

贾盛洁, 刘锦丽, 吕达仁, 等. 2009. 小洋山岛大气气溶胶光学厚度的特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 427-433. Jia Shengjie, Liu Jinli, Lü Daren, et al. 2009. Analysis on the characteristics of aerosol optical depth over Xiaoyangshan isle [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 427-433.

小洋山岛大气气溶胶光学厚度的特征分析

贾盛洁^{1,2} 刘锦丽² 吕达仁² 杜秉玉¹

1 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

摘要 小洋山岛位于上海东南面距海岸线约 30 km 处, 四面环海, 研究其上空的大气气溶胶光学特性对了解我国东部沿海地区及其近海海域的环境和气候影响等都具有重要的意义。对于近岸海岛的气溶胶光学厚度 (AOD) 观测, 至今国内尚未见这方面的实测资料与分析。本次实验利用 2006~2007 年连续观测得到的 AOD 值, 分析了 AOD 的季节变化及其与地面风向、湿度和能见度等气象要素的关系, 并给出了气溶胶消光谱。分析发现: 小洋山地区 AOD 具有春季最大, 冬季次之, 秋季较小的特点, 而且在低能见度情况下, 气溶胶以大粒子为主; 盛行西风时, AOD 值增大且大粒子比重增加; AOD 与湿度有较好的正相关关系。

关键词 气溶胶光学厚度 风向 地面能见度 大气消光

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0427-07 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

Analysis on the Characteristics of Aerosol Optical Depth over Xiaoyangshan Isle

JIA Shengjie^{1,2}, LIU Jinli², LÜ Daren², and DU Bingyu¹

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

Abstract Xiaoyangshan Isle, approximately 30 km southeast coast of Shanghai, is surrounded by East China sea. The study of atmospheric aerosol optical characteristics over this region is important for understanding the effect on environment and climate in East Coast of China and its offing. The observation and analysis of the aerosol optical depth (AOD) data for isle near the coast are few in China until now. The authors used the observed data from 2006 to 2007 to analyze the characteristics of AOD, such as its seasonal variation, the correlation of AOD with surface winds, relative humidity and visibility, etc, and the spectral distributions of AOD are given. The results show that the AOD over Xiaoyangshan isle is the largest in spring, less in winter, and the smallest in autumn. The aerosol is composed of larger particles in low visibility and more larger particles appear in west wind. The AOD and relative humidity have a positive correlation.

Key words aerosol optical depth, wind direction, surface visibility, atmospheric extinction

收稿日期 2008-03-04 收到, 2009-03-02 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40333029 和国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403702

作者简介 贾盛洁, 男, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶的观测研究。E-mail: jjsj008@163.com

1 引言

大气气溶胶粒子通过直接和间接辐射强迫强烈影响着气候,其浓度变化与生态环境及人类健康息息相关(王明星,2000)。地表沙尘、海洋飞沫、工业燃煤以及尾气排放等多种自然过程和人类活动都会产生大气气溶胶粒子。由于大气气溶胶的成分、光学特性、粒谱及时空分布的多样性,人们对它的了解至今尚不够全面。

对于大气气溶胶的研究,除了直接采集近地面的样本进行物理化学分析之外,还可以通过推测垂直大气柱的光学厚度来实现。近年来,关于大气气溶胶的特性研究已经成为当前全球和区域性大气环境与气候变化所关注的焦点之一(Dubovik et al., 2000),对此国内已经做了不少的观测和研究(刘锦丽等,1994;李放等,1996;毛节泰等,2002;罗云峰等,2002;宋磊等,2006;王跃思等,2006)。但以往的工作大多集中在我国北方的城市及地区,东南沿海一带特别是其近海海域的气溶胶光学特性的研究还很少(李正强等,2003;赵崑等,2005),且大多没有长期数据的积累。近年来,随着气溶胶区域气候效应研究的深入,针对沿海地区近海海域的气溶胶光学特性的研究也正在逐步开展。上海作为我国东部沿海大城市之一,人类活动对大气的的影响比较明显,因此上海与其近海海域上空的气溶胶光学特征在东南沿海一带具有一定的代表性。我们于2000年开始在上海进行气溶胶观测至今,并于2006年9月~2007年5月在其东南沿海距海岸线约30 km处的小洋山岛进行了对比观测,以期了解上海近海海域气溶胶的光学特性。

2 观测与数据处理

2.1 观测仪器

本次实验小洋山观测站(30°38'N, 122°03'E)所用仪器为美国 Solar Light 公司生产的 Microtops II 型太阳光度计,其为接收 340、500、675、870 和 1 020 nm 波段的光辐射信号可直接得出气溶胶光学厚度(AOD)的太阳光度计。上海市区徐家汇观测站(31°12'N, 121°26'E)的仪器采用

表 1 两站仪器情况

Table 1 The instruments in two stations

观测站	仪器	波段/nm	视场角
徐家汇	L97 多波段光度计	450 500 550 600 650 700 750 800 850 900	3°
小洋山	Microtops II 型光度计	340 500 675 870 1020	2.5°

L97 型多波段光度计/辐射计,是在 450~900 nm 波长范围内分成 10 个波段对测量目标进行非接触式相对测量的光辐射测量仪器。表 1 为本次观测两站所用仪器情况。

2.2 观测条件及时间

两测站的观测资料大多在 11:30~13:30(北京时,下同)测得,这段时间通常为中等垂直输送阶段,接近日平均水平,且太阳天顶角小,基本可以反映测站上空的大气特性。资料分析中全部选择晴天且日面路径上无云大气的情况。小洋山站同时有地面气象要素(温度、湿度、风向、风速、云量、云况、能见度及天气现象)的观测和记录。本次实验小洋山站的观测时间为 2006 年 9 月~2007 年 5 月,徐家汇站选用的对比观测资料是 2006 年 6 月~2007 年 5 月。

2.3 仪器的标定

Microtops II 厂家定标常数是在夏威夷 Mauna Loa 观测站(空气质量好,无局地源)利用 Langley 定标方法获得,小洋山站仪器测得的电压值通过厂家定标常数可直接得出各波段的光学厚度值。我们在上海对 L97 使用 Langley 法进行标定(宋磊等,2006),在不同季节的稳定晴天下选取了 5 d 进行定标测量,并根据得出的定标值,对上海徐家汇站 2006 年 6 月~2007 年 5 月的资料进行了处理,在扣除了 Rayleigh 散射后,得到了大气气溶胶光学厚度值。

3 结果与分析

分析中,全部选取了小洋山站和徐家汇站观测时刻太阳附近完全无云的资料,然后根据由此得到的光学厚度值来讨论上海近海海域 AOD 的变化特征。

3.1 AOD 季节变化特征

考虑到上海地区的气候和地域特点,以及在

今后的工作中与北京等城市的光学厚度对比的方便, 本文讨论的“季节”, 以 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12~2 月为冬季来分类; 以 500~550 nm 波段为例 (L97 取通道 3 的值, Microtops II 取通道 2 的值) 做季节平均时, 先将满足条件的晴天中午观测时段内的值进行平均以代表该天 AOD 的情况, 然后再利用这些日平均值作季节平均, 因此, 季节平均的样本数就是该季满足观测条件的晴天数。两站不同季节 AOD 变化的统计结果见表 2。

从表 2 中可以清楚看到, 徐家汇站的光学厚度具有春、冬、秋、夏依次变小的特征。总体而言, 平均值的季节变化不是很大; 同时, 小洋山站也有类似的变化特点 (夏天缺测), 但是, 小洋山站各个季节的光学厚度明显大于徐家汇地区。同时值得注意的是, 两站冬天数据的离散度都是最小的, 而徐家汇站夏天的数据离散度最大。这种气溶胶光学厚度春天最大、秋冬较小, 夏天最小的结果与罗云峰等 (2002) 利用全国 46 个甲种日射站反演得到东南沿海一带地区的 AOD 季节变化一致, 李成才等 (2003) 利用 MODIS 资料得到的中国东部地区 AOD 也有类似特点。这种季节差异可能有以下几个原因:

(1) 春季气溶胶值偏高的主要原因是频繁来自于北方的大风天气系统中含有大量的沙尘粒子, 大量细沙尘粒子从北方高空输送过来使气柱总气溶胶含量增加; 上海四季的相对湿度都很高, 春季较高的相对湿度有利于大气中气粒转化的气相反应, 也增强了形成气溶胶的能力, 对气溶胶柱总量增加有一定的贡献。

(2) 秋冬季节, 来自西北的相对干燥的冷气团南下较多, 秋季大陆高压南下和副热带高压东退引起的降水冲刷造成 AOD 逐日变化较大, 冬季上海及东南沿海一带基本为稳定的大陆高压控制, 故数据的离散程度为一年中最小。可能由于秋季较之冬季相对较多的雨水冲刷, 使得秋季的 AOD

略小于冬季;

(3) 夏季东南沿海一带主要受夏季风及台风影响, 雨水充沛, 多以雨天及多云天气为主。上海地区 AOD 的低值可能是由于在夏季风控制下, 来自东南海面相对洁净的空气降低了局地气溶胶的浓度, 此时也不存在来自北方远距离输送的沙尘气溶胶的影响, 同时, 这一地区频繁降水带来的雨水冲刷过程也可以大大缩短气溶胶的生命期。考虑到夏天地面光度计的实际观测天数不是很多, 且降水频繁造成的 AOD 逐日变化大, 故数据的离散度是一年中最大的。

(4) 小洋山站在上海以东约 30 km 海面上, 四面环海, 受西风系统影响, 上海、浙江沿海大城市中的陆地和人类活动所产生的气溶胶会输送到东南近海一带, 上海与小洋山站之间 30 km 左右的洋面很可能使其中的吸湿性气溶胶平均粒径增大, 导致消光系数增加, 从而使得小洋山站的光学厚度整体上大于徐家汇站。事实上, 两站相同的 AOD 季节变化也是东南近海海域 (例如小洋山岛) 的大气状况受沿海一带城市影响较大的一个有力的说明。

3.2 AOD 与气象要素的关系

根据地面自动气象站和人工站记录的地面气象要素数据, 仍以 500 nm (Microtops II) 和 550 nm (L97) 通道为例重点分析 AOD 与风向和湿度的关系。

3.2.1 与风向关系

由于徐家汇站地处上海市中心, 周边高楼较多, 由此形成的湍流尾流对该站自动站影响比较大, 风数据的代表性差, 因而只选用了四面环海、地域代表性较好的小洋山站的风向及风速资料来分析其与 AOD 的关系。分析时把自动站的风向数据按一天的主导风向进行分类: 如一天中大部分时间的风向位于 45°~135°之间, 则这天的主导风向记为东风, 其他风向的定义以此类推, 具体分析结果见表 3。

表 2 两站四季 AOD 平均值及方差

Table 2 The average AOD and variance for different seasons

观测站	春季		夏季		秋季		冬季	
	AOD (Var)	N	AOD (Var)	N	AOD (Var)	N	AOD (Var)	N
小洋山	0.57 (0.08)	25			0.50 (0.09)	27	0.52 (0.06)	36
徐家汇	0.48 (0.07)	26	0.38 (0.16)	23	0.39 (0.07)	21	0.45 (0.04)	31

注: AOD 为平均值, Var 为其对应的方差, N 为各季样本数

表 3 小洋山不同天气情况下各风向的平均 AOD (500 nm)
Table 3 Average AOD (500 nm) with wind directions under different weather at Xiaoyangshan

主导风向	非雾天数 (总天数)	出现雾的比率	AOD (Var)	平均温度/°C	平均湿度 (%)	平均风速/m · s ⁻¹
东	21 (24)	0.125	0.455 (0.035)	16.72	60.83	5.16
南	20 (23)	0.130	0.559 (0.075)	19.12	57.76	5.49
西	16 (24)	0.333	0.626 (0.061)	12.04	49.73	7.01
北	31 (39)	0.205	0.510 (0.102)	12.76	56.23	5.81

注: 总天数为符合观测条件的天数, 非雾天数为总天数减去观测时雾天发生的天数

从表 3 中可以看出, 东南风的观测总天数略小于西北风, 这是由于小洋山站夏天没有观测资料所致。在有资料的这些天中, 当盛行西风时平均 AOD 最大, 而盛行东风时则相反, 盛行南风时平均 AOD 又略大于盛行北风时; 需要注意的是, 各风向下出现雾的比率大小也与此情况相类似; 从各风向下的平均温度来看, 盛行东南风时的温度明显大于盛行西北风时; 从平均湿度来看, 盛行东南风的湿度要略高于盛行西北风时, 平均风速的变化则与此相反。

为了进一步分析盛行不同风向时的气溶胶变化特性, 采用通用的 $\tau_a(\lambda) = \alpha\lambda^{-\beta}$ 拟合上述数据

(刘锦丽等, 1994), τ_a 为气溶胶光学原波; λ 为波长; α 为 Angstrom 大气浑浊度系数, 代表了波长 $1 \mu\text{m}$ 处的大气气溶胶光学厚度; β 则为 Angstrom 波长指数。得到的参数值列于表 4, 同时给出了不同风向时的 α 和 β 的散点图 (见图 1)。

表 4 小洋山各风向下 $\tau_a(\lambda)$ 的拟合参数
Table 4 The fitting parameter of $\tau_a(\lambda)$ for different wind directions at Xiaoyangshan

风向	α	β
东	0.318	1.557
南	0.305	1.395
西	0.345	1.195
北	0.307	1.487

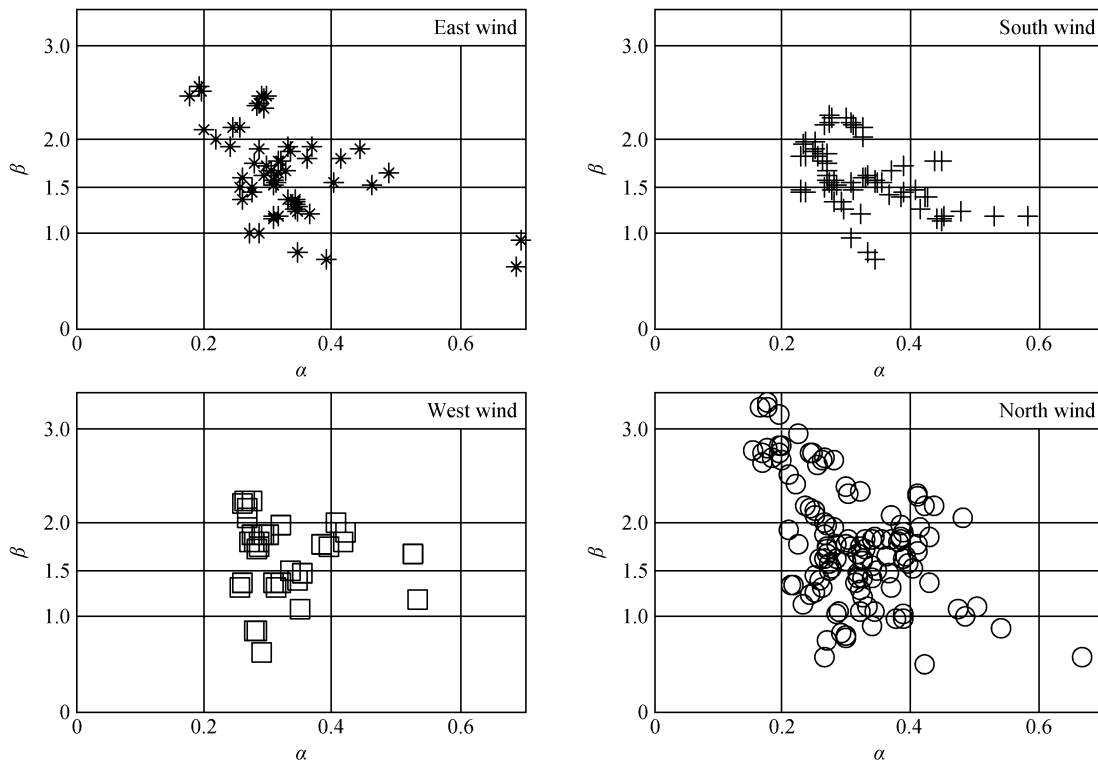


图 1 小洋山各风向 α 、 β 散点图

Fig. 1 Scatter plots of α and β for different wind directions at Xiaoyangshan

从表 4 和图 1 中可以看出，当盛行西风时，小洋山岛的空气最为混浊 (α 值最大)，且从 β 值可知，盛行东风时的小粒子比例最高，而盛行西风时则相反。出现上述现象的原因可能有以下几个方面：

(1) 夏秋季节上海小洋山岛等东南近海地区受夏季风的影响，盛行自洋面吹向陆面的暖湿气流；较之冬春季节控制这些地区的西北干燥的冷气团，一方面给该地区带来了洋面上“干净”的空气，另一方面温度和湿度也会明显比冬春季节的大。另外，由于夏天资料的缺失以及秋天可观测的天数限制，使得平均风速以盛行西风时为最大。

(2) 当小洋山岛盛行东风时带来了东海远海海域相对洁净的气溶胶，使得其上空的 AOD 为 4 种风向中最小的，且以小粒子为主导；相反，在盛行西风时，该地区则更多地受到来自上海和浙江地区人为源气溶胶输送的影响，并经过 30 km 左右洋面的加湿作用，使得其中的吸湿性气溶胶颗粒的平均粒径增大，从而一方面消光系数的增加导致小洋山岛上空气柱内气溶胶粒子的总光学厚度变大，且大粒子比例为最高，另一方面也使得雾天发生的频率高于其他风向盛行时。

3.2.2 与湿度的关系

为了分析小洋山站湿度对 AOD 的影响，对其每季湿度变化较大的天进行全天观测，发现该站的 AOD 与湿度的相关较好。图 2 给出 2007 年 2 月 19 日 AOD 与相对湿度关系的一个实例。由图可知当相对湿度较小时，其变化对 AOD 的影响较

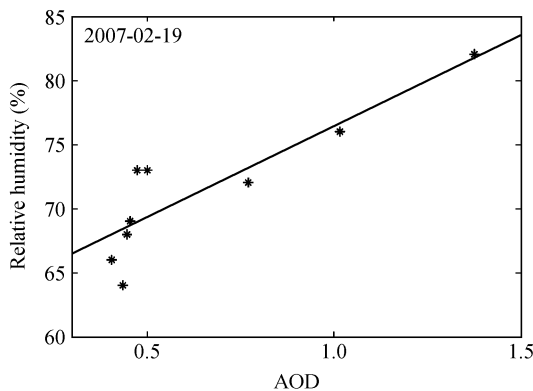


图 2 小洋山 500 nm 波段光学厚度与大气相对湿度的关系
Fig. 2 The relationship between AOD (550 nm) and relative humidity at Xiaoyangshan

小；而当相对湿度大于 70% 时，AOD 则随相对湿度的增加显著增加，该结果与杨军等 (1999) 的研究结果一致。图中两者相关系数达到 0.88。由此看来，小洋山岛主要以吸湿性粒子为主。

3.3 大气气溶胶消光谱

由得到的 AOD 数据，根据 $\tau_a(\lambda) = \alpha\lambda^{-\beta}$ 给出了小洋山站风向约束下的消光谱，结果如图 3 所示。为了对比，同时给出上海徐家汇站季节约束下的拟合参数值 (见表 5)。表 5 显示出了小洋山岛气溶胶浑浊度系数 α 春冬季较大、秋季较小的特点，上海市区也有类似情况；从波长指数 β 可以看到，小洋山岛春天大粒子比例最高，冬天次之，秋天则以小粒子为主导，并且市区也是如此；对比两站春季的波长指数可知，小洋山岛以小粒子为主，相对而言徐家汇站以大粒子为主，这恰恰说明了春季沙尘粒子的输送和本地扬尘的产生对局地大气气溶胶粒子谱分布的影响较大。

表 5 两站四季的 $\tau_a(\lambda)$ 拟合参数值

Table 5 The fitting parameter of $\tau_a(\lambda)$ for different seasons

季节	小洋山		徐家汇	
	α	β	α	β
春	0.314	1.329	0.491	1.214
夏			0.480	1.426
秋	0.279	1.584	0.378	1.567
冬	0.347	1.379	0.452	1.318

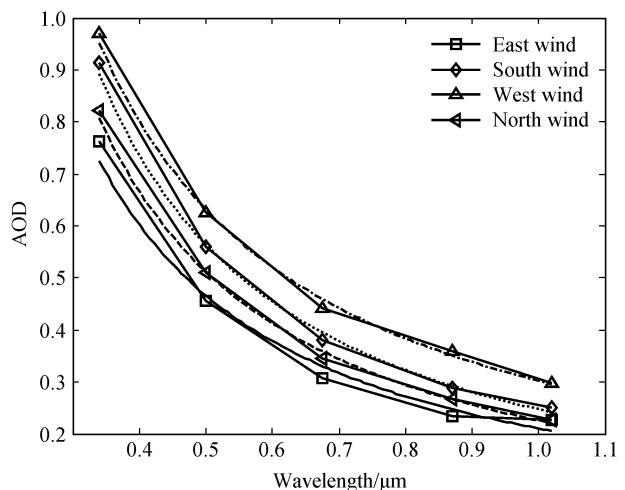


图 3 小洋山各风向大气气溶胶消光谱
Fig. 3 The spectral distribution of AOD with wind directions at Xiaoyangshan

图 3 为小洋山岛各盛行风向下的消光曲线, 每条拟合曲线的相关性为 0.99, 显著性水平均小于 0.01。由图可以清楚地看到盛行各主导风向对气溶胶光学厚度的明显约束, 即西风 $AOD >$ 南风 $AOD >$ 北风 $AOD >$ 东风 AOD 。由表 4 中的 α 、 β 拟合参数值可知, 盛行西风的情况下有更多的大粒子, 而盛行东风时则相反。为了更好地了解上海近海海域的光学厚度特征, 我们对小洋山岛的能见度资料进行了分类, 并给出了不同能见度下的消光谱 (图 4), 拟合参数值见表 6。

结果表明, 不同的能见度与小洋山岛的光学厚度有很好的对应关系, 随着能见度级别的提高, 平均 AOD 越来越小。并且注意到当能见度小于 5 km 时, 观测时的天气情况非雾即霾, 且从表 6 中可以清楚地看到, 小洋山岛在低能见度时, 有更多的大粒子, 与我国北方所不同的是 (张玉香等, 2002; 章文星等, 2002; 夏祥鳌等, 2005), 这种大粒子的形成可能主要有陆面上吸湿性气溶胶的参

表 6 小洋山不同能见度下的 $\tau_a(\lambda)$ 拟合参数
Table 6 The fitting parameter of $\tau_a(\lambda)$ for different visibility at Xiaoyangshan

能见度	α	β
I (<5 km)	0.321	0.941
II (5~10 km)	0.329	1.123
III (10~20 km)	0.304	1.388
IV (20~30 km)	0.343	1.619
V (>30 km)	0.286	2.171

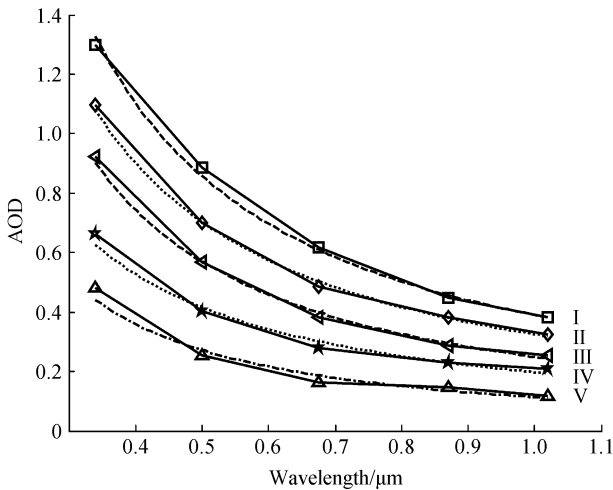


图 4 小洋山不同能见度下的消光谱

Fig. 4 The spectral distribution of AOD with visibility at Xiaoyangshan

与又有海盐气溶胶的补充, 并非沙尘源造成。但具体成分很复杂, 需要做进一步研究。总之, 以上的分析说明东南沿海一带城市对近海海域的气溶胶输送是造成这一现象最主要的原因。可以考虑将地面风向作为海雾预报的一个物理参数, 这对于东南沿海一带近海海域的海雾监测与研究应有一定的实际意义。

4 结论

本次实验在小洋山岛上进行了准一年的气溶胶光学厚度观测, 并与同期上海市徐家汇的观测作对比, 结果发现:

(1) 上海近海海域 (小洋山岛) 的大气气溶胶光学厚度和市区一样, 具有春天最大, 冬天次之, 秋天较小 (市区夏天 AOD 最小) 的季节变化特征, 而且小洋山 AOD 季平均值系统性地比市区的大。

(2) 小洋山岛 AOD 与湿度有较好的正相关, 说明岛上大气中水溶性粒子比较多。

(3) 不同的能见度与小洋山岛的光学厚度有很好的对应关系, 并且在低能见度的情况下, 有更多的大粒子。

(4) 小洋山岛上空盛行主导西风时平均 AOD 增大且大粒子比重也相应增加。

以上工作是进行东南沿海一带城市环境与气候效应研究的一个开始, 我们还将继续进行数据的积累以开展更加深入的研究工作。

致谢 本文资料由何珍珠女士等观测, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Dubovik O A, Smirnov B N, Holben M D, et al. 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D8): 9791-9806.
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 2003. 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 [J]. *科学通报*, 48 (19): 2094-2100. Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. 2003. Research on the distribution of AOD and the seasonal characteristics in Eastern China with MODIS [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 48 (19): 2094-2100.
- 李放, 吕达仁. 1996. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征

- [J]. 大气科学, 20 (4): 385-394. Li Fang, Lü Daren. 1996. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing Area [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 20 (4): 385-394.
- 李正强, 赵凤生, 赵巍, 等. 2003. 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究 [J]. 量子电子学报, 20 (5): 635-640. Li Zhengqiang, Zhao Fengsheng, Zhao Wei, et al. 2003. Gound surface observation of aerosol optical thickness over Yellow Sea region [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese), 20 (5): 635-640.
- 刘锦丽, 李放, 吕达仁. 1994. 长春静月潭遥感试验场大气光学特性研究 [J]. 环境遥感, 9 (3): 184-194. Liu Jinli, Li Fang, Lü Daren. 1994. Investigating of atmospheric optical characteristics over Changchun Jingyuetan remote sensing test site [J]. Remote Sensing of Environment (in Chinese), 9 (3): 184-194.
- 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 2002. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J]. 大气科学, 26 (6): 721-730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. 2002. Analysis on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 721-730.
- 毛节泰, 张军华, 王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 60 (5): 625-634. Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (5): 625-634.
- 宋磊, 吕达仁. 2006. 上海地区大气气溶胶光学特性的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 203-208. Song lei, Lü Daren. 2006. Investigating of atmospheric optical characteristics over Shanghai region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 203-208.
- 王明星. 2000. 气溶胶与气候 [J]. 气候与环境研究, 5 (1): 1-5. Wang Mingxing. 2000. Aerosol in relation to climate change [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (1): 1-5.
- 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 (9): 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 (9): 1703-1711.
- 夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 2005. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究 [J]. 遥感学报, 9 (4): 429-437. Xia Xiang'ao, Wang Pucui, Chen hongbin, et al. 2005. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties over North China in spring [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 9 (4): 429-437.
- 杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. 大气科学, 23 (2): 239-247. Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 239-247.
- 章文星, 吕达仁, 王普才. 2002. 北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析 [J]. 中国环境科学, 22 (6): 495-500. Zhang Wenxing, Lü Daren, Wang Pucui. 2002. The observation and analysis of atmospheric aerosol optical thickness over Beijing Area [J]. China Environmental Science (in Chinese), 22 (6): 495-500.
- 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 2002. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究 [J]. 应用气象学报, 13 (特刊): 136-143. Zhang Yuxiang, Hu Xiuqing, Liu Yujie, et al. 2002. Measurement of atmospheric aerosol optical characteristics in Beijing urban area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (Suppl.): 136-143.
- 赵巍, 唐军武, 高飞, 等. 2005. 黄海、东海上空春季气溶胶光学特性观测分析 [J]. 海洋学报, 27 (2): 46-53. Zhao Wei, Tang Junwu, Gao Fei, et al. 2005. Measurement and study of aerosol optical properties over the Huanghai Sea and The East China Sea in the spring [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 27 (2): 46-53.