



為地球遮陽

(本文節自科學人雜誌 2008 年第 82 期 12 月)



早在 1965 年，美國前副總統高爾還是大學新鮮人時，一個由傑出環境科學家組成的委員會，便警告當時的總統詹森：燃燒化石燃料產生的二氧化碳 (CO₂) 可能會造成「氣候的顯著改變」並「導致危險的後果」。

數十年後，即使各國大力呼籲並簽訂各項國際協定，CO₂ 排放量的上升趨勢，依然比跨政府氣候變遷研究小組在 2007 年預測的最糟情況還要快。極地的冰層正以前所未見的速度融化中，意味著氣候變遷比起任何人想像的更瀕臨崩潰的危險邊緣。2007 年 11 月，許多頂尖的氣候學家與熱心的地球工程學家，參加一場在美國麻州劍橋舉行的研討會。會後所有人都同意必須進行更多的研究，有些人覺得地球工程的想法令人振奮，有些人認為兩害相權取其輕，有些人則希望一勞永逸地解決全球暖化問題，然而科學家的共識是：「地球工程回來了。」。地球工程的方案分為兩類，其一是控制讓多少陽光抵達地球表面，另一則控制讓多少熱量逸散回太空，而後者取決於大氣中有多少 CO₂。將 CO₂ 從大氣中移除的方案，例如在海水中施放含鐵的肥料，能從根本解決問題，但必須花上數十年才會見到成效。相反的，遮蔽陽光的方案，理論上能夠立即停止全球暖化，不過效果只有在遮蔽作用持續時才看得到。因此科學家將遮蔽陽光的想法視為解決氣候問題的緊急對策。

增加平流層中的硫酸微滴

早在 1974 年，俄國列寧格勒地球物理主觀測站的物理學家布迪科 (Mikhail I. Budyko) 便提出了這項方案，做法是將數百萬噸的二氧化硫 (SO₂) 注入平流層中，二氧化硫與氧氣、水和其他分子反應，形成由水、硫酸 (H₂SO₄)、塵埃、鹽粒或其他微粒組成的硫酸微滴，進而使硫酸與水凝結在微滴上。所有人都同意，硫酸微滴形成的雲可以散射陽光，讓夕陽看起來更紅、天空顯得黯淡，而地球表面的平均溫度會下降。1991 年菲律賓皮納吐坡火山爆發，將 2000 萬噸的二氧化硫噴入平流層中，使往後一年內的全球平均溫度下降了 0.5°C。

影響臭氧層破洞的大小

另一個更值得擔心的議題是平流層中的臭氧層。如果更多的硫酸被送上平流層，將會扮演分解臭氧的催化劑，因而延緩臭氧層的復原。根據估計，如果我們在幾年內開始將二氧化硫注入平流層，南極上空的臭氧層破洞得多花 30~70 年才能回復原貌。在寒冷的年份，北半球的高緯度地區也會出現臭氧層破洞，讓下方的城市暴露在致癌的紫外線輻射之中。

增加對流層中的微液滴

在低層大氣中，二氧化硫不僅能散射陽光或引起呼吸道疾病，也會在原本晴朗的地方產生雲，或是讓已經存在的雲變得更明亮。當船隻航行時，引擎廢氣留下的線性軌跡雲，雲層延伸數百公

里並且持續好幾天，連衛星照片都能捕捉到被雲層反射回太空的陽光。

讓海面上的雲層反射陽光

目前陸地上方的空氣充滿了人造微粒，因此雲層看起來比原本的更白、也更能反射陽光。但是在海面上，空氣中的微粒主要是自然形成的，包括海浪捲起時泡沫產生的海水液滴，當這些液滴被吹到 300 公尺的高空時，大部份的水份都已經蒸發了，留下鹽晶微粒，此時水蒸氣也開始凝結在微粒上，新的液滴組成低層海洋層積雲，覆蓋在全世界 1/4 的海面上。藉由注入足夠的懸浮鹽霧，讓雲層中液滴的數量增加四倍，因此海洋層積雲看起來會更明亮。

在太空中撐起遮陽傘

太空中的遮陽傘不是一艘巨大的太空船，而是由數兆艘小型太空船組成。每艘太空船為寬約 60 公分的氮化矽碟盤，配備有電腦與導航系統，重量不超過一公克。這些「飛盤」會利用超過 1.6 公里長、大部份埋藏在地底的電磁感應線圈槍，以每疊 100 萬艘、每分鐘發射一疊的速度射向太空中，連續發射長達 30 年。這張遮陽傘的發射重量可以小於 2000 萬噸，約為目前國際太空站重量的七萬倍。想要將這麼多東西送上太空，可不是件容易的事。

高效率的離子推進引擎將會把每疊飛盤從地球軌道送達太空，抵達目的地後飛盤會像發紙牌一樣派送出去，成群散佈在 9 萬 6000 多公里長的區域中，並全部面向太陽。衛星「牧羊」會在四周巡邏，設置一套區域性的全球定位系統。飛盤會利用微小鏡片做為太陽光帆，防止自己飄移出這個區域。太陽光子會通過矽化氮碟盤，但是那些通過孔洞的光子，會比沒有通過孔洞的光子稍微前進一點，因此這兩組光子會互相干涉抵消，造成遮蔽陽光的效果。

聰明反被聰明誤？

光靠地球工程無法解決 CO₂ 的問題，部份原因是 CO₂ 不只造成全球暖化而已。如果我們光靠遮蔽陽光來解決全球暖化，CO₂ 仍然會持續溶入海洋，緩慢使海水酸化，遲早海洋生態系統會受到破壞。然而暫時阻止全球暖化也許值得一試。

也許我們所能想像最可怕的情況是，如果人類建造了遮陽傘，卻不努力降低 CO₂ 排放量，最後任憑遮陽傘崩壞。利用二氧化硫遮蔽陽光，就像用一條二氧化硫的細線懸掛著 CO₂ 的利刃。為了維持這條細線，人類必須持續往大氣中注入越來越多的二氧化硫。如果這條線突然斷裂，那麼長期累積的 CO₂ 會讓地球溫度快速上升，結果將比當初遮蔽陽光時企圖避免的危機更糟糕。卡德拉與加拿大康科狄亞大學蒙特婁分校的馬修茲 (H. Damon Matthews) 合作，模擬遮陽傘崩壞時的情況，他們發現全球暖化的速度可能因而高達每 10 年上升 2.2~4°C，遠比目前的暖化速度高出 10 倍之多。

目前沒有人知道實施地球工程是不是個好主意，大部份的人都同意針對這個領域進行更多研究是絕對必要的，但每個人看待這些研究的觀點都不同。一些科學家認為，為了爭取更多時間以改用碳中性能源，遮蔽陽光是一個合理的對策。另一些科學家則擔心地球工程將會讓減低 CO₂ 排放量的誘因消失。「正當全世界終於開始正視全球暖化的嚴重性之際，非常不幸的，地球工程這個精靈卻從神燈中現身了。」

最後這些爭議不免牽扯到人類的劣根性，以及科學的力量能否加以約束。威格里說：「就科學的角度來看，光是實施地球工程而不努力降低 CO₂ 排放量，會是一件非常愚蠢的決定，如果真的這麼做，無異於緣木求魚。我們在優秀的科學指導下，不會做出愚蠢的決定。」

皮爾杭伯特與其他科學家的看法則較為悲觀，他在演講中說得很清楚：「聰明人也有做出蠢事的能力。」