

文章编号: 0455-2059(2012)01-0062-07

张掖地区春季大气气溶胶的光学特性

冯 岚, 张 武, 向 涛, 史晋森, 宋松涛, 曹贤杰, 黄建平

兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要: 利用2008年4–6月份张掖气候观象台CE-318的观测资料, 结合同期PM₁₀质量浓度和地面常规气象资料, 分析了气溶胶光学厚度AOD, Angstrom指数和PM₁₀质量浓度的时间变化特征, 讨论了AOD与气象要素的关系以及AOD与PM₁₀质量浓度的相关性。结果表明, 观测期间AOD与浑浊度系数 β 的日均值变化趋势较为一致, 与波长指数 α 呈较弱的负相关。AOD大致存在四种日变化形式: 1) 平缓稳定; 2) 早晚低, 中午较高; 3) 早晨低, 傍晚高; 4) 早晨高, 傍晚低。观测点受西北(偏北)风控制时, AOD易出现较高值, 相对湿度的变化对AOD大小影响不明显。日平均情况下AOD和PM₁₀质量浓度的相关系数 R^2 为0.7359, 大于小时平均情况下的0.4035。

关键词: 气溶胶光学厚度; 波长指数; 浑浊度系数; PM₁₀质量浓度; 张掖地区

中图分类号: P421

文献标识码: A

Observational study on aerosol optical characteristics over Zhangye during springtime of 2008

FENG Lan, ZHANG Wu, XIANG Tao, SHI Jin-sen, SONG Song-tao,
CAO Xian-jie, HUANG Jian-ping

Key Laboratory of Semi-Arid Climate Changes with the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Atmospheric aerosol optical depth (AOD) and the Angstrom parameter were derived from the measurement of CE-318 automatic sun tracking spectrophotometer at Zhangye Climate Observatory from April to June, 2008, and in combination with the mass concentration of PM₁₀ data and the routine weather observation data, a comprehensive analysis was conducted. The time change characteristics of AOD, the Angstrom parameter and the mass concentration of PM₁₀ also were analyzed. The relationship between AOD and meteorological parameter, and the correlation between AOD and mass concentration of PM₁₀ were also discussed. It was found that AOD and the turbidity coefficient had the same variation trend in daily means and the correlation between AOD and wavelength exponent was weakly negative. AOD had four patterns of diurnal variations in the observation period: 1) AOD varied gently; 2) AOD peaked at noon; 3) AOD was low in the morning and high in the evening; 4) AOD was high in the morning and low in the evening. The correlation between AOD and the relative humidity was not obvious and, when the northwest (northerly) wind was prevailing, AOD tended to have a higher value. The correlation coefficient between AOD and mass concentration of PM₁₀ in daily means was 0.7359, larger than 0.4035 which was the correlation coefficient in hourly means.

Key words: aerosol optical depth; wavelength exponent; turbidity coefficient; mass concentration of PM₁₀; Zhangye

大气气溶胶光学特性的研究近年来一直是气溶胶相关领域的研究热点之一。气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 和 Angstrom 指数是描述气溶胶光学特性的重要参数。AOD 的物理意义

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-12-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费重点项目(LZUJBKY-2010-K06)

作者简介: 张 武(1960–), 男, 新疆乌鲁木齐人, 教授, 博士, e-mail: wzhang@lzu.edu.cn, 研究方向为大气辐射与遥感, 通信联系人。

是沿辐射传输路径,单位截面上因气溶胶吸收和散射对太阳辐射产生的总削弱^[1],它的测量精度直接影响到大气校正的精度。Angstrom 指数包括波长指数和浑浊度系数,波长指数反映了气溶胶粒子的尺度分布,浑浊度系数则代表了大气中气溶胶的相对浓度。AOD 和 Angstrom 指数是研究气溶胶气候效应的基础,同时在大气环境监测中也具有重要的意义。

气溶胶光学特性具有明显的地域特点,主要取决于当地气溶胶的排放、输送以及大气中气溶胶粒子的转化和沉降。此外,由于气溶胶的寿命相对较短,它们的特性随时间和空间存在明显变化^[2]。近年来,国内外学者对不同地区大气气溶胶光学特性做了大量的研究,如 Alados-Arboledas 等^[3]利用西班牙东南部内华达山四个不同海拔点的 CE-318 资料研究了 AOD 的垂直分布和气溶胶尺度谱分布特点等; Eck 等^[4-5]利用 AERONET 资料研究了阿拉斯加州中部气溶胶光学特性及巴罗北冰洋沿岸 AOD 季节变化特点,利用 AERONET 分布在阿拉伯湾南部和阿联酋 14 个观测点的资料分析了气溶胶光学特性的时空分布特征;杨志峰^[6]利用临安、上甸子、龙凤山三个区域本底站的 CE-318 资料分析了这些站点所在区域 AOD、Angstrom 指数的变化特征;李霞等^[7]利用 CE-318 资料分析了乌鲁木齐大气气溶胶光学特性;王毅等^[8]利用 MODIS 和太阳光度计资料研究了我国东南地区及近海海域的大气气溶胶光学特性及适用于中国东南地区的大气气溶胶模型。

张掖地处河西走廊干旱区中部,目前对该地区有关大气气溶胶光学特性观测研究的报道尚不多见。本文利用 2008 年中美沙尘暴联合观测实验中张掖站点 CE-318 观测的数据,结合同期 PM₁₀ 质量浓度和地面常规气象资料,以期探索河西走廊干旱区气溶胶光学特性变化的一些规律,以及 AOD 与大气环境质量的关系,为利用遥感数据进行气溶胶气候效应的研究、大气环境污染监测等提供依据。

1 观测仪器、资料和方法

1.1 观测仪器与资料

观测期间利用法国 CMIEL 公司生产的 CE-318 型自动跟踪太阳分光光度计测量 AOD 和 Angstrom 指数。该仪器在可见光和近红外波段设有 8 个观测通道,分别是 1020, 936, 870, 675, 500, 440, 380, 340 nm, 每个通道带宽为 10 nm。CE-318 型太阳光

度计是目前最精确的地基光学厚度监测仪器之一,被美国宇航局(NASA)和全球气溶胶观测网(AERONET)广泛使用。

PM₁₀ 质量浓度的测量采用美国 Thermo 公司生产的 TEOM(tapered element oscillating microbalance)1400ab 环境颗粒物监测仪。该仪器基于微震荡天平原理,输出分辨率为 0.1 μm/m³。

所用的同期地面常规气象资料由芬兰 Vaisala 公司生产的 WTX510 便携式气象传感器提供,它可以连续观测温、压、湿、风及降水等气象参数。

三种观测仪器都安装在张掖国家气候观测台(39°04'44" N, 100°16'32" E, 海拔 1460 m)。该观测点位于张掖市区西北部大约 20 km 处(图 1),观测时间从 2008 年 4 月 11 日至 6 月 17 日。由于 CE-318 光度计自动跟踪太阳进行测量,所以其每天的观测时段大致为北京时间 07:00-19:00,并且当太阳被云遮蔽或大气中沙尘含量较大以及多云不能分辨时都没有读数^[9]。TEOM 1400ab 环境颗粒物监测仪和 WTX510 便携式气象传感器进行 24 h 连续观测,两者都设定 1 min 输出一次测量结果。



图 1 观测点位置

Figure 1 Location of the measuring site

1.2 反演方法

CE-318 光度计测量 AOD 的原理是 Beer-Lambert-Bouguer 定律:

$$F_{\lambda} = F_{\lambda,0} e^{-\tau_{\lambda}} \quad (1)$$

其中: F_{λ} 为出射辐射通量密度; $F_{\lambda,0}$ 为入射辐射通量密度; τ_{λ} 为消光物质的光学厚度。该定律中,通过对瑞利散射、臭氧吸收以及气体污染物消光作用的估算即可近似得到 AOD^[10]。由于每个波段测得的 AOD 值在时间变化趋势上基本相同,本文选用 500 nm 的 AOD 来代表所有波段的大气气溶胶光学厚度。

Angstrom 提出气溶胶光学厚度(用 τ_λ 表示)和波长 λ (单位 μm) 之间存在如下关系:

$$\tau_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha}. \quad (2)$$

其中: α 为 Angstrom 波长指数; β 为 Angstrom 浑浊度系数. 当大气中含有较多的大粒子时, 波长指数 α 就比较小; 反之, α 就比较大. 例如, 沙尘气溶胶对应于较小的波长指数值, 一般为 $-1 \leq \alpha \leq 0.5$; 而当 α 接近于 2 时, 大气中小粒径的烟雾粒子含量较多^[11-13]. 当 $\beta < 0.10$ 时, 表示大气清洁; 当 $\beta > 0.20$ 时, 则属于相对浑浊^[14].

对(2)式两边取对数, 得到

$$\ln \tau_\lambda = -\alpha \ln \lambda + \ln \beta. \quad (3)$$

根据(3)式, 利用 7 个不同波段(除去 936 nm 水汽波段)的 AOD 值进行对数线性回归拟合, 可得到 α 和

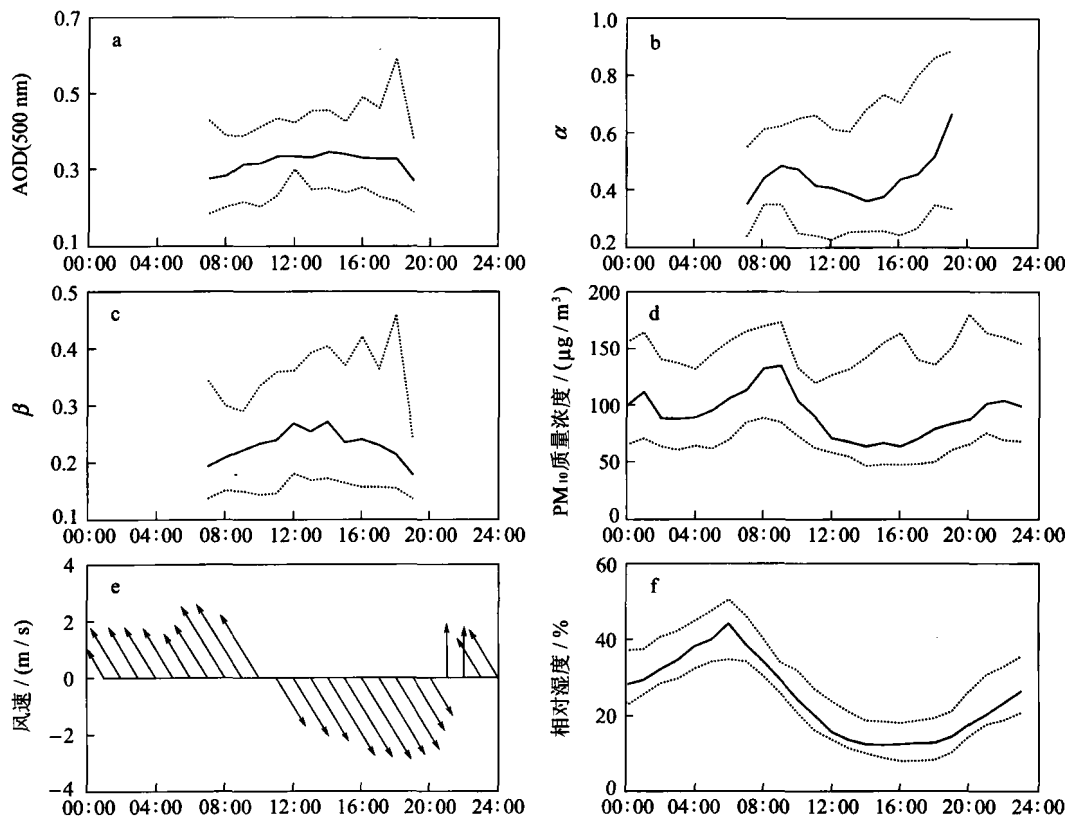
β 的值.

2 结果分析

2.1 各参数观测期间时间变化特征

2.1.1 日变化特征

图 2 给出了观测期间 500 nm 通道的 AOD, 波长指数 α , 浑浊度系数 β , PM_{10} 质量浓度, 风向风速以及相对湿度的日变化形式, 其中由 CE-318 光度计资料反演得到的 AOD, α 和 β 只存在白天的数据, 它们三者的小时均值样本容量都各为 478 个, PM_{10} 质量浓度、风向风速(风向取 1 h 内出现频率最多的方向)以及相对湿度的则依次为 1360, 1378, 1379 个. 图中时刻为北京时. 为了避免沙尘天气出现的极端值对平均日变化的影响, 各小时值采用中位数(风向取出现频率最多的方向).



实线代表一日内各小时值的中位数, 下方虚线表示第 25 百分位数, 上方虚线表示第 75 百分位数

图 2 AOD(500 nm), α , β , PM_{10} 质量浓度, 风向风速以及相对湿度的日变化

Figure 2 The diurnal variations in AOD(500 nm), wavelength exponent, turbidity coefficient, mass concentration of PM_{10} , wind, and relative humidity

从观测期间的整体水平来看, 张掖地区 AOD 的日变化呈现出一个微弱的拱形, 其幅度仅维持在 0.27~0.34, 变化相对稳定. α 的日变化值整体都较低, 不超过 0.67, 说明白天大气中气溶胶以粗粒子居多, 相对而言, 细粒子比重在傍晚时达到最大. β 的日变化与 AOD 的类似, 在上午呈上升趋势,

在 12:00-14:00 左右出现峰值, 然后开始下降. PM_{10} 质量浓度在 09:00 左右和 15:00 左右各达到一天中的最大和最小值, 分别是 134.5, 63.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 风的日变化有明显的昼夜转换, 观测点白天 11:00-20:00 盛行西北风, 夜晚 21:00-22:00 点转为偏南风, 23:00 至次日 10:00 则为东南风, 三个时段的平

均风速依次为 3.6, 2.3, 2.8 m/s. 造成这种转换的原因与当地复杂的山谷地形有关. 观测站西北向到正北方这一带的海拔相对较低, 而其他方向的地势均高于观测站. 这种地形导致观测站上空与其周围地区在同一高度空气受热不均, 使得白天盛行来自西北方向的谷风, 夜晚则盛行来自偏南或东南的山风. 相对湿度的日变化平均水平保持在 50% 以下.

2.1.2 日均值变化特征

分别对符合一日内至少具有 7 h (一半以上) 观测时间条件的 AOD, 波长指数 α 以及浊度系数 β 数据取日均值, 而对 24 h 连续观测的 PM_{10} 质量浓度则采用至少有 12 h 观测时间的日均值. 图 3a-3d 依次为它们随时间的变化.

观察比较完整的 PM_{10} 质量浓度的日均值变化, 出现峰值的时间依次是 4 月 20 日、4 月 26 日、5 月 2-5 日、5 月 8 日、5 月 11 日、5 月 26 日、5 月 29 日以及 6 月 12 日, 这与当时记录的沙尘天气出现日期基本一致, 其中 5 月 2 日 18:00 至次日 9:00 之间发生了观测期间最强的沙尘暴.

AOD 和 β 的日均值与 PM_{10} 质量浓度的一样, 它们的较高值多出现在 4, 5 月份, 说明春季沙尘天气的频繁发生正是导致大气浑浊的主要原因. 具体地讲, 一是由于春季冷空气活动较频繁, 多强

风, 造成沙尘源区的沙尘被大量吹入张掖地区; 二是由于气温回升, 在冬季经过长时间冻结的土地开始融解, 地表土质松软且没有植被保护, 出现大风天气时地表沙尘很容易被吹到空中, 从而引起 AOD, β 以及 PM_{10} 质量浓度值的增大. 进入 6 月, 虽然张掖地区在大尺度环流天气控制下仍容易发生沙尘现象, 但在沙尘天气之后常伴有降水过程^[15]. 由于雨水的湿沉降作用, 悬浮在大气中的沙尘以及人类排放的污染物重新回到地面, 大气变得清洁; 而且, 6 月地表植被相对丰富, 由地表进入大气的气溶胶粒子减少.

国家环境空气质量标准中日均 PM_{10} 质量浓度的一、二、三级标准极限值分别为 50, 150, 250 $\mu\text{m}/\text{m}^3$, 从图 3d 中知观测期间张掖地区日均 PM_{10} 质量浓度多为国家二级标准. $\beta > 0.2$ 的天数占到了总有效天数的 60%, 而 $\beta < 0.1$ 的天数只占到 14%, 说明观测时期张掖地区的大气浊度持续偏高. AOD 和 β 的变化趋势比较一致, 它们之间呈正相关关系. α 的变化趋势与它们相反, 呈较弱的负相关, 原因在于非沙尘日的大气气溶胶以细粒子为主, 沙尘日大气中粗粒子和细粒子含量都会上升, 但以粗粒子为主^[16].

2.2 AOD 的日变化类型

试验期间张掖地区 AOD 观测较完整的天数

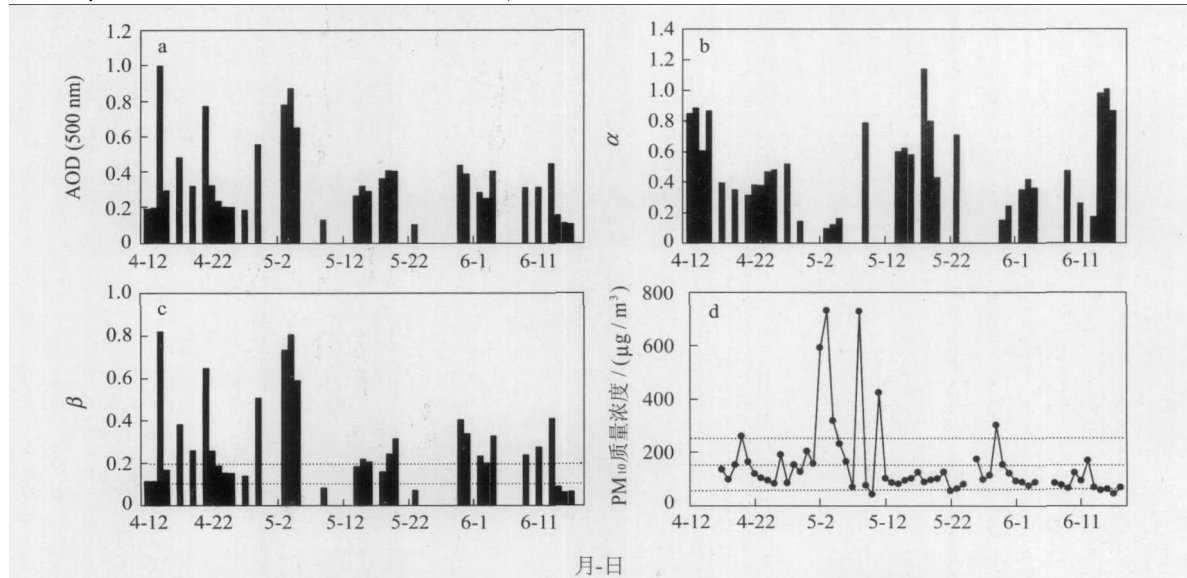


图 3 AOD (500 nm), α , β 以及 PM_{10} 质量浓度的日均值变化趋势

Figure 3 Overall trend of daily average variation of AOD(500 nm), wavelength exponent, turbidity coefficient, and mass concentration of PM_{10}

共有 28 天, 对这 28 天的 AOD 日变化形式做统计, 发现其日变化大致可分为四种类型 (图 4): 1) 平缓稳定; 2) 早晚低, 中午较高; 3) 早晨低, 傍晚高, 整体呈上升趋势; 4) 早晨高, 傍晚低, 中午左右出现

一个峰值, 但整体呈下降趋势. 这与刘玉杰等^[17]在银川地区观测的 AOD 日变化类型结果大体一致.

从表 1 可知, AOD 日变化平缓稳定和早晨低傍晚高是出现频率最高的两种类型, 各自都占了

总有效天数的 25%。在 AOD 日变化平缓稳定这种类型下, AOD 的日均值仅为 0.146, 与其他类型的日均值相比是最低的。AOD 的值偏小, 标准差仅为 0.042, 说明 AOD 变化平缓稳定, 大气比较清洁, 这种类型下的 AOD 观测值可以作为背景大气下的 AOD 值。

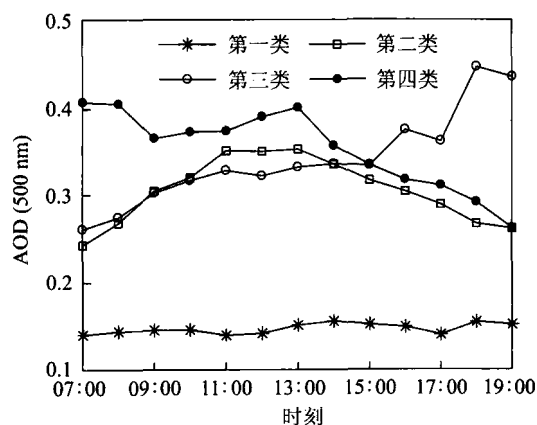


图 4 AOD (500 nm) 的日变化类型

Figure 4 Diurnal variation patterns of AOD (500 nm)

表 1 AOD (500 nm) 日变化类型统计结果

Table 1 Statistical results of diurnal variation patterns of AOD(500 nm)

| 变化类型 | 出现天数/天 | 比率/% | 平均值±标准差 |
|----------|--------|------|-------------|
| 平缓 | 7 | 25 | 0.146±0.042 |
| 早晚低, 中午高 | 5 | 18 | 0.307±0.056 |
| 早晨低, 傍晚高 | 7 | 25 | 0.334±0.117 |
| 早晨高, 傍晚低 | 4 | 14 | 0.355±0.088 |
| 其他类型 | 5 | 18 | 0.683±0.355 |

AOD 日变化早晚低中午高的类型占总有效天数的 18%, 这种情形下的 AOD 日均值是 0.307, 约为背景大气下的两倍。这种变化的原因与大气层结不稳定有关。白天太阳辐射对地面加热, 地面又对底层大气加热, 形成大气层结不稳定。这种不稳定经过一段时间的累积, 在中午前后形成局地湍流, 风卷起地面的沙尘悬浮在空气中, 造成 AOD 值的增大^[17]。

AOD 日变化早晨低傍晚高这种类型的特点是整体上 AOD 的变化呈上升趋势。这种变化是在大气相对稳定的情况下, 由于沉降作用比较缓慢, 悬浮在大气中的气溶胶粒子慢慢累积, 到傍晚达到一天中的最大值^[17]。

AOD 日变化早晨高傍晚低类型占总有效天数的 18%, 这种类型的特点是在中午及其前后出现一个明显的波动, 此时 AOD 值升高, 但从整体上看 AOD 的变化还是呈下降趋势的。造成下降的原因与早晨逆温层的消散有关。早晨由于逆温层的

存在, 阻碍大气湍流运动, 气溶胶粒子不易向上扩散。随着太阳慢慢升起, 逆温层逐渐消散, 湍流逐渐增强, 使得近地面气溶胶粒子能够垂直扩散, 浓度降低。中午及其前后 AOD 出现较高值的原因仍与局地湍流造成大量粒子进入大气有关。

其余 18% 的 AOD 日变化并没有明显的规律, 具体日期是 4 月 14 日, 4 月 17 日, 5 月 3 日, 5 月 5 日以及 6 月 13 日。这 5 天的 AOD 日均值为 0.683, 比上述四种类型的值都要高, 并且是背景天气下的 4 至 5 倍, 标准差为 0.355, 振幅相比较最大, 所以这些应该是沙尘天气中出现的变化形式。根据观测记录, 5 月 3 日确实出现了沙尘暴和浮尘天气, 5 月 5 日和 6 月 13 日均为沙尘暴过后的浮沉天气。

2.3 AOD 与气象要素的关系

2.3.1 AOD 与地面风的关系

图 5 是 500 nm 通道 AOD 的风玫瑰图。由图 5 知当观测点受西北(偏北)风控制时, AOD 往往容易出现较高的值。造成这种结果的原因是, 第一, 塔克拉玛干大沙漠位于张掖地区的西北方向, 内蒙古和蒙古戈壁位于正北和东北方向, 当观测点上空有大尺度天气系统过境盛行西北(偏北)风时, 会从上风向带来大量的沙尘粒子, 造成 AOD 值的增大。第二, 张掖地区除了农田, 下垫面是典型的戈壁, 沙源丰富, 再加上气候干燥少雨和蒸发强烈, 导致土壤粒子之间黏滞力很低, 降低了该地区的临界风速, 使得沙尘粒子很容易被吹离地面^[18]。观测点西北(偏北)风往往最强, 因此当出现西北(偏北)风时, 会有更多的地表沙尘被吹入大气, 造成了 AOD 值的增大。

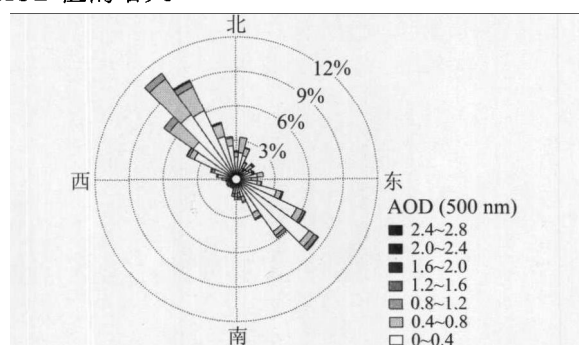


图 5 AOD (500 nm) 风玫瑰图

Figure 5 Wind rose for AOD (500 nm)

观测点东南向约 20 km 为张掖市区, 市区人口相对稠密, 城市交通及工业活动等会排放一定的污染物。当观测点受东南风控制并且 AOD 有观测值的时间段大致在早上 7:00-10:00 左右(图 2), 在此时段, 市区排放的污染物被带到观测点, 造成

观测点气溶胶浓度增大, AOD 值升高.

2.3.2 AOD 与相对湿度的关系

为了避免其他因素的干扰, 将 AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的比值与相对湿度做散点图, 即考察在同样 PM₁₀ 质量浓度情况下, 相对湿度对 AOD 的影响. 由图 6 可见, 在相对湿度小于 20% 的范围内 AOD 分布最多, 在 20%~40% 范围内分布次之, 大于 40% 的分布则很少, 即大部分的 AOD 分布在相对湿度比较低的范围内, 这是因为张掖地区的空气相对湿度本来就保持在较低的水平(图 2f).

还可看到, 当相对湿度比较低时, AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的比值存在较低值和较高值; 当相对湿度比较高的时候, 比值仍存在较低值, 整个图中没有表现出这个比值随相对湿度的升高有增大或减小的趋势, 而是表现为这些点比较离散地分布在图中左下三角形区域内. 张掖位于中国西北地区, 沙尘气溶胶是最主要的气溶胶类型, 其化学成分中以 SiO₂, Al₂O₃ 及其他金属氧化物为主^[19], 这些化学成分决定了沙尘粒子属于非吸湿性气溶胶粒子. 而非吸湿性气溶胶粒子只有在相对湿度达到过饱和时, 才能凝结增长^[18], 因此在一般情况下以非吸湿性粒子为主的气溶胶特性与相对湿度关系不大. 观测期间相对湿度的观测值最大不超过 93.3%, 说明张掖观测点相对湿度的变化对 AOD 大小的影响不明显.

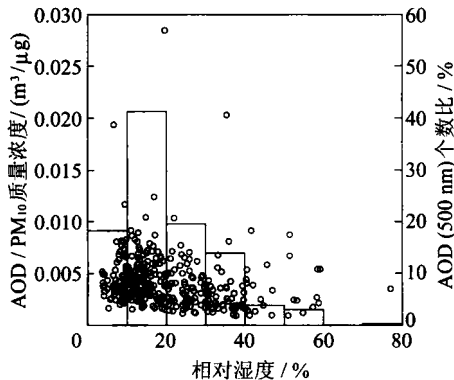


图 6 AOD (500 nm) 与相对湿度的关系

Figure 6 Relationship between AOD (500 nm) and relative humidity in hourly means

2.4 AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的关系

图 7 和图 8 分别给出了小时平均、日平均 AOD 与对应 PM₁₀ 质量浓度的关系图, 其中日平均 PM₁₀ 质量浓度同样取北京时间 7:00-19:00 点的平均值. 在小时平均情况下 AOD 和 PM₁₀ 质量浓度的相关系数 R^2 为 0.4035, 通过了显著性水平 $\alpha = 0.001$ 的 t 检验; 在日平均情况下 AOD 和 PM₁₀ 质量浓度

的相关系数 R^2 为 0.7359, 也通过了显著性水平 $\alpha = 0.001$ 的 t 检验. 可见, 日均值的对应关系要好于小时平均情况. 分析其原因, AOD 除了受 PM₁₀ 影响外, 还与其他污染物和天气要素等有关. 李霞等^[20]

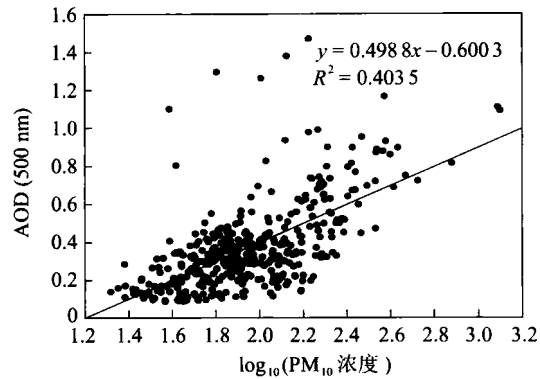


图 7 AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的小时均值散点图

Figure 7 Scatter plot of hourly means of AOD and mass concentration of PM₁₀

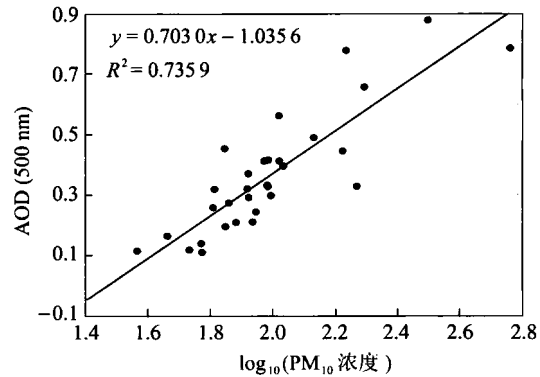


图 8 AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的日均值散点图

Figure 8 Scatter plot of daily means of AOD and mass concentration of PM₁₀

研究乌鲁木齐污染物 (PM₁₀ 和 SO₂) 与 AOD 的关系时得出月均值的对应关系要好于日平均情况, 认为原因之一是处于边界层的污染物浓度并不一定和紧邻其上自由对流层的浓度恰巧一致, 这两层的浓度值依赖于垂直混合的剧烈程度, 短暂的时间内这些要素间的关系非常复杂, 而较长时间的资料取平均后, 这些参数则趋向于一个常数. 同理, 相对小时均值, 取日平均后的值至少会滤掉一些波动, 所以日均值的对应关系要好于小时平均情况. 另一方面, 可能与样本容量的不同有关. 一般地, 样本容量越大, 其代表性越好. 小时均值样本容量为 392 个, 远远大于 31 个日均值样本容量, 因此日均值的相关性相对较高也可能是由于样本容量偏少引起的.

3 结语

观测期间, AOD, β 以及 PM₁₀ 质量浓度的较

高值多出现在4, 5月份。4, 5月份的天气比6月份浑浊的主要原因是由于春季沙尘天气的频繁发生和6月雨水及植被的增多。

观测期间张掖地区日均PM₁₀质量浓度多为国家二级标准, 大气浑浊度持续较高, AOD和浑浊度系数 β 的日均值变化趋势较为一致, 而波长指数 α 的变化趋势与它们相反, 呈较弱的负相关。

AOD的日变化形式大致分为四类: 1) 平缓稳定, 日均值仅为0.146, 这种类型下的观测值可作为背景大气的AOD值; 2) 早晚低, 中午较高; 3) 早晨低, 傍晚高, 整体呈上升趋势; 4) 早晨高, 傍晚低, 中午左右出现一个峰值, 但整体呈下降趋势。

当观测点受较强的西北(偏北)风控制时, AOD易出现较高值, 这主要与此时大气中沙尘气溶胶粒子的增多有关。当观测点受东南风控制时, AOD值的增大与张掖市区污染物的排放有关。由于张掖地区大气气溶胶以非湿性粒子为主, 相对湿度的变化对AOD大小的影响不明显。

AOD和PM₁₀质量浓度在小时平均情况下的相关系数 R^2 为0.4035, 在日平均情况下的相关系数 R^2 为0.7359, 它们都通过了显著性水平 $\alpha = 0.001$ 的 t 检验。AOD和PM₁₀质量浓度日均值的对应关系好于小时平均情况的原因除了可能与样本容量的不同有关外, 还与AOD受其他污染物和天气要素等影响有关。

参考文献

- [1] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 82-83.
- [2] 刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 近沙尘源区气溶胶光学特性的季节变化及其统计学描述[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 174-182.
- [3] ALADOS-ARBOLEDAS L, ALCÁNTARA A, OLMO F J, et al. Aerosol columnar properties retrieved from CIMEL radiometers during VELETA 2002[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(11): 2654-2667.
- [4] ECK T F, HOLBEN B N, REID J S, et al. Optical properties of boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site[J]. J Geophys Res, 2009, 114(D11): 1-14.
- [5] ECK T F, HOLBEN B N, REID J S, et al. Spatial and temporal variability of column-integrated aerosol optical properties in the southern Arabian Gulf and United Arab Emirates in summer[J]. J Geophys Res, 2008, 113(D1): 1-19.
- [6] 杨志峰. 中国特征区域大气气溶胶光学特性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- [7] 李霞, 陈勇航, 胡秀清, 等. 乌鲁木齐大气气溶胶的光学特性分析[J]. 中国环境科学, 2005, 25(Sup): 22-25.
- [8] 王毅, 石汉青, 黄思训. 中国东南地区及近海海域气溶胶反演遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(1): 13-21.
- [9] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用CE-318太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.
- [10] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 185-190.
- [11] TANRÉ D, KAUFMAN Y J, HOLBEN B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum[J]. J Geophys Res, 2001, 106(D16): 18205-18217.
- [12] KIM D H, SOHN B J, NAKAJIMA T, et al. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements[J]. J Geophys Res, 2004, 109(D2): 1-18.
- [13] DUBOVÍK O, HOLBEN B, ECK T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. Journal of the Atmosphere Science, 2002, 59(3): 590-608.
- [14] 王尧奇, 沈志宝, 季国良, 等. 兰州冬季的大气浑浊度[J]. 高原气象, 1982, 1(4): 83-91.
- [15] 文军, 季国良, 吕兰芝. 黑河实验地区大气浑浊度的初步分析[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 339-345.
- [16] 田磊, 张武, 史晋森, 等. 河西走廊干旱区春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 1050-1057.
- [17] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用CE-318太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.
- [18] 盖长松. 中国西北地区气溶胶光学厚度和波长指数观测数据的分析研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2005.
- [19] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 391-394.
- [20] 李霞, 任宜勇, 吴彦, 等. 乌鲁木齐污染物浓度和大气气溶胶光学厚度的关系[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 541-546.

(责任编辑: 张勇)