

我国 380 nm 波长气溶胶光学厚度分布特征 和演变趋势^{* 1}

胡 婷¹⁾²⁾ 孙照渤¹⁾²⁾ 张海东²⁾³⁾

¹⁾(南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室,南京 210044)

²⁾(南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044) ³⁾(国家气候中心,北京 100081)

摘 要

利用 1980—2001 年 TOMS/NASA 逐月气溶胶光学厚度(AOD)资料,通过 EOF, Morlet 小波分析、趋势分析和突变检验等方法,研究了我国大气气溶胶 380 nm 光学厚度的时空分布特征和变化趋势。结果表明:全国全年存在两个范围较大、持续时间较长的 AOD 高值区:南疆盆地和四川盆地;绝大部分地区春季 AOD 值最大,最小值出现的季节则有所不同;季节差异随纬度增加而减小;AOD 变化具有明显的季节性和年际振荡特征;年平均 AOD 呈明显增加趋势,20 世纪 80 年代末 90 年代初增加趋势有所减弱。

关键词: TOMS; 380 nm 气溶胶光学厚度; 时空分布

引 言

大气气溶胶是气候模型中的最不稳定因子之一,能够通过多种途径影响气候,如通过对太阳辐射的散射、吸收作用直接影响地球大气的辐射平衡,还通过成云作用及非均相化学反应参与大气中的各种化学过程影响其他温室气体成分的源汇,对全球气候变化有着重要意义^[1-3]。IPCC 第三次评估报告^[4]指出,气候变化受到气候系统内部可变化性和外部因子(包括自然因素和人类活动)的共同影响,气溶胶的辐射强迫效应是其中重要的外部因子之一;同时也指出,气溶胶的气候效应存在很大不确定性,主要是由于气溶胶本身物理化学性质极其复杂,导致对其分布、光学特性以及粒子谱分布等这些主要参数特点缺乏足够了解。所以,当前的一个重要问题是,如何从大量分散和不连续的气溶胶观测资料中,凝练出能够反映其时空分布状况和光学特性(光学厚度、不对称因子、单次散射反照率等)的数据,以便定量分析气溶胶对环境与气候变化的影响。

气溶胶光学厚度 AOD(aerosol optical depth)

作为气溶胶最基本的光学特性,是表征大气混浊度的重要物理量,也是确定气溶胶气候效应的一个关键因子^[4],常被应用于研究气溶胶的变化特征和区域气候效应,我国科研工作者已经进行了大量的探讨研究^[5-13]。

当前主要有 3 种方法获得 AOD 值:一是宽带消光法,这种方法利用晴天某一时刻地面观测的直接太阳辐射资料,提出大气中水汽、二氧化碳、臭氧等气体的吸收,再通过与理想大气直接太阳辐射的比较,求取 AOD 值^[5-9]。利用这种方法, Qiu 等^[6]分析了我国 10 个地方大气气溶胶 1980—1994 年间的变化特征。周秀骥等^[7]、罗云峰等^[8]分析了 1961—1990 年我国气溶胶光学厚度的变化特征及平均分布特征。宗雪梅等^[9]研究发现 1993—2002 年 AOD 的变化已经不是总体增加趋势,而是有些地方有增加的趋势,还有些地方变化趋势不明显,只在某些年份有增加或减弱的趋势。二是利用卫星观测资料反演大气气溶胶含量,如毛节奏等^[10]、李成才等^[11]、张军华等^[12]都对如何从卫星资料反演气溶胶光学厚度进行过深入的研究,施晓晖等^[13]、Massie 等^[14]分别利用 TOMS 反演的 AOD 资料研究了冬季亚洲地区、北京上空的气溶胶时空特征。三是地基观测,

* 江苏省气象灾害重点实验室基金项目(KLME05001)资助。
2007-10-10 收到,2008-01-02 收到再改稿。

主要是利用太阳光度计测量气溶胶光学厚度,用于验证和评估卫星反演的气溶胶光学特性参数的精度,如 AERONET 观测网^[15]。Yu 等^[16]着眼于后两种方法,研究了不同手段获取的气溶胶光学厚度时空分布特征及其直接辐射效应。

比较发现,卫星遥感能够提供广阔背景上有关气溶胶的区域分布,具有良好的空间覆盖性,其他方法受限于站点分布和观测次数,难以提供长期的全球数据。为了更加全面地了解我国上空气溶胶的时空分布特征和长期演变规律,本文利用 TOMS (the Total Ozone Mapping Spectrometer) 卫星资料,分析了 380 nm 气溶胶光学厚度的地理分布、季节变化和趋势特征。

1 资料和方法

选用 TOMS 提供的 380 nm 全球逐月 AOD 资料,时间为 1980 年 1 月—1992 年 12 月以及 1996 年 8 月—2001 年 12 月,总长度为 221 个月,其中 1993 年 1 月—1996 年 7 月为缺测,分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,下载自 NASA/TOMS 网站。详细算法见文献^[17-18]。本文资料是由 Torres 等在 2006 年进一步订正之后得到的,订正后的 TOMS 气溶胶算法与 Aura-OMI 算法一致,采用了更加准确的地表反照率数据集,修正了原算法中对反射率估计不足(低估近 0.015)的问题,减少了 AOD 数据的虚假高值现象(高估约 0.1~0.2)。

经气溶胶自动地面监测网(AERONET)的 level 2.0 资料验证,TOMS 气溶胶光学厚度与地面实测站点的观测数据存在较好的一致性(图 1)。由于我国境内的 AERONET 站点较少,选取同期 $0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$, $60^\circ \sim 150^\circ\text{E}$ 范围内有数据的站点(共 98 个,表略)加以补充。

对 1980—1992 年以及 1996—2001 年的 AOD (包括原始数据和距平序列)分别分析,所得结果与线性连结这两段数据结果有较好的一致性,故采用 1980—2001 年(除去 1993 年 1 月—1996 年 12 月)进行分析。

根据 EOF 分析的显著中心,结合 AOD 分布特点,在全国范围内取出了 11 处研究区域(图 2),分别记为东北(区域 A)、华北(区域 B)、西北(区域 C, D, E, F)、华中(区域 G)、华东(区域 H)、西南(区域

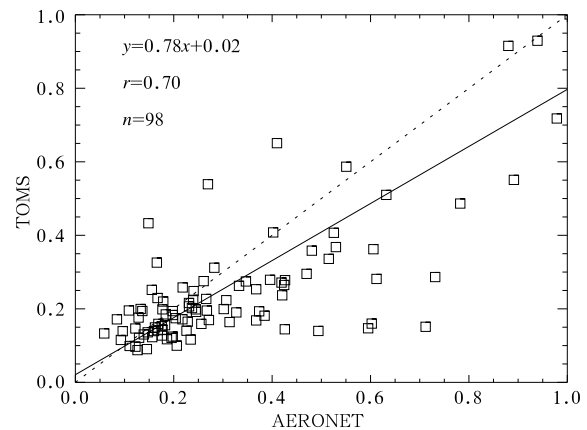


图 1 TOMS 反演与 AERONET 观测的 380 nm 气溶胶光学厚度的比较

(实线为线性拟合线,虚线表示 $y=x$; r 为相关系数)

Fig. 1 Scatter plot of monthly mean AOD for TOMS retrievals vs AERONET measurements at 380 nm (solid line stands for linear fit curve, dotted for $y=x$ line, and r for coefficient of correlation)

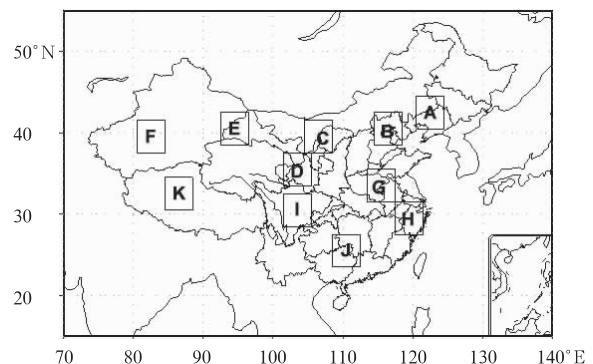


图 2 研究区域图

Fig. 2 The target regions

I)、华南(区域 J)和青藏高原(区域 K)。

文中对资料取季节平均时,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月。比较 AOD 的月、季平均值,发现 AOD 的季节内变化相当显著,采用季节平均虽然能够反映出季节内的大致状况,但是也造成了一些特征被平滑和忽略。所以,分别采用 1 月、4 月、7 月和 10 月数据代表各个季节进行分析,以便保留较多的 AOD 月变化特征,同时又能够反映不同季节的主要状况。

应用的方法有经验正交函数分解(EOF)、Morlet 小波分析、Fourier 功率谱、Mann-Kendall 非参数检验方法(简称 M-K 检验)、线性倾向估计和滑动 t 检验等。

2 我国 AOD 的区域特征

2.1 多年平均分布

1980—2001 年我国上空年平均 AOD 的分布(图略)显示,全国大部分地区的年平均值都达到 0.2 以上,高值中心位于南疆盆地、华南沿海及四川盆地上空,中心值达到 0.6 以上。以 100°E 为界,我国西部的 AOD 分布显示了明显的南北差异,青藏高原上空的 AOD 相当稀薄,而其北部的盆地地区则是范围最广的年 AOD 大值区; 100°E 以东地区,长江中下游至黄河中下游地区(统称为江河中下游)及华南上空均出现 AOD 高值中心。

在多年月均 AOD 图(图略)上,11 月至翌年 1 月分布相似,整体 AOD 值较低,仅四川盆地被浓厚的气溶胶所覆盖,另两个相对高值区分别位于南疆盆地、江河中下游一带;2 月开始各地 AOD 逐渐增大,南疆盆地上空 AOD 明显增厚。冬季,蒙古气旋东移南下,随之而来的大风、风沙天气可能是北方地区 AOD 增加的主要原因;同时,取暖燃煤也使这些地区的气溶胶光学厚度值增加。3—4 月,全国大部分地区 AOD 值迅速增大,四川盆地和江河中下游地区仍为高值区;南疆盆地和华南上空 AOD 值增加显著,部分地区跃变达到 0.8 左右。同时,在东北三省和内蒙古东部也出现了大范围的 AOD 高值。这一阶段(春季)气溶胶光学厚度明显增多,可能是由于北方沙尘暴的影响。5 月, 100°E 以西地区的 AOD 变化较小;以东,各高值中心都明显减弱缩小,其余各地也有一定减幅。6—8 月,全国大部分地区的 AOD 变化不大或略有减少,但南疆盆地的 AOD

大幅度减少,而在华南再次出现了小范围的 AOD 极大值。夏季,由于降水频繁,雨水的清除或湿沉降缩短了气溶胶的生命期,导致绝大多数地区的 AOD 减少。9—10 月,华南和南疆盆地上空的 AOD 均减弱,但仍高于全国平均状况;而在江河中下游地区,AOD 逐渐增大,其余地区的变化不明显。由年循环情况可以看出,南疆盆地及其周边地区主要属于沙漠气候,降水偏少,易于发生沙尘天气,从而有利于气溶胶的形成,全年的 AOD 值都偏高;黄河中下游至长江中下游一带受沙尘天气影响较大,冬春季节 AOD 较高;华南地区是我国典型的高温高湿气候区,其温湿条件有利于“气-粒”转化过程气溶胶的形成,同时水溶性气溶胶粒子吸湿增长也会使得局地 AOD 偏大。此外,春夏季节华南高值区的形成,可能也与南亚棕色气溶胶云^[19-21]有关联,Krishnamurti 等的研究结论^[20-21]也初步证明了这一情况。

图 3a 显示了我国境内 AOD 沿 110°E 的季节分布。可以看出,AOD 变化具有明显的季节性特征,随着纬度增加,其季节性差异减小。春夏 AOD 随纬度增加而减少,很明显是与北方沙尘暴有关;秋季纬向变化不明显,证明秋季各地 AOD 分布较为均匀。AOD 值,基本可以春—夏—冬—秋依次排列,唯一的例外是长江中下游平原(大约在 $28^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 间)冬季的 AOD 相对高值,几乎与春季持平。

图 3b 为沿 25°N (代表南方)和 40°N (代表北方)的春季 AOD 多年平均分布,主要出现了春季的两个高值中心:南疆盆地和四川盆地。其余季节的南北分布比较(图略)表示,夏季,南方略大于北方,冬季则相反;秋季在 110°E 以西,北大南小,以东则南大北小。

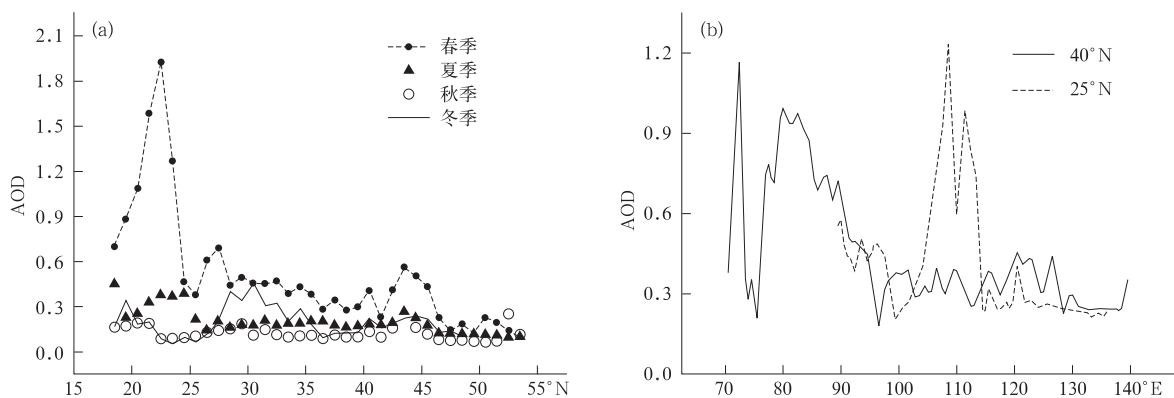


图 3 1980—2001 年 380 nm AOD 多年平均季节分布

(a) 沿 110°E 的四季变化, (b) 春季的南北比较

Fig. 3 Spatial distributions of 1980—2001 averaged seasonal 380 nm AOD

(a) through 110°E in spring, autumn and winter, (b) through 25°N and 40°N in spring

总体而言,全国存在两个范围较大、持续时间较长的 AOD 高值区:南疆盆地和四川盆地,另一个持续时间较短的高值中心位于华南上空;青藏高原、东北南部等地 AOD 值较小。我国整体 AOD 分布具有显著的季节变化特征,春季 AOD 最大,夏季次之,秋冬季节的 AOD 较小。低纬的季节变化较大,随纬度增加,季节差异减弱。此外,各季节的 AOD 都有明显的南北差异。

2.2 空间分布型

分析全国 1,4,7,10 月 AOD 异常的 EOF 第一特征向量场(简称 EOF1,图略):1 月,第一模态占总体方差的 31.93%,远大于其他各模态的方差贡献,说明这是全国 AOD 异常空间变化的主要分布型,即全国 AOD 变化基本一致。表明尽管各地的地形和下垫面条件存在较大差异,但气溶胶光学厚度的空间分布仍有很好的 consistency。具体表现为“南低北高”,高值中心位于华北及内蒙古西部,说明这里是 1 月 AOD 变化最敏感的区域。4 月 AOD 距平的第一特征向量反映了整个区域一致偏大或偏小的形势,结合时间序列可以看出,此时全国的变化都十分显著;这在一定程度上反映了春季沙尘暴影响范围之广、强度之大。7 月,第一模态显示西南内陆和 100°E 以西为正值区,东南沿海、华北、东北为负值区;表明这一阶段的 AOD 变化极其复杂。10 月的 EOF1 也表现了全国一致的变化情况,但变化幅度小于其他季节。总之,各季有其独特的空间分布特征,不同季节的显著变化区并不重合,由此全国可划为 11 个代表区域(图 2);春、秋、冬三季的 AOD 都呈现全国一致的变化趋势;夏季,以 110°E 和 30°N

为分界线,体现出明显的东西及南北差异。

3 全国及各研究区的 AOD 时间变化特征

3.1 年内变化特征

图 4a 给出了全国平均的 AOD 年循环曲线,体现了我国 AOD 分布的季节性特征:春季最大,秋冬季节较小。在 11 个研究区内,仅青藏高原(区域 K,图 4b)的 AOD 在秋季最大,其余各区(图略)均是春季 AOD 最大,且 AOD 最大值一般出现在 4 月,3 月在区域 G, I 和 J, 5 月在区域 F 也出现了极大值; AOD 极小值出现的月份各地有所不同:东部地区(区域 A, B, G~I)及全国的 AOD 最小值在秋季,西部(C~F, K)及华南区域 J 在冬季。

各区的年内循环,按其变化规律可以分为 5 类,第一类包括区域 A, B 和 G,位于我国的东北、华北及华中,特征是年内循环与全国分布相近,春季最大,冬季次之,秋季最小,全年呈现“增-减-增”循环;第二类为我国西北的 C~F 4 个区域,由春到冬, AOD 逐渐减少;第三类由纬度相近的区域 H 和 I 组成,分布类似与第一类,但在夏季 AOD 值有所增长;第四类是位于华南的区域 J,分别在 3 月和 8 月出现 AOD 最大值和第二大值,秋冬季节的 AOD 量值和变化幅度均小于其他各区;最后一类,是位于青藏高原上的区域 K,由于其独特的地理位置和环境, AOD 的变化与全国大部分地区都存在明显差异,从 1 月开始, AOD 逐渐增大,至 6 月达到极大值,7 月稍减,随后再次增大,9 月出现全年最大值,随后再次减少。

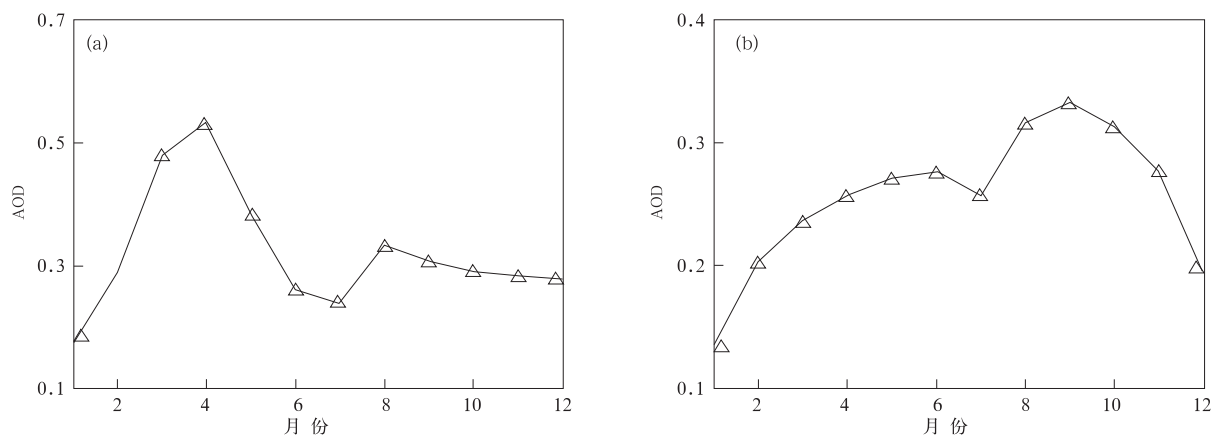


图 4 380 nm 多年平均的 AOD 年循环
(a) 全国平均, (b) 青藏高原(区域 K)平均

Fig. 4 Mean annual cycle of 380 nm AOD over the analysis period for national mean (a), zone-K mean (Tibetan Plateau) (b)

3.2 周期分析

应用 Morlet 小波变换分析 1980—2001 年我国境内 380 nm AOD 的周期特征。考虑到小波方差可能会增大长周期的相对波谱,使较短周期的成分振幅减弱,导致判别误差,所以运用能更准确反映周期分布的 Fourier 功率谱加以检验^[22]。

全国平均序列的小波分析显示,AOD 及其距平(图略)都存在年内(<1 年)和年际(1 年)周期信号,AOD 距平还包括较强的 2 年、4 年及 8 年振荡,均满足 90%信度的红噪声检验。AOD 年际信号在整个时段没有发生明显的转变趋势,距平的 2 年和 4 年信号则在 1987 年前后衰减。比较原始数据和距平的小波结果,发现两者周期比较一致。

表 1 是 1980—2001 年各个研究区域经 Morlet 小波分析得到的周期,均通过小波方差和 Fourier 功率谱检验,达到 90%信度检验,其中的转换期表示年际信号发生变化的年份。结果表明,全国平均和 11 个研究区域内均存在下列特征:AOD 及其距平在 1980—2001 年均达到 90%信度的年际信号,以 1 年和 4 年周期为主;年内振荡特征十分明显,季节性信号不容忽视(表 1 统一表示为小于 1 年)。AOD 异常的 4 年以上周期在小波方差和傅立叶波谱检验中也超过 90%信度,但是受边界效应影响,很难直观判断是否有效,所以需要进一步判断。另一个有趣的发现是,各区及全国的距平年际信号在 20 世纪 80 年代末均有一定的减弱。

表 1 1980—2001 年各区周期(经小波方差和傅立叶功率谱验证的 Morlet 小波结果)

Table 1 Periods of Zone A—K & China during 1980—2001

(already verified by the global power spectrum and Fourier power spectrum at 90% level)

区域	AOD 周期/a	AOD 年际信号转换期	AAOD 周期/a	AAOD 年际信号转换期
A	<1, 1	无	<1, 1, 4 及以上	1987 年
B	1	无	<1, 1, ~2, 4 及以上	1990 年
C	<1, 1	无	1, ~2, 4 及以上	1989 年
D	1	无	<1, 1	1987 年
E	<1, 1	无	<1, 1, 2	1989 年
F	<1, 1	无	<1, 2	1986 年
G	<1, 1	无	~1, ~4 及以上	1990 年
H	<1, 1, 4	无	<1, ~4	1988 年
I	1	1989 年	<1	1989 年
J	<1, 1	1988 年	<1	1989 年
K	<1, 1, ~10	无	<1, 4	1989 年
全国	<1, 1	无	<1, 1, 2, 4 及以上	1987 年

3.3 趋势分析

利用线性倾向估计和 Mann-Kendall 非参数检验方法分析了 1980—2001 年各区 AOD 的演变趋势。

线性倾向估计显示(图略),全国及各个研究区的年均 AOD 均呈增长趋势,大部分地区达到 90%以上信度水平。全国平均,1 月 AOD 弱减,其余时段均为增加趋势,但仅有 4 月的增长趋势达到了 90%信度水平。讨论各个分区的同期变化特征,可以看出 AOD 的变化趋势具有明显的空间分布差异(图 5)。相对而言,4 月 AOD 变化较为一致,除华南区外其他地区均呈增加趋势,且大部分地区超过了 95%信度。四季变化趋势相同的研究区是西北的区域 C,华南的区域 J 和青藏高原上的区域 K。J 区始终呈减少趋势,经检验这一趋势的可信度极小,

趋势并不明显,另外两个区域表现出明显的增长形势。对比各分区的年均与月 AOD 结论,也可以证明 AOD 的年内变化不容忽视,各个季节的变化各有其特点;同时也表明 1980—2001 年全国年均 AOD 呈现增加趋势,但是存在显著的区域性和季节性差异。

全国平均 AOD 序列的 M-K 检验(图 6)显示,1 月 AOD 基本表现为减少趋势,4 月和 10 月约在 1989 年前后发生转变,7 月的增加趋势也在 1989 年左右减弱;四季的 AOD 变化趋势都在 20 世纪 80 年代末期有所改变。综合 11 个研究区(A~K)的 M-K 检验(图略)可以看出,我国的 AOD 变化具有明显的地区和季节差异。1 月,北方(区域 A~F)及华南(区域 J)AOD 的减少趋势突出,在 20 世纪 80 年代末期到 90 年代初期显著减弱;华中区域 G 及

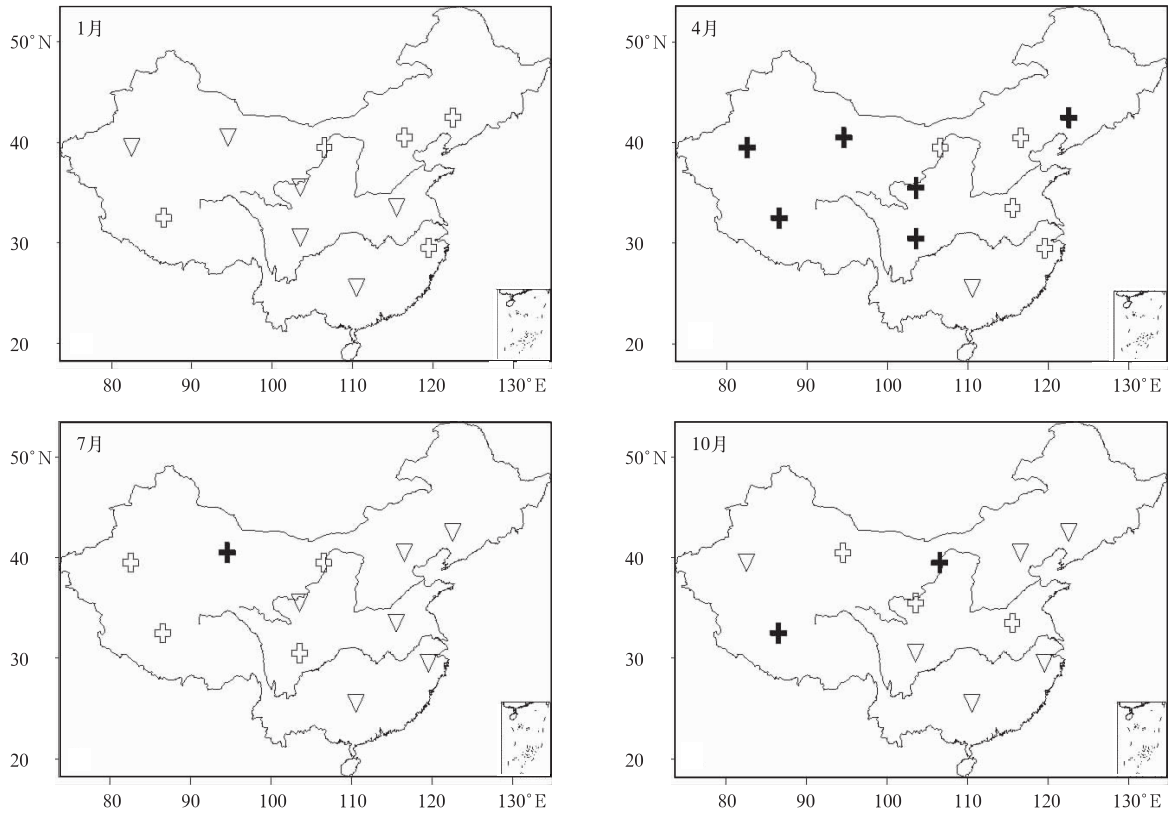


图 5 各研究区域的线性倾向
(+表示增加, ∇表示减少, +表示通过 90% 信度检验)

Fig. 5 The linear trends of the target areas

(+ denotes increase, ∇ denotes decrease and + denotes reaching 90% level)

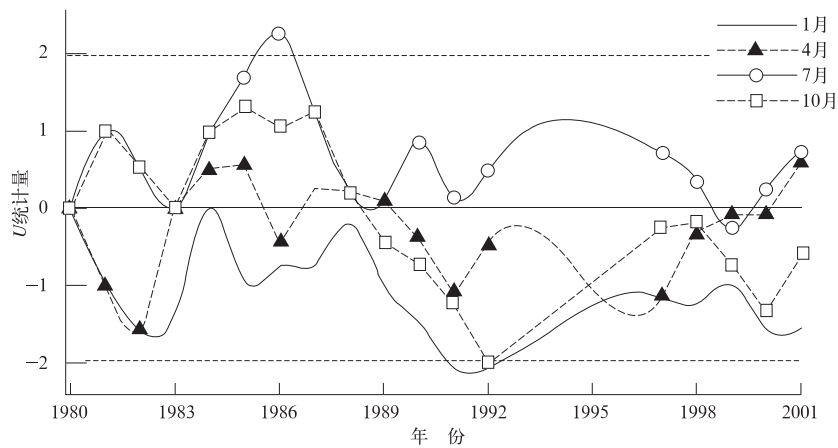


图 6 1980—2001 年我国 1 月、4 月、7 月和 10 月的 AOD 演变趋势的 M-K 检验
(上下两条虚线是 95% 信度临界值)

Fig. 6 M-K test for China AOD in January, April, July and October from 1980 to 2001
(dotted curves show the interval at 95% level)

区域 B, F 的 AOD, 在 20 世纪 80 年代末由增加转为减少; 其余地区趋势较弱。增加倾向主导了 4 月

AOD 的变化, 显著的增加趋势出现在 1984 年的区域 F 和 1987—2001 年的区域 K。7 月, 区域 A, D, F

的 AOD 分别在 1985, 1989 年和 1990 年发生趋势转换; 区域 B 和 E 始终表现为减少趋势, 且分别在 1998—2000 年和 1992 年通过 95% 的信度水平; 其他地区呈现增加倾向, 拥有各自的显著增加期。10 月, 除了区域 E 的负倾向和区域 K 的正倾向外, 其余研究区域在 20 世纪 80 年代末出现了趋势转折现象, 也是由增加转为减少。而在年平均基础上, 区域 B 的 AOD 始终减少, 区域 I 和 K 呈现增加趋势, 其余地区(包括全国平均)大致在 20 世纪 80 年代末期到 90 年代初期这一阶段发生增加趋势由强减弱的转换。

结合线性趋势分析, 可以认为全国和 11 个选区的 AOD 年均值基本呈线性增长趋势, 这一增加趋势在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初发生变化, 多数由强减弱, 并且由东至西、由北及南依次发生。各个研究区内, 四季 AOD 的变化都比较复杂, 但在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 不少区域在不同季节也出现趋势转弱的现象, 这与 Morlet 小波分析结果一致。气溶胶光学厚度减少的原因, 部分可能是由于研究期内北方广大地区冬季变暖, 冬夏温差变小, 由寒潮大风引起的风沙活动(如大风、扬沙等天气现象)总体上呈现减少的趋势^[23]; 此外, 也与我国环境保护基本国策的实施有关。

3.4 突变检验

用滑动 t 检验对 1980—2001 年全国平均 AOD 序列的变化特征进行突变检验, 信度水平为 99%。由滑动 t 统计量曲线(图 7)可以看出, 1 月 AOD 突变发生在 1988 年; 4 月 AOD 转折出现在 1982 年, 经历了一次显著减少的突变, 1988 年的 t 检验值仅次于 1982 年, 也比较突出; 7 月 AOD 无明显的突变年, 但 1986 年的 t 检验值相对较大, 可以看作在 1986 年出现转折; 10 月 AOD 跃变年为 1987 及 1992 年, 其中 1987 年的 t 值更加显著。可见, 各个季节的 AOD 全国平均值在 20 世纪 80 年代末均出现一次较明显的跃变, 年均值在 1987 年也有较明显的转折, 这与 M-K 检验的结论可以互证。就单个选区而言, 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 11 个研究区的 AOD 也存在类似的突变现象(图略), 多发生在 4 月和 10 月的 AOD 序列中; 而且, 大部分研究区域(A~F, H, K)具有年际突变特征, 主要集中在我国北方。

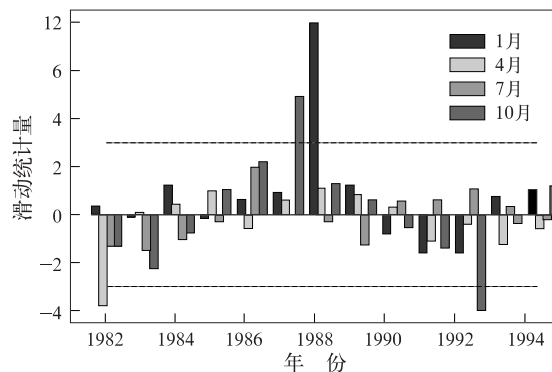


图 7 1980—2001 年全国 1 月、4 月、7 月和 10 月的 AOD 演变趋势的滑动 t 检验

(上下两条虚线代表 99% 信度水平临界值)

Fig. 7 Moving- t test for China AOD in January, April, July and October

(upper and lower beelines show 99% levels)

4 结 论

本文利用 TOMS 反演资料获得了我国上空 380 nm 气溶胶光学厚度的时空分布特征和演变规律:

1) 我国上空 380 nm 气溶胶光学厚度全年存在两个范围较大、持续时间较长的高值区: 南疆盆地和四川盆地, 另一个持续时间较短的高值中心位于华南上空; 青藏高原、东北南部等地 AOD 值较小。各季的 AOD 分布具有突出的南北差异: 春季, 除华南高值区外, 北方的 AOD 值高于南方; 夏季, 南方略大于北方, 冬季则相反; 秋季在 110°E 以西, 北高南低, 以东则相反。

2) AOD 变化的季节性特征明显。我国绝大部分地区春季气溶胶光学厚度值最大(除青藏高原), 最小值出现的季节则有所不同。低纬的季节变化较大, 随纬度增加, 春夏季节 AOD 均逐渐减小, 季节差异减弱。各季的空间分布特征不同, 不同季节的显著变化区并不重合; 春、秋、冬三季的 AOD 都呈现全国一致的变化趋势; 夏季, 以 110°E 和 30°N 为分界线, 表现出明显的东西及南北差异。

3) AOD 变化具有明显的季节内和年内振荡特征, 1 年、2 年和 4 年左右的年际周期也非常显著。

4) 1980—2001 年, 全国及各研究区的 380 nm AOD 年均值呈线性增加趋势, 这一趋势在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初发生转变, 增加趋势由强转

弱,并且由东至西、由北及南依次发生。各季节代表月内,AOD的长期趋势比较复杂:除了冬季(1月)外,其余各季节都表现为增加趋势;在20世纪80年代末到90年代初,大部分区域的趋势明显减弱。单个选区而言,转折多发生在4月和10月的AOD序列;北方(如A~F,H,K区)具有显著的年际突变特征。

由于研究资料有限,本文初步探讨了我国AOD的整体情况以及各地区区域性特征,得出的初步结论有待以后进一步验证。

致谢:感谢NASA/TOMS以及AERONET研究人员提供卫星和地基气溶胶产品。

参考文献

- [1] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 2002, 419(6903):215-223.
- [2] Hudson J G. Cloud condensation nuclei. *J Appl Meteor*, 1993, 32(4): 596-607.
- [3] Lohmann U, Lesins G. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect. *Science*, 2002, 298(5595): 1012-1015.
- [4] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge:Cambridge University Press, 2001:1-20;135-146.
- [5] Li Fang, Lu Daren. Features of aerosol optical depth with visibility grade over Beijing. *Atmos Environ*, 1997, 31(20): 3413-3419.
- [6] Qiu Jinhuan, Yang Liqun. Variation characteristic of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980—1994. *Atmos Environ*, 2000, 34(4): 603-609.
- [7] 周秀骥,李维亮,罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. *大气科学*, 1998, 22(4): 413-427.
- [8] 罗云峰,吕达仁,周秀骥,等. 30年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. *大气科学*, 2002, 26(6): 721-730.
- [9] 宗雪梅,邱金桓,王普才. 近10年中国16个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析. *气候与环境研究*, 2005, 10(2): 201-208.
- [10] 毛节泰,李成才,张军华,等. MODIS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 127-135.
- [11] 李成才,毛节泰,刘启汉,等. 利用MODIS研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. *科学通报*, 2003, 48(19): 2094-2100.
- [12] 张军华,斯召俊,毛节泰,等. GMS卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2003, 27(1): 23-35.
- [13] 施晓晖,徐祥德,张胜军,等. EOF模型分析北京周边气溶胶影响域气候变化显著性特征. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(增刊D): 206-218.
- [14] Massie S T, Torres O, Smith S J. Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) observations of increases in Asia aerosol in winter from 1979 to 2000. *J Geophys Res*, 2004, 109(D18211): doi: 10.1029/2004JD004620.
- [15] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements. *J Geophys Res*, 2000, 105: 9791-9806.
- [16] Yu H B, Kaufman Y J, Chin M. A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6(3): 613-666.
- [17] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. *J Geophys Res*, 1998, 103(D14): 17099-17110.
- [18] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *J Atmos Sci*, 2002, 59(1):398-413.
- [19] Ramanathan V, Crutzen P J, Mitra A P, et al. The Indian Ocean Experiment and the Asian brown cloud. *Current Science*, 2002, 83(8): 947-955.
- [20] Krishnamurti T N, Jha B, Prospero J M, et al. Aerosol and pollutant transport over the tropical Indian Ocean during the 1996 northeast monsoon and the impact on radiative forcing. *Tellus*, 1998, 50B:521-542.
- [21] UNEP and C4. *The Asian Brown Cloud: Climate and Other Environmental Impacts*, Nairobi: UNEP, 2002.
- [22] Wu Shu, Liu Qinyu. Some problems on the global wavelet spectrum. *Journal of Ocean University of China*, 2005, 4(4):398-402.
- [23] 中国科学院地质部. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. *地球科学进展*, 2000, 15(4):361-36.

Spatial/Temporal Variations and Trends of Aerosol Optical Depth at 380 nm Wavelength in China During 1980—2001

Hu Ting¹⁾²⁾ Sun Zhaobo¹⁾²⁾ Zhang Haidong²⁾³⁾

¹⁾(*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

²⁾(*Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

³⁾(*National Climate Center, Beijing 100081*)

Abstract

Study is undertaken of the spatial and temporal distributions and long-term trends of 380 nm Aerosol optical depth (AOD) over China of 1980—2001 TOMS/NASA monthly data which are then treated with techniques such as EOF (empirical orthogonal function), Morlet wavelet transform, Fourier power spectrum, linear trend, Mann-Kendall test (M-K test) and moving t -test. The conclusions as follows are drawn. AOD differs greatly in its meridional distribution all over China. On an annual-mean basis there are two AOD high-value regions covering wide areas and active throughout the whole year, which are the basins in South Xinjiang and Sichuan Basin, together with a short-term high-valued area in South China as well as low AOD covering Northeast China and the Tibetan Plateau. In spring, the northern values are higher in comparison with the southern ones except the high value zone in South China. In summer the southern values are slightly bigger than the northern ones and the reversal happens in winter. AOD in autumn is higher in the north than in the south to the west of 110°N and v. v. to the east. During the research period, the AOD at wavelength of 380 nm varies remarkably with time, thickest during spring in most part of China except the Tibetan Plateau and thinnest in different seasons for regions all over China. Furthermore, variations in seasonal AOD are dominated by significant geographic characteristics, which are of two patterns. The one for summer is a type with the south/west AOD opposite to north/east AOD and the other is a type with no difference in the general tendency throughout the whole country for the other three seasons. Eleven areas (Zone A—K) are selected for regional research of the spatial and temporal variations based on the annual distribution and seasonal EOF analysis of the AOD characteristics. There are five kinds of annual cycles for the AOD in the selected eleven regions. The differences among seasons are decreasing with the latitude and significant in lower latitudes. AOD in target areas and the national means show pronounced intra-seasonal/annual oscillations, as well as significant 1-, 2- and 4-yearly periods. The AOD anomaly of China and regional representatives have been weakened since late 1980s. During 1980—2001 annual-mean AODs experience the linear increasing trends on the national and regional scales, whose increase rates have been slowed down since the period from the late 1980s to the early 1990s, occurring from east to west and from north to south in China, with remarkable inter-annual abrupt changes in North China, i. e., Zone A-F, H and K in this study. Except the decreasing trend in January, most of the regional trends in different study months also have similar linear increasing trends and decreasing shifts. The turning points of seasonal AODs in eleven selected areas also occur during the period from the late 1980s to the early 1990s, especially significant in time series of spring and autumn AODs for the eleven research zones.

Key words: TOMS; 380 nm aerosol optical depth; spatial/temporal distributions