

北大西洋臭氧极小值和北太平洋极大值及其相互关系

邹 捍¹ 李 鹏¹ 周立波¹ 马舒坡¹ 季崇萍²

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 北京市气象局, 北京 100089

摘 要 利用 1979~2002 年 TOMS 卫星观测资料, 采用臭氧总量纬向偏差和区域强迫的分析方法, 研究北大西洋东北部大气臭氧低值与北太平洋西北部臭氧高值的季节变化过程和相互关系。研究表明, (1) 北大西洋东北部存在一个大气臭氧极小值, 年平均臭氧总量比纬向平均值低 20 DU 以上, 冬季低 50 DU 以上; 北太平洋西北部存在一个大气臭氧极大值, 年平均臭氧总量比纬向平均值高 35 DU 以上, 冬季高 70 DU 以上。(2) 上述两个地区大气臭氧的季节变化具有很强的区域特征, 区域大气动力学输送和化学过程对上述两个地区大气臭氧季节变化的强迫分别为 50.3% 和 42.6%。(3) 上述两个地区大气臭氧纬向偏差的季节变化间存在很好的反相关, 相关系数达到 -0.98, 说明其臭氧区域强迫之间存在良好的关系。

关键词 大气臭氧 北半球 中高纬度 纬向不均匀性

文章编号 1006-9895(2006)05-0905-08

中图分类号 P421.3

文献标识码 A

On Low Ozone over the North Atlantic and High Ozone over the North Pacific

ZOU Han¹, LI Peng¹, ZHOU Li-Bo¹, MA Shu-Po¹, and JI Chong-Ping²

¹ *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

² *Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089*

Abstract Atmospheric ozone plays important roles in the global climate and environment change, and directly protects our human beings from the harmful solar UV radiation. The ozone destruction has been found globally since the start of ozone observation. CFCs and Halogens etc. are identified as the ozone depleting substances (ODS), and the nations signed international protocols to phase out the ODS. This effort would result in a global ozone recovery in this century. This article is attempting to analyze the ozone distribution and seasonal variation over the North Atlantic and the North Pacific, using the 1979-2002 TOMS data. It will benefit our understanding of global and regional ozone distribution and variation, and the future ozone recovery. Based on our study, the minimum and maximum ozone concentrations are located over the northeast of the North Atlantic and northwest of the North Pacific, respectively. The regional ozone distributions and variations, defined by the ozone zonal deviation, show the ozone minimum and maximum over both the above regions and illustrate a dominating pattern at the NH middle-high latitudes in winter. The analysis shows regional forcing of dynamics and chemistry processes as 50.3% and 42.6% to the seasonal ozone variations over the northeast of the North Atlantic and northwest of the North Pacific. The seasonal variations of zonal ozone deviation over the above minimum and maximum ozone regions have a close relation, with correlation coefficient -0.98. This may indicate a close link between the regional forcings of dynamic and chemical processes to ozone over both the regions.

Key words atmospheric ozone, NH middle-high latitudes, zonal inhomogeneity

1 引言

臭氧是大气层中一种重要的痕量气体,从三方面影响着人类生存环境:(1)大气臭氧通过吸收太阳紫外辐射加热大气,决定了大气平流层的温度和环流结构^[1];(2)大气臭氧是一种重要的温室气体,平流层臭氧在全球变暖中起着负反馈作用,而对流层臭氧则为正反馈^[2];(3)大气臭氧吸收有害太阳辐射,保护地表生态系统和人类本身^[3]。自南极臭氧洞发现以来,各国政府投入了大量的人力物力,开展大气臭氧变化研究^[4, 5]。研究表明,以哈龙和氟利昂族为代表的化学物质是臭氧层的真正杀手^[6]。因此,各国政府共同签订了维也纳公约和蒙特利尔议定书^[7],旨在减少并最终停止排放以哈龙和氟利昂族为代表的破坏臭氧层的物质,并期望在本世纪看到大气臭氧层的恢复^[5]。尽管蒙特利尔议定书规定中国应在 2010 年终止破坏臭氧层物质的排放,但中国政府已经在有计划的实施,并部分停止了破坏臭氧层物质的排放^[8]。

在对大气臭氧的研究中,人们发现,尽管全球范围内大气臭氧总量的减少是与以哈龙和氟利昂族为代表的摧毁臭氧物质参与的化学过程相关联,但在区域大气臭氧的变化中,大气动力学过程也占有相当重要的位置。例如,大气定常和准定常波动引起的动量和能量输送与大气臭氧的分布间存在良好的相关^[9];南极地区海陆分布造成的大气波动导致南极臭氧洞的非对称分布^[10];大气准两年振荡(QBO)和 ENSO 振荡造成大气臭氧的同周期变化^[11, 12];高原地表加热造成的区域环流系统导致定常的青藏高原大气臭氧低值^[13~15];北半球中纬度定常波的长期变化导致大气臭氧趋势分布的变化^[16, 17];北大西洋暖流维持的热力环流造成北欧地区的臭氧极小值^[18]。

从全球臭氧的分布看,冬季北半球大气臭氧的最小值位于北大西洋的斯堪的纳维亚上空,最大值位于北太平洋的鄂霍次克海上空,处于相近的纬度带中,位于北极极涡边缘,其分布规律与北半球中高纬度大气环流结构相关联^[17, 18]。因此,北半球中高纬度的大气环流结构,及其带来的动力和化学影响,将在很大程度上导致上述两个地区大气臭氧分布和变化的特殊性,同时构成这两个地区大气臭氧变化中的相互关联。研究这种区域大气臭氧的特

殊性和相关性,对于正确认识北半球大气臭氧的变化和分布规律以及未来的大气臭氧恢复过程有重要意义。但是,对于上述两个地区大气臭氧极小值和极大值的季节变化、区域强迫特征以及它们之间的相互关联尚无充分的研究。

本文将使用 1979~2002 年间 TOMS 卫星观测臭氧总量资料,采用纬向偏差分析和区域强迫的分析方法,研究北半球中高纬度大气臭氧分布和季节差异,特别是大气臭氧极小值和极大值的季节变化规律和区域强迫特征,以及它们之间的相互关系。

2 资料与处理方法

本文使用的大气臭氧总量资料是美国宇航局(NASA)提供的由 Nimbus-7 和 Earth Probe 卫星搭载的臭氧观测光谱仪全球大气臭氧总量分布资料(TOMS ozone monthly grid)。Nimbus-7 卫星的时间区域为 1979 年 1 月至 1992 年 12 月,Earth Probe 卫星的时间区域为 1996 年 8 月至 2005 年 3 月。该资料空间区域为全球(除极夜区域外),水平分辨率为 1° 纬度和 1.25° 经度,单位为 Dobson Unit (DU)。由于 Earth Probe 的系统校准误差^[19],2002 年以后的资料不适合研究使用,因此,我们在研究中采用 1979~1992 和 1996~2002 年时段的 TOMS 资料。

为了排除太阳季节变化造成的纬向平均的化学和动力学影响,我们对大气臭氧总量进行了纬向偏差计算。该方法为:格点臭氧总量的纬向偏差值=格点臭氧总量值-臭氧总量纬向平均值。研究中,我们定义两个区域代表北太平洋西部臭氧高值区和北大西洋东部臭氧低值区,分别为($45^\circ\text{N}\sim 65^\circ\text{N}$, $130^\circ\text{E}\sim 170^\circ\text{E}$)和($45^\circ\text{N}\sim 65^\circ\text{N}$, $20^\circ\text{W}\sim 20^\circ\text{E}$),并使用面积加权(即 $\cos[\varphi]$ 加权,此处 φ 为纬度)平均的方法计算上述区域的臭氧总量平均值。为研究区域尺度大气动力和化学过程对臭氧总量季节变化的影响,我们计算了臭氧总量区域强迫的强度:臭氧纬向偏差季节变化振幅/臭氧总量季节变化振幅。

3 北半球臭氧的极小值与极大值

研究表明,北半球中高纬度存在较强的大气臭氧纬向分布不均匀性^[20]。北大西洋和北太平洋地区的大气臭氧变化与天气、气候过程密切相关^[16~18]。为研究上述两个地区大气臭氧分布和变化的特殊性,我们使用较新的 1979~2002 年全球

臭氧分布资料，分析研究大气臭氧总量和纬向偏差的全年、冬季和夏季的分布特征。

3.1 北半球臭氧总量的低值扰动和高值

使用 1979~2002 年 TOMS 卫星观测资料，我

们得到全球大气臭氧总量的全年、夏季和冬季分布(图 1)。由图 1a 可以看出，全球臭氧总量的年平均

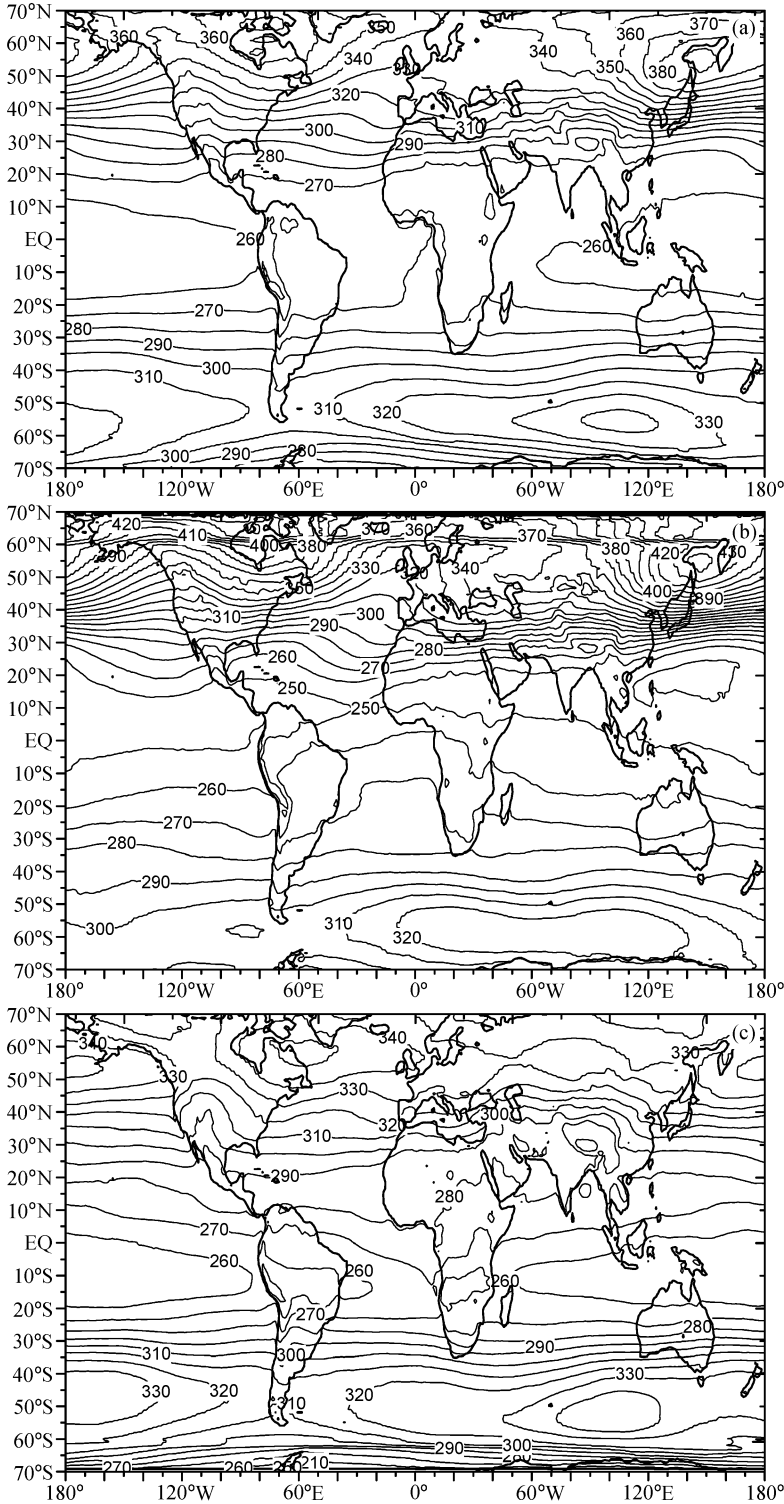


图 1 1979~2002 年全球臭氧总量分布 (单位: DU): (a) 全年; (b) 冬季; (c) 夏季
Fig. 1 Global total ozone (DU) distribution during 1979 - 2002: (a) Annual; (b) winter; (c) summer

值区,总量低于 270 DU。中高纬度地区为大气臭氧高值区,最大值在南半球(55°S , 110°E)可以达到 340 DU 以上,在北半球(55°N , 150°E)达到 390 DU 以上。南北两极和邻近地区为大气臭氧总量低值区,以西南极地区最为明显,年平均值可以达到 270 DU 以下,北极和邻近地区的大气臭氧总量则在 340 DU 以下。从全年大气臭氧分布图中,我们可以看出北半球中高纬度存在明显的大气臭氧低值和高值,一个较为强烈的臭氧低值扰动位于北大西洋东北部-斯堪的纳维亚-俄罗斯东部上空;一个大气臭氧高值位于北太平洋鄂霍次克海上空,为全球最大的臭氧极大值。另外,一个较为明显的臭氧低值扰动位于北美北部的落基山上空。从全球冬季大气臭氧分布(图 1b)可以看到,位于北大西洋北部-北欧地区的臭氧低值扰动向西移动至北大西洋-斯堪的纳维亚地区,并有所加强;位于鄂霍次克海的大气臭氧高值的强度大大增加,最大值达到 440 DU 以上。此外,落基山上空的臭氧低值扰动略有减弱。从全球夏季大气臭氧分布(图 1c)可以看出,北大西洋北部的臭氧低值扰动明显趋于平缓;鄂霍次克海地区的大气臭氧高值中心东移至白令海地区,强度也大大减弱,最高值仅大于 350 DU。落基山上空的臭氧低值扰动明显加强。

从上述对全球臭氧总量的分析可以看出,北半球中高纬度存在较强的大气臭氧不均匀分布特征;北大西洋东北部和北太平洋西北部分别存在较强的大气臭氧低值和高值扰动,冬季较夏季明显加强;落基山上空也存在大气臭氧低值扰动,但夏季较冬季为明显。由此可见,北半球大气臭氧分布的纬向不均匀性主要体现在冬季北大西洋东北部的臭氧低值扰动和北太平洋西北部的臭氧高值。

3.2 北半球臭氧纬向偏差的极小值和极大值

由于大气臭氧总量变化和分布的物理和化学机制与太阳高度角密切相关,例如,剩余经圈环流对大气臭氧的输送过程以及极地平流层云相关的非均向化学反应等^[1, 21],全球尺度的大气臭氧分布具有较好的纬向均一性。为了更好地表现大气臭氧分布的纬向不均匀性,突出区域尺度对大气臭氧分布的影响,我们采用纬向偏差计算,滤去大气臭氧分布中的纬向平均成分(方法见第 2 节)。

图 2 为 1979~2002 年全年、冬季、夏季的大气臭氧全球纬向偏差分布。从全年大气臭氧纬向偏差

分布(图 2a)可以看出,除北半球中高纬度以外,大气臭氧分布较为均匀,其纬向偏差值绝对值在 20 DU 以下。北半球中高纬度的大气臭氧分布呈现出很强的纬向不均匀性,一个较强的纬向偏差负值中心位于斯堪的纳维亚半岛南部(60°N , 5°E),小于 -20 DU 的纬向偏差值覆盖了北大西洋北部、英伦诸岛、斯堪的纳维亚南部和俄罗斯西部地区;一个较强的纬向偏差正值中心位于鄂霍次克海上空(53°N , 150°E),大于 35 DU 的纬向偏差值几乎覆盖全部鄂霍次克海地区;另外,还有一个较弱的低值中心位于北美落基山上空,小于 -15 DU 的纬向偏差值覆盖落基山中部和邻近地区。从冬季大气臭氧纬向偏差分布(图 2b)可以看出,北大西洋东北部的低值区明显加强,最小值低于 -50 DU,小于 -40 DU 的臭氧纬向偏差值覆盖包括英伦诸岛和斯堪的纳维亚南部的北大西洋东北部;北太平洋鄂霍次克海地区的臭氧偏差高值大大加强,中心强度大于 70 DU,大于 60 DU 的臭氧纬向偏差值覆盖整个鄂霍次克海以及部分东西伯利亚;而落基山地区的臭氧纬向偏差低值强度和位置没有改变。从夏季大气臭氧纬向偏差分布(图 2c)可以看出,北大西洋东北部的纬向偏差低值明显减弱并向西南移动,中心位于英格兰西南的北大西洋,强度在 0 DU 左右;同时,北太平洋鄂霍次克海的臭氧偏差极大值也大大减弱并向东南移动,位于鄂霍次克海以南的北太平洋地区,强度仅仅大于 15 DU;落基山上空的臭氧偏差极小值没有明显变化。由此可见,北半球中高纬度臭氧总量分布的纬向不均匀性主要表现为:冬季北大西洋东北部的臭氧极小值和北太平洋西北部的臭氧极大值。

4 北半球极小值与极大值的季节变化和相互关系

上述全球臭氧总量和纬向偏差分析显示,在北大西洋东北部存在一个区域尺度大气臭氧极小值,在北太平洋西北部存在一个臭氧极大值。这两个区域尺度极值是北半球中高纬度大气臭氧分布中的主要特征,在研究北半球中高纬度大气臭氧分布和变化中占有重要地位。使用区域加权平均的方法(见第 2 节),我们计算了北大西洋东北部($45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{E}$)、北太平洋西北部($45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{E}$)和同纬度带($45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$,

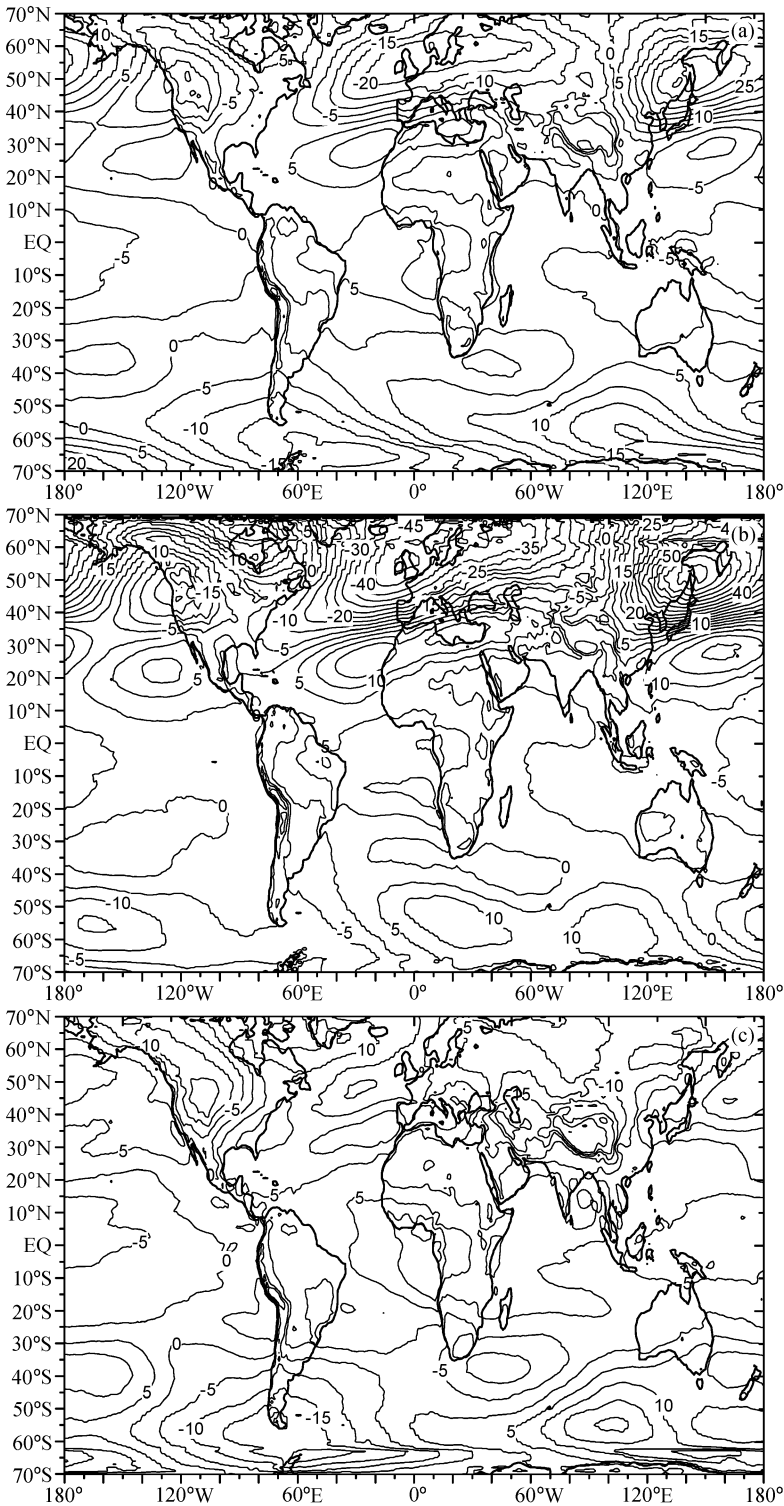


图2 1979~2002年全球臭氧总量纬向偏差分布(单位:DU): (a) 全年; (b) 冬季; (c) 夏季

Fig. 2 Global distribution of zonal ozone deviation (DU) during 1979–2002: (a) Annual; (b) winter; (c) summer

180°W~180°E) 臭氧总量和纬向偏差的区域平均值。

4.1 臭氧总量极小值和极大值的季节变化和相互关系

首先, 我们分析研究北半球中高纬度大气臭氧

极小值和极大值的季节变化。图3显示北大西洋东北部臭氧极小值地区、北太平洋西北部臭氧极大值地区和同纬度带大气臭氧总量季节变化。可以看

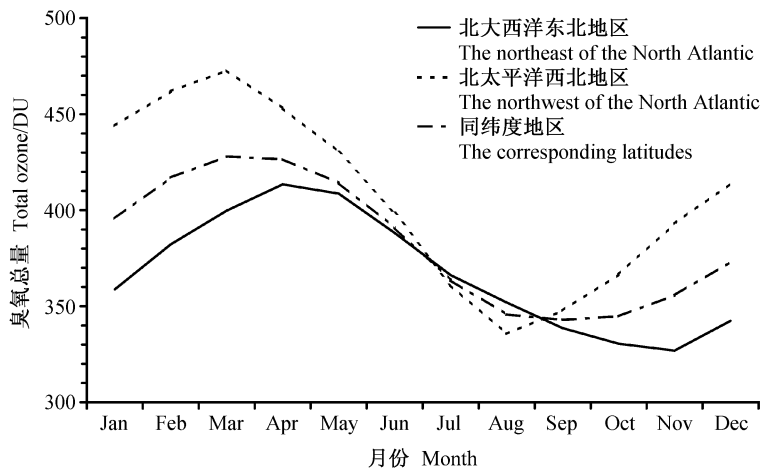


图3 1979~2002年北大西洋东北部、北太平洋西北部、同纬度带臭氧总量季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of total ozone over the northeast of the North Atlantic, the northwest of the North Pacific and the corresponding latitudes during 1979–2002

出,北半球中高纬度大气臭氧总量年平均值为383 DU,最大值出现在3月,为428 DU,最小值出现在9月,为343 DU,季节变化振幅为85 DU;北大西洋东北部臭氧极小值地区大气臭氧总量年平均值为367 DU,最大值出现在4月,为413 DU,最小值出现在11月,为327 DU,季节变化振幅为86 DU;北太平洋西北部臭氧极大值地区大气臭氧总量年平均值为407 DU,最大值出现在3月,为473 DU,最小值出现在8月,为336 DU,季节变化振幅为137 DU。由此可见,北大西洋东北部臭氧极小值的季节变化与其相同纬圈的季节变化接近;北太平洋西北部臭氧极大值的季节变化明显大于该纬圈平均臭氧季节变化。同时,北半球中高纬度臭氧极小值和极大值季节变化的位相也有别于同纬圈臭氧平均值的季节变化位相。因此,可以认为上述臭氧极小值和极大值地区的大气臭氧季节变化具有较强的区域特征,是北半球中高纬度大气臭氧季节变化较为强烈的地区。

4.2 臭氧纬向偏差极小值和极大值的季节变化及相互关系

图4显示北大西洋东北部臭氧极小值地区和北太平洋西北部臭氧极大值地区臭氧总量纬向偏差季节变化。可以看出,北大西洋东北部臭氧极小值地区大气臭氧纬向偏差年平均值为-15.9 DU,最大值出现在8月,为6.3 DU,最小值出现在1月,为-37.0 DU,季节变化振幅为43.3 DU;北太平洋西北部臭氧极大值地区大气臭氧总量纬向偏差年平

均值为23.4 DU,最大值出现在1月,为48.2 DU,最小值出现在8月,为-10.1 DU,季节变化振幅为58.3 DU。由此看来,除去由于太阳高度角季节变化所引起的大气输送和大气化学过程影响以后,在北大西洋东北部和北太平洋西北部仍然可以看到较为强烈的大气臭氧分布区域特征,这种区域特征在夏季减弱,冬季明显加强。上述区域大气臭氧季节变化特征是由大气输送和化学过程的区域强迫所导致。为了清楚地描述这种季节变化的区域强迫特征,我们计算上述两个地区大气臭氧纬向偏差和总量季节振幅间的比值,并定义为大气臭氧季节变化的区域强迫。计算表明,北大西洋东北部臭氧季节变化的区域强迫为50.3%,即由区域大气输送和化学过程引起的大气臭氧季节变化占该地区全部臭氧季节变化的50.3%;而北太平洋西北部大气臭氧季节变化的区域强迫则占该地区全部臭氧季节变化的42.6%。可见,区域性大气输送和化学过程对上述两个地区大气臭氧季节变化有重要影响。

由图4可以看出,北大西洋东北部和北太平洋西北部臭氧纬向偏差的季节变化间存在良好的负相关,即北大西洋东北部臭氧纬向偏差降低时,北太平洋西北部臭氧纬向偏差上升;同样,北大西洋东北部臭氧纬向偏差上升时,北太平洋西北部臭氧纬向偏差下降。计算表明,两者之间的相关系数达到-0.98。由此可见,上述两个地区的局地臭氧季节变化间存在一种此起彼伏的振荡,说明影响上述两个区域大气臭氧季节变化的大气输送和化学过程之

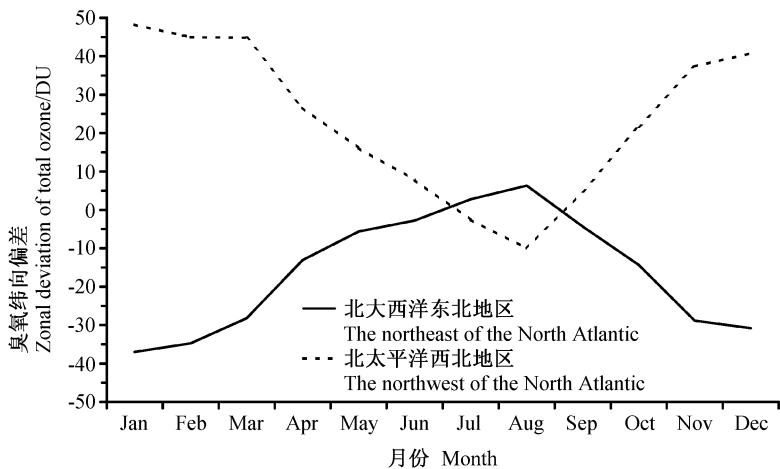


图4 1979~2002年北大西洋东北部、北太平洋西北部臭氧总量纬向偏差季节变化
Fig. 4 Seasonal variation of zonal ozone deviation over the northeast of the North Atlantic and the northwest of the North Pacific during 1979–2002

间存在着紧密联系。这种联系可能与极地涡旋相关的大气动力学和化学过程及其纬向不均匀性有关。

5 结论与讨论

通过对北大西洋东北部和北太平洋西北部臭氧总量、纬向偏差和区域强迫的分析研究，可以得到如下结论：

(1) 北大西洋东北部存在一个大气臭氧极小值，年平均臭氧总量比纬向平均值低 20 DU 以上，冬季低 50 DU 以上；北太平洋西北部存在一个大气臭氧极大值，年平均臭氧总量比纬向平均值高 35 DU 以上，冬季高 70 DU 以上。

(2) 上述两个地区大气臭氧的季节变化具有很强的区域特征，区域尺度大气动力和化学过程对大气臭氧季节变化的强迫分别为 50.3% 和 42.6%。

(3) 上述两个地区大气臭氧纬向偏差的季节变化间存在很好的反相关，相关系数达到 -0.98，说明两区域大气动力与化学强迫之间存在紧密联系。

根据 Zou 等^[18]的分析，冬季北大西洋东北部相对高的海温导致了该地区大气物质抬升，低层臭氧含量较低的空气向该地区辐合，高层臭氧浓度较高的空气向周围辐散，导致整层气柱大气臭氧含量降低，从而形成该地区冬季大气臭氧低值。同时，Hood 等的研究^[16]指出，北太平洋西北部的大气定常波动，使得该地区冬季平流层气柱垂直扩展，从而增加整层的大气臭氧含量。考虑到北半球高纬度冬季光化学反应效率较低，与非均向化学反应有关

的平流层云出现几率也相对较小，平流层大气臭氧化学源汇较弱。在北半球冬季，北大西洋东北部辐散出来的大气臭氧被北极极涡边界的强劲气流输送到北太平洋西北部，由当地的辐合机制积累，形成该地区的臭氧极大值，同时也形成上述两地臭氧极值之间的相互联系。但其输送和平衡的具体过程尚待进一步的研究。

致谢 谨向提供 TOMS 臭氧总量资料的 OPT of NASA/GFSC 致以衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] Holton J R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 3rd ed. San Diego, California: Academy Press, 1992. 380pp
- [2] WMO/UNEP. *Climate Change, the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 340pp
- [3] UNEP. *Environment Effects of Ozone Depletion: 1998 Assessment*. Nairobi, Kenya: UNEP, 1998. 290pp
- [4] Farman J G, Shaklin J D. Large losses of total ozone in Antarctic reveal seasonal CLOx/NOx interaction. *Nature*, 1985, **315**: 207~210
- [5] WMO. *Scientific assessment of ozone depletion: 2002*. Global Ozone and Research Monitoring Project, Rep. 47. Geneva: WMO, 2003. 270pp
- [6] WMO. *Atmospheric ozone 1985, Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change*. Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. 16. Geneva: WMO, 1985. 333pp
- [7] UNEP. *Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer*. Nairobi, Kenya: Ozone Secretary, 2003. 180pp

- [8] China SEPA (State Environmental Protection Administration). Activities for 9. 16 int'l ozone day in China. *Ozone Action in China*, 2005, (60–61): 1, 4
- [9] Randel W J, Wu F, Stolarski R. Changes in column ozone correlated with the stratospheric EP flux. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, **80**: 849~862
- [10] Zou H, Gao Y. Long-term variation in TOMS ozone over 60°S–70°S. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24** (18): 2295~2298
- [11] Zerefos C S, Alkviadis F B, Zosmas I S. On the relative importance of quasi-biennial and El Niño/Southern Oscillation in the revised total ozone records. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 10135~10144
- [12] Sitnov S A. Vertical structure of the extratropical quasi-biennial oscillation in ozone, temperature, and wind derived from ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 12855~12866
- [13] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. *气象学报*, 1995, **40**(15): 1396~1398
Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. Total ozone variation over China and Tibet low ozone center. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **40** (15): 1396~1398
- [14] Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 1029~1032
- [15] Zou H, Gao Y. Vertical ozone profile over Tibet using Sage I and II data. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 505~512
- [16] Hood L, Zaff D A. Lower stratospheric stationary waves and the longitudinal dependence of ozone trends in winter. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 25791~25800
- [17] Hood L, Rossi S, Beulen M. Trends in lower stratospheric zonal winds, Rossby wave breaking behavior, and column ozone at northern midlatitudes. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 24321~24339
- [18] Zou H, Zhou L, Ji C, et al. A possible mechanism of Scandinavian ozone loss. *Progress in Natural Science*, 2001, **11** (4): 288~293
- [19] NASA. TOMS Calibration Error. TOMS news, Nov. 18, 2004 (<http://toms.gsfc.nasa.gov/news/news.html>)
- [20] Zou H, Zhou L, Gao Y, et al. Total ozone variation between 50° and 60°N. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L23812, doi: 10.1029/2005GL024012
- [21] Molina M J, Rowland F S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atomic-catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 1974, **249**: 810~812