

# 渤海气溶胶时空分布研究\*

马玉娟<sup>1,2</sup> 赵冬至<sup>2</sup> 刘玉光<sup>1</sup> 杨建洪<sup>2</sup> 顾艳镇<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100; 2. 国家海洋环境监测中心 大连 116023)

**摘要** 利用 2003—2008 年在渤海所测的 212 组气溶胶数据,研究了气溶胶光学厚度 (AOT)、浑浊度系数( $\beta$ )和 Ångström 指数 $\alpha$ 的时空分布规律,并初步探讨了气溶胶特征参数之间的关系。结果表明,在时间分布方面,渤海气溶胶光学厚度、浓度和粒径尺度在一天中的变化比较小,中午 AOT 较大,10 点左右 AOT 较小。从 6 月份到 9 月份,AOT、 $\beta$ 和 $\alpha$ 的范围和均值均呈下降趋势;3 月份 AOT、 $\beta$ 和 $\alpha$ 均明显小于六、八、9 月份的对值。离岸 25 km 之内的大部分地区,AOT 随离岸距离的增大而减小;但 25 km 以外,气溶胶变化没有规律。比较而言,气溶胶 AOT 和 $\beta$ 变化比较一致。浑浊度系数(浓度因子) $\beta$ 比 Ångström 指数(尺度因子) $\alpha$ 对气溶胶光学厚度 AOT 的影响更明显,AOT 和 $\beta$ 的关系可采用一阶线性回归方程表示。

**关键词** 气溶胶光学厚度, 浑浊度系数, Ångström 指数, 水汽  
**中图分类号** P732

近海海域是大气污染物从源地向大洋和全球迁移扩散的过渡带。中国近海受亚洲大陆影响,存在多种来源的气溶胶成分,为研究陆海相互作用和海气相互作用提供了天然试验场。近年来,亚洲尤其是中国近海气溶胶的物理化学特性及其对气候和环境的影响已成为目前海洋环境研究中的关键问题之一。刘毅等(1999)利用中国近海 10 个航次气溶胶观测资料,统计分析了中国海区气溶胶中不同元素含量的时间变化和地理分布特征,发现中国近海气溶胶中各种元素的含量受亚洲大陆和东亚季风气候的影响呈现出显著的地理分布和时间变化特征。李正强等(2003)利用太阳光度计实测了黄海海域的气溶胶,研究发现其主要由自然来源的气溶胶构成,光学厚度的日变化和逐日变化不大,但在秋、冬季节有大风、大雾时,会造成气溶胶光学厚度在几天内有较大波动。赵崑等(2005)对黄海、东海上空春季气溶胶光学特性进行了观测分析,并计算了气溶胶的粒子分布。谭浩波等(2006)对南海北部气溶胶光学厚度进行了观测,分析了其时空分布特征、气溶胶类型和来源等。渤海是半封闭内海,其大气受陆地影响很大,气溶胶分布十

分复杂研究也相对较少。周良明等(2005)对渤海上空大气衰减光学厚度进行了研究,发现黄河口区域气溶胶光学厚度较大。刘亚豪等(2008)对渤海和北黄海气溶胶分布特征进行研究,发现气溶胶光学厚度与气压存在负相关关系。

本文利用在渤海实测的气溶胶数据,以分析气溶胶光学厚度、Ångström 指数 $\alpha$ 和浑浊度系数 $\beta$ 的时空分布特征和相关因子的影响。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

渤海是我国典型的半封闭内海,四周围绕陆地,只通过一处水道与黄海相连(李晓红等,2011)。渤海周边地区经济较为发达,人口高度集中,大气污染较为严重,渤海气溶胶受到陆地气溶胶的显著影响。本次研究数据采用 Microtops II 手持太阳光度计和臭氧监测仪测量。现场同步测量 440、500、675、870 和 1020 nm 的气溶胶光学厚度、臭氧含量、水汽含量、温度和气压值。测量依据 NASA 技术规程(James *et al.*, 2003),采用走航和定点测量两种方式进行,走航方

\* 我国近海海洋综合调查与评价专项(908),908-02-03-01 号;国家重点基础研究规划(973)项目,973-2007CB411807 号。马玉娟,博士研究生, yjma8511@163.com

收稿日期: 2011-05-07, 收修改稿日期: 2012-03-13

式为到达预定站点船停稳后进行测量, 定点方式为船舶锚定, 9:00—16:00 每隔一小时测一次。其中 2005 年航次和 2008 年航次同步测量了气象数据, 包括风速、风向、相对湿度。2003 年到 2008 年共计进行了 8 个走航航次和两个定点站位测量, 累计获取有效数据 212 组, 其中 2003 年 72 组、2004 年 21 组、2005 年 98 组、2008 年 21 组。图 1 显示了观测站位的分布。

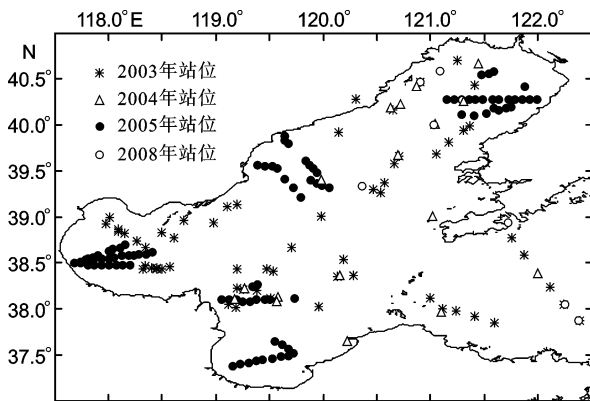


图 1 站位分布图

Fig.1 Distribution of observation sites

## 1.2 数据处理方法

### 1.2.1 气溶胶光学厚度 AOT 的求取

气溶胶光学厚度指气溶胶衰减系数从大气层顶到海面的积分, 简称 AOT (Aerosol Optical Thickness), 在公式中用  $\tau_a$  表示。本文中 AOT 均指 440 nm 气溶胶光学厚度。利用太阳光度计观测的大气数据, 采用 Langley-Bouguer 方法计算气溶胶光学厚度, 计算公式为 (Solar Light Company, 2001):

$$\tau_a = \frac{1}{m} \left( \ln \left( \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \right) - \ln \left( \frac{V(\lambda)}{V_0(\lambda)} \right) - m_{o_3} \tau_{o_3} \right) - \tau_m \quad (1)$$

式中,  $d$  是当日的太阳到地球的距离,  $d_0$  是平均日地距离,  $\left( \frac{d_0}{d} \right)^2$  是日地距离校正系数,  $m$  表示气溶胶的光学质量;  $\tau_m$  是大气分子的光学厚度,  $\tau_{o_3}$  为臭氧的光学厚度,  $m_{o_3}$  为臭氧的光学质量。

### 1.2.2 Ångström 指数 $\alpha$ 和浑浊度系数 $\beta$ 的计算

自 Ångström (1929) 第一次提出大气气溶胶的粒子粒径与波长相关的消光系数之间的关系以来, 一些研究者就开始了气溶胶粒子谱分布特性的研究 (Curcio, 1961)。根据 Ångström 公式得到

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

其中,  $\alpha$  为 Ångström 指数, 它与气溶胶的粒径有关,

也称为粒径因子、尺度因子;  $\beta$  是浑浊度系数, 它与气溶胶的浓度有关, 也称为浓度因子。利用太阳光度计 5 个通道的气溶胶光学厚度通过公式(2)拟合出  $\alpha$  和  $\beta$  值。

## 1.3 误差分析

### 1.3.1 仪器定标

Microtops II 手持太阳光度计有 5 个波段: 440 nm、500 nm、650 nm、870 nm 和 1020 nm。带宽 10 nm, 视场角 2.5°, 精度 1%—2%。仪器在美国 Solar Light 公司经过定标, 出海测量前对仪器进行了标定 (修鹏等, 2005)。

### 1.3.2 环境对仪器的影响

使用仪器测量时, 需要将仪器对准太阳; 高空不断移动的薄云和船体晃动会使测量产生误差。解决办法是同一站点同一时间连续测量多次, 然后剔除偏离较大的观测, 剩余数据取平均。

误差还来源天空光。因为仪器视场角比较大, 太阳直射光经过大气层达到仪器的同时少量旁边的天空光也进入仪器。在晴朗天气, 天空光远小于太阳直射光; 在有雾或者阴霾天气, 天空光可能不能忽略, 引起一定误差 (主要出现在 AOT 比较大的时候, 由于天空光引起低估 AOT)。大多数测量选在无云天气早 9 点至下午 4 点期间内进行, 最大可能的减少了这种误差。个别很大的 AOT 数据是受到天气 (肉眼不可见且变化迅速的高空薄云、薄雾) 的影响, 其中有的观测数据是在浓厚阴霾 (haze) 天气下获得的。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气溶胶光学厚度 AOT、浑浊度系数 $\beta$ 和 Ångström 指数 $\alpha$ 数据的基本情况

图 2 给出了 2003—2008 年在渤海所测得的 212 组数据的直方分布。从图 2 中可以看出 AOT 分布范围比较大, 85% 以上的数据比较均匀地分布在 0.3—1.5 区间; 个别数值很大的数据是受到天气 (肉眼不可见且变化迅速的高空薄云、薄雾) 的影响。浑浊度系数  $\beta$  分布范围也比较大, 85% 以上的数据分布在 0—0.6 区间, 而其中大部分数据分布在 0.2—0.4 区间; Ångström 指数  $\alpha$  分布范围较窄, 60% 以上的数据集中分布在 1.1—1.4。观测期间, 渤海气溶胶的 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  较大 (即气溶胶粒子的浓度大),  $\beta$  较小 (即气溶胶粒子的尺度大), 这意味着该海域的气溶胶具有明显的大陆-海洋混合型特征。浓度大意味着大量气溶胶粒子的凝结核来源于陆地, 尺度大意味着陆源性尘埃遇到海上水汽形成了较大的气溶胶粒子。

2.2 气溶胶光学厚度 AOT、浑浊度系数  $\beta$  和 Ångström 指数  $\alpha$  的时间分布

气溶胶随时间变化是衡量气溶胶的一个重要特征, 它主要分 4 个时间尺度变化: 日内变化、日际变化、月际变化、季节变化, 另外还有更大尺度的年际变化。本文主要讨论其日内变化和月际变化。

2.2.1 日内变化 图 3A 显示了站点(38.869°N、118.099°E)观测的 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  的距平在 2003 年 7 月 15 日一天内的变化。从图 3A 和表 1 可以看出, 在 7 月 15 日观测 AOT 的标准差只占其均值的 7%, Ångström 指数  $\alpha$  的标准差只占其均值的 10%, 浑浊度系数  $\beta$  的标准差只占其均值的 17%。

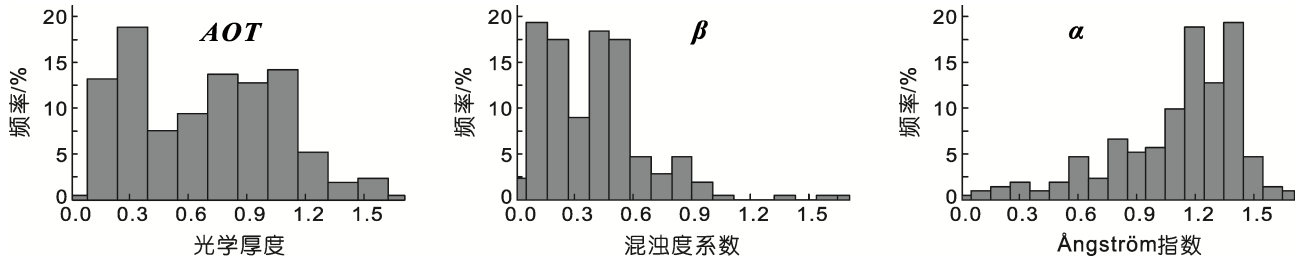


图 2 AOT、浑浊度系数  $\beta$  和 Ångström 指数  $\alpha$  分布直方图分布  
Fig.2 Histograms of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$

表 1 日内气溶胶 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  的平均值和标准差  
Tab.1 Inter-day means and standard deviations of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$

日期 (年-月-日)	AOT		$\beta$		$\alpha$	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
2003-07-15	1.02	0.07	0.35	0.06	1.36	0.14
2008-02-29	0.26	0.03	0.12	0.02	0.71	0.07

图 3B 显示了站点(38.933°N、121.717°E)观测的 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  的距平在 2008 年 2 月 29 日一天内的变化情况。在 2 月 19 日观测的 AOT 标准差只占其平均值的 11.5%,  $\alpha$  的标准差只占其平均值的 17%,  $\beta$  的标准差只占其平均值的 9.9%。

这两天观测数据显示, 中午气溶胶 AOT 较大, 10 点左右 AOT 较小。赵崑等(2005)和李正强等(2003)在黄海的测量结果均显示黄海气溶胶 AOT 中午时较小, 早晚较大, 与本文结论不一致, 说明不同的海区气溶胶的变化情况是不一样的。从表 1 可以看出, 气溶胶光学厚度、浓度和粒径尺度在一天中的变化比较小。

2.2.2 不同月份气溶胶的变化 图 4 描述的是

2003—2008 年在渤海实测气溶胶数据在不同月份的直方图分布, 其中 3 月 18 组数据、6 月 30 组数据, 8 月 107 组数据, 9 月 50 组数据, 7 月 8 组数据(数据太少, 未作分析)。表 2 描述了 3 月、6 月、8 月和 9 月气溶胶光学厚度 AOT、浑浊度系数  $\beta$  和 Ångström 指数  $\alpha$  的均值。

气溶胶光学厚度 AOT 在 3 月的

均值为 0.60, 70% 以上的数据集中在 0.20—0.60 区间, 这与赵崑等(2005)3 月在黄海和东海得到的结果一致, 3 月风向多为西北风或东北风, 渤海、黄海和东海均受陆地影响, 所以气溶胶光学厚度分布比较一致; 6 月 AOT 平均值为 1.14, 50% 以上的数据集中在 1.20—1.60 区间, 比 3 月大大增加; 8 月 AOT 均值为 1.0, 65% 以上的数据集中在 0.40 附近和 1.00—1.40 区间, 较 6 月有所减小; 9 月 AOT 均值为 0.74, 均匀的分在 0—1.60 区间, 跟 6、8 月情况都不同, 刘大召等(2008)在中国科学院南海海洋所测数据显示 9 月南海气溶胶光学厚度分布在 0.20—0.60, 比渤海要小很多。南海地域开阔, 周边陆地少, 9 月大多吹东南风或

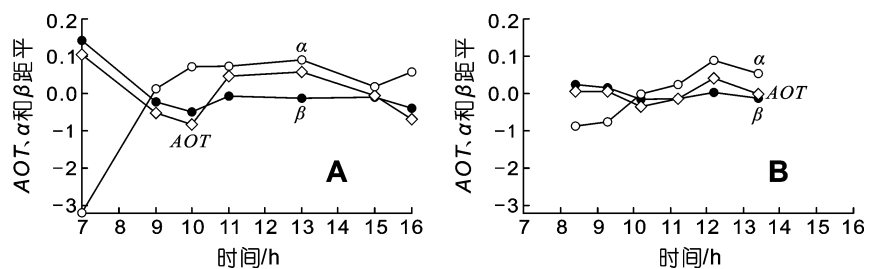


图 3 日内 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  随时间的变化  
Fig.3 Inter-day variations of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$

西南风,此时南海气溶胶受陆地气溶胶影响小,而受海洋气溶胶影响大,气溶胶呈现明显的海洋气溶胶特征;渤海三面围绕陆地,任何风向都会受到陆地气溶胶的很大影响,因此渤海气溶胶呈现明显的陆地气溶胶特征,气溶胶光学厚度比南海要大得多。罗云峰等(2001)提出中国大陆大部分地区 AOT 极大值出现在 3、4 月,极小值出现在、8 月,本文结论与其不一致。可能是因为夏季海上多雾,相对湿度很大,气溶胶吸湿增长使 AOT 值显著升高。大气气溶胶消光能力和空气湿度的正相关关系已被其它很多观测事实和研究所证实(孙景群, 1983; 杨军等, 1999; 张仁健, 2000)。施晓晖等(2005)分析北京地区气溶胶分布

也得出北京与南部周边地区冬季气溶胶与低云量、雾日数的年际变化存在着一定的相关关系。Shinozuka 等(2007)分析北美洲气溶胶数据也发现水汽对气溶胶 AOT 影响很大,尤其是对污染严重地区的 AOT,因为这些地区大气气溶胶中含有大量的水汽成分。

浑浊度系数 $\beta$ 在 3 月的均值为 0.29,绝大部分数据分布在 0.20—0.40 区间; 6 月浑浊度系数 $\beta$ 均值为 0.42,较均匀的分布在 0.20—0.60 区间; 8 月 $\beta$ 均值为 0.43,55%以上的数据分布在 0.20—0.40 区间,较 6 月有所减小; 9 月 $\beta$ 均值为 0.30,60%以上的数据分布在 0.20—0.40 区间。李子华等(1996)提出晴天气溶胶粒子浓度与浓雾日相比可小到 1/2—1/3,时宗波等

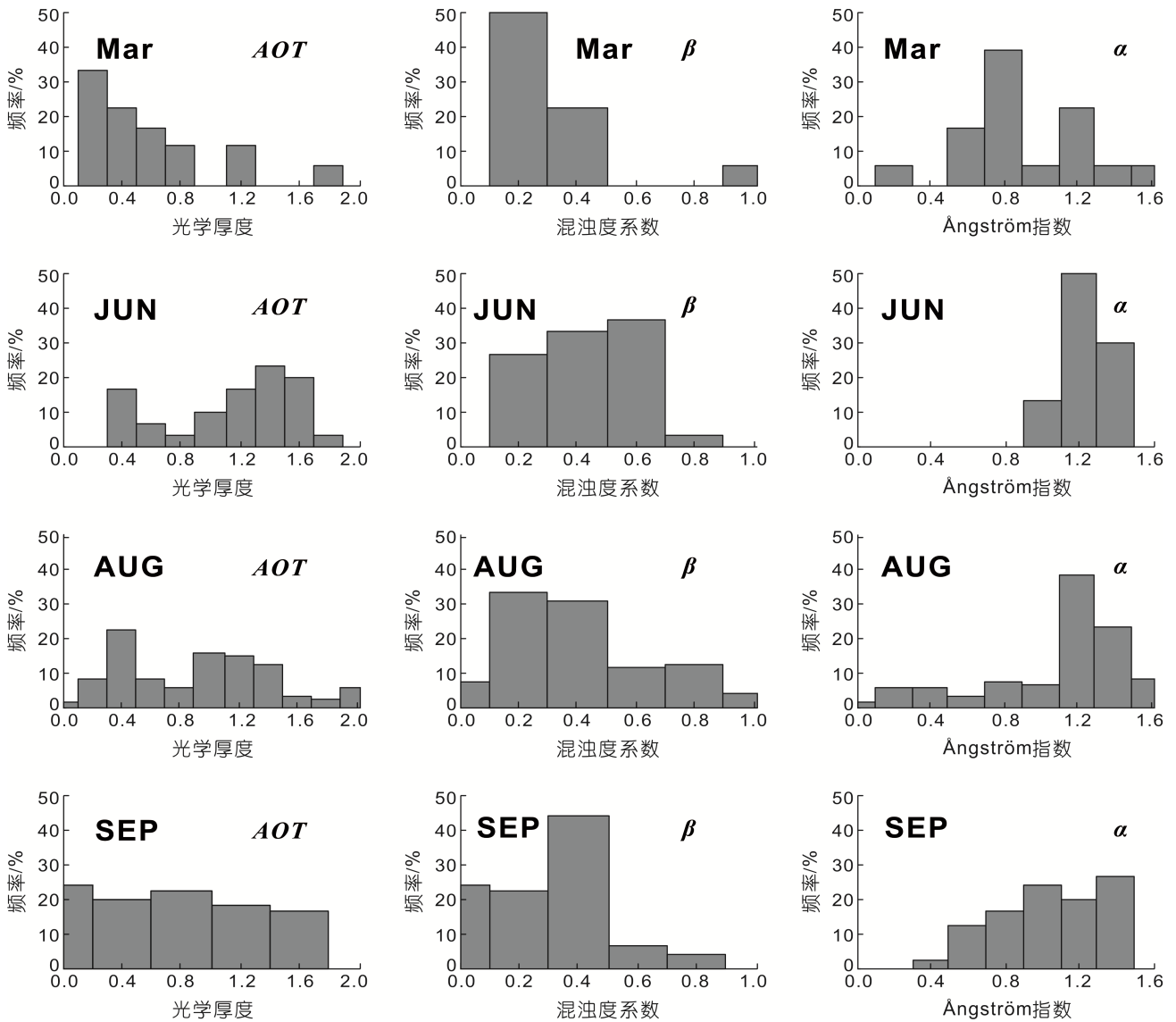


图 4 不同月份气溶胶 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  的直方分布图

Fig.4 Monthly variations of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$

表 2 不同月份气溶胶光学厚度 AOT、浑浊度系数  $\beta$  和 Ångström 指数  $\alpha$  的均值

Tab.2 Means of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$  in different months

月份	AOT 均值	$\beta$ 均值	$\alpha$ 均值
3	0.60	0.29	0.91
6	1.14	0.42	1.23
8	1	0.43	1.12
9	0.74	0.3	1.07

(2008)提出大雾期间大气中  $0.20 \mu\text{m}$  以上颗粒物的数浓度较晴天低污染期间高 5—8 倍。本次观测对比天气记录可以发现,当海雾发生时,水汽含量比较大,浑浊度系数  $\beta$  也比较大,与前人结论一致。

Ångström 指数  $\alpha$  在 3 月的均值为 0.91, 60% 以上的数据集中在 0.60—0.80 区间, 20% 的数据分布在 1.20 附近; 6 月 Ångström 指数  $\alpha$  均值为 1.23, 90% 以上的数据集中在 1.2—1.4 区间, 较 3 月有所增大; 8 月  $\alpha$  均值为 1.12, 60% 以上的数据集中在 1.20—1.40 区间; 9 月  $\alpha$  均值为 1.07, 分布比较分散, 60% 以上的数据集中在 1.00—1.40 区间。这是因为我国春、秋、冬 3 季沙尘暴时有发生, 尤其是春季, 沙尘暴更是频繁, 受

到沙尘气溶胶的影响, 大气  $\alpha$  较小, 夏季东亚在夏季风的控制下, 沙尘气溶胶的影响减小, 大气  $\alpha$  较大。李成才等(2003)提出中国东部大部分地区夏季  $\alpha$  较其它 3 个季节显著增高, 与本文结论一致。

### 2.3 气溶胶光学厚度 AOT、浑浊度系数 $\beta$ 和 Ångström 指数 $\alpha$ 的断面分布

图 5 给出了 2005 年渤海各调查断面气溶胶 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  随离岸距离的变化。从图 5 中可以看出, 渤海湾 6 月 11 日和 9 月 22 日断面、秦皇岛 6 月 15 日和 9 月 18 日断面、黄河口 9 月 1 日断面和辽东湾 9 月 14 日断面离岸 25 km 之内, AOT 随离岸距离的增大而减小, 可能的原因是人类活动对近岸的影响大于远海, 符合客观事实。这与刘毅等(1999)在黄海、郝增周等(2007)在中国近海、谭浩波等(2006)在南海得出的结论一致。在这几个断面, 浑浊度系数  $\beta$  也随离岸距离的增大而减小, 可能的原因是近岸海域受陆源气溶胶影响大, 粒子浓度大, 远海受陆源气溶胶影响小, 粒子浓度小, 这与郝增周等(2007)在中国近海得出的结论一致。而 Ångström 指数  $\alpha$  没有明显的变化规律。离岸 25 km 以外, 气溶胶变化复杂没有规律。

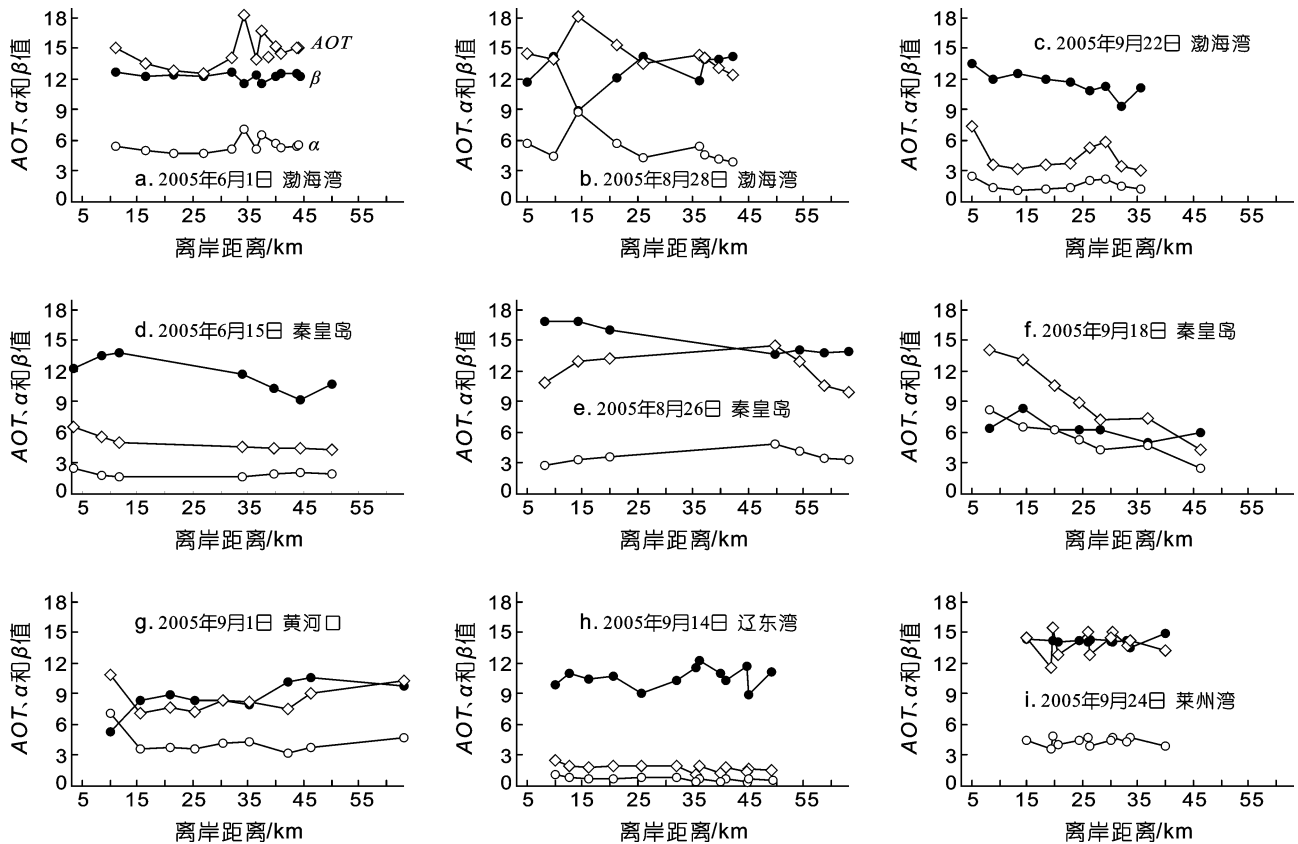


图 5 2005 年各测量断面气溶胶 AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  随离岸距离的变化

Fig.5 Variations of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$  with offshore distance in 2005

在其他几个断面离岸 25 km 以内, AOT 并不随离岸距离的增大而减小, 变化没有规律可循。

#### 2.4 气溶胶光学厚度 AOT 与浑浊度系数 $\beta$ 和 Ångström 指数 $\alpha$ 之间的关系

数据分析显示, 渤海气溶胶 AOT 和  $\beta$  变化比较一致, 变化速度快, 变化幅度大, 存在明显的正相关关系, 相关系数为 0.85。图 6A 给出了气溶胶光学厚度 AOT 与浑浊度系数  $\beta$  的散点图, 从图 6A 中可以看出当  $\alpha > 0.8$  时 AOT 与  $\beta$  的关系可以用方程

$$\tau = 2.52 * \beta + 0.07 \quad (3)$$

来近似描述, 模型的决定系数为 0.92, 通过显著性水平  $P=0.01$  的  $F$  检验。当  $\alpha < 0.8$  时, AOT 与  $\beta$  的关系可以用方程

$$\tau = 1.20 * \beta + 0.16 \quad (4)$$

来近似描述, 模型的决定系数为 0.88, 通过显著性水平  $P=0.01$  的  $F$  检验。

$\alpha$  值变化较慢, 变化幅度也小, 与 AOT( $\lambda=440$  nm) 和  $\beta$  的变化没有明显的关系。图 6B 给出了气溶胶光学厚度 AOT 与  $\exp(-\alpha)$  的散点图从图 6B 中可以看出  $\exp(-\alpha)$  对 AOT 的影响是散乱没有规律的, 且  $\exp(-\alpha)$  分布比较集中。

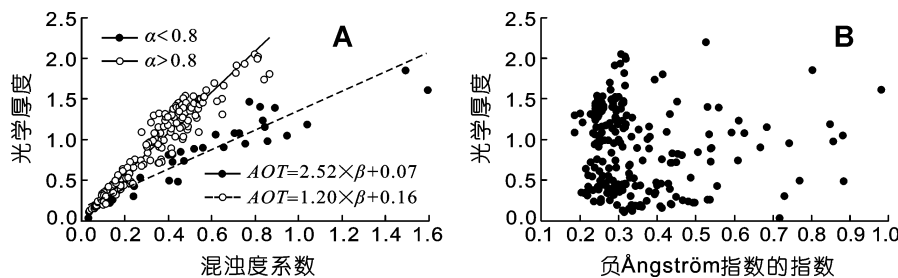


图 6 (A) AOT 与  $\beta$  散点图; (B) AOT 与  $\alpha$  散点图

Fig.6 (A) Scatter plot of AOT and  $\beta$ ; (B) Scatter plot of AOT and  $\alpha$

综上所述, 在 2003—2008 年观测期间渤海气溶胶光学厚度 AOT( $\lambda=440$ nm) 主要受气溶胶粒子浓度影响, 两者之间是一阶线性关系; 气溶胶粒子尺度对光学厚度的影响在公式(3)和(4)中可以通过判断  $\alpha$  是否大于 0.8 来确定。公式(3)和(4)表明,  $\alpha$  对 AOT 的影响仅仅在于气溶胶的两种类型, 即  $\alpha$  是否大于 0.8; 在同一类尺度的气溶胶中,  $\alpha$  的细微变化对 AOT 影响可以忽略。Radhi 等(2006)研究澳大利亚 WMO 本地站 Tennant Creek 的气溶胶光学特征时发现 AOT 的变化与 Ångström 指数存在明显的负相关关系, 气溶胶组成成分的变化导致了 AOT 的变化, 与本文的情况相反, 这说明不同的地区气溶胶的变化原因是不一样的。

### 3 结语

渤海气溶胶有明显的陆源气溶胶特征; 气溶胶光学厚度、浓度和粒径尺度在一天中的变化比较小。从 6 月份到 9 月份, AOT、 $\beta$  和  $\alpha$  的范围和均值均呈下降趋势; 由于水汽的影响 3 月份 AOT 和  $\beta$  小于 6、8、9 三个月; 由于沙尘气溶胶的影响, 3 月份  $\alpha$  明显小于 6、8、9 三个月。

断面调查结果显示, 大部分地区离岸 25 km 之内, AOT 随离岸距离的增大而减小, 明显的反映了人类活动对近岸的影响大于远海。但 25 km 以外, 气溶胶受到各个方向陆地的影响, 变化复杂没有规律。

气溶胶光学厚度 AOT( $\lambda=440$  nm) 和浑浊度系数  $\beta$  变化比较一致,  $\beta$  对 AOT( $\lambda=440$  nm) 的影响比 Ångström 指数  $\alpha$  更明显。当  $\alpha > 0.8$  时 AOT( $\lambda=440$  nm) 与  $\beta$  有如下关系  $\tau = 2.52 * \beta + 0.07$ ; 当  $\alpha < 0.8$  时, AOT( $\lambda=440$  nm) 与  $\beta$  有如下关系  $\tau = 1.20 * \beta + 0.16$ 。这两个公式表明,  $\alpha$  对 AOT( $\lambda=440$  nm) 的影响仅仅在于气溶胶的两种类型, 即尺度因子  $\alpha$  是否大于 0.8; 在同一类尺度的气溶胶中,  $\alpha$  的细微变化对 AOT( $\lambda=440$  nm) 影响可以忽略。

气溶胶具有生命周期短、空间变化快、成分复杂等特点, 通过走航和海上定点实测获得的数据时空连续性不好, 只能初步分析其时空变化, 不能充分反映海上气溶胶的实际情况。建立定点观测站, 开展长期连续的观测非常必要; 同时, 利用卫星遥感监测海洋气溶胶, 同步性好, 也是今后有待发展的有效手段之一。

### 参 考 文 献

- 孙景群, 1983. 湿气溶胶的光散射特性. 高原气象, 2(3): 49—54
- 刘大召, 田礼乔, 杨锦坤等, 2008. 南海北部海域气溶胶光学厚度研究. 热带海洋学报, 24(2): 205—208
- 刘亚豪, 刘玉光, 顾艳镇, 2008. 渤海及北黄海气溶胶分布特征和大气校正研究. 海洋湖沼通报, 3: 40—62
- 刘毅, 周明煜, 1999a. 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征. 海洋学报, 21(1): 32—40
- 李子华, 涂晓萍, 1996. 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应. 大气科学, 20(3): 359—366
- 李正强, 赵凤生, 赵 崑, 2003. 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究. 量子电子学报, 20(5): 635—640

- 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. 科学通报, 48(19): 2094—2100
- 李晓红, 董礼先, 2011. 冬季寒潮期间黄、渤海水位低频波动研究. 海洋与湖沼, 43(4): 467—473
- 时宗波, 贺克斌, 陈雁菊等, 2008. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响. 环境科学, 29(3): 551—556
- 张仁健, 王明星, 戴淑玲, 2000. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究. 气候与环境研究, 5(1): 85—89
- 罗云峰, 李维亮, 周秀骥, 2001. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析. 气象学报, 59(1): 77—87
- 周良明, 郭佩芳, 刘玉光, 2005. 渤海海域上空大气衰减光学厚度的研究. 高技术通讯, 15(6): 102—105
- 赵 崑, 唐军武, 高 飞, 2005. 黄海、东海上空春季气溶胶光学特性观测分析. 海洋学报, 27(2): 46—53
- 郝增周, 潘德炉, 白 雁, 2007. SeaWiFS 遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分布特征. 海洋学研究, 25(1): 81—87
- 修 鹏, 刘玉光, 2005. 太阳光谱仪的定标技术与渤海海域的光学测量. 高技术通讯, 15(7): 85—89
- 施晓晖, 徐祥德, 张胜军等, 2005. 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, 35(增刊 1): 206—218
- 谭浩波, 吴 兑, 毕雪岩, 2006. 南海北部气溶胶光学厚度观测研究. 热带海洋学报, 25(5): 21—25
- Ångström A, 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. Geografiska Annaler, 11: 156—166
- Curcio J A, 1961. Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurements in the visible and infrared. Journal of the Optical Society of America, 51(5): 548—551
- James L Mueller, Curtiss Davis, Robert Arnone *et al*, 2003. Above-Water Radiance and Remote Sensing Reflectance Measurement and Analysis Protocols. In: James L. Mueller. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols. National Aeronautical and Space administration: Goddard Space Flight Space Center, 21—31
- Radhi M, Box M A, Box G P *et al*, 2006. Seasonal Cycles of Aerosol Optical Properties at Wagga Wagga and Tennant Creek. Australia, Clean Air and Environmental Quality, 40(3): 40—44
- Solar Light Company, Inc, 2001. Microtops Ozone Monitor & Sunphotometer User's Guide. Version 2.43, Philadelphia, USA: Solar Light Company, 54
- Shinozuka Y, Antony D Clarke, Steven G Howell *et al*, 2007. Aircraft profiles of aerosol microphysics and optical properties over North America: Aerosol optical depth and its association with PM<sub>2.5</sub> and water uptake. Journal of Geophysical Research, D, Atmosphere, 112(D12): S20

## TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTIONS OF AEROSOLS OVER THE BOHAI SEA

MA Yu-Juan<sup>1,2</sup>, ZHAO Dong-Zhi<sup>2</sup>, LIU Yu-Guang<sup>1</sup>, YANG Jian-Hong<sup>2</sup>, GU Yan-Zhen<sup>1</sup>

(1. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266100;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, 116023)

**Abstract** Aerosol optical thickness (AOT) data between 2003 to 2008 obtained using a ship-based multiband sun photometer were taken to study the temporal and spatial distributions and the influencing factors of AOT, turbidity coefficient ( $\beta$ ), and Ångström exponent ( $\alpha$ ) over the Bohai Sea. We obtained a total of 212 datasets from eight cruises and two fix-point measurements. There were 72 datasets in 2003, 21 datasets in 2004, 98 datasets in 2005, and 21 datasets in 2008.

Intra-day variations of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$  were inconspicuous. The mean values and ranges of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$  decreased from June to September. The values of AOT,  $\beta$ , and  $\alpha$  in June, August and September were larger than those in March due to smog, sandstorm, and ocean moisture. In most areas within 25 km offshore, AOT and  $\beta$  decreased with increasing distance from shore. However, the variation of  $\alpha$  did not show a clear trend.

Over the Bohai Sea, the influence of  $\beta$  on AOT was more significant than  $\alpha$ . The relationship between AOT and  $\beta$  was described by  $AOT = 2.52 \times \beta + 0.07$  when  $\alpha$  is greater than 0.8, and the relationship became  $AOT = 1.20 \times \beta + 0.16$  when  $\alpha$  is smaller than 0.8. We classified the aerosols into two types based on whether  $\alpha$  was greater than 0.8. The influence of small changes in aerosol particle size on AOT may be ignored for certain types of aerosols.

**Key words** Aerosol optical thickness, Turbidity coefficient, Ångström exponent, Moisture