

# 广州市大气能见度影响因子的贡献研究

刘新罡<sup>1</sup> 张远航<sup>1</sup> 曾立民<sup>1</sup> 杨 鸿<sup>2</sup> 刘 源<sup>1</sup>

1 北京大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871

2 香港科技大学, 香港 999077

**摘要** 通过对广州市2004年10月1日~11月5日污染性气体NO<sub>2</sub>、气溶胶散射系数和吸收系数以及粒子化学成分组成等观测资料的分析, 得到了影响广州市大气能见度因子的贡献比例: 大气气溶胶散射  $b_{sa}$  为75.26%、大气气溶胶吸收  $b_{aa}$  为12.89%、水汽  $b_{sw}$  为5.78%、气体吸收  $b_{ag}$  为3.68%、大气分子散射  $b_{sg}$  为2.38%; 给出了不同粒径段气溶胶对散射的贡献比例; 然后采用逐步多元线性回归得到了大气干气溶胶散射系数与PM2.5、PM10及化学成分的经验关系式; 并给出了广州市区气溶胶的质量散射系数。

**关键词** 能见度 消光 散射 气溶胶

**文章编号** 1006-9585 (2006) 06-0733-06 **中图分类号** X513 **文献标识码** A

## Research on the Influential Factor of Visibility Reduction in Guangzhou

LIU Xin-Gang<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-Hang<sup>1</sup>, ZENG Li-Min<sup>1</sup>, YANG Hong<sup>2</sup>, and LIU Yuan<sup>1</sup>

1 *Environmental College of Peking University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100871*

2 *The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077*

**Abstract** Based on the data acquired from PRD (Pearl River Delta) observation campaign from October 1 to November 5, 2004, analyzing the relationship among atmospheric visibility in Guangzhou and gaseous pollutant, aerosol mass and chemical component. Extinction proportion of each factor is given:  $b_{sa}$  75.26%,  $b_{aa}$  12.89%,  $b_{sw}$  5.78%,  $b_{ag}$  3.68%,  $b_{sg}$  2.38% respectively. Contribution of different particles to scattering is analyzed. Lastly, experiential function among  $b_{sa}$  and PM2.5 concentration, PM10 concentration and chemical components is obtained based on the method of stepwise multiple linear regression, then, the mass scattering coefficient is put forward.

**Key words** visibility extinction scattering aerosol

## 1 引言

随着经济的发展和人民生活水平的提高, 大气能见度及相关的城市污染问题日益引起大众的关注, 也成为大气科学领域内研究的热点问题。广州市及珠江三角洲地区是改革开放以来发展较快的经济发达地区, 市区的水平能见度与人们的

生产和生活、人体健康、交通、风景旅游等息息相关, 因而对广州市区能见度的现状及影响因子进行分析研究, 对定量分析广州市污染状况、制定环境保护措施、改善空气质量都具有十分重要的意义。

从20世纪70年代起, 国内外科学工作者就开始研究气溶胶的化学成分、粒径分布、光学性质等及气溶胶影响能见度的物理化学机制。大气

**收稿日期** 2005-07-20 收到, 2006-07-25 收到修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410801

**作者简介** 刘新罡, 男, 1977年出生, 博士生, 主要从事大气环境的研究。E-mail: lxxstar@pku.edu.cn

能见度的高低是城市污染程度的显性而直观的外观特征量；从科学的角度讲，影响大气能见度的因素有：大气气溶胶粒子数浓度及谱分布，气溶胶的化学组分，空气分子散射，污染性气体的吸收。所以大气能见度的高低还包含了以上各因素的丰富信息。澳大利亚的学者对城市能见度降低问题进行了系统的研究<sup>[1~4]</sup>。

北京大学联合德国对流层研究所、MAX PLANK 化学研究所、香港科技大学、台湾中央研究院等科研单位，于2004年10月1日~11月5日在广州市及新垦（广州市郊区），对大气气态和颗粒污染物的物理、化学、光学性质进行了地面、空中三维立体的加强综合观测。本文利用地面站所测得的气溶胶散射系数和吸收系数、气溶胶粒子化学成分组成、NO<sub>2</sub>等资料对广州市区大气能见度的影响因子进行了研究。

## 2 理论依据

大气能见度的好坏是受大气对太阳光散射和吸收的消光效应制约的。能见度降低的主要原因有两个<sup>[4]</sup>：一是物体和背景两者之间的对比度的减小，二是由于气溶胶及气态污染物对光的散射和吸收，使得来自物体的光信号减弱。在可见光波段，对太阳辐射有衰减作用的物质及衰减原理如下：

(1) 干洁大气的散射。大气分子由于对可见光的瑞利散射作用所产生的消减是可以由瑞利散射理论计算的，记干洁大气的衰减为  $b_{sg}$ ，取为  $0.13 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ <sup>[5]</sup>。

(2) 气态污染物的吸收。在人类活动的边界层内对水平能见距有影响的气态污染物有 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub>。O<sub>3</sub> 对可见光的吸收一般在研究太阳辐射垂直方向上的消光时考虑，在水平方向上由于 O<sub>3</sub> 污染的存在，同样对可见光存在吸收作用<sup>[6]</sup>，但其作用与干洁大气分子相比，可以忽略不计。NO<sub>2</sub> 对可见光的吸收采用经验公式<sup>[7]</sup>：

$$b_{ag} = 3.3 Y, \quad (1)$$

式中， $b_{ag}$  表示 NO<sub>2</sub> 产生的吸收衰减（单位： $10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ）， $Y$  表示大气中 NO<sub>2</sub> 的含量（单位：体积分数（ $10^{-6}$ ））

(3) 水汽分子的散射。水汽分子对太阳辐射的衰减可以分为直接衰减和间接衰减：直接衰减是大气中以气态形式存在的水汽分子对太阳辐射的衰减，间接衰减是大气中的气溶胶由于吸湿长大<sup>[8]</sup>而引起气溶胶辐射性质的变化，从而对太阳辐射产生的消光。理论上由气溶胶的谱分布、增长系数<sup>[9]</sup>，水汽含量可以计算水汽分子对太阳辐射的衰减的。在此实验中，用2台积分浊度计（Integrating Nephelometer），一台加干燥剂，另外一台不加干燥剂的方式测量到了水汽分子对可见光的间接消光效应  $b_{sw}$ 。

(4) 干气溶胶的散射。环境大气中的气溶胶经过干燥剂（硅胶）进入测量仪器，相对湿度小于30%，我们认为这样的气溶胶就是干的气溶胶，它对太阳辐射的散射衰减记为  $b_{sa}$ 。

(5) 干气溶胶的吸收。由于气溶胶中碳黑的存在，对太阳辐射有吸收作用，记为  $b_{aa}$ 。

通过以上的分析可知：大气对可见光总的衰减  $b_{ext}$  可以分解如下：

$$b_{ext} = b_{sa} + b_{aa} + b_{sw} + b_{ag} + b_{sg}, \quad (2)$$

从而大气能见度  $v_d$  由下式<sup>[10]</sup>计算：

$$v_d = 3.912/b_{ext}. \quad (3)$$

## 3 实验仪器及数据处理

在实验中测定大气气溶胶的散射性质与影响因素采用了3台澳大利亚 Ecotech Pty 公司生产的积分浊度计，其中2台型号为 M903，所用发光二极管（LED）波长为 545 nm，均在其进气口安装切割头（Cyclone）以过滤掉粒径大于 2.5 μm 的气溶胶颗粒，为了考察相对湿度对气溶胶散射性质的影响，又在其中一台 M903 的进气口安装了吸湿装置干燥剂硅胶；另一台浊度计型号为 M9003，所用 LED 波长为 525 nm，其进气口不安装任何过滤及吸湿装置。为了便于区分，对3台仪器按照型号及观测用途做如下标记：M903Dry、M903Amb、M9003。测定大气气溶胶的吸收系数实验采用了德国 Max Plank 地球生物化学研究所自行研制生产的光声光谱仪（Photoacoustic Spectrometer, PAS）1台。试验中4台观测仪器所用波长不一致，根据 Mie 散射理论，假设粒子谱为 Junge 分布的情况，大气气溶胶粒子散射系数为

$$\sigma_{0.55}^A / \sigma_{\lambda}^A = (0.55/\lambda)^{3-a}, \quad (4)$$

式中， $\sigma_{\lambda}^A$  表示大气气溶胶对应波长  $\lambda$  (单位： $\mu\text{m}$ ) 的散射系数， $a$  为常数，可取  $a=4$ <sup>[11,12]</sup>。从而计算可得在  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时不同浊度计的大气气溶胶散射系数。PAS 测定吸收系数波长的调整根据经验系数计算。化学成分使用台湾中央研究院自行研制的粒子液化取样器 (Particle-Into-Liquid Sampler, PILS) 的观测结果。试验设计和仪器安装见图 1。所有仪器均按照实验 QA/QC 进行标定，标定结果表明仪器稳定性好、数据可靠。

## 4 结果分析

### 4.1 消光系数的比例构成

根据以上分析，针对本研究的需要，我们对测量数据进行了整理和分析。为了定量考察广州市大气水平能见度的水平及影响因素，根据太阳天顶角的计算选择白天的观测值进行统计分析，不同的能见度影响因子测量结果统计分析如表 1。

从表 1 及图 2 可看出：使广州市大气能见度降低的影响因子的贡献比例分别为： $b_{sa}$  75.26%、 $b_{aa}$  12.89%、 $b_{sw}$  5.78%、 $b_{ag}$  3.68%、 $b_{sg}$  2.38%。大气气溶胶的散射消光  $b_{sa}$  占了总消光的 3/4 强，而大气气溶胶的吸收对消光的作用也不可忽视，广州市区大气气溶胶引起的消光 (散射加吸收) 约占大气总消光的 90%，成为影响水平能见度的

首要污染物。广州市是沿海城市，观测期间，白天空气相对湿度平均值为 55.8%，最大值达到了 99.9%。水汽通过两种方式影响大气能见度，这里是通过测量得到水汽对太阳辐射的直接散射消光，也可以通过大气水汽含量使用瑞利散射理论计算。其间接效应是通过气溶胶的吸湿长大，改变颗粒物的折射率来体现的，而间接效应就比较复杂。相对湿度的增加有利于气溶胶粒子的凝结、碰并和悬浮增长效果，但这种效果对不同尺度、不同化学成分的粒子是不同的<sup>[9]</sup>。光散射的增强可能由于粒子尺度的增加造成，也可能是来自粒子数密度增长的贡献，也许两者贡献都起了作用。对于大气能见度的降低，污染性气体  $\text{NO}_2$  的贡献超过了干洁大气，而且  $\text{NO}_2$  在大气中通过一系列复杂的化学反应生成散射性更强的二次硝酸盐气溶胶，因此控制  $\text{NO}_2$  的源排放显得尤为重要。干洁大气分子的消光由于所占比例很小可以忽略不计。总体来看，广州市大气消光的主要贡献者是大气中的气溶胶，这和广州市大气首要污染物是颗粒物污染相符合。本研究结果与 Chan<sup>[1]</sup> 对澳大利亚布里斯班的研究进行对比发现：两地由于空气污染程度不同，在能见度降低影响因子分担上存在明显的差异，布里斯班大气能见度平均在 85 km，这和广州市的平均 7 km 左右存在很大的差别，在 Chan<sup>[1]</sup> 的研究中，尽管气溶胶的散射约占总消光的 50%，但是干洁空气的散射消光还是占

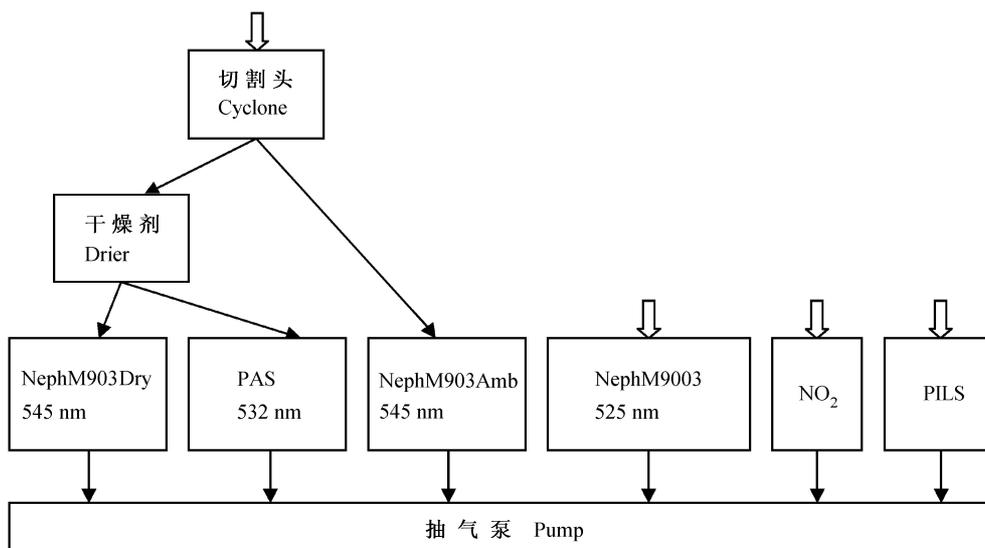


图 1 观测仪器的安装及参数

Fig. 1 The installation of instruments and their parameters

表 1 水平能见度影响因子的测量/计算结果

Table 1 The observation or calculation results of the influential factor on horizontal visibility

$10^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$

测量参数 Parameter	计算值/测量值 Calculation/Observation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
$b_{sa}$	$4.1130 \pm 1.3058$	2.0390	8.7070
$b_{aa}$	$0.7047 \pm 0.3049$	0.3350	1.9200
$b_{sw}$	$0.3161 \pm 0.3096$	0.0380	1.0370
$b_{ag}$	$0.2013 \pm 0.0769$	0.0947	0.3746
$b_{ext}$	$5.3481 \pm 0.7564$	2.6796	10.5476
能见度 Visibility/km	$7.3148 \pm 1.2312$	3.7089	14.5992

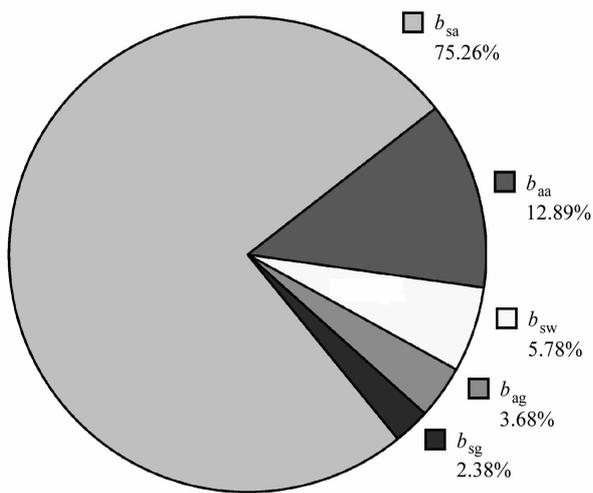


图 2 广州市区大气水平能见度各消光因子贡献比例  
Fig. 2 Influential factor on horizontal visibility in Guangzhou urban

到了 20%，这与广州市干洁大气仅占 2.38% 悬殊很大，两地  $\text{NO}_2$  对能见度降低的影响均小于 5%，但广州市区是在高度颗粒物污染的情况下所占比例较小；另外污染性气体  $\text{NO}_2$  消光所占的比例超过了干洁大气的消光贡献，引起这个结果的直接原因是该地区的  $\text{NO}_2$  污染严重，1982 年在 Riverside 和 Los Angeles 的观测也得到了同样的结论<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 气溶胶光散射系数 $b_{sa}$ 的分解

##### 4.2.1 不同粒径段对散射系数的贡献

把大气中的气溶胶人为的分成粒径小于  $2.5 \mu\text{m}$  和大于  $2.5 \mu\text{m}$  的两部分，根据 Mie 散射理论，细粒子对可见光的散射能力较粗粒子强，实验结果也证明了这一点。2 台积分浊度计使用不同的切割头，使得测量的粒径范围不同，如图 3，

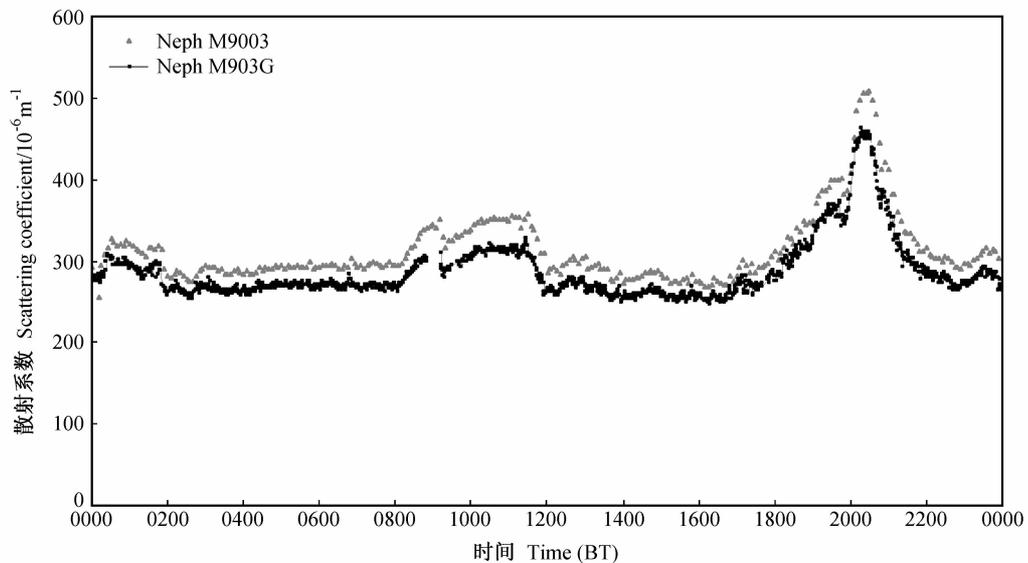


图 3 两积分浊度计观测结果比较  
Fig. 3 The contrast between the results of two Integrating Nephelometers

M903Amb 和 M9003 分别测量 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的散射系数，两者之差即粒径为 2.5~10 μm 大气气溶胶粒子的散射系数。大量观测结果经计算得到：平均而言，粒径小于 2.5 μm 的气溶胶粒子在 λ = 0.55 μm 处对太阳辐射的散射占总散射的 89%，粗粒子的散射比例仅为 11%。

#### 4.2.2 干气溶胶的比散射系数

从上述结果可以看出，气溶胶的光散射作用是大气消光系数的第一贡献者，而 PM<sub>2.5</sub> 在气溶胶散射中又占了绝大部分，所以在考察干气溶胶的消光特征并进行消光系数分解时可以重点考察 PM<sub>2.5</sub> 的物理化学特征。对  $b_{sa}$  和 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的质量（分别记为  $m_{2.5}$ 、 $m_{10}$ ）进行回归分析：

$$b_{sa} = (0.0299 \pm 0.0011) \times m_{2.5}, \quad (n=90, R^2=0.8627, P<0.0001) \quad (5)$$

$$b_{sa} = (0.0173 \pm 0.0014) \times m_{10}, \quad (n=90, R^2=0.8825, P<0.0001) \quad (6)$$

$$b_{sa} = (0.0241 \pm 0.0012) \times m_{2.5} + (0.003 \pm 0.0010) \times m_{10}, \quad (n=90, R^2=0.9347, P<0.0001) \quad (7)$$

由上可见，干气溶胶散射系数与 PM<sub>2.5</sub> 的质量相关系数的平方为 0.8627，两者高度相关，可以在气候模式中用 PM<sub>2.5</sub> 的质量来定量计算大气中气溶胶的散射系数，从公式 (7) 也可看出，气溶胶粗粒子对散射效应的影响并不重要，这个结果与前面 4.2.1 的结果也是一致的。由图 4 可知，广州市大气气溶胶的比散射系数为  $2.9900 \pm 0.1100 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。Hoff<sup>[13]</sup> 对于硫酸盐气溶胶的研究发现，其比散射系数是  $3.0000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ；Chan<sup>[1]</sup> 对澳大利亚布里斯班的研究发现，硫酸盐、

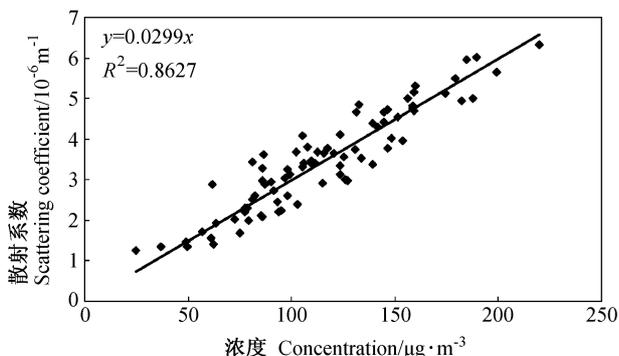


图 4 广州市气溶胶散射系数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的关系  
Fig. 4 The relationship between aerosol scattering coefficient and PM<sub>2.5</sub> concentration in Guangzhou

硝酸盐、有机碳的比散射系数是  $2.9000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。我们的结果与其较一致。根据气溶胶外混模型的研究结果，可以认为广州市区气溶胶的化学成分及组成与布里斯班有很好的相似性。

4.2.3 干气溶胶散射系数与化学成分关系的分析  
美国的 Sisler 等<sup>[14]</sup> 1990 年提出计算  $b_{sa}$  的公式：

$$b_{sa} = \sum_i^n a_i c_i, \quad (8)$$

式中， $a_i$  表示  $i$  物种的质量散射系数， $c_i$  表示  $i$  物种的质量浓度，我们采用上述公式，结合观测的广州市大气气溶胶主要化学成分（硫酸盐、铵盐、硝酸盐、钠盐、钾盐、氯盐）的质量浓度，用多元线性回归（MLR）方法分析广州市大气气溶胶散射系数与化学成分的关系。

首先对散射系数与以上物质的质量浓度进行相关性分析，硫酸盐、铵盐、硝酸盐、钠盐、钾盐、氯盐与气溶胶散射系数的相关系数分别为 0.5030、0.2875、0.1202、0.4563、0.0770、-0.0951，然后用 SAS 多元线性逐步回归分析，排除了硝酸盐、铵盐、钠盐、氯盐对散射消光可能产生的消光，得到如下  $b_{sa}$  值和气溶胶成分回归关系式：

$$b_{sa} = (9.5899 \pm 1.6382) \times c_{\text{SO}_4^{2-}} - (6.1619 \pm 1.8304) \times c_{\text{K}^+} - 17.7741, \quad (n=61, R^2=0.8965, P<0.0001) \quad (9)$$

式中， $c_{\text{SO}_4^{2-}}$  表示硫酸盐质量浓度， $c_{\text{K}^+}$  表示钾盐质量浓度。

由式 (9) 可看出：广州市气溶胶散射系数的大小可以由硫酸盐及钾盐的质量定量来描述。一般认为，硫酸盐是二次气溶胶，而钾盐是生物质燃烧的结果，从中可以看出广州市区燃煤排放的含硫化合物及二次硫酸盐对气溶胶消光有很大贡献，而生物质燃烧对能见度的影响也不可忽略。

## 5 结论

(1) 广州市大气能见度降低其影响因子的贡献比例： $b_{sa}$  为 75.26%、 $b_{na}$  为 12.89%、 $b_{sw}$  为 5.78%、 $b_{ag}$  为 3.68%、 $b_{sg}$  为 2.38%。气溶胶的散射消光  $b_{sa}$  占到了总消光的 3/4 强，广州市区大气气溶胶引起的消光（散射加吸收）约占大气总消

光的 90%，成为影响水平能见度的首要污染物。

(2) 平均而言，广州市区粒径小于  $2.5 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子在  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  处对太阳辐射的散射占总散射的 89%，粗粒子的散射比例仅为 11%。

(3) 对广州市区干气溶胶散射系数  $b_{\text{sa}}$  和 PM2.5、PM10 的质量浓度进行回归分析，得到广州市大气气溶胶的质量散射系数为  $2.9900 \pm 0.1100 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(4) 对广州市干气溶胶散射系数  $b_{\text{sa}}$  和气溶胶化学成分进行回归分析，可以看出广州市区燃煤排放的含硫化合物及二次硫酸盐气溶胶的对气溶胶消光占有很大贡献，而生物质燃烧对能见度的影响也不可忽略。

#### 参考文献 (References)

- [1] Chan Y C. Identification of sources of PM2.5 and PM10 aerosols in Brisbane. Ph. D. dissertation, Faculty of Environmental Sciences, Griffith University. 1997
- [2] Gras J L. A report to department of Environmental Protection of western Australia on fine-particle haze in Perth. Division of Atmospheric Research, CSIRO. 1996
- [3] Gras J L, Gillett R W, Bentley S T. CSIRO-EPA Melbourne Aerosol Study. CSIRO Division of Atmospheric Research. 1991
- [4] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques. *Atmos. Environ.*, 1999, **33** (19): 3237~3250
- [5] Peundorf R. Tables of the refractive index for standard and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 microns and their application to atmospheric optics. *Journal of the Optical Society of America*, 1957, **47**: 176~182
- [6] 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学. 南京: 南京大学出版社, 1990. 156~160  
Liu Changsheng, Liu Wenbao. *The Theory of Atmospheric Radiation* (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 1990. 156~160
- [7] Hodkinson R J. Calculations of colour and visibility in urban atmospheres polluted by gaseous  $\text{NO}_2$ . *Int. J. Air Water Pollut.*, 1966, **10**: 137~144
- [8] 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响. 大气科学, 1999, **23** (2): 239~247  
Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (2): 239~247
- [9] Hanel G, Lehmann M. Equilibrium size of aerosol particles and relative humidity: New experimental data from various aerosol types and their treatment for cloud physics applications. *Contrib. Atmos. Phys.*, 1981, **54**: 57~71
- [10] Koschmieder H. Theorie der horizon- talen sichtweite II; Kontrast und sichtweite beitrage zur physik der freien. *Atmosphäre*, 1925, **12**: 171~181
- [11] 赵柏林. 赵柏林文集. 北京: 北京大学出版社, 2001. 152~162  
Zhao Bolin. *The Corpus of Zhao Bolin* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2001. 152~162
- [12] Sturm B. The atmospheric correction of remotely sensed data and the quantitative determination of suspended matter in marine water surface layers. In: *Remote Sensing in Meteorology, Ocean and Hydrology*, Cracknell A P Ed. Ellis Harwood Limited, 1981, 163~197
- [13] Hoff R M, Wiebe H A, Guise-Bagley L. Lidar, nephelometer, and in situ aerosol experiments in southern Ontario. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D14): 19199~19209
- [14] Sisler J F, Malm W C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. *Atmos. Environ.*, 1994, **28**: 851~862