

秦世广, 石广玉, 陈林, 等. 2010. 利用地面水平能见度估算并分析中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征 [J]. 大气科学, 34 (2): 449-456. Qin Shiguang, Shi Guangyu, Chen Lin, et al. 2010. Long-term variation of aerosol optical depth in China based on meteorological horizontal visibility observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 449-456.

利用地面水平能见度估算并分析中国地区 气溶胶光学厚度长期变化特征

秦世广^{1,2} 石广玉¹ 陈林^{1,2} 王标¹ 赵剑琦¹ 于长文³ 杨溯^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 河北省气候中心, 石家庄 050021

摘要 首先对 1980 年前后能见度资料非均一性进行了处理, 得到中国地区 1960~2005 年能见度时间序列, 并由此估算得到气溶胶光学厚度时间序列。对比已有观测及研究结果, 本文获得的气溶胶光学厚度时间序列能够较好地反映出中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征。中国地区气溶胶光学厚度呈现逐年增加的趋势, 但 1985 年后增加趋势减缓, 这种变化在大城市区域表现得更为明显。中国地区气溶胶光学厚度空间分布上呈现东南部高、西北部低的特征, 东南部地区气溶胶光学厚度普遍大于 0.4, 最大值出现在四川盆地, 气溶胶光学厚度超过 0.8。

关键词 能见度 气溶胶 光学厚度

文章编号 1006-9895 (2010) 02-0449-08

中图分类号 P422

文献标识码 A

Long-Term Variation of Aerosol Optical Depth in China Based on Meteorological Horizontal Visibility Observations

QIN Shiguang^{1, 2}, SHI Guangyu¹, CHEN Lin^{1, 2}, WANG Biao¹,
ZHAO Jianqi¹, YU Changwen³, and YANG Shu^{1, 2}

1 *State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Climate Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021*

Abstract After processing the visibility data inhomogeneity from inconsistent record formats before and after the year 1980, the authors obtain the long-term time series of visibility, from which the time series of atmospheric aerosol optical depth over China during 1960 to 2005 is derived. It shows well consistency with former observations and researches on long-term variation of aerosol optical depth over China. It is found that the aerosol optical depth over China showed an increasing trend but a slow upward trend after 1985, especially in the megacity regions. The aerosol optical depth is small in northwestern China and large in southeastern China where the aerosol optical depth is generally greater than 0.4, and the maximum of more than 0.8 is located in the Sichuan Basin.

收稿日期 2009-03-18, 2009-06-29 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403705, 国家科技支撑计划 2007BAC03A01, 科技基础性工作专项 2007FY110700

作者简介 秦世广, 男, 1976 年出生, 博士生, 研究方向: 大气辐射与气溶胶。E-mail: qinshg@post.iap.ac.cn

Key words visibility, aerosol, optical depth

1 引言

大气气溶胶能通过直接、半直接与间接效应影响地气系统辐射能量平衡,从而对全球气候变化产生重要影响(石广玉等,2008)。大气气溶胶光学厚度(AOD)是确定气溶胶辐射气候效应的一个重要参数,目前这一参数主要通过地基观测和卫星反演两种方法获得,国内外在此方面都已开展了大量的研究工作(Dubovik et al., 2000; 毛节泰等, 2001; Chu et al., 2003; 李成才等, 2003; 王跃思等, 2006)。此外,邱金桓(1995)提出并发展了“从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度”的宽带消光法,并被罗云峰等(2000a)、宗雪梅等(2005)用于反演和研究中国地区气溶胶光学厚度长期变化及分布特征。但由于气溶胶本身高度时空可变性,而地基观测和卫星监测分别在空间范围或时间长度上还存在一定的局限性,因此目前在全球乃至区域范围内都还缺乏气溶胶光学厚度长时间序列。

大气能见度是反映大气透明度的一个指标,其大小直接反映了大气的干洁程度,与空气中的水汽凝结物和干质悬浮物(天气现象和大气的污染程度)有着密切的关系。已经有部分研究表明水平能见度同气溶胶光学厚度之间存在很好的负相关性(罗云峰等, 2000b; 宗雪梅等, 2005; 赵秀娟等, 2005)。Wang et al. (2009)利用 AERONET 气溶胶光学厚度直接观测资料和 MODIS 和 MISR 卫星反演气溶胶光学厚度资料,证明气象能见度计算得到的气溶胶光学厚度具有卫星反演气溶胶光学厚度相当的精度。利用地面气象台站长期观测资料,赵柏林等(1986)研究了中国能见度及透明度的区域分布情况,邱金桓等(2001)则进一步发展了一种从地面气象能见度和水汽压信息反演大气柱气溶胶光学厚度的参数化方法。采用该方法,杨琨等(2008)分析了 1999~2003 年我国气溶胶光学厚度的变化特征。

本文旨在利用中国地区气象台站 46 年(1960~2005)水平能见度资料估算中国地区气溶胶光学厚度时空变化特征,从而为气溶胶辐射气候效应研究提供一定的数据基础。

2 资料与方法

2.1 资料说明

本文选取资料包括 1960~2005 年中国地区 753 个气象台站地面水平能见度、相对湿度及天气现象代码,其中有 639 个站点能见度资料在 35 年以上。1980 年之前,地面气象站大气能见度资料根据能见度距离将能见度分为 10 个等级(见表 1)。表 1 第 2 列给出了各能见度级别所对应的能见度距离范围,而 1980 年之后,能见度资料则为实际能见度距离(单位: km)。我国气象台站每天至少 4 次定时观测,依次为 02 时、08 时、14 时和 20 时(北京时,下同)。由于 02 时和 20 时分别在夜间或傍晚观测,所选的目标物与白天目标物不同,易造成观测资料的不一致性;08 时的能见度易受辐射雾影响,且夜间形成、尚未被破坏接地逆温也可能导致此时大气中颗粒物浓度升高,能见度降低,但通常都会在中午消散,因此本文仅使用了 14 时观测资料来估算气溶胶光学厚度。此外,考虑到本文目的是估算气溶胶光学厚度,因此剔除了可能对能见度造成较大影响的天气现象(如降水、雾)以及高湿度($RH > 90\%$)天气条件下能见度资料,而保留灰霾、沙尘等天气条件下的能见度观测资料。

2.2 能见度资料处理方法

前文已经提到,水平能见度资料在 1980 年前后存在格式上的不统一,即 1980 年前能见度资料

表 1 各能见度级别对应能见度距离范围及能见度距离估算值

Table 1 Visibility ranges and estimations for visibility levels

能见度级别	能见度距离范围/km	能见度距离估算值/km
0	<0.05	0.025
1	0.05~0.2	0.1
2	0.2~0.5	0.28
3	0.5~1.0	0.7
4	1.0~2.0	1.41
5	2.0~4.0	2.67
6	4.0~10.0	6.77
7	10.0~20.0	13.58
8	20.0~50.0	29.04
9	≥ 50.0	54.27

仅给出了 10 个等级, 而自 1980 年起, 能见度资料则为能见度距离, 资料格式的不统一会对能见度长期变化分析造成比较大的影响。若想从能见度资料入手, 估算得到气溶胶光学厚度长期时间序列, 需对 1980 年能见度等级赋以合理的能见度距离。理论上, 各能见度等级可以符等级对应距离区间内任意值, 例如区间中值, 但由于各能见度等级所对应能见度距离的区间并不是等间隔划分的, 使用区间中值代替能见度等级会过高地估计 1980 年能见度距离, 从而造成能见度在 1980 年前后资料不连续性。因此, 本文首先利用 1980~2005 年所有站点逐日能见度资料, 将其精确转换为能见度等级, 在各能见度等级限制下对能见度距离进行平均, 从而得到更适合 10 个能见度等级所对应的能见度距离的替代值 (简称估算值), 进而用该值取代 1980 年前能见度等级资料。表 1 分别给出了各能见度等级对应能见度距离区间范围和用上述方法得到的估算值, 其中能见度为 0 级时, 其估算值定为能见度距离区间范围的中值, 即 0.025 km。从表 1 中可以看到各能见度等级对应能见度距离值要小于该能见度等级对应能见度距离范围区间中值, 特别是能见度等级值较大时更为显著, 这也就说明了使用区间中值为什么会造成能见度在 1980 年前后不连续。

利用上面得到的能见度距离估算值替代 1980 年前能见度等级资料, 进而对站点能见度距离资料进行平均, 可以得到各站点月 (年) 平均能见度距离, 也可以进一步得到中国地区能见度逐月 (年) 平均。图 1 给出了中国 639 个站点年平均水平能见度距离变化 (1960~2005 年), 1980 年前, 能见度值是利用上文介绍的方法估算得到, 而 1980 年后, 图 1 分别给出了两种结果, 观测值是指直接利用台站实际观测的能见度距离通过平均获得, 而估算值是指先将台站能见度距离转换为能见度等级, 然后依照 1980 年前资料处理方法获得的年平均能见度, 这样做的目的是将 1980 年前后资料处理的方法统一起来, 从而消除处理方法不同可能引起的资料的不连续。从图 1 显示的结果中可以看到, 本文采用的能见度资料处理方法, 有效地保证了中国地区年平均能见度在 1980 年前后变化的连续性, 通过对单个站点的检查 (图略), 该方法在处理资料不连续性上也有一定效果。当然, 采用该方法得到的能见度估算值与观测值之间还存在一定的误差, 就中

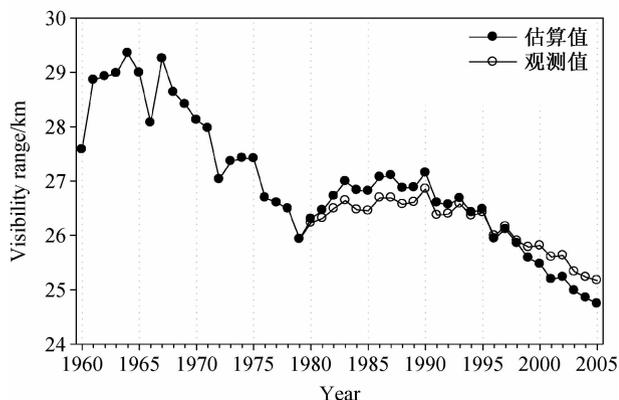


图 1 1960~2005 年中国地区年平均能见度距离变化

Fig. 1 Variation of annually averaged visibility over China during 1960 to 2005

国区域平均而言, 1995 年之前估算值略大于观测值, 而 1995 年后估算值略小于观测值, 能见度距离年平均估算误差范围为 $-1.5\% \sim 1.7\%$, 但这种误差对能见度长期变化趋势分析的影响很小。因此, 为了保持资料的连续性, 本文后面在整个时段 (1960~2005) 均使用估算值来计算气溶胶光学厚度。

2.3 能见度计算光学厚度原理与方法

根据气象能见度 V 的定义, 它与波长 $0.55 \mu\text{m}$ 消光系数 $\sigma_{0.55}$ 的关系为

$$V = \frac{3.912}{\sigma_{0.55}} \quad (1)$$

在标准状况下 ($T=15^\circ\text{C}$, $p=1013 \text{ hPa}$), 假设气溶胶服从 Junge 分布, 根据 Elterman (1970) 得到的大气垂直衰减量与地面能见度的关系, 以及 McClatchey et al. (1971) 归纳得到的气溶胶粒子浓度随高度的分布, 在海拔高度 Z (单位: km) 上的能见度 V_z (单位: km) 与订正到海平面的能见度 V (单位: km) 之间存在关系:

$$V_z = 3.912 \left/ \left[0.0116 - 0.00099Z + \left(\frac{3.912}{V} - 0.0116 \right) e^{-\frac{Z}{0.886+0.0222V}} \right] \right. \quad (2)$$

进而可以得到大气气溶胶光学厚度 τ_λ 与能见度 V 关系:

$$\tau_\lambda = \left(\frac{3.912}{V} - 0.0116 \right) \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{2-\alpha^*} \left[H_1 \left(e^{-\frac{Z}{H_1}} - e^{-\frac{5.5}{H_1}} \right) + 12.5 e^{-\frac{5.5}{H_1}} + H_2 e^{-\frac{5.5}{H_1}} \right], \quad (3)$$

其中, $H_1 = 0.886 + 0.0222V$ (单位: km), $H_2 =$

3.77 km, $\nu^* = -2$, $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 。

依照此方法, 赵柏林等(1986)利用地面日射台站能见度资料初步探讨了我国大气透明度分布。邱金桓等(2001)在该方法基础上, 利用地面水汽压对能见度反演光学厚度进行了订正, 发展了一个比较适合中国特点的气溶胶光学厚度模式, 即

$$\tau_{\lambda, E} = \tau_{\lambda} f = \left(\frac{3.912}{V} - 0.0116 \right) \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{2-\nu^*} \cdot \left[H_1 \left(e^{-\frac{Z}{H_1}} - e^{-\frac{5.5}{H_1}} \right) + 12.5 e^{-\frac{5.5}{H_1}} + H_2 e^{-\frac{5.5}{H_1}} \right] f. \quad (4)$$

对不同地区, 订正系数 f 采用二种不同的模式, 对东北区域:

$$f = e^{-0.32+0.02V_Z}, \quad (5)$$

对除东北外其它中国区域:

$$f = e^{(0.42+0.0046p_w+0.015V_Z) \exp(-0.0047V_Z^2/p_w)}, \quad (6)$$

其中, p_w 为地面水汽压(单位: hPa)。

依照邱金桓等(2001)方法, 利用 2.2 节得到的中国地区气象台站能见度资料估算得到了中国地区各台站、气溶胶光学厚度月、年平均长期时间序列(1960~2005 年), 并对中国区域进行了平均。

3 结果与分析

3.1 中国地区能见度变化特征

已有研究针对我国不同区域能见度长期变化特征进行了分析, 如范引琪等(2005)和黄健等(2008)分别分析了河北省和珠江三角洲地区能见度长期变化趋势, 研究结果表明能见度总体呈下降的趋势, 能见度的下降与当地人口增加和经济发展程度有密切的关系。此外, Che et al.(2007)还讨论了中国区域 1981~2005 年能见度变化趋势, 结果显示中国地区能见度呈下降趋势, 特别是 1990 年后, 年平均能见度每 10 年减小约 2.1 km。本文研究结果也显示出近 46 年来中国地区能见度呈明显下降的趋势(见图 1), 其中在 1980 年之前和 1990 年后两个时段尤为明显, 而 1980~1990 年内中国地区能见度略好转。对于同时段能见度变化趋势, 本文结果与 Che et al.(2007)的结论一致, 但本文给出的年平均绝对值结果要略小, 其原因是使用资料的站点数不同, 而且 Che et al.(2007)在利用天气现象资料处理能见度资料时更为严格, 剔除了沙尘等可能造成能见度降低的资料。总体上讲,

中国地区能见度变化特征与中国经济快速发展和能源消费不断增加相一致, 至于 1980~1990 年能见度出现的波动, 还需要进一步研究加以确认。

3.2 气溶胶光学厚度结果对比验证

罗云峰等(2000a)采用“宽带消光法”使用中国 44 个日射站太阳直接辐射资料研究了中国大气气溶胶光学厚度分布特征(1961~1990 年), 本文使用对应站点能见度资料估算了 1961~1990 年大气气溶胶光学厚度。图 2 给出了本文与罗云峰等(2000a)的结果, 可以看到它们在气溶胶光学厚度变化趋势上基本保持一致, 相关系数达到 0.9。罗云峰等(2000a)反演得到的气溶胶光学厚度值要低于本文结果, 这是因为其利用太阳直接辐射得到的是等效波长为 $0.75 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度, 而本文结果则是 $0.55 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度, 如果假设气溶胶粒径服从 Junge 分布, 波长越大对应光学厚度越小。

AERONET 是以 NASA(美国宇航局)为首建立的全球气溶胶光学特性监测网络, 目的是利用地基太阳光度计获取全球具有代表性区域的探测气溶胶光学特性参数的基准资料, 用于验证和评估卫星反演的气溶胶光学特性参数的精度(Dubovik et al., 2000)。目前, 中国区域加入 AERONET 的站点有 40 多个, 但开展观测的时间大都很短, 本文仅选取了观测时间最长的北京站点资料同本文得到的气溶胶光学厚度进行了比较。图 3 和图 4 分别给出月平均和年平均气溶胶光学厚度的对比结果, 其中 AERONET 北京站点的气溶胶光学厚度采用加权

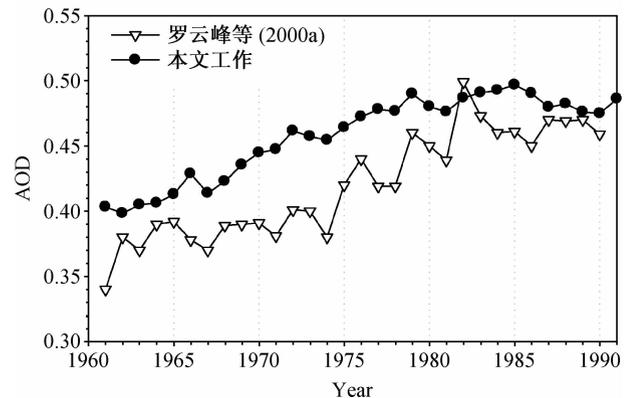


图 2 1961~1990 年 44 个站点年平均气溶胶光学厚度 (AOD) 变化特征

Fig. 2 Variation of annually averaged aerosol optical depth (AOD) for 44 stations in China during 1961 to 1990

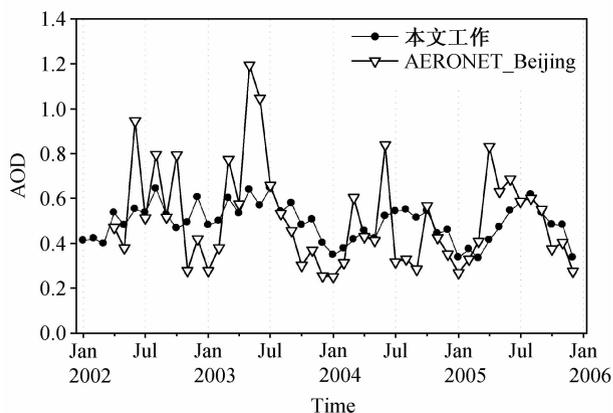


图3 2002年1月~2005年12月北京逐月平均气溶胶光学厚度变化与 AERONET 对比结果

Fig. 3 Variation of monthly averaged AOD in Beijing in comparison with AERONET from Jan 2002 to Dec 2005

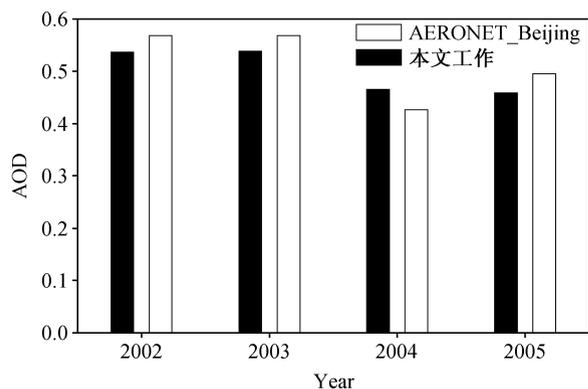


图4 同图3, 但为2002~2005年逐年平均

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for annually averaged AOD from 2002 to 2005

平均的方法由日均值得到, 并通过 Angstrom 指数由 $0.44 \mu\text{m}$ 换算为与本文一致的 $0.55 \mu\text{m}$ 光学厚度。从图 3 结果来看, 两个结果均能显示出北京气溶胶光学厚度春、夏季高, 秋、冬季低的特征, 光学厚度随时间变化的趋势也基本一致, 相关系数达到 0.54。AERONET 与本文结果的不同在于后者随时间变化明显比前者平缓, 也就是说本文方法在气溶胶光学厚度过高或过低时的估算效果还不够理想, 这主要是因为能见度距离是由观测员人工目测得到, 除不同观测员观测误差外, 其观测数据的灵敏度还无法同太阳光度计等器测仪器灵敏度相媲美。但从图 4 显示的结果中看到, 对于气溶胶光学厚度年均值来说, 本文方法估算结果与 AERONET 较接近。对比 AERONET 北京站气溶胶光学厚度,

本文方法获得 2002~2005 逐年平均气溶胶光学厚度的绝对误差分别为 0.030、0.029、0.039 和 0.037, 相对误差分别为 -5.4%、-5.1%、9.1% 和 -7.4%, 估算结果总体要小于 AERONET 结果, 只是在 2004 年略高, 这可能是由于 2004 年夏季北京 AOD 较往年异常偏低的原因。

从以上对比结果可以看到, 本文方法估算得到的气溶胶光学厚度结果除在月平均时间尺度上对极高或极低气溶胶光学厚度情况下的估计存在一定的偏差, 在年平均时间尺度上的估算结果较好, 特别是该气溶胶光学厚度时间序列可以较好地反映出中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征。

3.3 中国地区气溶胶光学厚度时空变化特征

3.3.1 中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征

图 5 是 1960~2005 年中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征以及两个时段 (1960~1985 年和 1986~2005 年) 线性变化趋势。图 5a 利用了全国 639 个资料在 35 年以上的站点, 通过平均得到; 图 5b 则仅使用了全国省会城市、自治区首府以及直辖市共 31 个站点资料平均的得到, 代表中国地区大城市地区气溶胶光学厚度变化特征; 图 5c 是使用另外 608 个站点资料平均得到。可以看到, 1985 年之前, 中国区域内气溶胶光学厚度呈明显增加的趋势, 相比较而言, 大城市区域气溶胶光学厚度增加幅度最大, 而在 1986~2005 年内, 整个中国区域内气溶胶光学厚度增加趋势有所减缓, 特别是大城市地区的气溶胶光学厚度增幅减小了 1 个量级。其原因很可能是随着中国经济和居民生活水平的发展和提高, 以煤、石油等生物化石燃料为主的能源消费不断增加造成气溶胶排放的增加, 而这种状况在大城市地区尤为明显, 因此 1985 年之前大城市区域年平均气溶胶光学厚度增加最为迅速。但随着国家和居民环境意识的提高, 更为严格的污染物排放标准的颁布, 大城市颗粒物污染得到一定的控制, 从而减缓了气溶胶排放的增加, 相反中小城市气溶胶排放则随着 90 年代中国经济的快速发展继续增加, 而相应的污染物控制措施可能并不完善或规范, 因此 1985 年后气溶胶光学厚度增加幅度仅略有减小。

Wild et al. (2005) 发现 20 世纪 80 年代末全球绝大部分地区地面太阳辐射经历了一个从减少到增加转变, 即所谓的“全球变亮”。Shi et al.

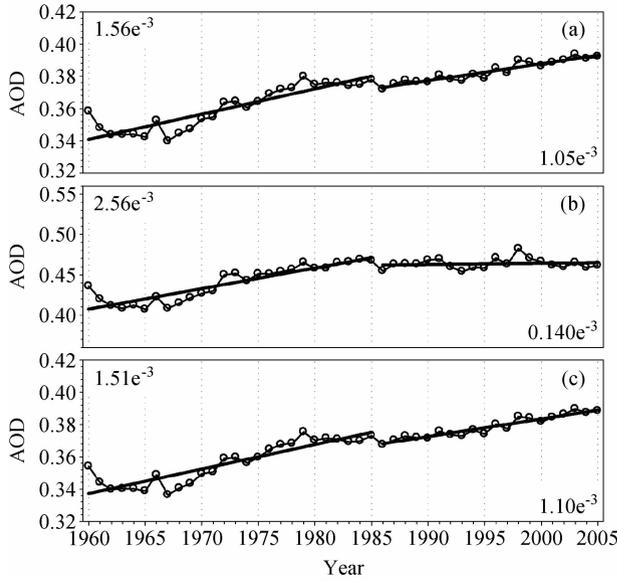


图5 中国地区年平均气溶胶光学厚度长期变化(1960~2005)及两个时段线性趋势(1960~1985; 1986~2005): (a) 639个资料在35年以上的站点平均; (b) 31个省会、自治区首府及直辖市站点平均; (c) 其余608站点资料平均。两时段线性趋势斜率依次标于图左上角及右下角

Fig. 5 Variation of annually averaged AOD over China from 1960 to 2005 and linear trends for two subdivided periods 1960 to 1985 and 1986 to 2005: (a) Averaged over 639 stations with data more than 35 years; (b) averaged over 31 stations which are located in capital cities of provinces, autonomous regions, and municipalities; (c) averaged over the remaining 608 stations. The slopes of linear trends are marked at the upper left and lower right corners

(2008) 研究表明 1990 年前后中国地区地面太阳辐射也呈现由变“暗”向变“亮”的转变。尽管造成这种变化的原因还有待进一步研究, 但已有研究指出大气气溶胶含量的减少及其与云的相互作用是最可能的因素之一 (Wild et al., 2005)。中国地区太阳辐射站点多处在在大、中城市, 本文所选的 31 个省会 (自治区首府)、直辖市也都设有太阳辐射观测, 因此从某种程度上讲, 中国地区地面太阳辐射由变暗向变亮的转变与大城市区域气溶胶光学厚度增幅的减小有一定的关系, 当然这还有待进一步的研究加以验证。

3.3.2 中国地区气溶胶光学厚度分布特征

考虑到不同时段站点气溶胶光学厚度变化趋势有所差别, 并且各站点资料年限也不尽一致, 因此图 6 仅给出了 2001~2005 年中国地区多年平均气溶胶光学厚度的分布特征。从图 6 中可以看到, 中

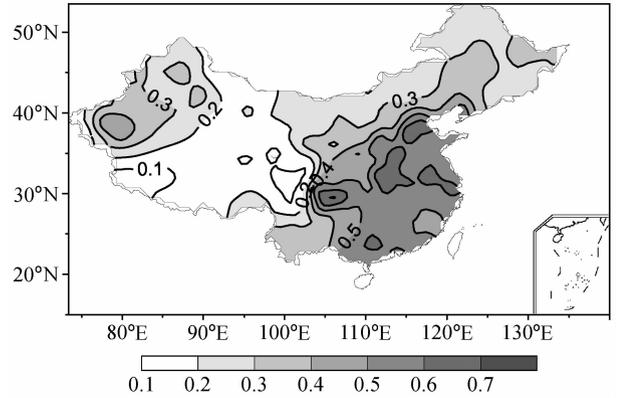


图6 2001~2005年中国地区多年平均气溶胶光学厚度分布
Fig. 6 Distribution of AOD averaged over 2001–2005 over China

国地区气溶胶光学厚度主要呈现东南部高、西北部低的特征。东南部地区多年平均光学厚度基本上都大于 0.4, 其中还存在几个明显的高值区, 如四川盆地、华北和河南以及长江中下游区域, 可以达到 0.6 以上, 最大气溶胶光学厚度出现在四川盆地, 超过 0.8, 而新疆西北塔里木和柴达木盆地存在的高值区则与沙尘等自然气溶胶释放有关。该结果与杨琨等 (2008) 得到的结果基本一致, 只是绝对值略低于其结果, 这与资料统计时段的不同及杨琨等 (2008) 可能未考虑雨、雪等高湿度天气状况对光学厚度的影响有关。同时, 该结果也与李成才等 (2003) 利用 MODIS 气溶胶产品得到中国内陆地区气溶胶光学厚度 2000 年平均分布特征保持一致。

4 结论

基于非均匀性处理后气象台站 1960~2005 年能见度观测资料及相关气象资料, 本文得到了中国地区气溶胶光学厚度长时间序列, 并对比已有观测及研究对该时间序列进行了评估, 进而分析了中国地区气溶胶光学厚度长期变化趋势以及空间分布特征, 主要结论是:

(1) 利用能见度估算得到的气溶胶光学厚度, 尽管对极高和极低值的估计还有一定偏差, 但可以较好地反映出中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征。

(2) 中国地区气溶胶光学厚度呈逐年增加的趋势, 但 1985 年后增加趋势减缓, 特别是大城市区域更为明显, 这在某种程度上与中国地面太阳辐射的变化特征相关联。

(3) 中国地区气溶胶光学厚度分布特征为东南高、西北低, 东南部地区大气气溶胶光学厚度普遍超过 0.4, 四川盆地、华北地区和河南省及长江中下游区域是主要高值区, 其中最大值出现在四川盆地, 其光学厚度可以超过 0.8。

致谢 本文使用的中国气象台站观测资料均来自于国家气象信息中心, 对此表示感谢。同时, 对 AERONET 北京观测站主要负责人陈洪滨研究员及相关工作人员及表示感谢。最后, 感谢两位审稿人给本文提出的宝贵意见和建议。

参考文献 (References)

Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981 - 2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24706, doi: 10.1029/2007GL031450.

Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. 2003. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System—Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D21): 4661 - 4679.

Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 9791 - 9806.

Elterman L. 1970. Relationships between vertical attenuation and surface meteorological range [J]. *Appl. Opt.*, 9 (8): 1804 - 1810.

范引琪, 李二杰, 范增禄. 2005. 河北省 1960~2002 年城市大气能见度的变化趋势 [J]. *大气科学*, 29 (4): 526 - 535. Fan Yinqi, Li Erjie, Fan Zenglu. 2005. Visibility trends in 11 cities of Hebei Province during 1960 - 2002 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (4): 526 - 535.

黄健, 吴兑, 黄敏辉, 等. 2008. 1954~2004 年珠江三角洲大气能见度变化趋势 [J]. *应用气象学报*, 19 (1): 61 - 70. Huang Jian, Wu Dui, Huang Minhui, et al. 2008. Visibility variations in the Pearl River Delta of China during the period of 1954 - 2004 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (1): 61 - 70.

李成才, 毛节泰, 刘启汉. 2003. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 39 (增刊): 108 - 117. Li Chengcai, Mao Jietai, Lau Alexis Kai Hon. 2003. Remote sensing aerosol with MODIS and the application of MODIS aerosol products [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 39 (Suppl.): 108 - 117.

罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 2000a. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. *科学通报*, 45 (5): 549 - 554. Luo Yunfeng, Lü Daren, Li Weiliang, et al. 2000. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation over China in recent 30 years [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 45 (5): 549 - 554.

罗云峰, 吕达仁, 何晴, 等. 2000b. 华南沿海地区太阳直接辐射、

能见度及大气气溶胶变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 5 (1): 36 - 44. Luo Yunfeng, Lü Daren, He Qing, et al. An analysis of direct solar radiation, visibility and aerosol optical depth in South China coastal area [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (1): 36 - 44.

毛节泰, 刘莉, 张军华. 2001. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究 [J]. *气象学报*, 59 (3): 352 - 359. Mao Jietai, Liu Li, Zhang Junhua. 2001. GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu Lake [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (3): 352 - 359.

McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E A, et al. 1971. Optical properties of the atmosphere (revised) [R]. AFCRL 71-0279.

邱金桓. 1995. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论 [J]. *大气科学*, 19 (4): 385 - 394. Qiu Jinhuan. 1995. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation. Part I: Theory [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 19 (4): 385 - 394.

邱金桓, 林耀荣. 2001. 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式 [J]. *气象学报*, 59 (3): 368 - 372. Qiu Jinhuan, Lin Yaorong. 2001. A parameterization model of aerosol optical depths in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (3): 368 - 372.

石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 32 (4): 826 - 840. Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 826 - 840.

Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. 2008. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47: 1006 - 1016.

Wang K, Dickinson R E, Liang S. 2009. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007 [J]. *Science*, 323: 1468 - 1470.

王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 2006. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测 (2004 - 08~2004 - 12) [J]. *环境科学*, 27 (09): 1703 - 1711. Wang Yuesi, Xin Jinyuan, Li Zhanqing, et al. 2006. AOD and Angstrom parameters of aerosols observed by the Chinese sun hazemeter network from August to December 2004 [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 27 (09): 1703 - 1711.

Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. 2005. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. *Science*, 308: 847~850.

琚琨, 孙照渤, 倪东鸿. 2008. 1999~2003 年我国气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (1): 92 - 96. Yu Kun, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2008. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over China during 1999 - 2003 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (1): 92 - 96.

赵柏林, 张芃菲, 高国明. 1986. 我国大气气溶胶光学厚度的特性 [J]. 气象学报, 44 (2): 235 - 241. Zhao Bolin, Zhang Pengfei, Gao Guoming. 1986. Study of the characteristics of atmospheric aerosol thickness over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 44 (2): 235 - 241.

赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 2005. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系 [J]. 高原气象, 24 (4): 617 - 622. Zhao Xiujian, Chen Changhe, Yuan Tie, et al. 2005. Lanzhou aerosol

optical depth in winter and their relation with visibility [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 617 - 622.

宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005. 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 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 202 - 208. Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucui. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 202 - 208.