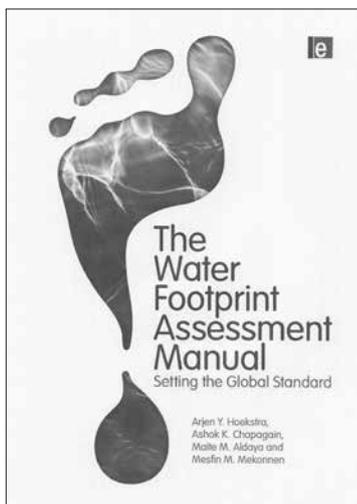
二十一世紀開始不久，荷蘭屯特大學（University of Twente）的 Hoekstra 教授於 2002 年提出了一個衡量直接和間接使用「淡水（freshwater）」的指標——「水痕量（water footprint）」（或譯「水足跡」）新名辭，也是一新觀念，其定義是：在一定時間內個人或社區所消費、利用，或農工商業所生產、供應的所有產品和服務必需的水資源總體積。也就是「耗水之量」，以公升為單位，是衡量直接和間接使用淡水資源的指標。他並將淡水分成三類：

- （1）藍水（blue water）——地表和地下的淡水；
- （2）綠水（green water）——自然界產生（降水）、暫存和蒸散發的水；
- （3）灰水（grey water）——處理生產供應鏈造成汙染所用的水。

此一思考方式比以前考慮永續發展中水的問題時都為完整。例如拙作（《科學月刊》43 卷第 4 期 314-318 頁，2012 年）所介紹荷蘭台夫特技術大學（Delft University of Technology）Sheldon 教授於 1992 年提出化學工業生產過程的「環境因數（E-factor）」，即未考慮「水」或「污水」。

水痕量的觀念提出後，因彌補了以往核算水資源對「耗水之量」只考慮藍水的不足，立即受到各界有識者之關注。這一觀念含有在水的永續發展上一些新思維，如：（1）人類消費方式密切影響淡水的生態系統，及（2）從生產供應鏈能夠全面了解水資源短缺和水污染，同時也影響了人類對水資源管理方式的思考與設計。國際組織「水痕網（Water Footprint Network, WFT）」於 2011 年綜合多位專家之研究成果和意見，由 Hoekstra 教授等四人編輯出版了《水痕量評價手冊》（*The Water Footprint Assessment Manual-Setting the Global Standard*）之修正版。

簡介《水痕量評價手冊》



圖二

此書（封面如圖二）共 225 頁，分八章：

- （1）導論
- （2）水痕量的目標與範圍
- （3）水痕量的核算
- （4）水痕量的永續評論
- （5）響應水痕量的資料庫
- （6）侷限
- （7）未來的挑戰
- （8）結論

能讓讀者對「水痕量」有全面的了解，也介紹了一些新的研究發展，如水污染所引起的灰水痕量的評價方法等。

本書之一特色是具啟發性。因水痕量之發展尚在萌芽階段，有待生根、茁壯，許多工作還屬於探索性而未成熟。作者們於 6、7 兩章提出一些現有的侷限性，以及其所預見之未來發展，可以引導更多的思索和廣泛的研究。

此手冊已譯成多國文字，中譯本名為《水足跡評價手冊》（北京科學出版社，2012 年出版），此譯本 160 頁，但多處為直譯，不甚理想。

一些定義

為了介紹一些生活中用品的水痕量，除上述的水痕量、藍水、綠水與灰水外，再介紹幾個名辭的定義：

抽取水（water abstraction 或 water withdrawal）：從地表或地下抽取的淡水資源量。

實耗水（water consumption）：實際使用的淡水資源量，包含藍水和綠水。

佔用水（water appropriation）：在人類活動中消耗的淡水資源（綠水痕、藍水痕）及造成的淡水污染（灰水痕）。

直接水痕（direct water footprint）：由消

費者或生產者所造成淡水之消耗和污染。

間接水痕 (indirect water footprint)：由製造產品和服務以供消費，或生產者的投入所造成水之消耗和污染。

國外水痕 (external water footprint)：某國進口和消費的產品與服務所消耗他國之淡水資源。

國內水痕 (internal water footprint)：只用國內淡水資源以生產供國民消費的產品與服務。

經營用水痕 (operational water footprint)：經營企業時本身直接消耗和污染的淡水量。

經常用水痕 (overhead water footprint)：維持或支援企業經營之活動與物資所關聯的淡水消耗。

虛水 (virtual-water)：物品於生產過程之整個製造供應鏈所消耗或污染的水。其總體積稱為「虛水(含)量(virtual-water content)」。

出口虛水 (virtual-water export)：出口產品在本地生產過程中消耗或污染的水量。

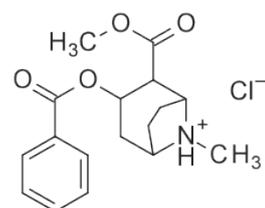
進口虛水 (virtual-water import)：進口產品在外地生產過程中消耗或污染的水量。

交流虛水 (virtual-water flow)：因產品貿易造成由某地區轉移到另一個地區的虛水量，乃水資源的一種移轉方式。

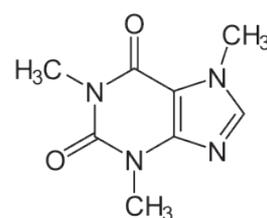
以生產可樂為例

早在公元十六世紀，歐洲的地質學家發現礦泉水喝起來特別清涼解渴，後經研究發現礦泉水常含有二氧化碳。發現氧氣的英國化學家普里斯特萊 (Joseph Priestley) 1768 年發明將二氧化碳直接溶解在水裡的方法 (論文於 1772 年正式發表)，得到與礦泉水同樣的效

果，這便是汽水工業的萌芽。1783 年，德國人 Scheppe 在日內瓦成立公司，開始生產、銷售「碳酸水」——汽水，之後此飲料逐漸在歐美普及。1886 年，原為南軍上校且因作戰受傷而服用嗎啡成癮的 Pemberton 發明了含有古柯鹼 (cocaine，圖三為古柯鹼之鹽酸鹽) 的碳酸飲料——Coca Cola (可口可樂)，宣稱可治癒許多疾病，包括嗎啡成癮、消化不良、神經衰弱、頭痛和陽痿等，故最初是作為藥物出售，後因發現古柯鹼也會使人上癮，1906 年起可口可樂的成分中改用咖啡因 (caffeine，圖四)。1985 年，可口可樂改用塑膠瓶。現在已有多種類似商品，通稱「可樂 (cola)」，是一種最流行的冷飲料。



圖三



圖四

可樂中除二氧化碳和水 (碳酸水)、糖或代糖，各種品牌的其他配方成分則有出入。荷蘭出產的有磷酸、香草精、檸檬油、橙橘油等。由於估算水痕量時直接與間接水痕都須計入，現列荷蘭生產 1 瓶可樂 (通常為 470 毫升，

表一：荷蘭生產 1 瓶 0.5 公升可樂用原料及瓶、箱等物

| 使用物 | | 量 (公克) | 原料 | 來源 |
|------|-------------|--------|-------|-----------|
| 配方成份 | 糖 | 50 | 甜菜 | 伊朗、俄國、荷蘭等 |
| | | | 甘蔗 | 古巴、巴勒斯坦等 |
| | | | 玉米 | 印度、美國等 |
| | 二氧化碳 | 4 | 製氫副產物 | 荷蘭 |
| | 咖啡因 | 0.05 | 咖啡豆 | 哥倫比亞 |
| | 磷酸 | 0.2 | 磷酸鹽石 | 美國 |
| | 香草精 | 0.01 | 香草豆 | 馬達加斯加 |
| 聚酯瓶 | 檸檬油 | 0.007 | 檸檬 | 全球 |
| | 橙橘油 | 0.004 | 橙橘 | 全球 |
| | 瓶體 (聚酯) | 19.5 | 石油 | 全球 |
| | 瓶蓋 (高密度聚乙烯) | 3 | 石油 | 全球 |
| 運貨之需 | 瓶用標籤 (聚丙烯) | 0.3 | 石油 | 全球 |
| | 標籤用膠 | 0.18 | 膠 | 全球 |
| | 貨盤用膠 | 0.015 | 膠 | 全球 |
| | 貨盤紙箱 (紙) | 2.8 | 樹木 | 全球 |
| | 貨盤用薄膜 (聚乙烯) | 1.6 | 石油 | 全球 |
| | 棧板包裝膜 (聚乙烯) | 0.24 | 石油 | 全球 |
| | 棧板標籤 (紙) | 0.003 | 樹木 | 全球 |
| | 棧板 (上漆木) | 0.09 | 樹木 | 全球 |

(取自 Hoekstra 教授所著 *The Water Footprint of Modern Consumer Society* 一書，由 Routledge 公司於 2013 年出版。)

表二：荷蘭一般飲料生產供應鏈之經常性消耗物資 (估算水痕用)

| 經常項目 | 用量 / 單位 | 原料 | 用量 / 單位 | 壽命 | 每年用量 |
|------|---------------|-----|---------------|------|-----------|
| 建築 | 30000 噸 | 水泥 | 30000 噸 | 40 年 | 750 噸 |
| 鋼 | 5000 噸 | 鋼 | 5000 噸 | 20 年 | 250 噸 |
| 紙 | 1 噸 (年) | 木材 | 1 噸 (年) | — | 1 噸 |
| 天然氣 | 65000 GJ (年) | 天然氣 | 65000 GJ (年) | — | 65000 GJ |
| 電力 | 85000 GJ (年) | 數種 | 85000 GJ (年) | — | 85000 GJ |
| 車輛 | 40 輛 | 鋼 | 11.6 噸 (輛) | 10 年 | 46.4 噸 |
| 燃料 | 150000 公升 (年) | 柴油 | 150000 公升 (年) | — | 150000 公升 |

(GJ : gigajoule, 10⁹ 焦耳)

(取自 Hoekstra 教授所著 *The Water Footprint of Modern Consumer Society* 一書，由 Routledge 公司於 2013 年出版。)

表三：1 瓶 0.5 公升可樂所含糖之水痕量 (公升)

| 糖 | | 藍水痕 | 綠水痕 | 灰水痕 | 總水痕 (公升) |
|-----|------|------|-------|------|------------|
| 甜菜糖 | 荷蘭 | 7.0 | 13.6 | 5.4 | 26.0 (最低) |
| | 伊朗 | 82.8 | 5.7 | 10.0 | 98.5 (最高) |
| | 全球平均 | — | — | — | 66.5 |
| 蔗糖 | 秘魯 | 41.3 | 0.0 | 2.6 | 43.9 (最低) |
| | 古巴 | 65.7 | 95.2 | 6.2 | 167.0 (最高) |
| | 全球平均 | — | — | — | 104.5 |
| 玉米糖 | 法國 | 10.1 | 10.0 | 9.2 | 29.3 (最低) |
| | 印度 | 38.2 | 117.9 | 10.2 | 166.2 (最高) |
| | 全球平均 | — | — | — | 61.1 |

簡算為 0.5 公升，以下各表均同) 將造成淡水之消耗和污染，及使用的原料、瓶、箱等物 (表一)。其中採用荷蘭本地原料者，乃計算國內水痕，否則須計算國外水痕。

永續化學與生活

經營用水痕，乃由經營企業時本身生產供應鏈之經常性消耗物資直接消耗和污染的淡水量計算，「表二」為一般規模飲料生產工廠之平均值。

維持或支援企業經營活動與物資等之淡水消耗，例如營業單位之清潔用水、人員之飲食、盥洗用水等，即所謂「經常用水痕」，然一般而言此值相對較低，可以略去。

原料以糖為例，來源、產地不同，水痕各異。「表三」為 Hoekstra 等教授於 2011 及 2012 年發表之部分數據綜合而得，由此可知荷蘭產甜菜糖之總耗水量最低。

「表四」為在荷蘭生產 1 瓶 0.5 公升可樂之總水痕量（或耗水量）的估算，「產銷部分」的「藍水痕」乃指每瓶可樂所含水之大約量。

表四：荷蘭生產 1 瓶 0.5 公升可樂之水痕量（公升）

| 類別 | | 藍水痕 | 綠水痕 | 灰水痕 | 總水痕（公升） |
|------------------|------------|-------|--------|--------|--------------|
| 產銷部分 | 生產 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| | 其他 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 經營部分 | 經營 | 0.5 | 0 | 0 | 0.5 |
| 製造供應部分 （配方用物） | 糖 | 7.0 | 13.6 | 5.4 | 26 |
| | 二氧化碳 | 0.3 | 0 | 0 | 0.3 |
| | 磷酸或檸檬酸 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 咖啡因 | 0 | 52.8 | 0 | 52.8 |
| | 香草精 | 0 | 79.8 | 0 | 79.8 |
| | 檸檬油 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| | 橙橘油 | 0 | 0.9 | 0 | 0.9 |
| 製造供應部分 （其他用物） | 瓶體 - 聚酯 | 0.2 | 0 | 4.4 | 4.6 |
| | 瓶蓋（高密度聚乙烯） | 0.03 | 0 | 0.68 | 0.71 |
| | 瓶用標籤（聚丙烯） | 0.003 | 0 | 0.068 | 0.071 |
| | 貨盤紙箱 | 0 | 1 | 0.5 | 1.5 |
| | 貨盤用薄膜（聚乙烯） | 0.02 | 0 | 0.36 | 0.38 |
| | 棧板包裝膜（聚乙烯） | 0.003 | 0 | 0.054 | 0.057 |
| | 棧板標籤（紙） | 0 | 0.001 | 0.0004 | 0.0014 |
| 棧板（上漆木） | 0 | 0.033 | 0.007 | 0.04 | |
| 經常性消耗 | 建築 | 0 | 0 | 0.005 | 0.005 |
| | 鋼 | 0.004 | 0 | 0.05 | 0.054 |
| | 紙 | 0 | 0.0012 | 0.0004 | 0.0016 |
| | 天然氣 | 0 | 0 | 0.024 | 0.024 |
| | 電力 | 0 | 0 | 0.13 | 0.13 |
| | 車輛 | 0.001 | 0 | 0.009 | 0.01 |
| | 燃料 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| 總水痕（耗水量） | | | | | 168.4 |

（取自 Hoekstra 教授所著 *The Water Footprint of Modern Consumer Society* 一書，由 Routledge 公司於 2013 年出版。）

故知在荷蘭，每瓶 0.5 公升可樂之總水痕量（或耗水量）為 168.4 公升。關於其他飲料等之水痕量，限於篇幅，以後再予報導。

劉廣定

臺灣大學化學系名譽教授