

肖钟湧,江洪,余树全,等. 2008. 杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究[J]. 环境科学学报, 28(9): 1894-1903
Xiao Z Y, Jiang H, Yu S Q, et al. 2008. Monitoring the atmosphere aerosol optical characteristics using hyperspectral remote sensing in Hangzhou region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(9): 1894-1903

杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究

肖钟湧¹, 江洪^{1,2,*}, 余树全², 周国模², 陈然¹, 宋晓东¹, 焦荔³, 洪盛茂³, 常杰⁴, 江波⁵

1. 南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210093
2. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心,杭州 311300
3. 杭州市环境监测总站,杭州 310007
4. 浙江大学生命科学学院,杭州 310058
5. 浙江省林业科学研究院,杭州 310058

收稿日期: 2007-11-29 修回日期: 2008-05-25 录用日期: 2008-06-25

摘要: 利用 ASD 地物光谱仪对杭州地区的气溶胶光学特性进行了观测并结合同步观测的太阳分光光度计 CE-318 的数据对其精度进行检验。分析表明,在时间演变中,杭州市冬季气溶胶光学厚度值比夏季大,气溶胶光学特性的日进程变化比较明显;从空间分异上,杭州不同区域间的差异也比较显著;杭州地区大气的浑浊度系数和波长指数主要分布在 0.02~0.2 和 0.2~2.6 之间。在气溶胶光学厚度、浑浊度系数和波长指数等大气环境重要变量中,气溶胶光学厚度和浑浊度系数之间存在正相关,而气溶胶光学厚度和波长指数之间存在负相关。

关键词: ASD 地物光谱仪; 气溶胶; 气溶胶光学厚度; 浑浊度系数; 波长指数

文章编号: 0253-2468(2008)09-1894-10 中图分类号: X513 文献标识码: A

Monitoring the atmosphere aerosol optical characteristics using hyperspectral remote sensing in Hangzhou region

XIAO Zhongyong¹, JIANG Hong^{1,2,*}, YU Shuquan², ZHOU Guomo², CHEN Ran¹, SONG Xiaodong¹, JIAO Li³, HONG Shengmao³, CHANG Jie⁴, JIANG Bo⁵

1. Nanjing University, International Institute for Earth System Science, Nanjing 210093
2. Zhejiang Forestry University, International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Hangzhou 311300
3. Hangzhou Environmental Monitoring Central Station, Hangzhou 310007
4. Zhejiang University, College of Life Science, Hangzhou 310058
5. Forestry Research Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310058

Received 29 November 2007; received in revised form 25 May 2008; accepted 25 June 2008

Abstract: The ground-based remote sensing is one of important approach on observation of aerosol optical depth. In this study, the aerosol optical characteristics of Hangzhou region had measured using ASD spectrometer. The spatial-temporal distribution and change of aerosol optical depth, turbidity coefficient, wavelength exponent and their interrelations were analyzed, and combined with the synchronous data of Sunphotometer CE-318 made an accuracy validation. Our results indicate that the aerosol optical depth is higher in winter than in summer of Hangzhou, as well as the diurnal variation of aerosol optical characteristics is distinct obviously. The spatial patterns of aerosol optical depth are various in different region of Hangzhou. The turbidity coefficient and wavelength exponent distribute mainly from 0.02 to 0.2 and 0.2 to 2.6 respectively. The results also show that the correlation between the aerosol optical depth and turbidity coefficient is positive, while the correlation between aerosol optical depth and wavelength exponent is negative. It is a useful approaches that using ASD Spectrometer to monitor aerosol optical characteristics.

Keywords: ASD spectrometer; aerosol; aerosol optical depth; turbidity coefficient; wavelength exponent

1 引言 (Introduction)

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和

液体微粒共同组成的多相体系(毛节泰等, 2002).

大气气溶胶粒子的直径多在 0.001~10 μm 之间.

气溶胶粒子中含有各种各样的有毒化合物, 如致癌

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208)

作者简介: 肖钟湧(1979—),男, E-mail: xiaozhongyong@gmail.com; * 通讯作者(责任编辑),E-mail: jianghong@nju.edu.cn

Biography: XIAO Zhongyong(1979—), male, E-mail: xiaozhongyong@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: jianghong@nju.edu.cn

物质多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH).研究表明,10 μm以下的颗粒物可以进入鼻腔,7 μm以下的颗粒物可进入咽喉,而<2.5 μm的颗粒物可被吸入肺部,深入肺泡并沉积,进入血液循环系统,从而对人类的健康造成相当大的直接伤害;人体肺部功能的下降、呼吸系统疾病的增多和正在逐年增加的死亡率与大气中气溶胶粒子浓度的上升存在着紧密的联系(Suess *et al.*, 1999;任丽新等,1999;罗云峰等,1998).这些气溶胶粒子不仅严重影响危害人体健康而且致使环境状况恶化.人类活动向大气排放的气溶胶粒子,包括大量的硫酸盐、硝酸盐氯化物以及少量的有机酸等化学物质,它们与酸雨的形成有密切的关系(浦一芬等,2000;曾凡刚等,2001).

目前,通过地基遥感来监测污染气溶胶的物理化学特性是一种比较常用的方法,结果比较可靠(毛节泰等,2002).除了太阳分光光度计CE-318外,采用ASD地物光谱仪进行气溶胶的观测也是重要的方法(邓孺孺等,2003;亓雪勇等,2004);而且利用ASD地物光谱仪的高光谱分辨率可以获得连续的太阳辐射波谱(350~2500 nm),能反映大气不同成分对太阳辐射的吸收特征,从而反演出各个不同波段的气溶胶光学厚度.不同的光谱波段可反映出水汽和气体分子的吸收,利用这个规律可计算出水汽和各种气体分子的光学厚度(如O₂、O₃、水汽、二氧化碳).邓孺孺等(2003)利用ASD连续光谱仪对北京市主要大气污染类型的气溶胶散射进行了观测实验,对比分析了不同污染类型,及在不同观测角度下污染气溶胶的散射特征,并建立了数值模拟模型.亓雪勇等(2004)利用ASD地物光谱仪进行了大气气溶胶光学厚度的观测实验,并将结果与6S大气辐射传输模型的模拟结果进行了比较,比较结果误差较小.

随着杭州市经济发展,人为活动强烈,工业污染物排放增加,产生了大量各种人为的气溶胶.根据杭州市环境状况公报,杭州市区环境空气质量近年来有所下降,特别是二氧化硫、二氧化氮等酸性污染物排放增加,在这些酸性物质的影响下,酸雨污染较为严重,酸雨发生频率有所升高.本研究中利用ASD地物光谱仪进行杭州市气溶胶光学厚度及其时空变化的地基遥感观测,计算与大气污染有关的大气浑浊度参数和波长指数,旨在揭示杭州地区大气污染对气溶胶光学特性的影响.

2 观测(Measuring)

2.1 气溶胶光学厚度(AOD)的测量原理

根据Beer-Bouguer-Lambert定律,在给定地点和一年中的给定时间测量的给定波长的太阳辐照度I(λ)可表示为:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \exp[-\tau_{\text{tot}}(\lambda) m(\theta_0)] \quad (1)$$

式中,I₀(λ)为日地平均距离处大气上界太阳直射辐照度;τ_{tot}(λ)是大气总光学厚度;θ₀为太阳天顶角,根据当地地方时的时角、地理经纬度、太阳赤纬可以计算出来太阳高度角;($\frac{d_0}{d}$)²为日-地距离修正因子,采用近似公式为:

$$\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi J}{365} \quad (2)$$

J是一年中第几天的天数,m(θ₀)为大气质量,当太阳天顶角为θ₀时,其函数形式表示为:

$$m(\theta_0) = \left\{ \cos \frac{\pi \theta_0}{180^\circ} + 0.15 \times (93.835 - \theta_0)^{-1.253} \right\}^{-1} \quad (3)$$

公式(1)中,大气总光学厚度(τ_{tot}(λ))包括气溶胶光学厚度(τ_a(λ))、瑞利分子散射光学厚度(τ_R(λ))、气体吸收光学厚度(τ_g(λ)),则有:

$$\tau_{\text{tot}}(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_g(\lambda) \quad (4)$$

瑞利分子散射光学厚度可用经验公式表示为:

$$\tau_R(\lambda) = 0.008569 \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \lambda^{-2} + 0.00013 \lambda^{-4}) \frac{P}{P_0} e^{-0.125A} \quad (5)$$

式中,λ为波长(μm),P为大气压(hPa),A为海拔高度(km).气体吸收光学厚度主要是臭氧、二氧化氮、二氧化硫和甲烷等各个分量贡献的总和.

Ångström(1929)认为,气溶胶光学厚度可表示为大气浑浊度参数β和波长指数α的函数.因为可以忽略水汽导致的吸收,而且臭氧吸收的作用也较小,通常利用可见光谱的波长,埃斯屈朗公式可表示为:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (6)$$

式中,λ为波长(μm).利用多个波段测量得到气溶胶光学厚度,根据上式对气溶胶光学厚度的值进行拟合得到浑浊度系数β和波长指数α.通常波长指数反映了气溶胶粒子谱分布特征,当小粒子比例增大时,值也相应地增大.而大粒子比例增大,值也随着减小.大气混浊度系数β与气溶胶粒子总数、折射

率指数和谱分布等密切相关(李正强等,2003).

2.2 仪器和观测

本研究中气溶胶特性观测采用了美国 ASD 公司生产的 ASD 地物光谱仪. ASD 地物光谱仪具有较高的采样间隔和光谱分辨率, 采样速度快、操作简单. 它的观测波段为 350~2500 nm; 光谱分辨率在 350~1050 nm 为 3.5 nm, 在 1050~2500 nm 为 10 nm; 光谱采样间隔在 350~1050 nm 为 1.4 nm, 在 1050~2500 nm 为 2 nm; 视场角为 25°; 仪器的绝对辐射量的最大测量误差为 10% 左右, 但仪器相对测量误差极小. 同时采用法国 CEMIL 公司生产的可自动跟踪扫描的太阳分光光度计 CE-318 进行观测. 它的滤光片中心波长为 340、380、440、500、670、870、936、1020 nm, 半波宽度为 10 nm, 视场角为 1°, 936 nm 是水汽的强吸收波段. 太阳分光光度计 CE-318 是一种大气气溶胶观测的一个重要的仪器, NASA 将它作为全球气溶胶监测网络 AERONET 主要仪器后, 其成为目前气溶胶遥感手段中最准确和较普遍的方法. 但是, 太阳分光光度计 CE-318 光谱非连续和移动困难等问题也带来一定的局限性. 在本实验研究中, ASD 地物光谱仪与 CE-318 两种仪器同时进行观测, 目的是利用 CE-318 对 ASD 地物光谱仪测定的大气气溶胶光学厚度进行验证.

观测时间在 2006 年进行, 分为 3 个时段, 第 1 时段为 4 月份, 第 2 时段为 7、8 月份, 第 3 时段为 12 月份. 选择天气状况较好的时间在 8:00~17:00 之间进行观测, 间隔 5~10 min 测量 1 次, 除去有云时段. 每次测量分为 2 个部分: 先对参考板直接测量太阳辐射的总辐照度; 然后迅速用挡板挡住太阳直接辐射, 进行天空光的漫射辐照度测量, 漫射辐射包含大气反射和散射辐射. 总辐照度减去漫射辐照度即为太阳直接辐射辐照度. 观测方法可参考亓雪勇等(2004)利用地物光谱仪测算大气气溶胶光学厚度方法的文献.

由于 ASD 地物光谱仪记录的是电压值($DN(\lambda)$)正比于仪器接收到太阳辐照度值($I(\lambda)$). 由公式(1)两边取对数可得:

$$\ln\left[DN(\lambda)/\left(\frac{d_0}{d}\right)^2\right] = \ln DN_0(\lambda) - m(\theta_0)\tau_{\text{tot}}(\lambda) \quad (7)$$

由于地物光谱仪测得的是水平参考板在垂直方向反射的太阳辐射能量, 故垂直于太阳辐射的单位面积的辐射能量等于光谱仪测量到的参考板的辐亮度和 $\sec\theta_0$ 的乘积, 即有:

$$DN(\lambda) = DN'(\lambda) \times \sec\theta_0 \quad (8)$$

θ_0 为太阳直射光线与水平参考板法线的夹角. 所以, 根据方程(7)可得:

$$\ln DN'(\lambda) + \ln \sec\theta_0 - \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = \ln DN_0(\lambda) - m(\theta_0)\tau_{\text{tot}}(\lambda) \quad (9)$$

令 $\ln DN'(\lambda) + \ln \sec\theta_0 - \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)^2$ 为因变量, $m(\theta_0)$ 为自变量进行线性拟合, 求得斜率的绝对值即为 $\tau_{\text{tot}}(\lambda)$, 截距为 $\ln DN_0(\lambda)$, 当大气条件稳定时, $DN_0(\lambda)$ 可以做为定标常数. 用以计算一天中不同时刻的气溶胶光学厚度.

2.3 实验场地

杭州市中心地理坐标为北纬 30°16'、东经 120°12'. 杭州地处长江三角洲, 是长江三角洲重要中心城市和中国东南部交通枢纽, 常住人口 773.1 万. 选择测量地点的原则主要是根据杭州市区环境状况, 选择城区、近郊区、清洁地区几个梯度, 并结合杭州市环保局设立的环境监测站选择观测点. 观测点位于杭州市的茶叶科学研究所(Cha)(120°05'E, 30°11'N), 海拔高度为 28 m; 朝晖小区的朝晖小学楼顶(Zhao)(120°09'E, 30°17'N), 海拔高度为 23 m; 临安市市政府大楼楼顶(Lin)(119°43'E, 30°14'N), 海拔高度为 70 m; 千岛湖海处海楼顶(Qian)(119°03'E, 39°36'N), 海拔高度为 144 m. 本研究中所用的数据主要为由 ASD 地物光谱仪和太阳分光光度计 CE-318 直接观测得来的数据, 其它有关的气象和环境污染等的数据从杭州市环境监测站获得.

2.4 数据处理

2.4.1 气溶胶光学厚度的高光谱反演 根据公式(9), 利用 Langley-Plot 法对观测数据进行拟合, 拟合后

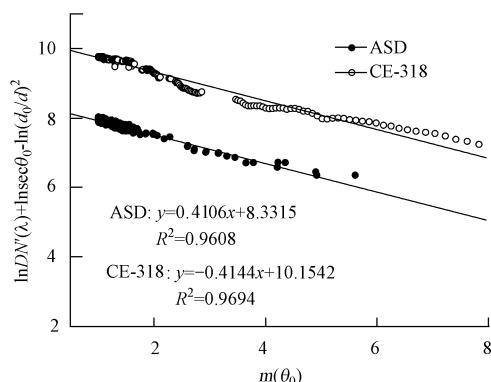


图 1 Langley-Plot 法拟合 500 nm 处大气总光学厚度

Fig. 1 Fitting the daily atmospheric gross optical depth in 500 nm according to Langley-Plot

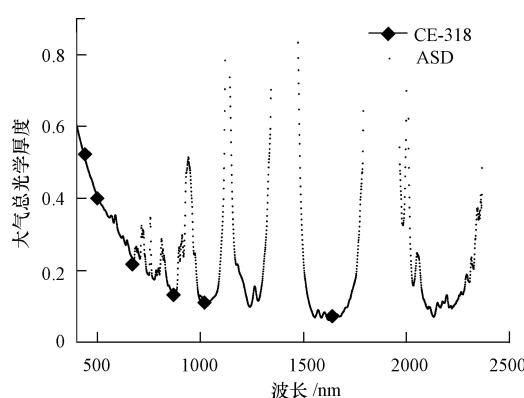


图 2 ASD 和 CE-318 的大气总光学厚度

Fig. 2 Atmospheric gross optical depth of ASD and CE-318

的直线斜率的绝对值为大气总光学厚度($\tau_{\text{tot}}(\lambda)$)，500 nm 处拟合的结果如图 1 所示。同理 ASD 地物光谱仪从 350 nm 到 2500 nm 和太阳分光光度计 CE-318 几个波段的拟合后大气总光学厚度，如图 2 所示。

在受水汽的影响很小，而且气体分子吸收也很小的波段，可以忽略水汽和分子吸收的光学厚度。根据公式(4)，气溶胶光学厚度($\tau_a(\lambda)$)为大气总光学厚度($\tau_{\text{tot}}(\lambda)$)减去瑞利分子散射光学厚度($\tau_R(\lambda)$)和气体吸收光学厚度($\tau_g(\lambda)$)。500 nm 处 ASD 地物光谱仪和太阳分光光度计 CE-318 的气溶胶光学厚度如表 1 所示。

表 1 500 nm 处气溶胶光学厚度
Table 1 Aerosol optical depth in 500 nm

日期	ASD 气溶胶光学厚度	CE-318 气溶胶光学厚度	瑞利分子散射光学厚度	R^2	数据点数	观测点
20060406	0.5307	0.5145	0.1437	0.7635	49	茶科所
20060407	0.4842	0.6030	0.1438	0.9094	30	朝晖小学
20060728	0.2053	0.2153	0.1418	0.8178	105	临安
20060729	0.2682	0.2720	0.1424	0.9608	104	朝晖小学
20060730	0.4015	0.3900	0.1433	0.8553	98	朝晖小学
20060731	0.0911	0.0580	0.1392	0.9187	106	千岛湖
20060802	0.2455	0.0948	0.1389	0.6451	108	千岛湖
20060803	0.2665	0.2472	0.1437	0.6605	87	茶科所
20061216	0.5086	0.6750	0.1435	0.9176	57	朝晖小学
20061217	0.2253	0.2470	0.1433	0.8860	64	朝晖小学
20061218	0.3857	0.4620	0.1435	0.8619	60	朝晖小学
20061219	0.3498	0.3520	0.1437	0.8312	59	茶科所
20061221	0.5065	0.6630	0.1392	0.7813	62	千岛湖
20061222	0.3406	0.3020	0.1392	0.7832	61	千岛湖
20061223	0.5416	1.1700	0.1408	0.7948	62	临安

2.4.2 浑浊度系数(β)、波长指数(α) 埃斯屈朗(Ångström)公式描述了气溶胶光学厚度和波长之间的关系。本研究中选择不受水汽影响和受分子吸收影响较小的 500、670、870 和 1020 nm 4 个波段，以这 4 个波段为中心波段，根据埃斯屈朗公式对波段宽度为 5 nm 相应的气溶胶光学厚度进行拟合，得出浑浊度系数 β 和波长指数 α 的值，结果如图 3 所示。表 2 为观测其间各天的 α 和 β 值。拟合的可决系数较高，最小的可决系数为 0.9655，结果表明，气溶胶光学厚度符合埃斯屈朗公式。

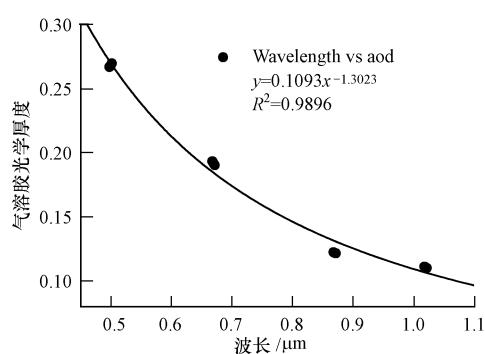


图 3 7月 29 日埃斯屈朗关系式拟合的结果

Fig. 3 The result of curve fitting in Jul. 29 use Ångström law

表 2 波长指数和浑浊度系数

Table 2 Wavelength exponent and turbidity coefficient

日期	波长指数	浑浊度数	R^2	观测点
20060406	1.2573	0.2180	0.9857	茶科所
20060407	1.1920	0.1730	0.9956	朝晖小学
20060728	1.2708	0.0856	0.9673	临安
20060729	1.3023	0.1093	0.9896	朝晖小学
20060730	0.6677	0.1875	0.9663	朝晖小学
20060731	1.4955	0.0670	0.9791	千岛湖
20060802	1.5382	0.0912	0.9886	千岛湖
20060803	1.2977	0.1003	0.9866	茶科所
20061216	0.4326	0.3971	0.9809	朝晖小学
20061217	0.8208	0.1476	0.9793	朝晖小学
20061218	0.5243	0.2399	0.9754	朝晖小学
20061219	0.3402	0.4021	0.9930	茶科所
20061221	0.6929	0.2824	0.9912	千岛湖
20061222	0.6220	0.1632	0.9902	千岛湖
20061223	0.5580	0.1703	0.9655	临安

2.4.3 精度检验 ASD 地物光谱仪的工作原理是通过对参考板进行太阳辐照度测量,首先是假定参考板是朗伯体,即参考板的反射是各向同性的;但是,当测量天顶角大于 45° 时,参考板的非朗伯特性增大,测量的误差也随之增大。为此,利用太阳分光度计 CE-318 对 ASD 地物光谱仪的结果进行检验,数据见表 1。从图 4 的结果来看,Pearson 相关系数为 0.8617,较小的相关系数说明 ASD 地物光谱仪的精度低;斜率和截距分别为 1.7491 和 -0.2065,说明 ASD 地物光谱仪的结果相对于太阳分光度计 CE-318 的结果小。

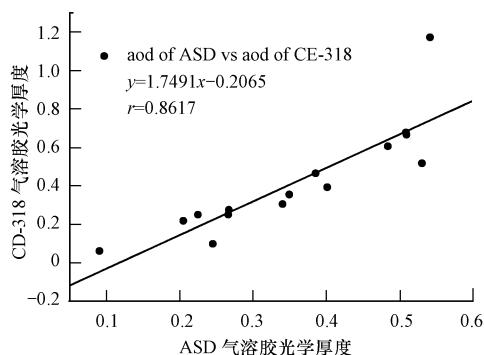


图 4 ASD 和 CE-318 的 500 nm 处气溶胶光学厚度比较

Fig. 4 The comparison between the aerosol optical depth of ASD and CE-318 in 500 nm

3 结果(Results)

3.1 气溶胶光学厚度

图 5 描述了气溶胶光学厚度的日变化拟合的结果,选取 4 个地点两个不同时期比较有代表性的观测结果进行分析。从图中的结果来看,冬季观测的气溶胶光学厚度值比夏季的大。地域之间的差别也比较明显,7 月 29 日和 12 月 16 日在市区朝晖小学观测的值较大,分别为 0.5086 和 0.2682。原因主要是市区的人为活动比较强烈,产生的气溶胶粒子较多,大气污染比较大。临安是一个酸雨危害严重地区,酸雨发生频率高,污染较为严重,我们观测得到的 12 月 23 日的气溶胶光学厚度的值为 0.5416,是观测期间的最大值,能反映出临安地区污染较为严重的现状。但是 7 月 28 日观测的值较低,原因可能是观测前几天受台风带来的降雨的影响,清除了大气中的气溶胶粒子,大气比较清洁,所以气溶胶光学厚度较低(赵海波等,2005)。8 月 2 日和 12 月 22 日在千岛湖观测的结果较大,而且这两天的变化比较小,它们的气溶胶光学厚度分别为 0.3406 和 0.2455。千岛湖地区主要是丘陵地形和该地区有大面积水域,山谷地形不利于大气中污染物的扩散,水汽的蒸腾使大气中的湿度增大,进而增加了气溶胶粒子的形成。这些可能是影响气溶胶光学厚度主要的原因(Yoon et al., 2006)。对茶科所观测数据的拟合结果显示,气溶胶光学厚度分别为 0.3498 和 0.2665,能够较为准确的反映出该地的情况。结合图 6 可以发现,杭州市气溶胶光学厚度冬季大夏季小的特点,原因是该地区夏季进入了高温多雨的阶段,降雨对空气中悬浮颗粒物湿沉降能力较强,冲刷了大气中的气溶胶粒子,大气比较清洁。研究结

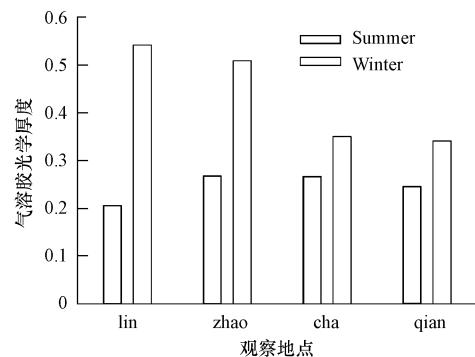


图 5 500 nm 处气溶胶光学厚度

Fig. 5 The aerosol optical depth in 500 nm

果表明,由于空气湿度对气溶胶光学厚度的影响,较干燥的春、冬季气溶胶光学厚度比较湿润的夏、秋季的气溶胶光学厚度大,这个结果与前人的研究结果相吻合(Adeyewa *et al.*, 2003)。

一天当中每一个观测时刻得到的数据,根据公式(9)可以计算出相应的气溶胶光学厚度,从而反映出气溶胶光学厚度的日变化趋势。图6描述了2个不同季节4个地点气溶胶光学厚度的日进程。从图中可以看出,夏季的气溶胶光学厚度日变化比较大,冬季比较平稳。例如,夏季茶科所观测的数据显示,早上从8点逐渐下降,随后平稳上升,到下午3点左右出现最大值;临安、朝晖小学、千岛湖气溶胶光学厚度变化趋势基本相同,早上气溶胶光学厚度较大,然后逐渐下降,到午后2点左右出现最低值,

下午4点左右又有所上升。冬季(12月22日)在千岛湖观测的气溶胶光学厚度的日变化,最大值出现在早上9点左右,中午12点出现最低值,午后又有回升。总的来说,千岛湖的日进程波动较大。原因可能是千岛湖地区大气水汽含量较大,早上出现了薄雾,但到中午时候天空比较晴朗,大气状况比较稳定,所以,中午时分的气溶胶光学厚度较小。冬季在临安、朝晖小学、茶科所等地的气溶胶光学厚度变化趋势基本相同,变化平缓。临安和朝晖小学观测点的气溶胶光学厚度到午后4点左右都有所回升。原因可能与这些城市区域下午交通流增大(刘新罡等,2005)有密切的关系。这些观测的结果表明了气溶胶的最小值一般出现在12点左右。

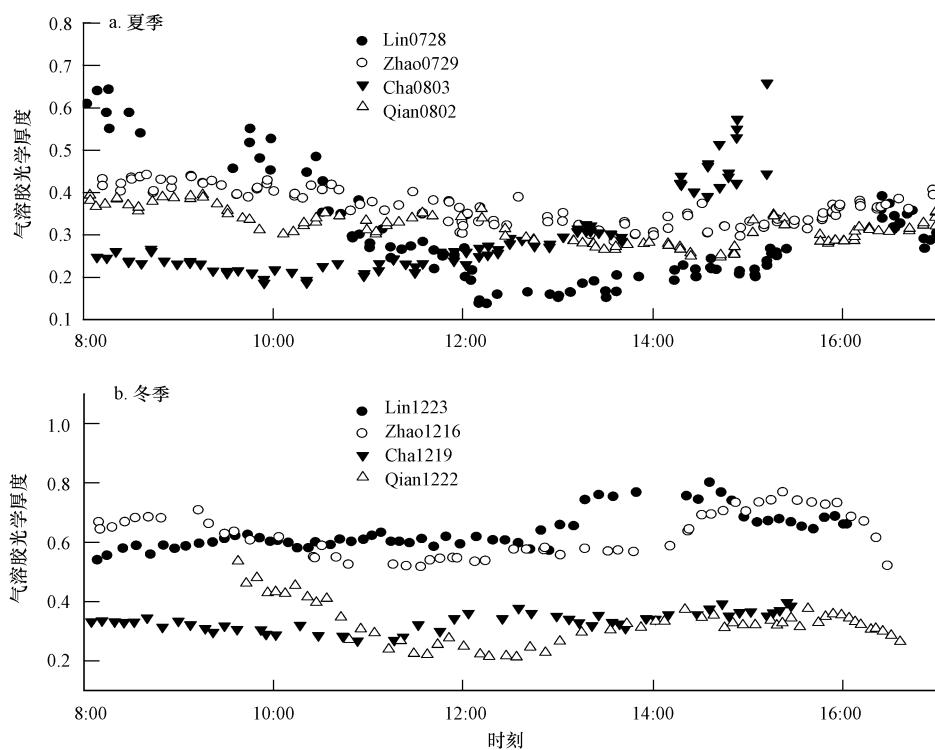


图6 不同时间 500 nm 处气溶胶光学厚度日进程

Fig. 6 The diurnal variation of aerosol optical depth in 500 nm in summer and winter in different time

3.2 浑浊度系数(β)、波长指数(α)和气溶胶光学厚度(AOD)的关系

3.2.1 波长指数和浑浊度系数 根据埃斯屈朗公式对不同波段气溶胶光学厚度进行拟合,得出浑浊度系数 β 和波长指数 α ,结果如图7和表2所示。波长指数可以说明气溶胶粒子的模式:即当小粒子浓度增大时, α 值也相应的增大;而小粒子的浓度减小时, α 值也随着减小(李正强等,2003; Masmoudi

et al., 2003)。

从图表可以看出,波长指数 α 和浑浊度系数 β 的值变化比较大。其中7月29日在杭州市区的朝晖小学观测的波长指数 α 值最大,为1.3023,说明这一天粒径较小的气溶胶粒子浓度较大。这些粒径较小的气溶胶主要来源于人为污染源排放,特别是流动源,如汽车尾气的排放(杨圣杰等,2001; 张晶等,1998)。最小值为12月16日在杭州市朝晖小学测

得,为 0.3326,说明这一天粒径较小的气溶胶粒子浓度较小。根据杭州市环境监测站观测 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 粒子的数据,7月 29 日从 8:00 ~ 18:00 的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别为 $56.856 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $36.275 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}$ 占的总粒子的比例为 64%。12 月 16 日从 8:00 ~ 18:00 的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别为 $163.100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $55.606 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}$ 占

的总粒子的比例为 34%,这与本研究结果一致。波长指数 α 的值夏季大于冬季,说明夏季较小的气溶胶粒径浓度较大。表中的数据也表明,较大的波长指数对应较小的浑浊度系数,这个结果和 Kaskaoutis 等(2006)在雅典地区进行的气溶胶特性研究结果一致。

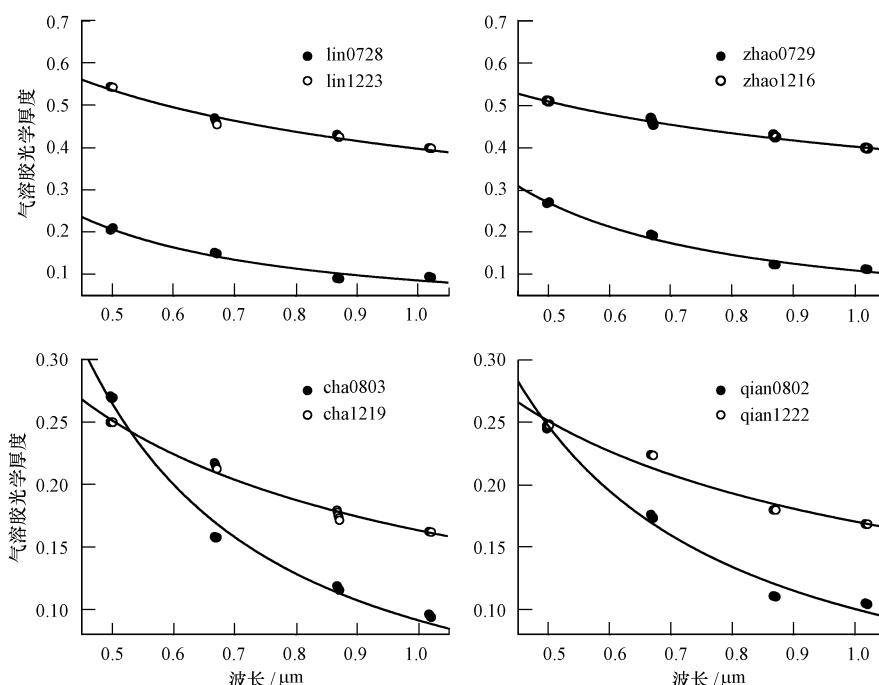


图 7 埃斯屈朗关系式拟合结果
Fig. 7 Results of curve fitting of Ångström law

3.2.2 气溶胶光学厚度、波长指数(α)和浑浊度系数(β)的日变化 日变化中每一个时刻观测的数据都对应着一个气溶胶光学厚度,所以可以计算出该时刻的一组 α, β 参数,这样可以反映出气溶胶光学特性的日变化情况。图 8 描述了 4 个地点气溶胶光学厚度和埃斯屈朗的 2 个参数 α, β 的日进程。显示了气溶胶光学厚度和浑浊度系数 β 的变化趋势比较一致,较大的气溶胶光学厚度对应较大的浑浊度系数。波长指数的规律性比较差,基本上呈现出 2 种模式:一是夏季观测的波长指数和气溶胶光学厚度、浑浊度系数变化趋势相反,呈较强的负相关;二是冬季观测的波长指数和气溶胶光学厚度、浑浊度系数变化趋势一致,呈较弱的正相关。

图 9a 和 9b 为 8d 中每一个观测时刻的气溶胶光学厚度与浑浊度系数 β 和波长指数 α 的关系,分析结果表明,气溶胶光学厚度和浑浊度系数 β 存在

正相关,Pearson 相关系数为 0.9099;即气溶胶光学厚度大,浑浊度系数也大,所以气溶胶光学厚度可以用来表征大气的浑浊度(Kaufman *et al.*, 1990)。从图 9b 得出了气溶胶光学厚度和波长指数 α 存在着指数的负相关,Pearson 相关系数为 -0.7356;气溶胶光学厚度大的时,波长指数 α 较小,气溶胶光学厚度大, α 值反而小。这个结果与 Masmoudi 等(2003)的研究结果相吻合。

图 10a 和 10b 描述了每一个观测时刻的埃斯屈朗 2 个参数波长指数 α 浑浊度系数 β 的频率分布的情况。浑浊度系数主要分布在 0.02 ~ 0.2 之间,在 0.5 处还出现个小的峰值,平均值为 0.1965。而波长指数主要分布在 0.2 ~ 2.6 之间,呈正态分布,平均值为 1.1807。这个结果和 Cachorro 等(2000)的研究相似,波长指数 α 的值的分布表明了观测其间的粒径较小的粒子浓度较大。

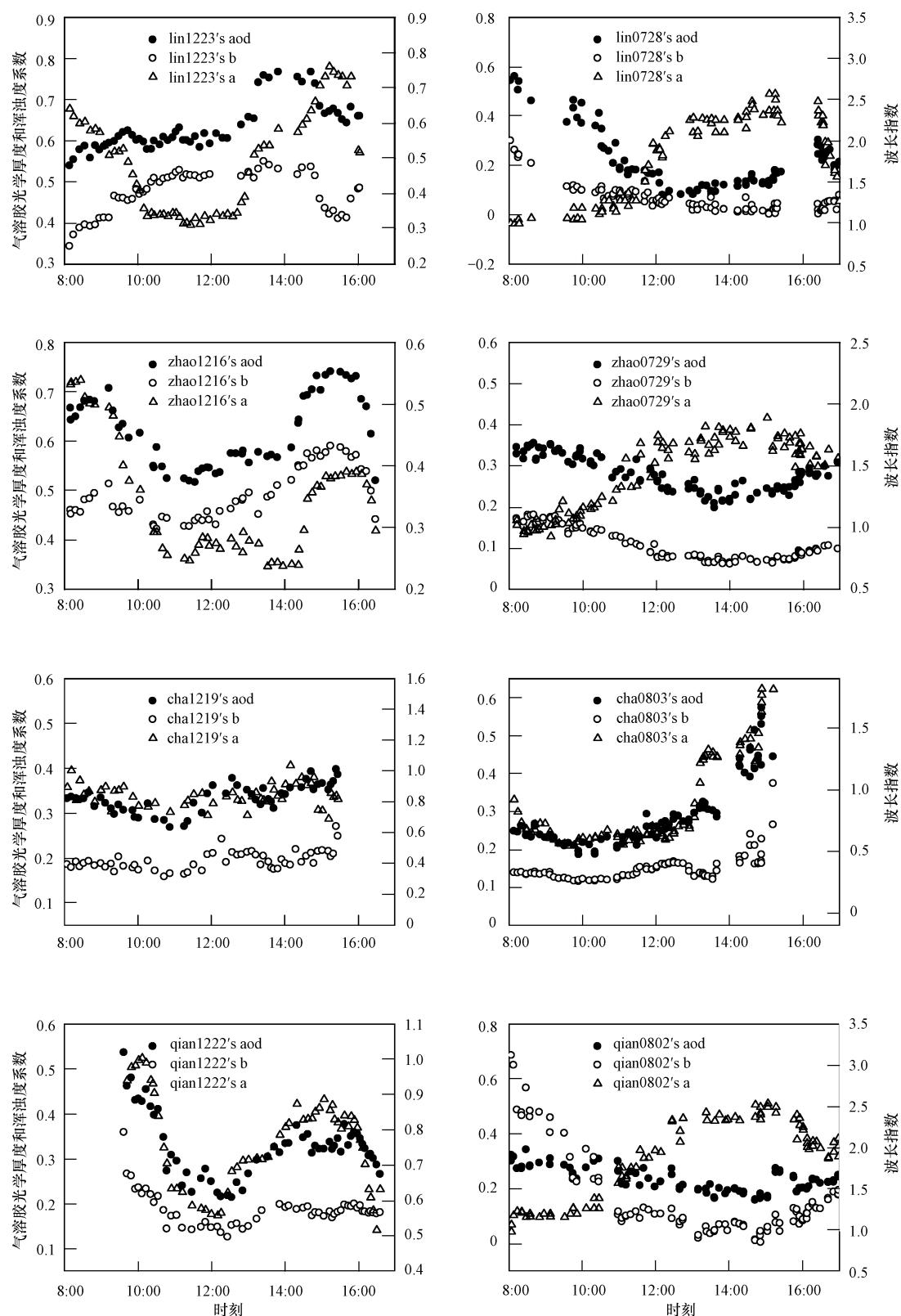


图 8 不同地点的 500 nm 处气溶胶光学厚度、波长指数和浑浊度系数的日进程

Fig. 8 The diurnal variation of aerosol optical depth in 500 nm, wavelength exponent and turbidity coefficient in different regions

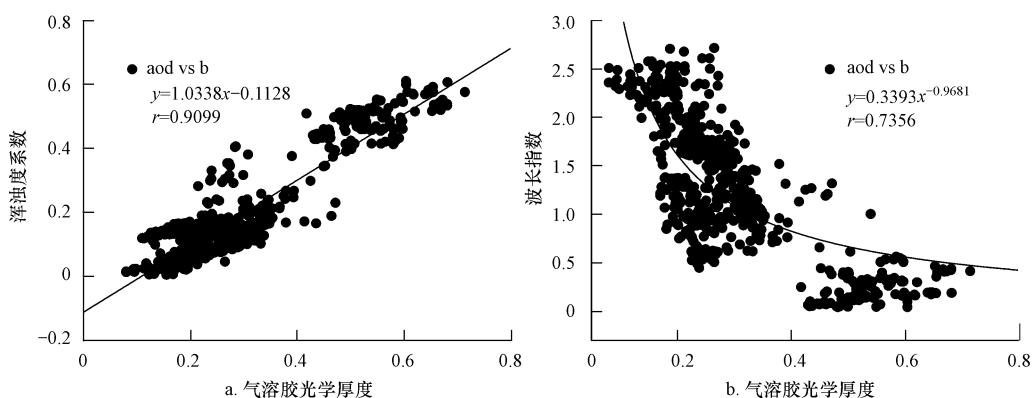


图 9 500 nm 处气溶胶光学厚度和浑浊度系数、波长指数的关系(a. 浑浊度系数,b. 波长指数)

Fig. 9 The relationship of aerosol optical depth in 500 nm, turbidity coefficient and wavelength exponent (a. turbidity coefficient, b. wavelength exponent)

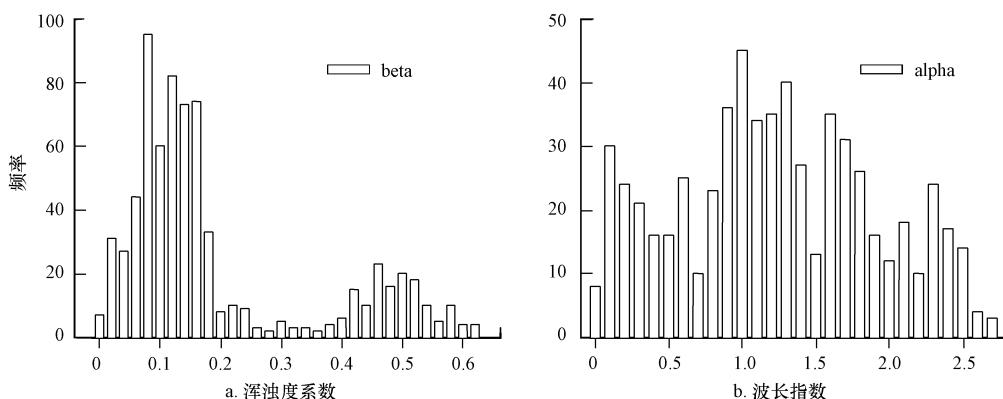


图 10 浑浊度系数、波长指数频率分布(a. 浑浊度系数,b. 波长指数)

Fig. 10 The distribution of the number of turbidity coefficient and wavelength exponent (a. turbidity coefficient, b. wavelength exponent)

4 结论(Conclusions)

1) 杭州地区的气溶胶光学厚度最小值一般出现在中午前后,最大值在早上 9 点左右,而且地区间差异比较显著;朝晖小学和临安等人为活动强烈的地区气溶胶光学厚度比茶科所和千岛湖地区等郊区和大气清洁的地区要大。

2) 冬季气溶胶光学厚度和浑浊度系数普遍比夏季大,波长指数则反之。浑浊度系数主要分布在 0.02 ~ 0.2 之间,平均值为 0.1965;波长指数主要分布在 0 ~ 2.6 之间且大于 0,平均值为 1.1807. 这表明该地区的大气状况主要受较小粒子的影响。

3) 浑浊度系数和气溶胶光学厚度的日变化趋势基本一致,呈线性正相关, Pearson 相关系数为 0.9099. 波长指数和气溶胶光学厚度呈指数反相关, Pearson 相关系数为 -0.7356. 波长指数一天当中波

动较大,较大的波长指数对应较小的浑浊度系数。

4) 虽然 ASD 地物光谱仪观测的气溶胶光学厚度值相对于太阳光度计 CE-318, 在较大的气溶胶光学厚度偏小, 在较小的气溶胶光学厚度偏大, 精度稍低;但是能反映出气溶胶的光学特性, 是一种可以利用地基遥感测试气溶胶光学厚度、大气污染指标, 如浑浊度系数和波长指数的重要工具。

致谢: 本研究得到“973”项目(No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208)、国家自然科学基金项目(No. 40671132)和科技部数据共享平台建设项目(No. 2006DKA32300-08)的部分支持,在此表示感谢。

责任作者简介: 江洪(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事全球变化、生态系统生态学、定量环境遥感应用方面的研究。

References:

- Adeyewa Z D, Balogun E E. 2003. Wavelength dependence of aerosol optical depth and the fit of the Ångström law [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 74: 105—122
- Ångström A. 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation on dust in air [J]. *Geografiska Annaler*, 2: 156—165
- Cachorro V E, Plinio D, Ricardo V, et al. 2000. Measurements of the atmospheric turbidity of the north-centre continental area in Spain: spectral aerosol optical depth and Ångström turbidity parameters [J]. *Journal of Aerosol Science*, 31(6): 687—702
- Deng R R, Tia G L, Sun Q, et al. 2003. Experiment and numeric simulation for the scattering characteristics of pollute aerosol in Beijing city [J]. *Journal of Remote Sensing*, 7(4): 321—327 (in Chinese)
- Kaskaoutis D G, Kambezidis H D, Adamopoulos, et al. 2006. On the characterization of aerosols using the Ångström exponent in the Athens area [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(18): 2147—2163
- Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. 1990. Satellite remote sensing of large scale air pollution method [J]. *Journal Geophysics Research*, 95: 9895—9909
- Li Z Q, Zhao F S, Zhao W, et al. 2003. Ground surface observation of aerosol optical thickness over Yellow Sea region [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 20(5): 635—640 (in Chinese)
- Liu X G, Lu R D, Xiao W A, et al. 2005. Retrieval and analysis of the aerosol optical depth of Beijing ultraviolet waveband (spectrum) in sunny day [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 28(1): 51—57 (in Chinese)
- Luo Y F, Zhou X J, Li W L. 1998. Advances in the study of atmospheric aerosol radiative forcing and climate [J]. *Advance in Earth Sciences*, 13(6): 572—581 (in Chinese)
- Mao J T, Zhang J H, Wang M H. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(5): 625—634 (in Chinese)
- Masmoudi M, Chaaobane M, Medhioub K, et al. 2003. Variability of aerosol optical thickness and atmospheric turbidity in Tunisia [J]. *Atmospheric Research*, 66: 175—188
- Pu Y F, Yang J L. 2000. Relationship of acidification of air aerosols with relative humidity and its contributions to the formation of acid rain [J]. *Climatic and Environmental Research*, 5(3): 269—302 (in Chinese)
- Qi X Y, Tian Q J. 2004. Aerosol optical depth retrieval method based on field Spectroradiometer [J]. *Remote Sensing Information*, (4): 16—18 (in Chinese)
- Ren L X, You R G, Lu W W, et al. 1999. The physical and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. *Climatic and Environmental Research*, 4(1): 67—73 (in Chinese)
- Suess D T, Prather K A. 1999. Mass spectrometry of aerosol [J]. *Chemical Reviews*, 99: 3007—3035
- Yang S J, Chen S, Yuan B X. 2001. The characteristics of 2.5 μm aerosol measurements in Beijing [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 25(6): 50—54 (in Chinese)
- Yoon S C, Kim J Y. 2006. Influences of relative humidity on aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during ACE-Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 40(23): 4328—4338
- Zeng F G, Wang W, Yang Z F, et al. 2003. Study and analysis of acidifying buffer capacity of aerosols [J]. *Environmental Monitoring in China*, 17(4): 13—17 (in Chinese)
- Zhang J, Chen Z L, Wang W. 1998. Source apportion on fine particulates in atmosphere in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18(1): 62—67 (in Chinese)
- Zhao H B, Zheng C G. 2005. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(12): 1590—1596 (in Chinese)
- 中文参考文献:**
- 邓孺孺,田国良,孙荃,等.2003.北京市污染气溶胶散射特征实验及其数值模拟[J].遥感学报,7(4): 321—327
- 李正强,赵凤生,赵崴,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
- 刘新罡,吕达仁,肖稳安,等.2005.北京晴天紫外波段气溶胶光学厚度反演与分析[J].南京气象学院学报,28(1): 51—57
- 罗云峰,周秀骥,李维亮.1998.大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状[J].地球科学进展,13(6): 572—581
- 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
- 浦一芬,杨建亮.2000.大气气溶胶的酸化与相对湿度的关系及其对酸雨形成的贡献[J].气候与环境研究,5(3): 269—302
- 亓雪勇,田庆久.2004.利用地物光谱仪测算大气气溶胶光学厚度方法[J].遥感信息,(4): 16—18
- 任丽新,游荣高,吕位秀,等.1999.城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响[J].气候与环境研究,4(1): 67—73
- 杨圣杰,陈莎,袁波祥.2001.北京市2.5 μm 小颗粒大气气溶胶特征及来源[J].北方交通大学学报,25(6): 50—54
- 曾凡刚,王玮,杨忠芳,等.2001.大气气溶胶酸度和酸化缓冲能力研究[J].中国环境监测,17(4): 13—17
- 张晶,陈宗良,王玮.1998.北京市大气小颗粒物的污染源解析[J].环境科学学报,18(1): 62—67
- 赵海波,郑楚光.2005.降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J].环境科学学报,25(12): 1590—1596