

北半球中纬度地区大气臭氧的年际和年代际变化研究

郭世昌 常有礼 张利娜

云南大学大气科学系, 昆明 650091

摘 要 利用 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 范围内 1963~1992 年的臭氧格点数据资料, 应用 Morlet 小波变换方法对臭氧演变进行了分析。结果表明: (1) 臭氧存在明显的年际和年代际变化, 其年际变化的特征时间尺度为 2 年和 5 年, 年代际变化的特征时间尺度为 12 年; (2) 臭氧准 4 年周期振荡最明显的地区出现在西欧, 而准 11 年周期振荡最明显的地区则在东亚, 其中 12 年时间尺度的周期振荡最强。

关键词 臭氧 小波分析 特征时间尺度 年代际

文章编号 1006-9895 (2007) 03-0418-07

中图分类号 P421

文献标识码 A

Research on the Interannual and Interdecadal Variations of the Atmospheric Ozone in the Middle Latitude Region of the Northern Hemisphere

GUO Shi-Chang, CHANG You-Li, and ZHANG Li-Na

Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract It is well known that the climate system and some of its elements present notable interdecadal feature. As an important tracer of atmospheric circulation, ozone has a vital climatic and biological effect in the earth system, and its concentration can be modulated by some synoptic system activity, such as frontal passage, cyclonic/anticyclonic disturbance and mass exchange between stratosphere and troposphere. Because ozonosphere protects the earth's ecosystem from exceed solar ultraviolet radiation, it is important to study its temporal-spatial distribution.

The content of the atmospheric ozone in the stratosphere is determined by both photochemical and dynamic processes which are related to solar activity and general circulation respectively. The solar cycle and long-period oscillation in general circulation should have some effect on ozone change. In order to seek the relationship between them on interannual and interdecadal scales, the Morlet wavelet transform is used. The modulus of averaged Morlet wavelet transform represents energy density. The ozone grid data derived from ground-based (WOUDC) and satellite observational (TOMS) data during the period of 1963 to 1992 are used. Here, the WOUDC data range from 1963 to 1985 and TOMS from 1979 to 1992. Comparison between the two data sets during 1979-1985 indicates that their change trends are in agreement. The studied region is ($40^{\circ}\text{N} - 60^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W} - 150^{\circ}\text{E}$). The relative sunspot number data in the same period are also used to compare the characteristics of ozone change and solar cycle.

The results show that, (1) there exist evident interdecadal and interannual variations in atmospheric ozone variation in the studied region. The region with the maximum value of total ozone modulus of averaged Morlet wavelet is defined as the Maximum Amplitude Activity Centre (MAAC). (2) For the interannual variation, there are two characteristic time scales, 2-year and 5-year. As for the interdecadal variation, its characteristic time scale is 12-year. It is interesting that this time scale is corresponding to the quasi-23-year oscillation of the solar activity. (3) The MAAC of averaged annual ozone change with 2-year characteristic time scale is located at (50°N , 10°W). That

is, in western Europe the ozone quasi-4-year oscillation is evident. The MAAC of averaged annual ozone change with 12-year characteristic time scale is located at (40°N , 60°E), in this region there usually exists an ozone lower value centre, and the periodic oscillation with 12-year time scale is the most obvious changing composition. (4) The MAAC of averaged annual ozone change with 5-year characteristic time scale is located at (40°N , 100°E), which means there is an evident ozone quasi-11-year cycle in eastern Asia, which bears some relation to the quasi-11-year oscillation of the solar activity. (5) Similar to the sunspot activity, atmospheric ozone also has the quasi-11-year cycle, and there is certain phase difference between them.

Key words ozone, wavelet analysis, characteristic time scale, interannual variation

1 引言

20 世纪以来,随着人类活动对自然环境的影响明显增强、大气中 CO_2 等温室气体的增加、全球气候变暖及平流层臭氧层变薄等全球变化对人类的影响日益严重,一个显著的表现就是各类气象灾害事件及其次生自然灾害事件有频次增加、强度加大的趋势。因此,开展这方面的监测与研究有重要的意义,其中,气候变化的年代际变化是近年的研究热点。

近年来,对气候变化的研究在以下几个方面比较突出:大气环流的年代际变化、中国气温和降水的年代际变化、海洋的年代际变化研究,以及海-气系统的年代际变化研究等等。所有这些研究成果都表明一个不争的事实:气候系统及其某些要素均表现出了明显的年代际变化特征^[1~4],这对我们认识气候系统的演变发展规律十分重要。对于地球生态系统有着重大意义的平流层臭氧的年代际变化问题值得我们认真研究。

平流层臭氧在屏蔽太阳生物有效辐射、庇护地球生物圈、调制平流层大气环流温度-气压场之同时,亦为一种重要的大气运动示踪剂。锋面过境、气旋反气旋活动、对流层-平流层交换等天气系统活动都会引起一个地区的平流层臭氧的改变^[5],相应于大气行星波的东亚、北美、西欧三大气压槽位置存在有臭氧总量的三个高值中心^[6]。对于 ENSO、QBO、NAO、AO 与大气臭氧的关系也引起人们极大关注,邹捍等^[7~10]曾使用优化的研究方法,定量研究南半球臭氧中的太阳周期、ENSO 和 QBO 信号,指出臭氧变化的纬向不均一性和南极臭氧洞的偏心性,并使用不同的方法研究了北半球 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 大气臭氧变化中的太阳周期、QBO、ENSO、NAO、AO 等振荡的特征和分布规律,指出大气臭氧对不同气候因子相应的纬向不均匀性。

因此,大气环流和气候变化的某些重要特征,包括其年际和年代际变化特征,应该在大气臭氧总量的变化中有所反映。此外,平流层臭氧的存在是一个光化学分解与产生的动态平衡结果,因此,从较长的时间尺度来讲,太阳活动的周期变化有可能在臭氧总量的年代际变化中体现。

为弄清以上问题,本文选取欧亚地区 30 年的大气臭氧总量地面观测网资料及卫星观测月平均资料,并应用气候变化年代际分析中广泛采用的 Morlet 小波分析方法来对其加以研究。

2 资料及方法

本文所用的资料数据为:(1) 1963~1985 年欧亚地区的臭氧总量年平均值^[5],其地面格点数据资料水平分辨率为 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$,考虑到低纬和高纬地区观测站点少、缺测资料较多,故只选取了 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 的臭氧年平均资料;(2) 1979 年 1 月~1992 年 12 月美国航空航天局 (NASA) 的 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 臭氧总量月平均全球网格资料,水平分辨率为 $1.25^{\circ}\times 1.0^{\circ}$ 。

对以上资料进行如下计算和分析:将 1979 年 1 月~1992 年 12 月的 TOMS 资料插值到与文献^[6]相同的经纬度网格,即水平分辨率为 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$,并求出年平均值,以解决这两段资料的时空衔接问题。通过把文献^[6]中 1979~1985 年的臭氧年平均资料同 TOMS 资料中 1979~1985 年的臭氧年平均资料进行对比,发现其相关很好。而 Minschwaner^[11]和 Bian 等^[12]曾对臭氧的地面观测资料和卫星观测资料作过对比,其结果也显示相关系数一般大于 0.93,相对误差小于 3%。因此,我们认为可以把这两段资料连接起来使用,从而组成完整的 1963~1992 年的臭氧年平均资料。文中所采用的研究手段主要是小波分析方法^[13~16]。

3 臭氧变化的特征时间尺度分析

3.1 臭氧变化的特征时间尺度

图 1 是 1963~1992 年的欧亚地区臭氧年平均值的分布,其中水平空间范围为:(40°N~60°N, 20°W~150°E)。横坐标为所研究的臭氧资料的时间范围,纵坐标为臭氧总量的年平均值,单位为 DU (臭氧单位, 1 DU 相当于 10^{-3} cm)。通过初步分析与计算可以得出:(1) 这 30 年臭氧总量的平均值为 345.34 DU。其最高值是 1970 年的 373.61 DU,最低值是 1964 年的 315.74 DU;(2) 臭氧的年际之间存在较为明显的差异,并不是简单的年际振荡。臭氧的这种变化可能是由多种因素造成的;(3) 在 1969~1984 年期间的臭氧数值较高,而 1963~1968 年和 1984~1992 年这两个时段的臭氧数值较低,这表明,大气臭氧的确存在一定的年代际变化特征;(4) 与此同时,我们还注意到,在 20 世纪 80 年代以前,有些学者认为 60 年代的臭氧低值很可能是由测量误差所致,但我们现在把资料补充到 1992 年却发现这种低值的出现是有可能的,这就是由于臭氧存在着年代际变化。同样,1985 年以后臭氧主要呈下降趋势也可能是臭氧年代际变化所呈现出的一种“正常”趋势。

将该研究时空范围内的年臭氧量值处理为标准化的距平值时间序列后,即可对臭氧变化进行小波分析。图 2 给出相应的平均小波变换系数的模值随时间尺度的分布,其中纵坐标是无量纲的小波变换系数的模值,横坐标是以年为单位的时间尺度。从图 2 中可以看出,臭氧年均值在 2 a、5 a、12 a 的时

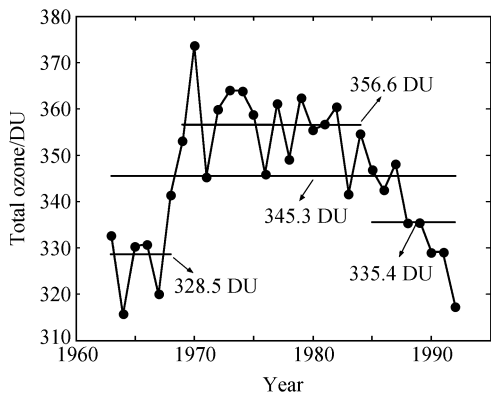


图 1 1963~1992 年的欧亚地区臭氧年平均值

Fig. 1 Annual mean distribution of total ozone in Europe-Asia during 1963 - 1992

间尺度上分别具有小波变换系数模值的极大值,这表明此臭氧年均值年际变化的特征时间尺度为 2 a 和 5 a,而年代际变化的特征时间尺度为 12 a。

3.2 不同特征时间尺度变化的臭氧最大振幅活动中心

根据以上分析结果,现分别取特征时间尺度为 $L_c=2$ a、 $L_c=5$ a、 $L_c=12$ a,将 1963~1992 年臭氧的格点资料全部处理为标准化的距平值时间序列后再作时间小波变换。在图 3 中分别给出 $L_c=2$ a、 $L_c=5$ a、 $L_c=12$ a 的 1963~1992 年平均的小波变换系数的模值的空间分布,其中数值是小波变换系数的模值,用其表示能量密度,小波变换系数的模值越大,表明其对应的时段和尺度的周期性越明显。

由图 3a 可以看出特征时间尺度 $L_c=2$ a 时,臭氧年均量最大振幅活动中心 (Maximum Amplitude Activity Center, MAAC) 位于 (50°N, 10°W),也就是说臭氧准 4 年周期振荡最明显的地区在西欧。这与文献[17]得出的结论不大一致,他们分析得出臭氧准 4 年周期振荡最明显的地区在北美,而不是西欧。究其原因,我们推测由以下几点造成:(1) 所研究的范围不同,由于本文所选取的资料的空间范围纬度太窄,把欧亚地区和北美地区放在一起分析会造成结果失真,因此本文只选取了欧亚中纬度地区作为研究对象,而文献[17]选取的则是北半球整个范围,包括欧亚地区和北美地区;(2) 文献[17]在分析过程中是把西欧和亚洲放在一起分析,但如果我们把这两个地区分开分析,西欧有可能就

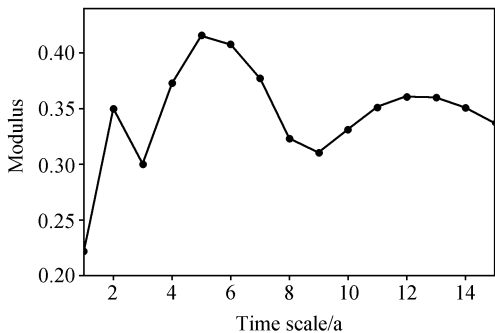


图 2 1963~1992 年欧亚地区平均小波变换系数的模值随时间尺度的分布

Fig. 2 Variation of total ozone modulus of averaged Morlet wavelet transform with characteristic time scale in Europe-Asia during 1963 - 1992

是北半球臭氧准 4 年周期振荡最明显的地区。由图 3b 可知,特征时间尺度 $L_c=5$ a 时,臭氧年均量 MAAC 位于 $(40^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E})$,即臭氧准 11 年周期振荡最明显的地区是在东亚地区,本文资料所选的纬度范围只是 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$,没把低纬度地区包含进去,但从图中还是可以很明显看出其 MAAC 应该偏向低纬度地区。而林学椿等^[18]曾指出北半球亚洲低纬度地区极可能是太阳黑子活动影响地球大气的关键区之一。由此也可看出,太阳黑子与臭氧变化之间的密切关系。图 3c 的结果表明,特征时间尺度 $L_c=12$ a 时,臭氧年均量 MAAC 位于 $(60^{\circ}\text{N}, 40^{\circ}\text{E})$ 。值得注意的是,对应于 12 a 特征时间尺度周期性最明显的地区是在一个臭氧低值中心,而东亚地区是在臭氧的高值区,周期性却不大明显,至于其物理原因和意义目前还不大清楚。

3.3 不同特征时间尺度变化的臭氧 MAAC 的小波分析

不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度下的变化特征:正的小波系数对应于臭氧偏多期,负的小波系数对应于臭氧偏少期,小波系数为零对应着突变点;小波变换系数的绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著。因此,通过小波系数的分析可识别出臭氧量时间序列的多时间尺度演变特性和突变特征。Morlet 小波为复数小波,其小波变换的模和实部是两个重要的变量。小波变换系数的模值表示能量密度,模值图能把各种时间尺度的周期变化在时间域中的分布情况展示出来,小波变换系数的模值越大,表明其对应的时段和尺度的周期性越明显。小波系数的实部包含给定时间和尺度下,相对于其他时间和尺度、信号的强度和位

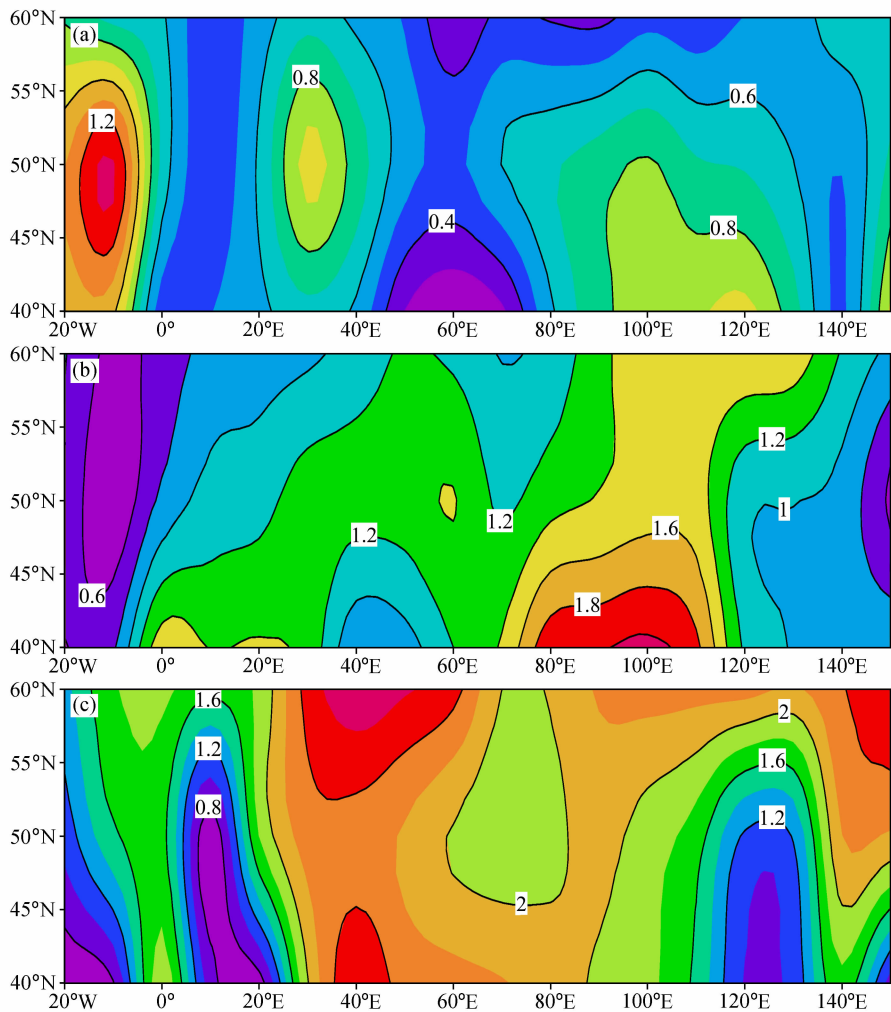


图 3 臭氧总量年均值小波变换系数模值空间分布: (a) $L_c=2$ a; (b) $L_c=5$ a; (c) $L_c=12$ a
Fig. 3 Spatial distribution of total ozone modulus of averaged Morlet wavelet transform: (a) $L_c=2$ a; (b) $L_c=5$ a; (c) $L_c=12$ a

相两方面的信息,也就是年臭氧变化在不同时间尺度上变化的臭氧量大小的时间振荡特征。以下仅就

$L_c=2$ a、 $L_c=12$ a 进行讨论,关于 $L_c=5$ a 我们将专门撰文讨论。

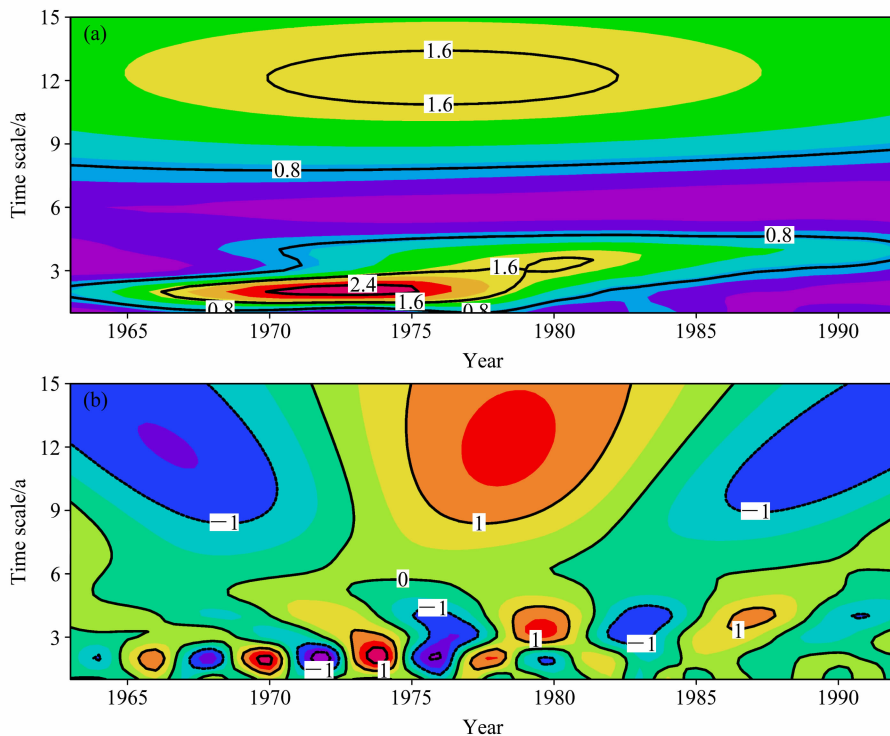


图 4 $L_c=2$ a 时 MAAC 标准化年臭氧值的小波系数模值 (a) 和实部 (b)

Fig. 4 Modulus (a) and real part (b) of Morlet wavelet transform of annual ozone data in MAAC regions when $L_c=2$ a

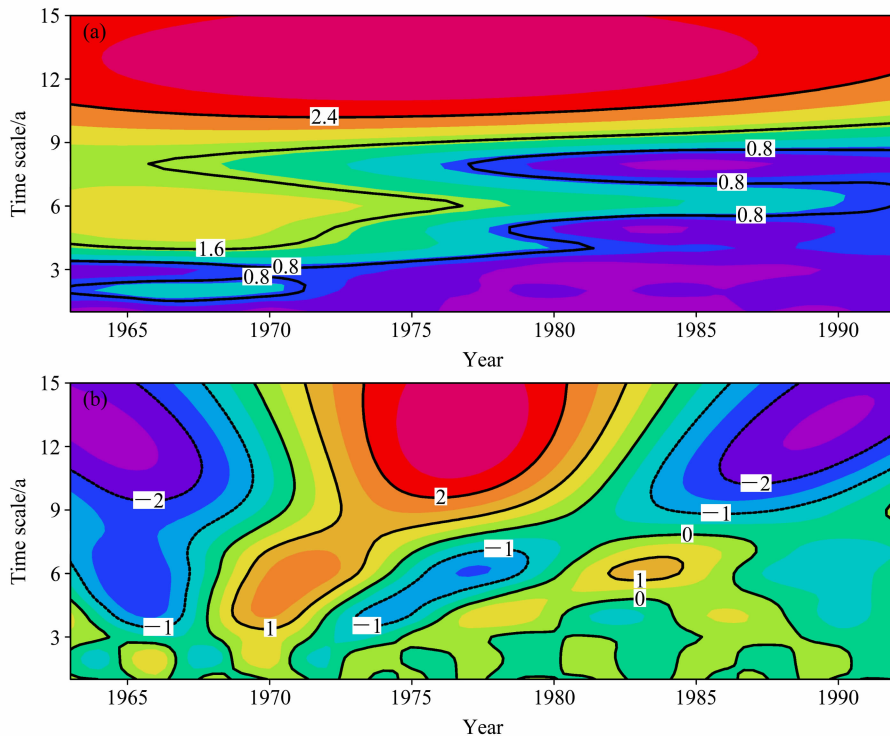


图 5 $L_c=12$ a 时 MAAC 标准化年臭氧值的小波系数模值 (a) 和实部 (b)

Fig. 5 Modulus (a) and real part (b) of Morlet wavelet transform of annual ozone data in MAAC regions when $L_c=12$ a

3.3.1 $L_c=2\text{ a}$ 的年均臭氧值 MAAC 的小波分析

在图 4 中, 我们分别给出 MAAC 位于 (50°N , 10°W) 的年臭氧值的标准化距平值时间序列的小波变换系数的模值和实部, 其中横坐标是以年为单位的时间变化, 纵坐标是以年为单位的时间尺度。从图 4a 中可看出, 2 a 时间尺度的模值比较大, 即 2 a 时间尺度的周期性很明显。小波系数实部为正时, 表示臭氧量偏多, 图 4b 中用实线绘出; 小波系数实部为负时, 表示臭氧量偏少, 图 4b 中用虚线绘出。从小波系数的实部可以看出不同时间尺度下的臭氧量多少的位相结构, 表明不同的时间尺度所对应的臭氧量多少变化是不同的。图 4a、b 均表明, 该 MAAC 的 2 a 尺度的周期变化特征是非常显著的, 并且准 4 年 周期振荡在 1978 年 以前比较明显, 而 1978 年 以后则不大明显。

3.3.2 $L_c=12\text{ a}$ 的年均臭氧值 MAAC 的小波分析

在图 5 中, 我们分别给出了 MAAC (60°N , 40°E) 的年臭氧值的标准化距平值时间序列的小波变换系数的模值和实部。分析图 5a、b 均可以看出, 该 MAAC 的 12 a 尺度的变化特征是非常显著的, 并且准 24 年 周期振荡在我们研究的时间段内一直都比较明显。

4 结论

(1) 臭氧存在明显的年际变化和年代际变化, 其年际变化的特征时间尺度为 2 a 和 5 a , 年代际变化的特征时间尺度为 12 a , 可能与太阳活动的准 23 年 周期变化有关。

(2) 特征时间尺度为 2 a 的臭氧年均量 MAAC 位于 (10°W , 50°N), 即臭氧准 4 年 周期振荡最明显的地区在西欧; 特征时间尺度为 12 a 的臭氧年均量 MAAC 位于 (60°N , 40°E)。这个地区是一个臭氧低值中心, 并且 12 a 时间尺度的周期振荡最强。

(3) 特征时间尺度为 5 a 的臭氧年均量 MAAC 位于 (40°N , 100°E), 即臭氧准 11 年 周期振荡最明显的地区是在东亚地区, 并且与太阳活动可能有着密切的关系, 这与邹捍等^[10] 在研究北半球 $50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 大气臭氧变化时得出的对于太阳活动对臭氧影响结果大致一致。

参考文献 (References)

[1] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际

变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 2006, **30** (5): 730~743

Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 730~743

[2] 周立波, 邹捍, 季崇萍, 等. 斯堪的纳维亚上空的臭氧亏损与北大西洋海温. 大气科学, 2001, **25** (2): 253~259

Zhou Libo, Zou Han, Ji Chongping, et al. The relationship of ozone low over Scandinavian with the surface temperature of the North Atlantic. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (2): 253~259

[3] 戚鹏, 李崇银. 国际上年代际到世纪时间尺度气候变化的研究. 气候与环境研究, 2001, **6** (3): 337~353

Xian Peng, Li Chongyin. A study of climate variability with interdecadal-centennial time scale in the world. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 337~353

[4] 李崇银, 朱锦江, 孙照渤. 年代际气候变化研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 209~219

Li Chongyin, Zhu Jinjiang, Sun Zhaobo. The study of interdecadal climate variation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 209~219

[5] 王贵勤. 大气臭氧研究. 北京: 科学出版社, 1985. 182~207

Wang Guiqin. *Atmospheric Ozone Research* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 182~207

[6] 魏鼎文, 郭世昌, 赵延亮. 1963~1985 年北半球大气臭氧时空变化分布图集. 北京: 科学出版社, 1989. 104~110

Wei Dingwen, Guo Shichang, Zhao Yanliang. *Chart Collection of the Northern Hemisphere Atmospheric Ozone Space-Time Change and Distribution During 1963-1985* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1989. 104~110

[7] Zou Han, Zhou Libo, Ji Chongping, et al. A possible mechanism of the Scandinavian ozone loss. *Progress in Natural Science*, 2001, **11** (4): 288~293

[8] Zou Han. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23** (9): 1029~1032

[9] Zou Han, Gao Yongqi. Long-term variation in TOMS ozone over $60\sim 70^{\circ}\text{S}$. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24** (18): 2295~2298

[10] Zou Han, Zhou Libo, Gao Yongqi, et al. Total ozone variation between 50° and 60°N . *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32** (23): L2381210. 1029/2005GL024012

[11] Minschwaner K. New observations of ultraviolet radiation and column ozone from Socorro, New Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26** (8): 1173~1176

[12] Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhao Yanliang, et al. Variation of total atmospheric ozone in Beijing and Kunming based on Dobson and TOMS data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (2): 279~286

- [13] 徐建军, 朱乾根. 印度洋-太平洋海温长期变化的周期性及其年代际变化. 热带气象学报, 1998, **14** (4): 353~358
Xu Jianjun, Zhu Qian'gen. The periodical oscillation of SST long term variation over Indian-Pacific ocean and its interdecadal changing. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1998, **14** (4): 353~358
- [14] Qian Weihong, Zhang Henian, Zhu Yafen. Interannual and interdecadal variability of East Asian Acaas and their impact on temperature of China in winter season for the last century. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (4): 511~523
- [15] Li Xiaodong, Zhu Yafen, Qian Weihong. Spatiotemporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880 - 1999. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (6): 1055~1068
- [16] Pinsky M A. *Introduction to Fourier Analysis and Wavelets*. Beijing: China Machine Press, 2003. 13~45
- [17] Guo Shichang, Wei Dingwen. Characteristic of the temporal-spatial variation in atmospheric ozonesphere over the Northern Hemisphere during the period of 1963 - 1985. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1988, **5** (3): 361~368
- [18] 林学椿, 于淑秋. 近百年来海平面气压对太阳黑子 11 年周期的响应. 天地生综合研究进展. 北京: 中国科技出版社, 1989. 342~384
Lin Xuechun, Yu Shuqiu. Response of sunspot 11-year period to sea level pressure for about 100 years. *Comprehensive Progresses Based on Astronomy Earth Biology Gene* (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1989. 342~384