

臺灣地區臭氧總量觀測及資料分析

鄭琇嫻 陳圭宏 羅如惠 陳瑋蘭
第二組
中央氣象局

摘要

臭氧層的變化情形可透過臭氧總量(Total Ozone)的觀測來瞭解，自 1985 年發現南極臭氧洞以來，臭氧總量的觀測更形重要。在蒙特婁議定書簽訂後，接續的各項限用措施已使全球大氣內的破壞臭氧物質濃度獲得有效控制，並有逐漸減少的趨勢。然而，因破壞臭氧物質長生命期的特性，全球臭氧層的恢復仍需至少數十年的時間。

中央氣象局的臭氧總量觀測始於民國 54 年，迄今已有超過 40 年的歷史，目前臺灣地區共有 2 個臭氧總量觀測站。觀測結果除於氣象局網頁公布統計值外，並定期傳送資料至加拿大世界臭氧及紫外線輻射資料中心，參與國際臭氧觀測資料交流。由最近 20 年的資料分析顯示，臺北及成功站的臭氧總量觀測值與臨近其他國家測站的觀測結果相當類似。近年來成功站的臭氧總量觀測值有略增趨勢，但臺北臭氧總量的增加趨勢則並不明顯。

關鍵字：臭氧總量，臭氧層，臭氧洞

一、前言

在地球的大氣層中，臭氧含量只佔所有氣體量的極小部分，但卻對輻射能量的平衡很重要。臭氧是溫室氣體之一、近地面空氣污染物的一種、也是調節到達地表的紫外線輻射量之重要物質。大氣中大部分（約 90%）的臭氧存在平流層中，最大濃度在 17-25 公里處的高空。臭氧在紫外線波段的吸收特性，讓地表的生物免於過量紫外線的傷害。

自 1970 年代起，某些人為製造的物質排放到大氣層後，破壞了平流層的臭氧。但到了 1980 年代，人們才發現並且開始企圖扭轉此現象。從 1980 年代起，除了南極出現眾所周知的臭氧洞現象，全球平均的臭氧量也有減少趨勢。迄今，平流層臭氧的減少已增加中高緯度地區的紫外線，並影響氣候。

1987 年蒙特婁議定書簽訂後，接續的各項限用措施已使全球大氣內的破壞臭氧物質濃度獲得有效控制，並有逐漸減少的趨勢。然而，由於此類物質在大氣中可長期存在的特性，使臭氧層仍無法在短期間內恢復。由最近的幾年的衛星觀測資料顯示，全球平均

臭氧量雖停止耗損，卻仍未恢復至 1980 年以前的水準。預估未來仍需數十年的時間才能使全球平均的臭氧量恢復至 1980 年的水準，而南極上空的臭氧層需要更長的時間修復，因此南極的“臭氧洞”現象可能持續到本世紀末。

本文將介紹目前中央氣象局之臭氧總量觀測作業，並針對近期(1991-2010 年)之觀測資料進行分析，以瞭解臺灣上空之臭氧層變化情形，另將與臨近國家或地區之觀測資料進行比對分析。

二、臺灣臭氧總量觀測

在地面上量測臭氧層中的臭氧量變化情形，除了可透過施放臭氧探空進行臭氧剖面分布的觀測之外，也可透過臭氧總量(Total Ozone)的觀測來瞭解。臭氧總量是指由地面至大氣層頂的垂直氣柱內所有臭氧的總含量。常用的單位是陶伯森單位(Dobson Unit, 簡稱 D.U.)及千分之一大氣公分(milliatmosphere centimeter 或 m-atm-cm)。1 陶伯森單位是指測得之臭氧總量相當於在標準氣溫及壓力下的純臭氧具有 10^{-5} m 之厚度(此單位係紀念 G.M.B. Dobson 對垂直臭

氧柱研究之貢獻，但非國際單位系〔ISO〕之法定單位。千分之一大氣公分是指測得之臭氧總量相當於在標準氣溫及壓力下的純臭氧具有 10^{-3}cm 之厚度（1 千分之一大氣公分等於 1 陶伯森單位）。也就是說臭氧總量的單位是表示在地表至大氣層頂的垂直氣柱內，若將全部的臭氧集中起來成爲一個純臭氧層，此純臭氧層在標準狀況（ 0°C ，1 大氣壓）之下，厚度爲 10^{-5} 公尺時即爲一個陶伯森單位。

臭氧總量的觀測可由地面儀器或衛星搭載儀器，以遙感探測技術量測臭氧吸收波段的紫外線輻照度，再計算出臭氧總量。在地面上進行臭氧總量觀測常用的儀器有陶伯森臭氧分光儀（Dobson ozone spectrophotometer）、布魯爾臭氧分光儀（Brewer ozone spectrophotometer），和 M-124 濾光臭氧儀（M-124 filter ozonemeter）。

中央氣象局的臭氧總量觀測開始於民國 54 年，迄今已有超過 40 年的歷史，初期的觀測作業是使用人工作業的陶伯森臭氧分光儀，於臺北之局本部進行觀測。自民國 74 年起，改以自動化作業的布魯爾臭氧分光儀進行觀測。民國 80 年將台北的臭氧分光儀增加了紫外線觀測的功能，再於臺灣東部較無污染之成功氣象站再增設 1 部臭氧分光儀。民國 86 年又增購 1 部臭氧分光儀於台北。因此，目前臺灣地區共有 2 個觀測站進行臭氧總量觀測。觀測結果除於中央氣象局網頁公布統計值外，並定期傳送資料至加拿大世界臭氧及紫外線輻射資料中心（World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre, WOUDC）。該中心亦定期寄送各國之臭氧觀測資料光碟，故臺灣臭氧總量資料已參與國際臭氧觀測資料交流。自 1998 年起，臺灣臭氧總量觀測站亦登錄於世界氣象組織（World Meteorological Organization, WMO）之全球大氣監測站資料系統（Global Atmosphere Watch Station Information System, GAWSIS）。

中央氣象局的臭氧總量觀測系統，包括布魯爾臭氧分光儀主機、太陽追蹤器、電腦及印表機（如圖 1）。布魯爾臭氧分光儀可全天候自動觀測臭氧總量及紫外線輻射，臭氧總量的觀測包括直射輻射臭氧總量量測（DS）及天頂輻射臭氧總量量測（ZS），但以直射輻射臭氧觀測較準確而誤差較小。其自動化作業內容爲：每日清晨自動重新啓動後，自動進行水銀燈（HG）及標準燈（SL）檢測，燈泡檢測通過後，依排定程序隨太陽天頂角之變化進行臭氧總量及紫外

線輻射等觀測。每日日落以後即結束觀測程序，將一天之觀測及燈泡檢測結果寫入磁碟機存檔，並準備進行次日之觀測。

平日觀測作業除每日依排定程序自動觀測之外，每月須進行外部紫外線燈泡校驗，及每年實施一次與標準儀器的比對校驗。年度校驗的實施方式爲，聘請布魯爾臭氧分光儀原廠或加拿大國際臭氧服務公司（Int'l Ozone Services Inc.）之技師，攜帶標準之布魯爾臭氧分光儀來臺進行校驗比對工作。校驗工作內容包含臭氧與紫外線比對，太陽掃描測試；檢查使用的正確波長，及利用標準之紫外線燈校驗系統作外部紫外線燈之校驗；針對所有臭氧分光儀的光譜做分光測試，計算臭氧、二氧化硫及紫外線新的常數並比對結果，最後將所有的校驗結果製成校驗報告。

三、布魯爾臭氧分光儀簡介

目前在臺灣地區的 2 個臭氧總量觀測站，皆使用布魯爾臭氧分光儀進行觀測作業。其中民國 74 年購置於臺北局本部，及民國 80 年購置於成功氣象站之臭氧分光儀爲 MKIV 型，民國 86 年於臺北增購之臭氧分光儀爲 MKIII 型。布魯爾臭氧分光儀是全自動觀測的儀器，可自動追蹤太陽位置，進行臭氧總量、紫外線 UVB 波段輻射或氣柱二氧化氮（ NO_2 ）量測。

布魯爾臭氧分光儀的命名是源自發展此儀器的多倫多大學教授 Alan W. Brewer。儀器的原始光學設計者是 David Wardle。透過 Brewer 的推廣，促使布魯爾臭氧分光儀取代陶伯森臭氧分光儀。J.B. Kerr，C.T. McElro 和 David Wardle 等三人後來再行改進此新型臭氧分光儀，並促進其商業化生產。目前在全球共有超過 190 部布魯爾臭氧分光儀。

臭氧在紫外線、可見光和紅外線範圍都有吸收帶。吸收光譜帶爲 100-340 nm 及 550-650 nm 的太陽輻射，以及 4700、9600 及 14100 nm 之紅外線輻射。布魯爾臭氧分光儀量測臭氧的原理是依據比爾定理（Beer's law）。即利用臭氧對太陽之紫外線輻射的吸收特性，依據地面觀測的太陽直射輻射和天頂輻射強度，或由月亮直接反射的太陽輻射強度，可以計算出氣柱臭氧總量。由太陽直射輻射強度量測臭氧總量，所測得之臭氧總量最爲準確，此項觀測係利用太陽直射到達地面之 305-340 nm 波段的紫外光輻射進行臭

氧總量的量測。

利用天頂輻射強度測得之臭氧總量，仍以天晴時誤差較小。以臺灣地區的天頂輻射臭氧總量量測結果而言，在雲量愈多（雲層愈厚）時誤差愈大，測得之臭氧總量值則有偏高情形。至於量測月亮直射光之觀測方法，以月亮反射之太陽輻射作為紫外線來源，因輻射強度弱，必須在天空晴朗時觀測，觀測期間僅限在滿月前後 5 天，且準確度不高。目前臺灣並未進行月亮直射光觀測，但此觀測方法可在極區永夜期間彌補觀測的不足。

布魯爾臭氧分光儀量測臭氧所使用的紫外線波段為 306.3、310.1、313.5、316.8 和 320.1 nm。由於其使用的波段較廣（使用波段較其他地面臭氧總量觀測儀器多），因此除量測氣柱臭氧總量之外，也可同時計算出氣柱二氧化硫總量。而一旦氣柱中的臭氧及二氧化硫已知，由比爾定理亦可估計出氣膠光學厚度。

臺灣所使用的布魯爾臭氧分光儀為 MKIV 型和 MKIII 型。MKIV 型布魯爾臭氧分光儀相較於 MKIII 型而言，為較舊型的布魯爾臭氧分光儀，可量測氣柱臭氧總量、二氧化硫(SO₂)及二氧化氮。臭氧及二氧化氮二種觀測之間的切換，是以濾光輪來控制。紫外線量測範圍為 290-325nm。

MKIII 型布魯爾臭氧分光儀和 MKIV 型不同之處在於 MKIII 具有二個分光器，使分光儀可以不必使用硫酸鎳及 UG11 濾光片，而避免了因儀器溫度變化而造成計算臭氧總量及氣柱二氧化硫的不確定性。MKIII 型布魯爾臭氧分光儀雖無量測二氧化氮，但可提供較高品質的氣柱臭氧總量量測結果，其紫外線量測範圍較 MKIV 型寬，為 286.5-363.0nm。

四、臺灣與臨近測站臭氧總量分析

一般而言全球大氣之平均臭氧總量約在 300D.U. 左右，也就是在標準狀況之下，臭氧層約只有 0.3 公分厚，且此總量會隨時間空間之不同而改變。臭氧總量在不同緯度的各月份分布情形如圖 2。

本文中所使用的資料是中央氣象局臺北局本部及成功站的臭氧總量觀測資料，內容為以布魯爾臭氧分光儀之直射(DS)觀測作業所測得之臭氧總量資

料。其中臺北站資料期間為民國 74-99 年(西元 1985-2010 年)，成功站資料期間為民國 80-99 年(西元 1991-2010 年)。臺北局本部之臭氧總量觀測資料包括自民國 74(1985)年起的第 023 號布魯爾臭氧分光儀之自動觀測資料，以及民國 86(1997)年以後，第 129 號布魯爾臭氧分光儀之自動觀測資料。成功站之臭氧總量觀測則為民國 80 年起的第 061 號布魯爾臭氧分光儀之自動觀測資料。經考量臺灣地區天候及雲量條件，利用天頂輻射強度測得之臭氧總量誤差仍偏大，所以臭氧總量資料皆採取太陽直射(DS)觀測作業之結果，也因此各站每月資料樣本數因陰天日數而異。另因年度校驗時將三部儀器集中於一站比對，而且大多數年份中係將成功站布魯爾臭氧分光儀運回臺北局本部校驗，故該站有部分月份之有效觀測數較少。

臺灣地區最近 10 年之逐年與最近 20 年平均(1991-2010 年平均)之各月份臭氧總量分佈情形比較如圖 3。由圖 3a 中曲線變化可見，臭氧總量季節變化相當明顯。臺北站 1991-2010 年臭氧總量平均值在春末的 5 月最高，達到 293D.U.，而冬季的 12 月最低，為 239D.U.，平均值為 269D.U.。成功站的季節變化和臺北站一致(圖 3b)，1991-2010 年之臭氧總量平均值以春末的 5 月最高，為 287D.U.，冬季的 12 月最低，為 238D.U.，平均值為 264D.U.。由於成功站緯度較低且該站污染來源較少，所以臭氧總量略低於臺北。比較二站的季節變化與圖 2 之同緯度臭氧總量季節變化，顯示本地的觀測結果與全球地面站的平均觀測結果相當接近。

雖然最近 20 年平均顯示，臭氧總量月平均值以 5 月最高，12 月最低，但以最近 10 年逐年的資料顯示，一年之中的最高值亦出現常出現在 4 月，少部分出現在 6 月；最低值則有時出現在 1 月、11 月或 2 月。臺北和成功二站最近 10 年的觀測結果皆顯示，大多數年份的觀測值皆與平均值接近；7 月至 12 月之觀測值多數略高於平均值，而 1 月至 6 月的觀測值，則為高於平均值或低於平均值二種情形互見。另外，最近三年(2008~2010 年)中，2009 和 2010 年成功站的全年臭氧總量月平均測值幾乎皆高於近 20 年平均值，但 2008 年為接近或略低於近 20 年平均值。而臺北的最近二年(2009 和 2010 年)全年臭氧總量月平均值為接近或略高於近 20 年平均值，但 2008 年為略低於近 20 年平均值。

除本地的資料分析外，本文亦使用臨近國家的觀

測資料納入分析比較。由於臭氧總量的分布情形隨緯度而不同，故本文中的臨近國家或地區的臭氧總量資料分析是採用緯度相近的觀測站資料。使用的測站包括那霸(Naha)、南鳥島(Minamitorishima)和昆明(Kunming)。那霸站之緯度為 26.20°N，經度為 127.6833°E，測站海拔高度為 27 m。南鳥島站之緯度為 24.2852°N，經度為 153.9813°E，測站海拔高度為 8 m。昆明站緯度為 25.03°N，經度為 102.2133°E，測站海拔高度為 1917 m。

比較前述各測站在不同月份的臭氧總量平均值(圖 4)顯示，各站一年之中的月平均最高值皆落在 5 月，最低值皆在 12 月，而變化趨勢與圖 2 之同緯度平均分布變化情形相似。其中以南鳥島的季節差異最明顯；昆明的季節差異最不明顯。各站的季節變化趨勢非常相近，除昆明外，其餘 4 站的季節臭氧總量變率幾乎一致。

圖 5 為臺北站和成功站，及與臺灣緯度相近之那霸站、南鳥島站和昆明站自 1991 年 1 月至 2011 年 6 月的各月份平均臭氧總量變化情形。圖中顯示各站的變化趨勢相近，在個別年度中的變化情形也很類似。近 20 年中以 1993 年全年的臭氧總量最低，而 1999 年、2005 年及 2008 年之全年觀測值亦較低。各站之比較結果顯示，除昆明外，其餘 4 站之年際變化情形較接近。由於臭氧總量為地表至大氣層頂的垂直氣柱內的全部臭氧量，當地面附近的人為空氣污染物質造成近地面臭氧濃度上升時，臭氧總量亦會增加。因此圖 5 之各站雖然位於相似的緯度，但地理、人文及生態條件仍有差異。例如，昆明位於內陸，而台北、成功、那霸和南鳥島之間互相的地理位置及溫暖潮溼的氣候條件則較相似。因每個站的環境條件不同，所以資料的個別差異性存在，也是可預期的。

由各站的年平均值變化情形顯示，那霸的臭氧總量測值有較顯著的增加趨勢，其他各站的趨勢則較不明顯。圖 3 的最近 10 年臺北及成功臭氧總量值顯示，在大多數年份中，下半年的觀測值是接近或略高於 1991 年至 2010 年平均值。但以平均值而言，近 10 年之成功臭氧總量平均值(265.03 D.U.)，高於近 20 年之平均(263.75 D.U.)，故其臭氧總量年平均似有增加之趨勢。而臺北近 10 年之臭氧總量平均值(268.89 D.U.)，則僅略高於近 20 年之平均(268.27 D.U.)，故臺北之增加趨勢並不明顯。

五、總結

在臺灣地區的臭氧總量觀測已有超過 40 年的歷史，目前此項觀測作業仍正常運作並且定期校驗維護。由最近 20 年的資料分析顯示，臺北及成功站的臭氧總量觀測值與臨近其他國家測站的觀測結果相當類似。而近年來成功站的臭氧總量觀測值有略增趨勢，但臺北的臭氧總量增加趨勢則較不明顯。

全球大氣臭氧層中臭氧量的變化除了與臭氧生成及破壞速率有關之外，也受到大氣動力影響，並與平流層溫度等因素有關。單獨測站的趨勢變化，有可能受到該站近地層環境條件改變的影響。但衛星觀測之全球平均臭氧總量顯示全球平均已不再減少，甚至開始有復增的跡象，顯示蒙特婁議定書及其相關規約對於破壞臭氧物質的管制應有成效。大部分破壞臭氧物質也同時是溫室氣體，所以相關管制措施也可同時具有減緩地球溫室效應的成效。但某些管制氣體的替代物也屬於溫室氣體，所以減緩地球溫室效應的效果會有部分被抵消。因破壞臭氧物質長生命期的特性，全球臭氧層的恢復仍需至少數十年的時間。但臭氧層對於地球大氣輻射能量平衡，和保護地表生物免於過量紫外線的傷害扮演重要角色，因此臭氧層相關的監測及保護工作仍應持續進行。

參考文獻

- 張修武、羅金鑑、羅如惠，1995：改進本局臭氧分光儀之觀測及資料分析技術之研究，中央氣象局研究發展專題。中央氣象局八十四年度研究報告第 CW84-1A-02 號。58 頁。
- Angus Fergusson, 2010: The Artic Ozone layer. Science & Technology Integration Division, Environment Canada, Toronto, Canada.
- Environment Canada, 2008: Standard operating procedures manual for the Brewer spectrophotometer, Version: D.01. Toronto, Ontario, Canada.
- SCI-TEC Instruments Inc., 1995: Brewer MKIV spectrophotometer operator's manual, OM-BA-C01/B, Rev J. Saskatoon, Sask., Canada.
- WMO (World Meteorological Organization), 2008: Guide to Meteorological instruments and Methods of Observation, Seventh edition.

WMO-No. 8, Geneva, Switzerland.

WMO (World Meteorological Organization), 2007: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report 52, Geneva, Switzerland.

致謝

感謝「加拿大世界臭氧及紫外線輻射資料中心」(World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre, WOUDC) 及參與該中心資料交流之國家或地區監測站提供臭氧總量的監測資料。

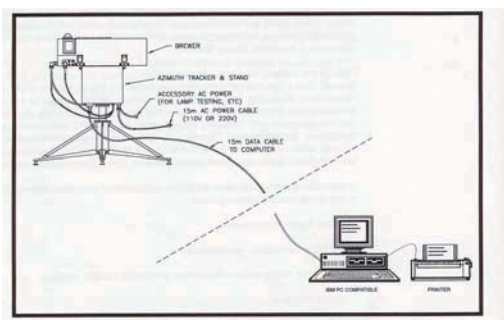


圖 1. 臭氧總量觀測系統。(摘自 SCI-TEC, Brewer MKIV spectrophotometer operator's manual, Figure om.1-1.)

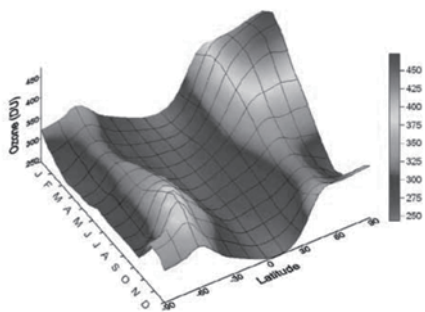
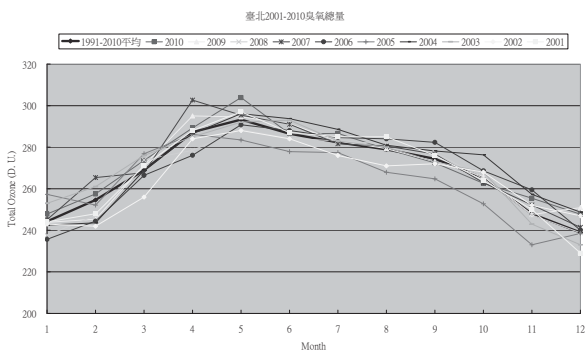


圖 2. 1964-1980 年間由地面觀測儀器量測之平均臭氧總量在不同緯度及月份之變化(摘自 Environment Canada, The Arctic Ozone layer, Figure 4.)。

(a)



(b)

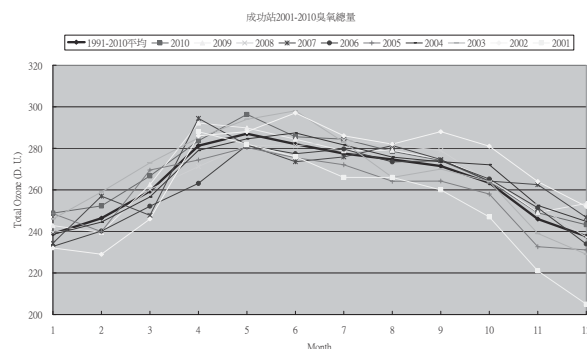


圖 3. (a)臺北最近 10 年逐年和 1991-2010 年平均之各月平均臭氧總量變化情形；(b)成功最近 10 年逐年和 1991-2010 年平均之各月平均臭氧總量變化情形。

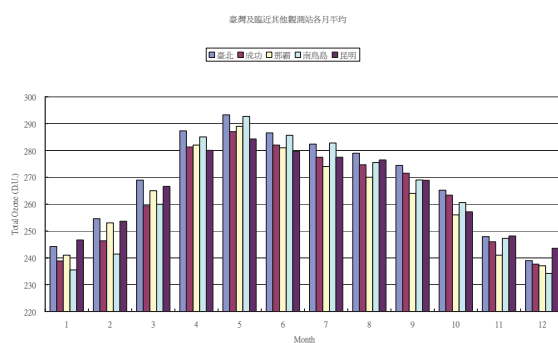


圖 4. 臺北站、成功站，及與臺灣緯度相近之那霸站、南鳥島站和昆明站的各月份平均臭氧總量比較圖。

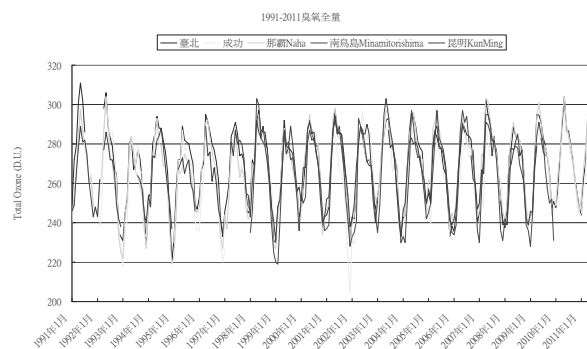


圖 5. 臺北站、成功站，及與臺灣緯度相近之那霸站、南鳥島站和昆明站自 1991 年 1 月至 2011 年 6 月的月平均臭氧總量變化圖。