

二十一世紀的環境危機： 陽光與空氣 I

• 劉雅章

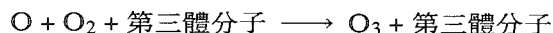
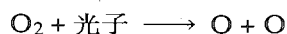
陽光和空氣向來是人類認為恆古常新，取之無盡，用之不竭，最可貴、可靠而又不必為之付出任何代價的東西。但自從十九世紀工業革命以來，隨着人口的激增以及人類經濟的起飛，這種想法就漸漸站不住腳了。為了迅速地追求工業發展，一百多年來，人類不計後果把各種工業過程中產生的廢氣大量排放到大氣層裏，滿以為擴散和分解作用自然會令這些氣體消失於無形。但事實證明，許多廢氣長期留存在大氣層中，令致它們的濃度有顯著的增加，而且開始直接影響到大氣與陽光之間一些重要的互動關係。可以說，陽光和空氣都不再單純為生命帶來幸福，反而可能成為下一世紀環境危機的根源了。

這危機的導火線是臭氧層的消失和大氣溫度的上升，也就是所謂「臭氧洞」和「溫室效應」的問題。我們在本文第一部分先討論臭氧洞，在四月間發表的第二部分則討論溫室效應問題。

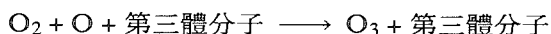
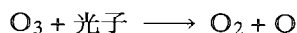
極地的戲劇性發現

也許，最戲劇性而又最令人類感到直接威脅的大氣問題，就是1985年發現的臭氧洞。臭氧(ozone, 或 O_3)是比普通氧氣分子(O_2)多一個氧原子(O)構成的

分子。大氣中的天然臭氧是通過以下的光化作用產生的：



它大部分存在於15至45公里高度之間的所謂「平流層」(stratosphere)。這層大氣是極之穩定的，差不多完全沒有我們所熟悉的種種風暴雨雪等現象，這兒的空氣運動主要是沿着平面進行，垂直上下的運動則屬微乎其微。平流層的空氣是十分稀薄的，臭氧在這麼稀薄的高空，卻只佔空氣體積的百萬分之十左右。但也就是這分量極微的臭氧分子通過下列週而復始的連鎖反應：



把太陽光之中的高能量部分，即紫外光(波長在0.4微米以下)，幾乎完全吸收，使得照耀地面的陽光，不再含有能引起皮膚癌、免疫系統疾病、眼球白內障和影響海洋生態環境的紫外線。所以，稀薄的臭氧層，事實上是人類和生態系統一張無形的保護傘。沒有了這張保護傘，陽光就成為猛烈、有害的輻射了。

從1957年的「國際地球物理年」開始，人類就已經在南極附近開始用地面儀器探測大氣中的臭氧含量。在開始二十年間，每年探測結果顯示臭氧濃度只有很微量的變化。但到1985年，就傳來了令科學界震驚的消息：在哈里灣(Halley Bay)探測站(南緯77度，西經27度)的英國南極探測隊宣佈：從70年代中期到80年代中期這十年間，在該站上空的大氣層已失去了三分之一的臭氧。但這臭氧密度的劇降只出現於南半球每年的早春(九至十月)季節，兩個月之後即回復正常水平。其實，這現象在1985年之前早就可以由安裝在氣象衛星的觀測儀查察出來，然而，這樣嚴重的臭氧損失似乎太過離奇，所以處理衛星資料的科學家都一貫忽視了低臭氧讀數。事後重新審查全球衛星資料，證實這低臭氧現象不限於哈里灣上空，而是遍及於整個南極洲，即和中國那麼大的一塊面積。基本上，每逢春季南半球上空的臭氧層中就出現一個巨大的洞，而且情況每年惡化(見本文之前彩頁第4版)。1993年10月的最新衛星探測顯示，南極洲臭氧密度已降到新低點：超過三分之二(即相等於大約五千萬公噸)的臭氧已經消失了！

理論紛紜

臭氧洞一旦發現，科學家就動員起來紛紛尋求這現象的成因。當時一共有

三種不同解釋：太陽周期說、大氣輸運說，以及一個和氯氣反應有關的化學理論。

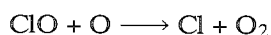
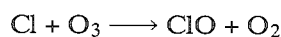
太陽周期說的推測是，周期為11或22年的太陽表面黑子活動可能影響照耀大氣上層的陽光光譜，因而增加了某些會破壞臭氧的氮化合物。然而，南極洲上空臭氧讀數並沒有明顯11或者22年周期的跡象，而且在大氣中對有關氮化合物的實測也和預期不符，所以這一說站不住腳。大氣輸運說的主要論點則是大氣環流變動引致缺臭氧的氣層被推入極帶上空，從而稀化該處的臭氧層。但各種大氣指標（例如溫度分佈）的觀察資料卻顯示南極洲上空的氣流並沒有出現過任何大規模的系統性變化，因此，這一說也就不能成立。這樣，就只剩下那個涉及氯氣化學作用的解釋了。

在1986和1987年，數十位來自世界各地的科學家冒着酷苦的嚴寒，集中到南極洲和智利南端的研究基地，利用衛星、地面儀器、氣球、高空探測飛機等各種工具作了大量觀測，以求澄清臭氧洞的化學和動力結構（作者工作的研究機構，就有一位傑出的青年女性科學家策劃這次大規模探測）。通過仔細分析探測所得數據，並且與電腦計算模擬以及化學實驗室中所作的許多量度結果比較，終於證實上述最後一個假設——即氯原子與臭氧之間的化學作用——可以滿意解釋臭氧洞的成因。

罪魁禍首

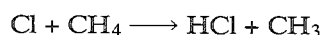
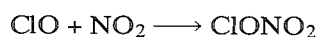
事實上，平流層中的氯原子只有一個主要根源，即人造的氯氟碳化合物（chlorofluorocarbons，簡稱CFC）。顧名思義，CFC就是由氯、氟、碳三種元素以不同比例結合而成的分子系列。它可以說是現代化學工業的神奇產品：有可壓性、高度穩定、無毒、無腐蝕性、無可燃性。因此，就自然地在許多不同工業運作上大派用場。例如作為壓縮罐噴劑、冷凝劑、產製塑料絕緣體時的吹噴氣體以及清潔電子板的溶劑等等，CFC都是十分理想的流載體。自從1930年代以來，為各種工業用途而製造的CFC大約一共有一千五百萬至二千萬公噸，而在1980年代的生產率則達到每年一百萬公噸左右，這些CFC分子最終都排放到空氣中去。而一旦進入了大氣層，這些出奇穩定的特殊分子就可能留存一個世紀也不會消失。因此，它們有機會被氣流傳送到同樣穩定的平流層，這時它的破壞性就顯現出來了。

在平流層中，猛烈的太陽紫外光有足夠能量分解在一般環境中十分穩定的CFC分子，從而釋放出帶有高度反應能力的單氯原子(Cl)。在早期的推論中，這氯原子和臭氧會產生下列的連串反應：



這樣，游離的氯原子濃度始終不會減少，而臭氧則不斷遭受破壞。事實上，氯和一氧化氯(ClO)成為了令臭氧轉變為普通氧分子的催化劑。

可是，這個理論忽略了一點：平流層中其他化合物(例如二氧化氮NO₂和甲烷CH₄)同樣會和氯原子以及一氧化氯化合。平流層的氮化物主要來自泥土裏腐蝕作用以及人工肥田料產生的氧化亞氮(N₂O)。而甲烷則來自各類農牧活動和天然氣的消耗。這兩種氣體在平流層裏雖然只是微量化合物，但它們都可能通過下列作用而「俘獲」氯原子和一氧化氯，令它們轉化為反應能力很低的硝酸氯(ClONO₂)和鹽酸(HCl)：



這樣，氯原子破壞臭氧的連續反應鏈就中斷，氯原子都被「拘禁」起來，而臭氧層的破壞也就停止了。因此，要充分解釋臭氧洞的出現，必須先找出一些機制，令氮化物干擾作用遭受制止，或者使氯原子脫離硝酸氯和鹽酸分子的束縛。同時，為甚麼臭氧洞只在南極洲上空，而且只在當地春季出現，也是必須解釋清楚的。

雲層的作用

尋找這個化學反應拼圖遊戲的答案，關鍵在於抓住臭氧洞出現的特殊位置和時間這個線索。在漫長的南極冬季(六至八月)，南極洲上的平流層是完全黑暗，不見陽光的。同時，有一股順時鐘方向的強烈氣旋圍繞着南極。這環流系統的半徑達2,000餘公里，風速達每小時數百公里。這個氣象學上所謂的環極渦旋(circumpolar vortex)，基本上成為有效阻隔南極冷空氣和較低緯度暖空氣的一道牆壁(圖1)。沒有陽光和與暖空氣絕緣這兩個因素，使得南極洲上空成為平流層中最寒冷的部分：這兒的溫度往往低到攝氏零下80度。在平時，由於缺乏水氣以及高度穩定，平流層一般無雲。但南極冬季的極低溫度容許微量的水氣和硝酸凝結成「極帶平流雲」。其中由水氣構成的雲層也稱為「珍珠雲」，因為由冰晶折射所形成的彩霞璀璨猶如貝殼上的色彩。

極帶平流雲有兩個作用。第一，周圍大氣中的硝酸會凝結在雲中微粒上，然後以雪的形式降落地面；同時，大氣中其他活性氮化物也在雲片上凝結成比較穩定的狀態。這個作用令氮化物與單氯原子的作用減少，後者破壞臭氧的機會也隨之增加。第二，鹽酸凝固在雲微粒表面之後，它和硝酸氯分子的反應速

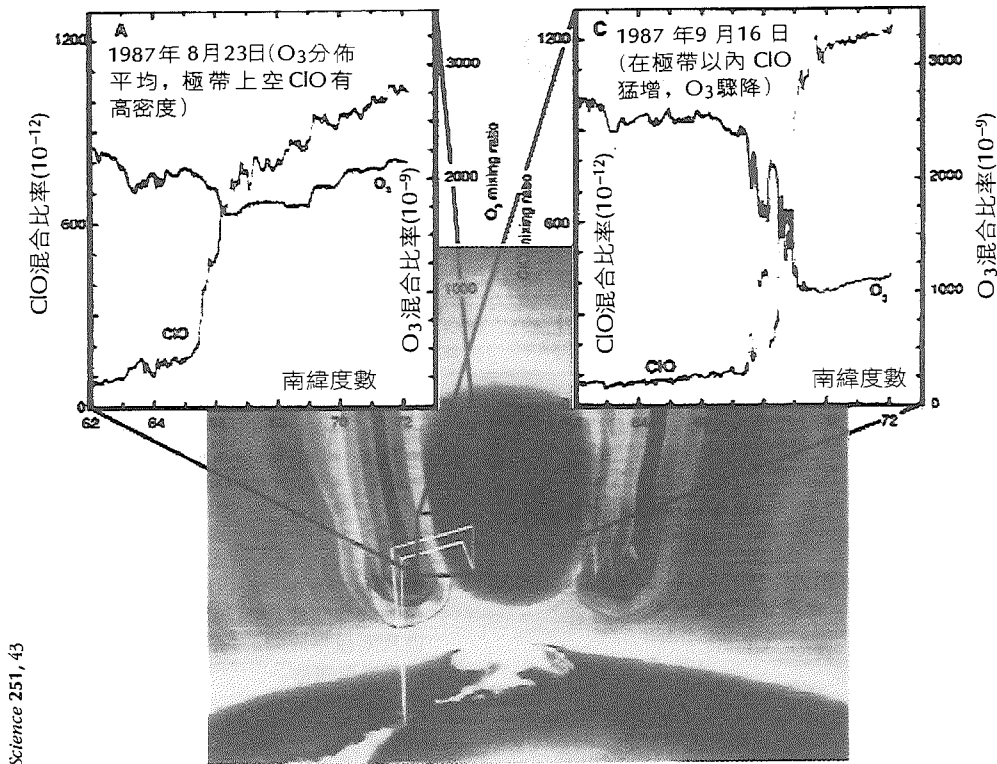
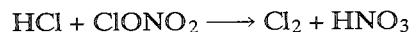


圖1 南極上空的強烈環流氣旋以及在極帶平流層中ClO以及O₃兩種分子比率戲劇性變化示意圖。

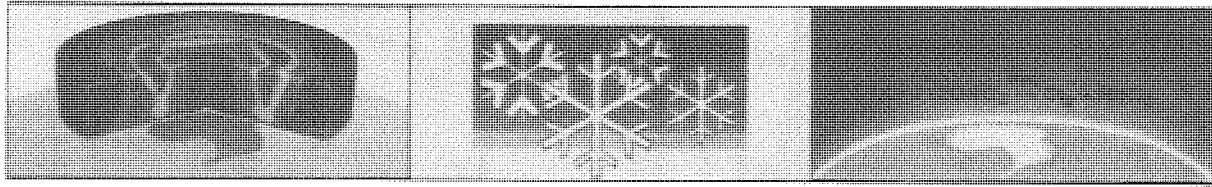
率會大大增加，遠超過兩者都是氣體分子的時候，而反應的結果則是把兩者的氯釋放出來，從而增加了氯氣對臭氧進行破壞的可能性：



所以，平流雲在南極漫長而嚴寒的冬季一旦形成，極帶上空的游離氯原子和分子濃度，就急速上升。當南極圈早春(九月)陽光再次照耀平流層的時候，氯分子就立刻藉陽光中的紫外線而分解為單氯原子，然後臭氧的破壞就急速進行，從而引致臭氧洞的出現了(圖2)。事實上，臭氧洞是一個有時間性的動態現象：南半球夏季來臨之後，平流雲層逐漸消失，氯原子重又被「拘禁」在穩定的硝酸氯以及鹽酸儲存庫之中；同時，季節回暖之後，環極渦旋開始消失，周圍臭氧和活性氮化物含量較高的暖空氣開始湧進極帶，和當地缺臭氧的空氣混合，這樣臭氧洞很快就消失了。它的壽命那麼短暫，是和以上兩個因素都有關係的。

北極臭氧洞？

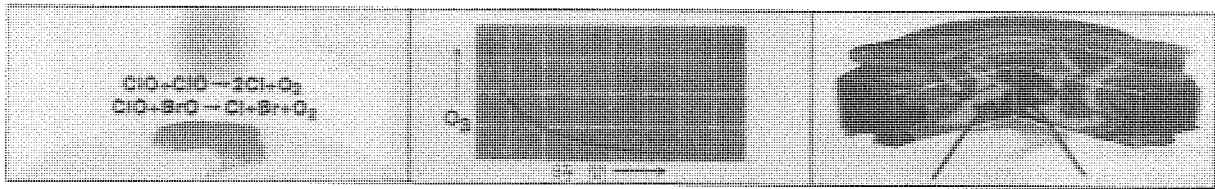
作為南極上空的周期性現象，臭氧洞的出現是十分戲劇性，十分驚人的。所幸在南極洲居住的人(包括科學工作者和遊客!)畢竟還只是極少數，所以臭



六月
南極冬季開始，渦旋形成，溫度降低，使雲層出現。

七月
極帶平流雲層藉凝結過程在平流層產生去氮及脫水作用。鹽酸與硝酸氯在雲層表面作用，釋放氯原子。

八月
冬季氣溫降到最低點。



九月
陽光再次照射渦旋中心，春天開始。由於氣溫上升，極帶平流雲層隨之消失。

ClO—ClO及ClO—BrO的催化反應，使臭氧受到破壞。

十月
臭氧量降至最低點。

十一月
極地渦旋消散，中緯帶高臭氧量空氣流入南極平流層，同時低臭氧量空氣向南半球擴散。

圖2 臭氧洞形成過程示意圖

氧洞的危害在時間、空間上都有其獨特的局限性。然而，南極臭氧洞在溫暖季節來臨時解體，等於說它上空缺臭氧的空氣北移，進入緯度較低的周圍地區，所以南美洲、澳洲和南非人對這事情開始關注是可以理解的。至於住在北半球的人，亦不免要擔心北極是否會在三、四月春間出現和南半球相類的現象。幸而北半球的地形和南半球不同：南半球的環極渦旋基本上是在南極洲周圍平滑的南極洋海面上出現，所以不太受地形的阻礙而可以發展到極高速度，而且其風向差不多在每一個經度都是從西向東的；至於北半球的環極渦旋卻要經過北美洲、大西洋、歐亞大陸和太平洋，所以不但感受着強烈的海陸分差，而且處於北半球的大型山脈(如青藏高原和洛磯山脈)對氣流亦產生阻撓和其他動力作用。所以，北半球的環極渦旋要弱得多，風向也沒有那麼規則，往往受地勢影響而擺動(圖3)。因此，即使在冬季，低緯度的暖氣還是不時會進入極帶，使北極冬季氣溫比南極高出攝氏10至15度。由於這樣，北極平流層就很難形成雲層，從而令活性的氮化物可以「拘禁」氯分子，壓制它破壞臭氧的作用。實際探測顯示，北極的臭氧層其實也遭受着破壞，只不過它的臭氧含量比正常時下降僅一成左右，所以才沒有令人那麼震驚罷了。隨着北半球臭氧的減少，在過去四年間的探測已證實加拿大多倫多市每年冬季短波紫外線已經有高達35%的增加。另一方面，在過去數十年間，平流層的溫度一直持續下降，假如這趨勢不改變的話，那麼至終北極也可能出現較嚴重的臭氧流失的。

況且，從全球大氣臭氧層的觀點看，臭氧洞的出現會引致平流層臭氧含量

Data courtesy of A.H. Coort, Geophysical Fluid Dynamics Lab.

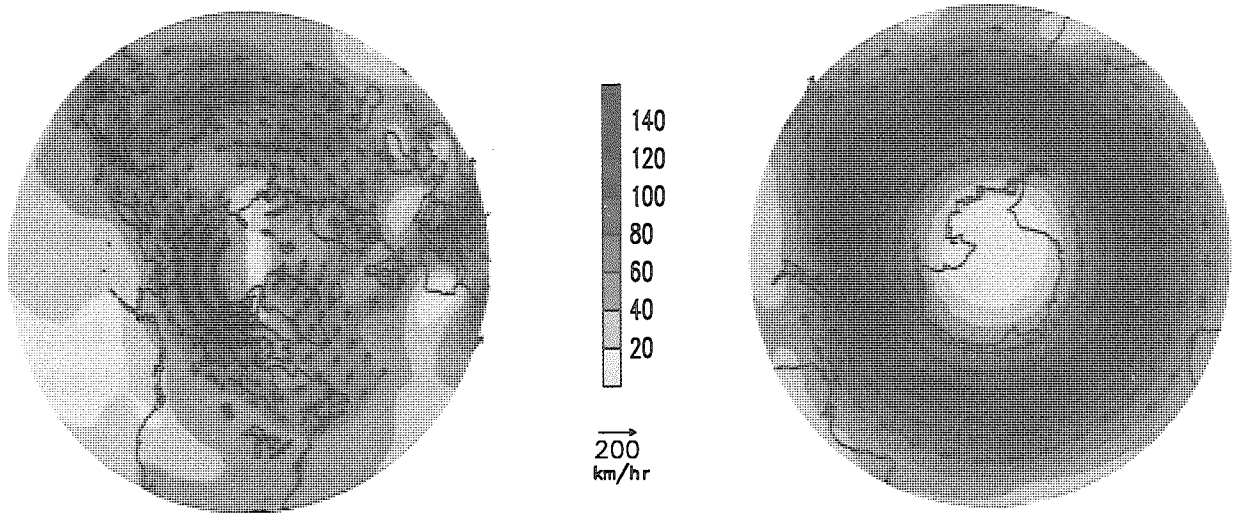


圖3 以氣象氣球長期實測所得北半球(左)和南半球(右)冬季在20公里高空的風向(箭頭)和風速(箭頭長短及色調深淺)分佈。注意南極洲上空成完整環形的強烈氣旋, 以及超過125km/hr的風速。

的整體下降。假如目前的臭氧破壞機制沒有改變, 也就是說臭氧洞年年出現, 那麼在未來的幾十年之內, 臭氧層的密度就可能有顯著改變, 而它對人類和自然環境的保護作用也將大打折扣了。所以, 臭氧洞已經成為一個非常迫切的環保問題。

回顧與前瞻

早在70年代中期, 大氣化學家就已經指出CFC化合物對平流層臭氧的可能影響。當時雖然有關理論並不確實, 但加拿大、瑞典、美國等國已經開始考慮禁止CFC的非必需應用, 例如是噴髮膠和除臭劑噴罐一類的商品。十年後, 當南極臭氧洞已確實測定, 而且CFC化合物也判定為禍首之後, 世界各國就立即開始商討補救辦法, 並在1987年簽訂「有關破壞臭氧層物質蒙特利爾國際公約」。根據公約, 許多工業國家同意在公元2000年之前將CFC化合物的釋放率減到1986年水平的一半。到了1990年, CFC的罪證愈加確定, 因此上述同樣國家在倫敦又再開會, 這次他們都決定在2000年之前完全禁絕CFC的產製了。在1992年, 禁絕CFC生產的期限更進一步推前至1996年。同時, 主要的化學公司也立即開始發展這些化合物的替用品。

雖是如此, 人類在今後數十年間還是不免要受臭氧洞的影響, 因為一方面已經進入平流層的氯氣還有長達百年的壽命, 這些氯氣最終會隨着鹽酸等儲藏庫被氣流及降水過程帶回大氣低層。另一方面我們家裏的舊冷氣機和電冰箱還會繼續把CFC釋放到大氣中去。

無論如何, 臭氧洞的問題我們現在已經充分了解, 並且獲得至終解決的辦

法。回想1986年(即臭氧洞發現後一年)筆者在香港中文大學初次就這個題目在研討會上作報告的時候，由於當時科學界對這個現象認識尚淺，所以只能夠為與會者作一個很簡略的描述。在其後短短八年間，我們仔細研究了許多可能的假設，修正了一些理論，發起了多次大規模的探測，在實驗室中做了許多仔細的化學實驗，並且用電子計算機作了模擬實驗。在這個「百花齊放」的時期，科學界對各種相競的理論都顯示出高度容忍態度。最後，當環極渦旋—平流雲層—CFC化合物三者組合成為領先理論的時候，它順利地為科學界所接受，並沒有引起不同理論之間的對壘。同樣，一旦科學界達成明確共識，各國政治領袖也就立即訂立適當管制法令：蒙特利爾公約可以說是針對特定環境問題的第一個普遍性國際條約，深具歷史意義。

工業革命所造成的環境污染誠然令我們感到頭痛而又棘手。臭氧洞的故事卻是例外：它可以說是科學家和政策釐定者以互助、互信的精神衷誠合作，迅速、有效和忘我地共同解決地球危機的一個光輝榜樣，是科學和政治良好結合的典範。但同樣的精神是否一定可以應用到其他環境問題上去，達成同樣成功的解決方法？這就有待我們進一步的認知和努力了。

鳴謝：本文內容取錄自作者於1993年底以楊振寧訪問學人身份在香港中文大學發表的其中兩個演講，在撰寫和整理過程中，承蒙陳方正博士給予多方面的幫助和鼓勵，特此致謝。

劉雅章 香港中文大學理學士(1974)，主修物理，隨赴華盛頓大學深造，於1978年獲大氣科學博士學位。其後受聘於普林斯頓大學地質流體動力實驗室，現為該室高級研究員，並兼任普大大氣與海洋學副教授。劉教授對大氣科學有廣泛研究，尤其在大氣環流分析問題上有重要貢獻，曾於各重要學術刊物發表論文50多篇，且先後獲多個美國學術團體獎項。