

認識水的另一面

劉廣定

《科學月刊》近幾年有好幾篇文章介紹水的各種性質，已選錄於《益智化學續編》（臺灣商務印書館 2014 年 4 月出版）。不久前，讀到一篇今年三月發表於 *Clean Techn. Environ. Policy* (2014) 16: 591-600 有關紡織工業用水回收處理後再用的研究報告，乃思介紹另一與水資源有關的永續發展課題，希讀者認識水的另一面。

大家必須知道，當前的許多紡織工業在漂白、印染、清洗等過程都會產生污水。在永續發展和環境保護的要求下，高效率的汙染廢水處理已成為紡織工業的熱門研發課題。上述論文的六位作者中，五位在巴西聖卡塔琳娜州（Santa Catarina）大學的化學及食品工程系工作。他們發現在 45°C，41 巴（bar）的條件下，利用孔徑 1 nm 以下的聚醯胺奈米濾膜（nanofiltration membrane）NF90 與 DK，幾乎可除去紡織工業廢水中所有的汙染物。已除去汙染物的工業廢水排放後將不會造成公害，甚至可以回收再利用。其實，許多國家和巴西一樣，對於工業廢水之處理甚為重視。近年來，從廢水中回收水以循環利用，更因追求永續發展而漸成科技發展之一重點。然在臺灣，工業廢水常遭胡亂排放，遑論回收利用！

筆者在本刊 2012 年 4 月號（頁 314~318）介紹人類生活與工業都會製造大量廢棄物，同年 6 月號（頁 474~477）又介紹了廢棄物之回

收與再利用。現又談「水」的回收及再利用，那麼，讀者也許會問：用過的「水」也是「廢棄物」嗎？答案為實際就是如此，只是以往我們多誤認為「水」是取之不盡、用之不竭的資源，未予考慮罷了。即使以前所介紹荷蘭 Delft 技術大學 Sheldon 教授 1992 年所訂「環境因數」（E-factor）時，也未將水的消耗量計算在內。

水與淡水

地球約 70% 是水，總體積約 326 百萬兆（million trillion, 10^{18} ）加侖，或 1234 百萬兆公升（L）。唯其中 98% 是鹽分超過 1% 的「鹽水」，只約 2% 為含鹽類及其他物質低於 1% 的「淡水（freshwater）」，故地球乃一「鹽水星球（salt water planet）」。淡水中又有接近 70% 乃冰封在南北極的冰山與冰川中，故理論上只有約 7.5 百萬兆公升可供地球上的生物利用。然實際上更少，因為有許多「淡水」是儲存在人煙稀少處，如約 20% 在俄國西伯利亞的貝加爾湖中；而只有約四分之一的雨雪是降於人口超過全球三分之二的地區。再者，溫室效應導致地球暖化，而淡水的蒸發量也變多。整個地球是一封閉的系統，其中水的量可視如不變。但全世界人口愈來愈多，據統計：1961 年 30 億，1987 年 7 月 50 億，2011 年 10 月 70 億，今（2014）年 5 月已逾 72.3 億。據



圖一：
(A) 婦女常須走幾公里取水。
(B) 許多地區無淨水可用。



2012 年聯合國估計，2050 年世界人口可能將有 92.3 億！人口增多，農工業須增產，因而生活垃圾與廢棄物也隨之增加，水汙染的情況，也愈來愈嚴重，平均每人可分配到「淨水」（潔淨的淡水）將日益降低，故必須有所作為。

人體約 60~70% 是水，各器官都需要水以維持正常生理運作，平均每人應攝取 2 公升水才夠。專家估計平均每人每天生活用的「淨水」至少需 20 公升。雖 1981~1990 聯合國的「飲用水十年行動」使約 10 億人口有了「淨水」，但是現仍有接近 8 億人沒有潔淨的飲用水，以至每天有約四千個兒童因而得病死亡。

據聯合國估計：2025 年全球將有 18 億人缺乏用水；屬於開發中國家的 50% 人口和屬於已開發國家的 18% 人口，即約三分之二的人可能因感受缺水之壓力而緊張。故必須及早採取行動，以為預防。

世界水日

約自 1990 年代開始，國際相關的組織已察覺許多缺水地區居民的衛生和健康問題非常嚴重，例如每天因無潔淨飲用水而得病死亡的兒童有好幾千；其他地區缺水的壓力也日益增大（圖一）。第 47 屆聯合國大會 1993 年元月 18 日通過 47/193 號決議，根據 1992 年

歷年世界水日之主題

1994

關心水資源是每個人的事
Caring for Our Water Resources Is Everyone's Business

1995

女性和水
Women and Water

1996

解決城市用水之急
Water for thirsty cities

1997

世界上的水夠用嗎？
The World's Water: Is There Enough?

1998

地下水—隱形的資源
Ground water—invisible resource

1999

讓每個人都有水用
Everyone lives downstream

2000

21世紀的水
Water for the 21st Century

2001

水和健康
Water and Health

2002

發展用水
Water for Development

2003

未來之水
Water for Future

2004

水和災害
Water and Disasters

2005

生活用水的十年
Water for Life 2005~2015

2006

水與文化
Water and Culture

2007

對付缺水
Coping with Water Scarcity

2008

水之衛生
Sanitation

2009

共享的水—共享的機會
Shared Waters—Shared Opportunities

6月在巴西里約熱內盧舉行的「環境與發展會議」所通過的「二十一世紀待辦事項」第18章之建議，1993年3月22日宣告每年該日為「世界水日」(World Water Day)。宗旨在推動進行水資源之統籌規劃和管理，加強水資源保護，解決日趨嚴重的缺水問題，以及藉廣泛宣傳提高民眾對開發與保護水資源的認識。

由於臺灣一般不重視水的教育，也少人知道「世界水日」，所以列出1994年起每年世界水日之主題如表，以便讀者略知一些水與民生的關係。

為了配合「聯合國千禧年發展目標」(UN Millennium Development Goals, MDG)聯合國大會於2003年12月將2005~2015年定為**生活用水行動的十年**(Decade for Action)，就糧食安全、疾病預防、健康、環境、能源、缺水、衛生、文化等課題分年開始進行。水之淨化與節約是目標之一，臺灣似也少人注意。

水之淨化

人類必須飲用「淡水」，而且必須是「淨水」，才能避免由細菌、病毒、寄生蟲等感染疾病，及因毒性離子和微粒而有礙健康。我國古代即以明礬去除水中一部分雜質，供飲用的則再予煮沸。現代文明進步地區有潔淨的自來水可用，至多再以煮沸，或經離子交換樹脂處理，以確保安全。但還有許多無自來水可用的地區，供應足夠的「淨水」給民眾是亟待求解的難題。目前由於種種因素，如無「淨水」處也多無「電力」供應，故除了加強水源的保護與管制外，尚缺可普及的適當去除毒性離子方法。至於其他的有害物質之去除，則有符合永續化學原則的日照法和過濾法兩種通常所謂的「消毒法(Disinfection)」。

日照法適用於陽光充沛的地區。以陽光消毒之原理可分利用熱和利用光兩類。藉透鏡

2010
清潔水源與健康世界
Clean Water for a Healthy World

2011
城市水資源管理
Water for Cities

2012
水和糧食安全
Water and Food Security:
The World is Thirsty Because We are Hungry

2013
國際水合作年
International Year of Water Cooperation

2014
水和能源
Water and Energy



圖二：印尼小學生學習 SODIS 保特瓶淨水方法。

或反射鏡聚光發熱，可使水溫升到 70~100°C 以消毒。也可藉陽光中的較長波紫外線 UVA（波長 320~400 nm）消毒。前者較快完成，但需要一些設備。後者稍慢（至少幾小時），但除保特瓶（PET，聚對苯二甲酸乙二酯）容器外，不需其他設備，故可廣泛應用而已實際在南非、肯亞與贊比亞三國試驗成功。現這種利用陽光中 UVA 與保特瓶殺死水中細菌、病毒、寄生蟲等的消毒法特稱 SODIS，為 Solar water disinfection 之縮寫。乃本世紀初由瑞士、英國、愛爾蘭、西班牙與上述三個國家共同研發成功。得知不同緯度，不同日照強度地區消毒所需時間；以及證明添加 10 ppm 過氧化氫於已消毒的水中，可以防止細菌再生。目前已向其他缺乏「淨水」之地區推廣此法（圖二）。

另一種是過濾法。2005 年由瑞士一家原本製造紡織品的 Vestergaard Frandsen 家族公司，生產了一種可普遍用於不同無「淨水」地



圖三：「救生桿」及使用實例。

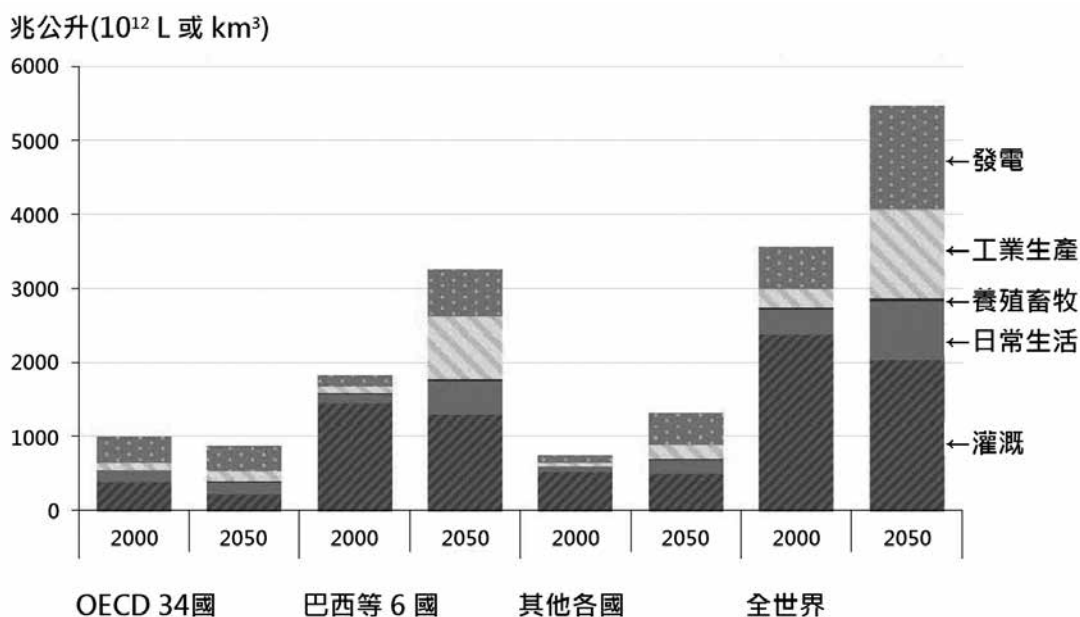
區，名為「救生桿 (Life® Straw)」的塑膠過濾管。以口吸的方式，使汙水經過孔徑自 80 μm (微米) 遞降到 0.2 μm (200 奈米) 紡織品類材料製成的濾層，而除去水中之細菌與寄生蟲 (圖三)。三年後該公司又生產了有雙重濾層的「家庭救生桿 (LifeStraw® Family)」，濾層的最小孔徑達 0.02 μm (20 奈米)，需要抽氣機助其過濾，但連病毒皆可除去。過濾效果為寄生蟲 99.99%，病毒 99.999%，細菌 99.9999%。《經濟學人 (The Economist)》雜誌 2009 年頒給該產品「社會與經濟創新獎」(Social and Economic Innovation Award)。

有了過濾用水，再加上推廣衛生教育，減少許多因汙水傳染的疾病。例如非洲流行的「幾內亞線蟲病」自 1986 年每年 350 萬個病例，減少到 2010 年 1800 個。更須一提的是，Vestergaard Frandsen 公司將用過的濾層和塑膠濾管回收後，可再製成多種日常用品，充分體現了追求永續發展的精神。

水之消耗

現代人類所用淡水約可分三大類：民生用水、農業用水和工業用水。農業用水主要是用於灌溉、養殖與畜牧。工業上則有產生蒸汽動力、生產製造及冷卻用水等。據世界銀行統計 2011 年全球平均約 12% 為民生用水，70% 為農業用水，18% 為工業用水。各國情況也不同。例如農業用水，德國、荷蘭、比利時只佔約 1%，法國、加拿大佔 12%，美國佔 40%，巴西 55%，澳洲 74%，印度則高達 90%。工業用水，德國、荷蘭、比利時佔 84~88%，法國和加拿大 69%，美國 44%，巴西 17%，澳洲 11%，印度則僅 2%。工業興盛國家工業用水比例高，消耗量也大，故常需要從廢水中回收水，循環利用。即使是水資源豐富之地，也不應例外。能未雨綢繆，如前述巴西之例，尤宜效法。

化學品及其相關產品、金屬及其相關產品、造紙等工業都是水的主要消費者。這些工



圖四：全世界 2000 年 (實際) 與 2050 年 (估計) 需水量。

業乃用水為反應溶劑，加工、冷卻、或產生蒸汽，回收再用可以降低消耗量，也減少對環境的汙染。廢水再利用所需之處理方式依其來源或用途而定，若含有毒物質則必須用適當方法除去。例如重金屬及其他有毒離子可用離子交換法，沉澱法或用前文所述之奈米濾膜將其除去，又有些有機物可用細菌生物分解而除去。許多增進效率的新方法，都在研究開發中。

國際經合組織 (OECD) 2012 年曾預估，如果按照目前的發展趨勢而無新對策的話，2050 年全球的淡水取量 (freshwater withdrawals) 將從 2000 年的約 3.6 兆 (10^{12}) 噸增加 55% 成為約 5.5 兆噸。其中工業製造用水約增為 4 倍，民生用水增加 30%，發電用水增加 40%。發電用水是以往未受重視的一項消耗。火力發電必須用水；產生動力的原料包括開煤礦、取天然氣與頁岩油、及栽育生質能源，也都必須用水。反核電者知道嗎？圖四取自 OECD 的報告 *Environmental Outlook to 2050* (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>)，分 OECD 國家，巴西、俄羅斯、印度、印尼、中國和南非等六國，其他各國，以及全世界總和四組，顯示其「發電」、「工業生產」、「養殖畜牧」、「日常生活」與「灌溉」用的淡水取量。

節約用水

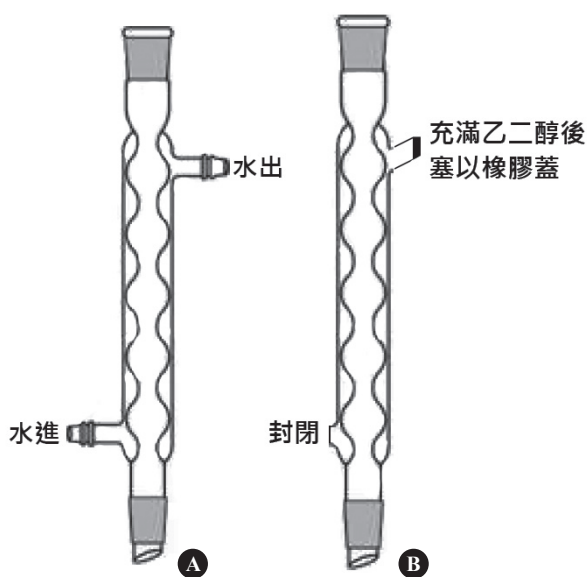
據 2013 年的統計，全世界有約 20 億人缺乏足夠衛生的生活用水，而包括北賽普魯斯共有 37 國嚴重缺乏淡水。其中新加坡和以色列因擁有高科技和優良制度而自有解決辦法。例如新加坡 40% 的水自馬來西亞進口，30% 乃回收再用水，20% 為收集的雨水，10% 為淡化的海水。其他則多為亞、非和拉丁美洲的一

些較落後地區，有待他人協助。

由於人口增加，消耗範圍擴大，平均每人每年可用的水量逐年減少。再者，生產「淨水」也需要電力能源。據聯合國 2014 年所發布配合「世界水日」活動的「世界水發展報告書」 (*World Water Development Report 2014*)，供應 1 噸可安全使用的民生用水，所需之電力依水源不同而異。該報告第一冊頁 24 列有以下數據：湖泊河川，0.37 度 (kWh)；地下水，0.48 度；廢水處理，0.62~0.87 度；廢水再用，1.0~2.5 度；海水，2.58~8.5 度。美國環保署曾報告，每年處理公共用水需用 560 億度的電！其他國家應也差不多。因此，大家都應節約用水。不但民生用水，各方面都應節約用水。

去年 12 月，美國化學會的《永續化學與工程學刊》 (*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*) 發表了兩篇改良「冷凝管」的報告。化學實驗室所用冷卻蒸氣的簡單型冷凝管分兩類：若液體沸點約在 150°C 或更高，以空氣冷卻其蒸氣即可；若液體沸點低於 150°C，則須用水來冷卻。水冷式冷凝管如 Allihn 型 (圖五 A) 或其他型都需要用很多水，每分鐘 1~4 公升 (L) 或每小時 60~240 L。試算一下：有機化學研究室做一次隔夜的迴流反應，14 小時就耗用 840~3360 L 的水；40 組的學生實驗室做 1 小時蒸餾實驗，冷凝用水至少需要 2400 L。是否應考慮節約呢？

現介紹上述兩篇報告中之一 (該學刊頁 1502~1505)。其作者們將 Allihn 型冷凝管修改 (圖五 B)，下方入水口截斷封閉，上方出水口移轉 45°，由此注入乙二醇，再封以血清塞。利用乙二醇高沸點 (195°C) 及高熱容量 149.5 J/mol K (水為 75.3 J/mol K) 的特性，



圖五：(A) Allihn 水冷凝管圖
(B) 乙二醇凝管

則乙二醇吸熱，使迴流溶劑的蒸氣冷卻，又藉冷凝管外流動的空氣散熱而本身降溫，故可為冷凝之用。結果發現冷凝效果甚佳，此封存有乙二醇的 Allihn 型冷凝管可以反覆使用，應可代替水冷式的各種冷凝管。

最後，必須告訴讀者：臺灣也面臨水資源逐漸匱乏之困境，因此節約用水極為重要。三年前駱尚廉教授已指出（本刊 2011 年 3 月號頁 172~173）：一般家用 14 公斤的洗衣機，每次用水量約為 260 L，但同樣大小的環保洗衣機用水量僅需 130 L，可以節省約一半的洗衣用水，且用電量也低。故水電費用均可節省。唯使用比例不高，表示臺灣的永續發展之相關教育落後，亟待加強。

劉廣定

臺灣大學化學系名譽教授

National Education Radio
教育電台
聲動全世界

國立教育廣播電台
National Education Radio

科學月刊
SCIENCE MONTHLY

金鐘獎肯定的優質電台—值得您收聽
金鼎獎肯定的刊物—值得您閱讀

教育電台 《科學so easy》

於每月第二個星期六下午2:05~3:00
製播科學月刊專題

全國調頻網播出

(台北、高雄FM101.7，餘詳見電台網站www.ner.gov.tw)