

利用卫星资料分析我国北方东西部 臭氧分布差异^{* 1}

杨景梅 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029)

摘 要

利用 SAGE II 和 HALOE 臭氧垂直分布资料和 TOMS 臭氧总量资料, 研究我国北方 ($45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 和 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围), 东部 ($105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 和西部 ($75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 大气臭氧总量和垂直分布特征和差异。结果表明: 我国北方东部冬季、春季和秋季臭氧总量明显大于西部, 主要表现在平流层臭氧极大值附近及其以下高度臭氧含量东部比西部明显偏大, 这种差异在冬、春季尤为明显; 随着纬度的降低, 冬季和秋季臭氧总量东、西部差异减小, 但春季臭氧总量东、西部差异没有明显改变; 夏季, 在 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围, 东、西部臭氧分布没有明显差异, 但在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围, 臭氧分布东、西部差异较明显, 臭氧总量东、西部差异达到 20.6 DU, 16 km 以下臭氧柱总量东、西部差异达到 12.8 DU。该文还对导致我国东、西部臭氧分布差异的原因进行了分析。

关键词: 臭氧总量; 垂直分布; 东、西部差异

引 言

大气臭氧层对地气系统的辐射收支起着关键作用。许多研究表明, 大气臭氧的辐射气候效应不仅依赖于臭氧总量, 也依赖于臭氧的垂直分布^[1-2]。大气臭氧总量和垂直分布研究越来越引起人们广泛重视^[3-7]。通常大气臭氧总量分布状况是经向梯度较明显, 纬向分布比较均匀。但由于地形和大气环流因素的影响, 臭氧在大气中的纬向分布也存在不均匀性, 特别是在中高纬度冬、春季节。臭氧分布的纬向不均匀是由行星波扰动引起的^[8-11]。冬季, 在对流层形成的行星波上传到平流层, 对 30 km 以下平流层大气运动产生影响。从全球臭氧总量时空分布图可以清楚地看到^[12]: 在北半球中高纬度地区冬、春季, 臭氧总量在东亚、北美和西欧存在 3 个高值中心, 位置与冬季平流层底部大气超长波的 3 个大槽位置大致相符。我国地处欧亚大陆东部, 东西跨度大, 受东亚臭氧高值中心的影响, 我国北方东部臭氧分布状况与同纬度西部地区相比, 有明显差异。为此本文对我国北方东、西部大气臭氧总量和垂直分布特征进行对比和研究。

本文运用 SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas

Experiment II) 和 HALOE (Halogen Occultation Experiment) 臭氧垂直分布资料和 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 臭氧总量资料进行分析和研究。装载于 ERBS 卫星的 SAGE II 仪器和装载于 UARS 卫星的 HALOE 仪器应用太阳掩星探测技术进行探测, 得到的臭氧垂直分布探测结果具有较高的精度和垂直分辨率^[13-15], 但是在一定区域范围内每月得到的探测资料十分有限。由于 SAGE II 和 HALOE 探测结果具有较好的一致性和可比性^[16-19], 因此本文综合运用 SAGE II 和 HALOE 臭氧垂直分布资料, 结合 TOMS 臭氧总量资料, 研究我国北方东、西部大气臭氧总量和垂直分布特征和差异。

1 资料和计算方法

本文使用的数据资料是由 NASA 提供的 SAGE II (版本 6.2) 和 HALOE (版本 19) 臭氧垂直分布资料以及 TOMS (版本 8) 臭氧总量资料。

本文将我国北方分为 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 两个纬度范围, 经度范围为 $75^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$, 并沿 105°E 经线将其分为东、西两部分。这样形成了 4 个区域: $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$; $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$;

* 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403702)和国家自然科学基金项目(40475014, 40333029)共同资助。

2007-12-26 收到, 2008-07-22 收到再改稿。

$35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$; $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ 。包括了我国北方大部和一些周边国家。

数据处理方法: 使用 1997 年 3 月—2002 年 2 月 SAGE II 和 HALOE 臭氧垂直分布资料, 结合对应的 TOMS 臭氧总量资料, 计算出每个区域春季 (3, 4, 5 月)、夏季 (6, 7, 8 月)、秋季 (9, 10, 11 月) 和冬季 (12 月, 次年 1, 2 月) 5 年平均臭氧垂直分布和臭氧总量、16~30 km 以及 16 km 以下臭氧柱总量。考虑到 SAGE II 和 HALOE 臭氧垂直分布探测数据在 16 km 以下误差较大, 所以在数据分析过程中, 对 16 km 以上臭氧柱总量进行积分计算, 16 km 以下臭氧柱总量近似用臭氧总量减去 16~60 km 臭氧柱总量计算出来。在运用臭氧垂直分布

资料计算一定高度范围内臭氧积分柱总量时, 首先将臭氧的单位换算成柱密度, 然后对高度积分计算出臭氧柱总量。

2 我国北方东、西部臭氧分布特征和差异

图 1~2 给出了 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 和 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内, 东部和西部 1997—2001 年各个季节平均臭氧垂直分布。

表 1 和表 2 分别对应 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 和 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围, 东、西部季节平均臭氧总量、16~30 km 臭氧柱总量、1 倍标准偏差、16 km 以下臭氧柱总量以及相应的东、西部差值。

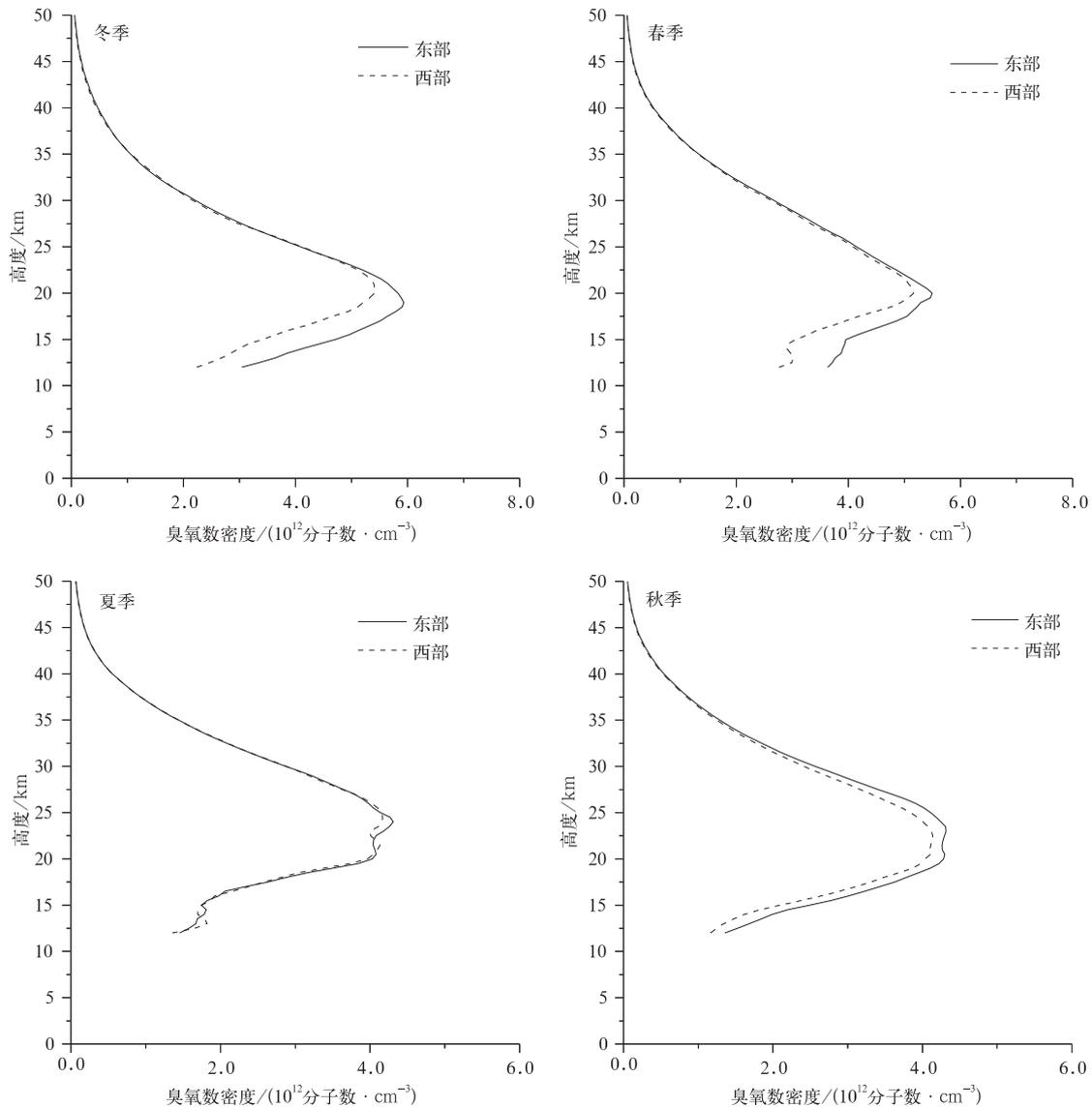


图 1 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围东部 ($105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 和西部 ($75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 各个季节平均臭氧垂直分布比较
Fig. 1 Comparison of seasonal averaged ozone vertical distributions between the east ($105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$) and the west ($75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$) of $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ latitude band

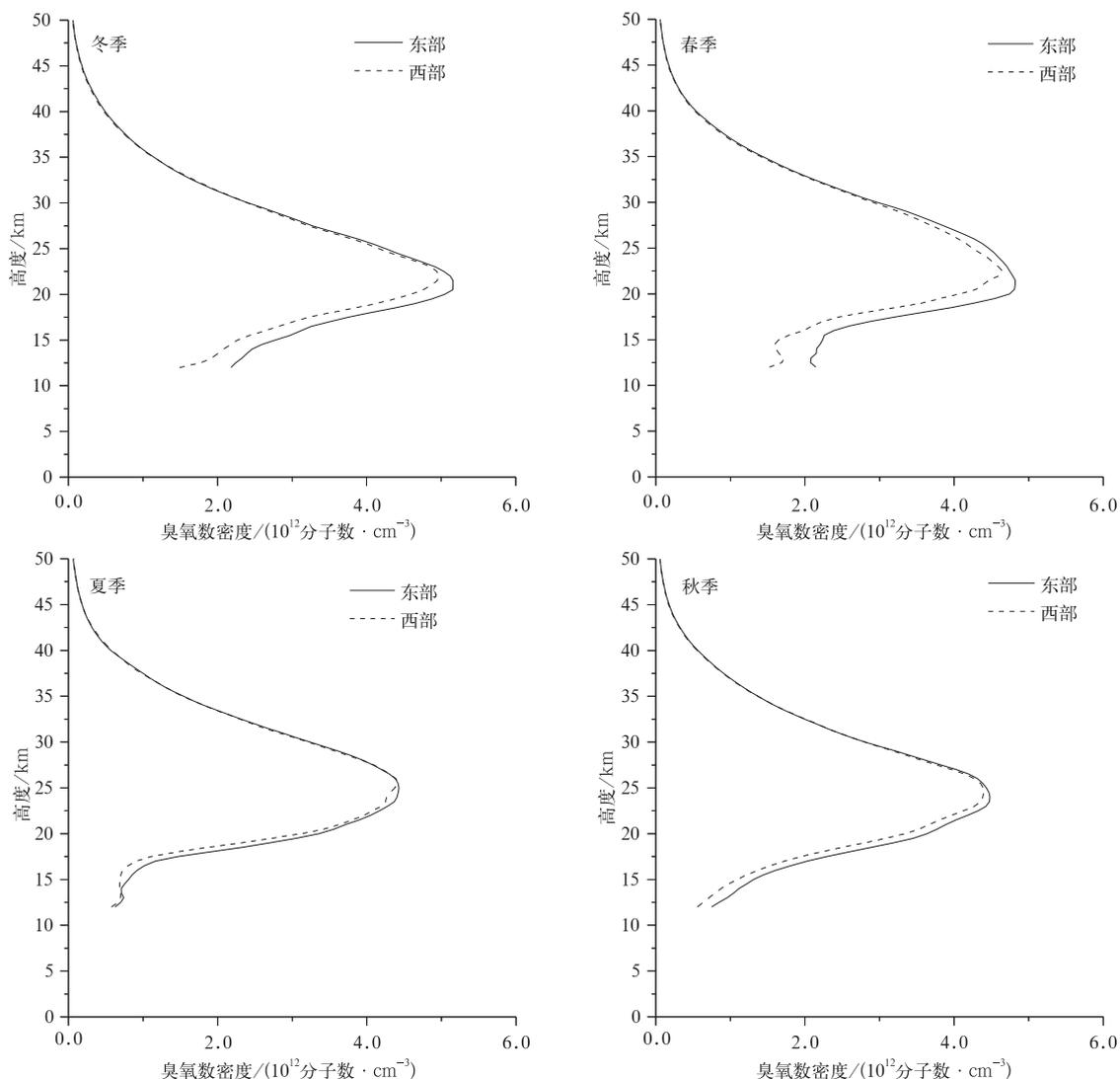


图2 35°~45°N 范围东部(105°~135°E)和西部(75°~105°E)各季节平均臭氧垂直分布比较

Fig. 2 Comparison of seasonal averaged ozone vertical distributions between the east (105°—135°E) and the west (75°—105°E) of 35°—45°N latitude band

从图1可以看出:在45°~55°N范围内,我国东部平流层低层臭氧含量在冬季、春季和秋季明显大于西部;冬季和春季平流层臭氧垂直分布差异主要表现在臭氧极大值附近及其以下高度;在秋季,东、西部臭氧垂直分布的差异范围持续到30 km。根据表1的计算结果,臭氧总量东、西部差近似等于16~30 km范围臭氧柱总量东、西部差和16 km以下臭氧柱总量东、西部差之和,这说明30 km以上东、西部臭氧含量几乎是一致的;从图1和表1中还可以看出,在夏季,东、西部臭氧总量和垂直分布差异不明显。

从图2可以看出:在35°~45°N范围内,我国东、西部臭氧垂直分布在冬季、春季和秋季仍有较明

显差异,其中冬季和秋季臭氧垂直分布东、西部差异表现在臭氧极大值附近及其以下高度,春季东、西部臭氧垂直分布差异范围达到28 km。从表2的计算结果同样可以看出,臭氧垂直分布的东、西部差异主要存在于30 km以下高度。对比45°~55°N范围的计算结果可以看出,随着纬度的降低,冬季和秋季臭氧总量东、西部差异减小,但春季臭氧总量东、西部差异没有明显改变。在夏季,35°~45°N范围臭氧分布状况出现了新的特征:东、西部臭氧总量存在明显差异,达到20.6 DU,并且此时东、西部臭氧分布差异主要存在于16 km以下平流层底层和对流层,达到12.8 DU。

表 1 45°~55°N 范围,我国北方东、西部季节平均臭氧分布差异(单位:DU)

Table 1 East-west differences of seasonally averaged ozone distribution for the latitude band of 45°—55°N(unit: DU)

季节	TOMS 臭氧总量			16~30 km 臭氧柱总量			16 km 以下臭氧柱总量		
	东部	西部	<i>d</i>	东部	西部	<i>d</i>	东部	西部	<i>d</i>
冬季	394.7(13.49)	348.8(16.04)	45.9	239.6(4.40)	222.7(8.27)	16.9	101.6	73.1	28.5
春季	400.7(20.06)	366.5(21.91)	34.2	230.8(8.47)	216.9(10.18)	13.9	105.7	86.7	19.0
夏季	323.1(7.91)	318.4(6.16)	4.7	186.7(1.08)	184.9(7.63)	1.8	68.0	65.0	3.0
秋季	324.0(4.43)	298.5(5.90)	25.5	198.7(4.04)	186.0(6.44)	12.7	62.8	52.4	10.4

注:括号内数字为相应的 1 倍标准差;*d*=东部臭氧含量-西部臭氧含量。下同。

表 2 35°~45°N 范围,其他同表 1

Table 2 Same as in Table 1, but for the latitude band of 35°—45°N

季节	TOMS 臭氧总量			16~30 km 臭氧柱总量			16 km 以下臭氧柱总量		
	东部	西部	<i>d</i>	东部	西部	<i>d</i>	东部	西部	<i>d</i>
冬季	339.1(11.92)	312.6(13.54)	26.5	214.0(6.00)	201.9(10.42)	12.1	67.8	53.7	14.1
春季	355.4(12.69)	320.8(13.26)	34.6	211.1(13.40)	193.1(13.68)	18.0	75.6	60.3	15.3
夏季	311.4(6.26)	290.8(4.19)	20.6	177.4(3.29)	170.0(3.35)	7.4	59.8	47.0	12.8
秋季	297.2(6.00)	279.2(3.88)	18.0	186.0(7.84)	176.8(6.81)	9.2	44.5	36.0	8.5

为分析臭氧总量和 16~30 km 臭氧柱总量东、西部差异的显著性,使用 *t* 统计量进行检验。首先根据 45°~55°N 和 35°~45°N 范围各个季节东、西部臭氧数据计算出 *t* 统计量。取显著性水平 $\alpha=0.05$,查 *t* 分布表得到置信限 $t_{0.05}=2.31$,若取显著性水平 $\alpha=0.10$,得到置信限 $t_{0.10}=1.86$ 。在 45°~55°N 范围,计算得到冬季、春季和秋季臭氧总量的 *t* 统计量分别为 4.90,2.57 和 7.73;16~30 km 臭氧柱总量的 *t* 统计量分别为 4.03,2.35 和 3.74。这些 *t* 统计量均大于 $t_{0.05}$,说明在 45°~55°N 范围,冬季、春季和秋季臭氧总量和 16~30 km 臭氧柱总量东、西部差异是显著的。夏季,45°~55°N 范围臭氧总量和 16~30 km 臭氧柱总量的 *t* 统计量分别为 1.05 和 0.52,均小于 $t_{0.10}$,说明在夏季这个纬度范围东、西部臭氧含量没有明显差异。在 35°~45°N 范围,计算得到冬季、春季、夏季和秋季臭氧总量的 *t* 统计量分别为 3.28,4.21,6.11 和 5.63,均大于 $t_{0.05}$;16~30 km 臭氧柱总量的 *t* 统计量分别为 2.25,2.10,3.52 和 1.98,其中夏季的 *t* 值大于 $t_{0.05}$,冬季、春季和秋季的 *t* 值虽然小于 $t_{0.05}$,但均大于 $t_{0.10}$ 。说明在 35°~45°N 范围,一年四季臭氧总量东、西部差异都是显著的;16~30 km 臭氧柱总量东、西部差异也是显著的,尤其在夏季,但是在冬季、春季和秋季,东、西部差异没有 45°~55°N 范围显著。

造成我国平流层低层东、西部臭氧分布差异的直接原因是每年冬、春季在东亚有一个臭氧高值区。图 3 是根据 TOMS 月平均臭氧总量资料绘制出的 1998 年 1,4,7,10 月全球臭氧总量分布图。图 3 中

采用 1,4,7,10 月月平均臭氧总量分布分别代表冬季、春季、夏季和秋季臭氧总量全球分布的典型状况。从图 3 可以看出臭氧高值区从产生、发展到消失阶段臭氧总量分布情况。根据 TOMS 臭氧总量探测结果,臭氧高值中心约在 50°~70°N,120°~150°E 范围。它在每年秋末开始产生,在冬季和初春季节发展到最强,到春末夏初逐渐消失。许多研究表明,臭氧高值区的产生是平流层准定长行星波作用的结果^[8-11]。冬、春季节,在平流层低层 100 hPa 等压面高度上,欧亚大陆东部边缘 130°E 附近通常处在行星波波槽的位置^[8]。槽后的下沉运动将高层富含臭氧的空气带到平流层低层,同时槽后的西北气流带来了北部和西北部臭氧含量丰富的空气,在平流层低层形成了臭氧高值区,并且也扩展到对流层。在夏季,行星波不能上传到平流层,很难对平流层臭氧分布造成影响,这时臭氧分布是纬向比较均匀的。从图 1~2 可以看出,臭氧高值区主要集中在臭氧极大值附近及其以下高度,最高不超过 30 km。在 30 km 以上,东、西部臭氧分布几乎是一致的。大气环流的动力影响范围主要在平流层 30 km 高度以下和对流层^[20],30 km 以上臭氧浓度主要受光化学作用的影响,纬向分布均匀。

秋季,在臭氧高值区逐渐形成时,便开始造成我国东、西部臭氧分布差异。在 45°~55°N 范围内,从秋季开始,东、西部臭氧垂直分布就存在较明显差异;在冬季,臭氧高值中心发展到最强,东、西部臭氧总量分布差异达到最大,为 45.9 DU;在春季,臭氧高值中心强度逐渐减弱,此时东、西部臭氧总量分

布差异减少到 34.2 DU;在夏季,随着臭氧高值区的消失,我国东、西部臭氧分布差异不明显。在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内,由于离臭氧高值中心距离较远,所以在冬季和秋季,东、西部臭氧总量差异较 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围要小。但在春季,随着臭氧高值中心强度逐渐减弱,高值区臭氧总量分布趋于均匀,此时东、西部臭氧总量分布差异比冬季有所增大,达到 34.6 DU,同 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围的东、西部臭氧总量分布差异相比,没有明显差别。夏季, $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内臭氧总量东、西部差异较明显,达到 20.6 DU;从图 2 夏季可以

看出,平流层臭氧垂直分布的东、西部差异主要存在于 25 km 以下高度;根据表 2 的计算结果,此时 16~30 km 臭氧柱总量东、西部差异为 7.4 DU,而 16 km 以下臭氧柱总量东、西部差异可达 12.8 DU。说明夏季, $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围臭氧分布的东、西部差异主要存在于平流层底层和对流层。虽然平流层底层和对流层臭氧含量同大地形的影响、行星波的作用、以及天气变化密切相关,但也应该考虑大气污染造成的影响。以上问题值得关注和进一步研究。

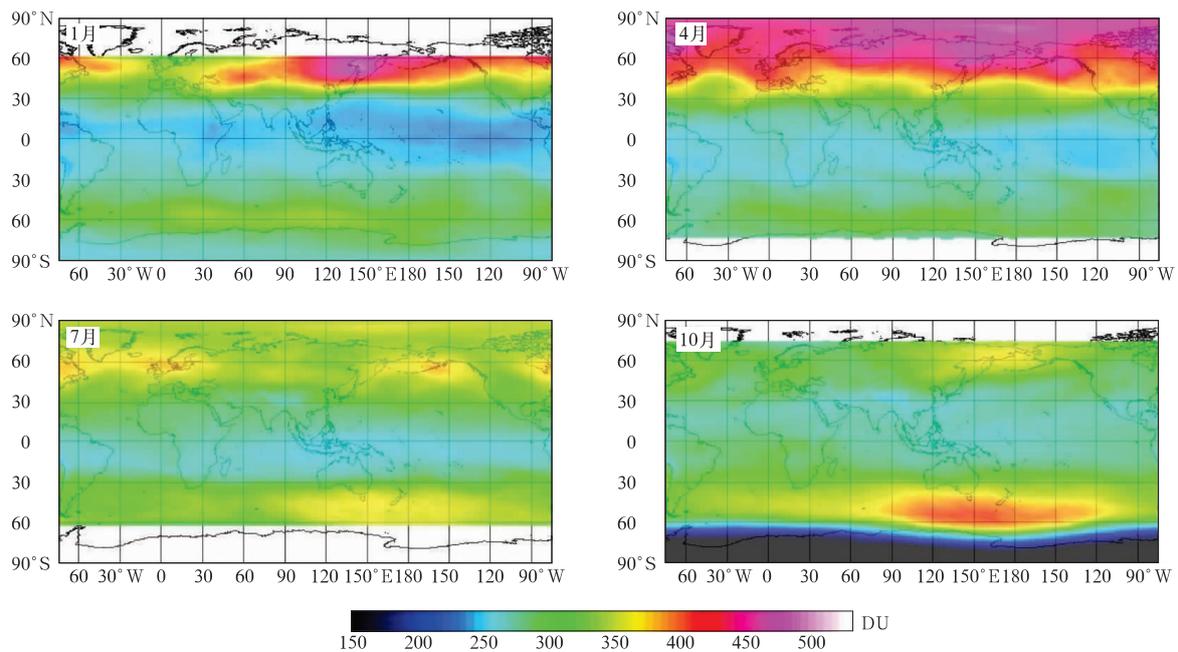


图 3 1998 年 1,4,7,10 月全球月平均臭氧总量分布图

Fig. 3 Monthly-mean maps of total ozone in January, April, July and October of 1998

3 结 论

本文研究了我国北方东、西部大气臭氧总量和垂直分布特征和差异,得到以下结论:

1) 在冬季、春季和秋季我国北方东、西部大气臭氧总量和垂直分布存在明显差异,表现在 30 km 以下,特别是臭氧极大值附近及其以下高度臭氧含量东部比西部明显偏大。

2) 随着纬度的降低,冬季和秋季臭氧总量东、西部差异减小,但是在春季,臭氧总量东、西部差异不随纬度的降低有明显改变。

3) 夏季,在 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内,东、西部臭氧总量差异较小,垂直分布差异不明显;但在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$

范围内,臭氧总量东、西部差异达到 20.6 DU,16 km 以下臭氧柱总量东、西部差异达到 12.8 DU。这说明此时 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围臭氧分布的东、西部差异主要存在于平流层底层和对流层。

致 谢:感谢美国 NASA/Langley 研究中心提供的 SAGE II, HALOE 臭氧垂直分布数据,感谢 NASA/GSFC 中心提供的 TOMS 臭氧总量数据。

参 考 文 献

- [1] Wang W C, Pinto J P, Yung Y L. Climatic effects due to halogenated compounds in the Earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37: 333-338.
- [2] 石广玉. 大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应. 中国科学(B辑), 1991, 7: 776-784.
- [3] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨, 等. 北京上空大气臭氧垂直分布的

- 特征. 地球科学进展, 2004, 19(5): 743-748.
- [4] 郭品文, 朱乾根, 刘宣飞. 北半球春季大气臭氧年际变化特征及其对大气温度和环流场的影响. 高原气象, 2001, 20(3): 245-251.
- [5] 郭世昌, 常有礼, 张利娜. 北半球中纬度地区大气臭氧的年际和年代际变化研究. 大气科学, 2007, 31(3): 418-424.
- [6] 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. 科学通报, 1995, 40(15): 1396-1398.
- [7] 邹捍, 李鹏, 周立波, 等. 北大西洋臭氧极小值和北太平洋臭氧极大值及其相互关系. 大气科学, 2006, 30(5): 905-912.
- [8] Hood L L, Zaff D A. Lower stratospheric stationary waves and the longitude dependence of ozone trends in winter. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 25791-25800.
- [9] McCormack J P, Miller A J, Nagatani R, et al. Interannual variability in the spatial distribution of extratropical total ozone. *Geophysics Research Letters*, 1998, 25: 2153-2156.
- [10] Kurzeja R J. Spatial variability of total ozone at high latitudes in winter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984, 41: 695-697.
- [11] 郑彬, 陈月娟, 施春华. 平流层臭氧纬向分布季节变化和行星波的关系. 高原气象, 2006, 25(3): 366-374.
- [12] 魏鼎文, 郭世昌, 赵延亮. 1963—1985年北半球大气臭氧总量时空变化图集. 北京: 科学出版社, 1989.
- [13] McCormick M P. SAGE II: An overview. *Advances in Space Research*, 1987, 7: 219-226.
- [14] Mauldin L E III, Zaun N H, McCormick M P, et al. Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II instrument: A functional description. *Optical Engineering*, 1985, 24: 307-312.
- [15] Russell J M III, Gordley L L, Park J H, et al. The Halogen Occultation Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 10777-10797.
- [16] Morris G A, Gleason J F, Russell J M III, et al. A comparison of HALOE V19 with SAGEII V6.00 ozone observations using trajectory mapping. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D13): 4177-4185.
- [17] Nazaryan H, McCormick M P. Comparisons of Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE II) and solar backscatter ultraviolet instrument (SBUV/2) ozone profiles and trend estimates. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D17302), doi: 10. 1029/2004JD005483.
- [18] Nazaryan H, McCormick M P, Russell J M III. New studies of SAGE II and HALOE ozone profile and long-term change comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D09305), doi: 10. 1029/2004JD005425.
- [19] Bhatt P P, Remsberg E E, Gordley L L, et al. An evaluation of the quality of Halogen Occultation Experiment ozone profiles in the lower stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 9261-9275.
- [20] 王贵勤, 毛节泰, 朱元竞, 等译. 大气臭氧研究. 北京: 科学出版社, 1985: 97-126.

Differences in Ozone Distribution Patterns of East and West Parts in the North of China Based on Satellite Data

Yang Jingmei Qiu Jinhuan

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The focus of this study is to better understand the characteristics and differences in total ozone and ozone vertical distribution patterns of east and west parts in the north of China. It is acknowledged that ozone vertical distribution feature in China not only has common behaviors, which is in line with many other regions of the same latitudes, but also has particular characteristics. It is worth noting that during the winter and spring, the monthly-mean maps of total ozone display a prominent maximum off the Asian east coast, centered at about 50° — 70° N, 120° — 150° E, caused by the vertically propagation of the quasi-stationary planetary waves. Affected by this high ozone concentration region, the column total ozone in the north of China displays substantial deviations from zonal symmetry, and ozone vertical distribution pattern in the east part is remarkably different from that of the west.

The Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II (SAGE II) (version 6.2), Halogen Occultation Experiment (HALOE) (version 19), and Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) (version 8) satellite data sets from March 1997 to February 2002 are used to derive seasonally averaged ozone profiles and total ozone. Seasonal, latitudinal and comparative studies of total ozone and ozone vertical distributions are performed for the regions covering latitude bands of 45° — 55° N and 35° — 45° N, and longitude ranges of 75° — 105° E (west part) and 105° — 135° E (east part). And the standard t test method is used to determine the significance of differences in seasonal average total column ozone, 16—30 km column ozone, and column ozone below 16 km between the east and the west part.

During winter, spring and autumn, the total ozone values of the east part are considerably higher than those of the west. At the altitudes of ozone maximum density and below, seasonal average ozone amounts in the east part are obviously higher than those of the west, especially during winter and spring. But at the altitudes above 30 km, there are small differences between the east and the west. During winter and autumn, the east-west total ozone differences decrease with the decreasing latitude. But during spring, the east-west total ozone difference over the 35° — 45° N band is nearly the same as that of the 45° — 55° N band. During the summertime, the east-west total ozone difference is small in the latitude band of $50^{\circ}\pm 5^{\circ}$ N, and the ozone profile of east region is very similar to that of the west. But for the latitude band of 35° — 45° N, there are still significant ozone distribution differences between the east and the west; The east-west total ozone difference becomes as large as 20.6 DU, and the derived 0—16 km total column ozone difference is 12.8 DU. It suggests that in the latitude band of 35° — 45° N, the east-west ozone differences mainly exist in the lowermost stratosphere and troposphere during the summertime.

Key words: total ozone; vertical distribution; east-west difference