

中国海洋大学
硕士学位论文
青岛地区气溶胶特性的初步研究
姓名：邱明燕
申请学位级别：硕士
专业：大气物理与大气环境
指导教师：盛立芳
20040601

青岛地区气溶胶特性的初步研究

摘 要

大气气溶胶质粒通过直接辐射强迫和间接辐射强迫两种方式影响着地球气候系统,同时,它在区域环境空气质量问题上也扮演重要角色。

青岛位于山东半岛南部,三面环海,具有独特的地理环境和气候背景,气溶胶来源受大陆和海洋的共同影响,气溶胶性质复杂。本文利用多波段太阳光度计观测的太阳直接辐射和散射辐射资料,气溶胶总悬浮颗粒物和分级采样资料,以及具有较高分辨率的 MODIS 卫星遥感资料,综合研究了青岛地区气溶胶的光学特性和粒子谱分布,分析了气象因素对气溶胶光学特性和粒子谱分布的影响,并对 MODIS 卫星遥感气溶胶光学厚度进行了对比分析和应用。研究结果表明:

青岛地区气溶胶光学厚度的日差别较大,这种较大的日差别与气象条件有关:光学厚度在盛行南风时较大,日差别明显;轻雾和霾光学厚度在青岛气溶胶光学厚度中占有较大比重,轻雾的贡献又比霾大;在波长小于 500nm 时,单次散射反照率是夏季较高,春季较低;在波长大于 1000nm 时,单次散射反照率在春季较高;气溶胶的消光能力随波段呈递减趋势,而春季气溶胶在各波段的散射消光能力相差较小;青岛地区波长指数主要出现在 0.9~1.4 范围内,浑浊度一般小于 0.3;波长指数与浑浊度具有明显的季节变化,波长指数在春秋季节频次分布呈多峰型,夏冬季节呈单峰型;大气浑浊度是秋冬季节较小,而春夏季节较大浑浊度的出现频次较多。

地面粒子分布中,春季粗粒子质量浓度较高,冬季细粒子浓度是其他季节的三倍左右;气溶胶光学厚度与积聚模态粒子($0.05 < r < 1 \mu\text{m}$)体积浓度之间的的相关系数达 0.9 以上,即气溶胶粒子对太阳短波辐射的衰减作用主要是由积聚模态粒子引起;随着波长的增长,各波段光学厚度与核模态粒子相关系数减小,而与粗模态粒子相关系数增大;在相对湿度大于 60%时,核模态和积聚模态粒子随湿度的增加而增加,即湿度的增加有利于小粒子的形成。

比较 MODIS 遥感光学厚度与地面光度计观测光学厚度显示,在光学厚度小于 0.7 时,MODIS 遥感光学厚度一般大于地面光度计观测,而当光学厚度大于 0.7 时,MODIS 观测值小于地面光度计观测;MODIS 遥感光学厚度与积聚模态粒子相关显著,而与核模态以及粗模态粒子相关不明显。

应用 MODIS 遥感光学厚度资料,结合地面气象观测资料和 API 指数资料,分析了 2002 年两次沙尘暴过程对青岛空气质量的影响。

关键词: 气溶胶; 光学厚度; 体积谱; MODIS;

A Preliminary Study on the properties of Atmospheric Aerosols in Qingdao

Abstract

Aerosol has much influence on the earth-atmosphere climate system through its impact on direct and indirect radiative forcing. It also plays a crucial role in regional air pollution problems.

Lying on the south of Shandong peninsula and surrounded by the sea, the aerosol in Qingdao area is affected by land and ocean. Based on direct and scattered radiation data measured by Skyradiometer, TSP (total suspended particulate) and size segregated data, and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, the optical property and spectrum distribution of aerosol and the effects of meteorological situation are analyzed in Qingdao area. The aerosol optical depth (AOD) measured based on MODIS and on ground are compared. The results show that:

Caused by meteorological situation, daily variance of AOD is rather large in Qingdao area. South wind increases AOD and its daily range. Light fog and haze have rather large proportion in AOD, and the contribution of fog is larger than that of haze. For the wavelength shorter than 500nm, the single scattering albedo (SSA) is higher in summer and lower in spring. But the SSA is higher in spring for the wavelength longer than 1000nm. With the wavelength increases, the scattering ability of aerosol descends. The wavelength index ranges from 0.9 to 1.4, and turbidity is lower than 0.3 in Qingdao area.

In the surface layer, the concentration of coarse particle is highest in spring, and fine particle is about three times in winter to other seasons. The coefficient of correlation between AOD and volume concentration of accumulated particulate is above 0.9. It means that the particulate of accumulated mode plays leading role in extinguishing solar radiation. With the wavelength increases, the coefficient of correlation between AOD and nucleus particulate decreases, but the coefficient goes up between AOD and coarse particulate. For the humidity over 60%, with the humidity increases, nucleus and accumulated particle manifold.

Comparisons between AOD measured by MODIS and by skyradiometer give good correlations. When the AOD is lower than 0.7, the value measured by MODIS is higher than measured by skyradiometer, but when the AOD is higher than 0.7, the reverse shows. The correlation between AOD measured by MODIS and the accumulated particulate is good. But the correlation between AOD by MODIS and the nucleus and coarse particulate are poor.

Using MODIS products from NASA, the seasonal characteristics and variation of AOD over Shandong peninsula are analyzed. Combined MODIS data and meteorological data and API data, the effect of two dust storms during 2002 on Qingdao are analyzed. The results show that the dust can be transported from the source area to Qingdao, and debase the local air quality.

Key word: aerosol; Optical depth; columnar volume spectrum; MODIS;

0 前言

0.1 引言

大气气溶胶是指大气与悬浮在大气中的固态和（或）液态粒子共同组成的一个多相体系，尺度范围从 $10^{-3}\mu\text{m}$ 的分子团到 $100\mu\text{m}$ 的尘埃、云滴，跨 5 个量级，气溶胶的质量浓度变化达到 15 个量级，它的数浓度变化可以达到 14 个量级^[1]。

大气气溶胶质粒主要来自地球表面，可以通过自然和人为机制注入到大气中，也可以通过化学或光化学过程转化而来。自然源气溶胶主要来自于洋面气泡的破裂、土壤的风蚀、生物的孢子花粉以及火山爆发、森林火灾等。人为气溶胶主要来自化石燃料的燃烧、工农业生产等活动。

气溶胶是地球大气系统中的微量成分，但其在大气过程中有着重要作用，不仅是气候变化模拟和环境遥感中的一个重要影响因子^[2]，作为污染物的载体，还影响着生物圈的健康。太阳辐射能是驱动地球系统的能量来源，气溶胶粒子对太阳辐射的散射和吸收，减少了到达地面的太阳辐射，直接影响着地气系统辐射能量的收支；作为云、雾的凝结核，气溶胶的分布及其化学成分影响着云、雾的形成和寿命，以及云、雾的光学特性，间接地影响了地气系统的辐射收支。随着大量燃料的燃烧和汽车数量增加，光化学烟雾成为城市大气气溶胶的一个重要来源，是城市污染大气中特定天气条件下发生的一种特殊现象，是气相物质经过光化学反应急剧地向固态颗粒物转化的结果，这一过程加剧了城市污染；另一方面，气溶胶粒子，尤其是粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物携带细菌、病毒和致癌物质，极易被人体吸收并沉积在肺中，直接危害人体健康。

0.2 气溶胶特性研究状况

气溶胶科学的初创时期主要研究工作有：Tyndall(1896)进行的气溶胶光学实验，随后 Rayleigh(1871)提出光的散射理论，这些研究工作是近代气溶胶科学的开端；接着 Aitken(1880)发现存在很小的核，并对质粒的力学进行研究(1884)，Wilson(1897)对核化作了经典研究，Einstein(1905)提出布朗运动理论，并建立了气溶胶质粒特征类同于大分子的微观近似同连续流体理论演绎之间的联系。这些出色的研究成果代表了气溶胶科学的发展进入鼎盛时期。1955 年，Φykc 出版了《气溶胶力学》，对当时气溶胶力学作了经典性概括和总结，标志着经典气溶胶科学时

代的终结^[1]。

现代科学技术的飞速发展，为气溶胶科学兴盛奠定了理论基础，创造了实验探测和数值模拟的条件，并不断渗透到基础学科。气溶胶科学已成为大气科学的重要分支学科，具有显著的边缘学科性质。它所涉及的领域与大气物理（云物理、大气辐射传输、大气光学、大气电学）、空气污染、大气化学、高层大气学、气候学、环境工程和工程技术、医疗卫生等学科密切相关。

由于气溶胶的气候效应问题，自上世纪 90 年代以来，气溶胶研究再次成为国际学术界的热点之一。国际大气化学研究计划（IGAC）科学指导委员会于 1994 年将国际全球大气化学研究计划和国际气溶胶计划（ICAP）合并重组，大气气溶胶研究被列为三大研究方向之一，而大气气溶胶的研究内容，发展到包括物理和化学的性状、来源和形成、时空分布、对气候变化和环境质量影响以及对大气化学过程的影响等多方面、多层次的综合研究^[3]。

了解气溶胶光学特性是研究气溶胶气候效应的基础。研究气溶胶光学特性的基本原理是入射的电磁辐射能与入射路径上气溶胶粒子相遇产生散射和吸收作用，使原来传输方向上的电磁辐射能量受到衰减，通过测量入射辐射的变化可以反演出气溶胶粒子特性。研究气溶胶光学特性的方式主要有利用太阳直接辐射的宽带分光辐射方法、全波段太阳直接辐射方法、多波段太阳光度计方法、激光雷达遥感以及卫星遥感等^[4]。

(1) 太阳直接辐射的宽带分光辐射

在 Junge 谱分布下，气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 与波长 λ 之间满足 $\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$ 。其中， β 为大气浑浊度，实际上是波长为 $1\mu\text{m}$ 处大气柱的气溶胶光学厚度； α 为波长指数，反映大气中气溶胶粒子的尺度。 α 值越大，表示大气中小粒子占优势，当粒子尺度接近于大气分子时， α 接近于 4。

β 和 α 可以通过装备滤光片的太阳直接辐射观测计算得出，世界气象组织（WMO）推荐德国 RG₁（ $0.53\mu\text{m}$ ），RG₂（ $0.63\mu\text{m}$ ）和 RG₃（ $0.7-2.8\mu\text{m}$ ）三种玻璃滤光片作为太阳直接辐射观测使用的滤光片。用这三种滤光片观测的太阳直接辐射相减，可以得到 $0.53-0.63\mu\text{m}$ 和 $0.63-0.7\mu\text{m}$ 波长范围内的太阳直接辐射，由这两个波段的大气上界太阳直接辐射常数，根据辐射传输方程得到 β 和 α 的值，

从而得到大气浑浊度和气溶胶粒子半径信息^[5]。刘树华等利用 1979 年南极瑞穗站的分光观测资料, 分析了大气光学厚度、浑浊度和波长指数, 并研究了大气光学特性与大气稳定度、湍流热通量的关系, 结果表明南极瑞穗站地区整层大气垂直光学厚度较小, 具有良好的大气透明度^[6]。

(2)全波段太阳直接辐射

国内很多气象台站全年进行全波段太阳直接辐射的观测, 为充分利用这些辐射资料研究大气气溶胶的光学特性, 邱金桓等在分析了全波段太阳直接辐射对气溶胶光学厚度及粒子谱敏感性的基础上提出了利用晴天全波段太阳直接辐射信息确定 $0.7\mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度的方法^[7]; 1997 年他又对这个方法作了改进, 在加入能见度信息基础上, 提出利用全波段太阳短波直接辐射和能见度资料, 反演整层大气气溶胶光学厚度和平流层气溶胶光学厚度的方法, 并用于长时间序列大气气溶胶特性的研究^[8]。

罗云峰等采用上述邱金桓提出的方法, 利用 1979 年到 1990 年中国 41 个甲种日射站太阳直接辐射资料, 反演了大气气溶胶光学厚度, 分析了中国大气气溶胶的变化和时空分布特征。结果表明: 中国大气气溶胶光学厚度的多年平均分布是以四川盆地为中心向四周减少, 南疆盆地和长江中下游武汉附近为另两个大值中心; 长江中下游地区大部分地区、山东半岛以及广东沿海光学厚度值较大; 而东北大部、西北大部、云南和福建沿海等地光学厚度较小^[9]。

(3)多波段太阳光度计

多波段光度计是利用一系列窄波段滤光片(通常半波宽度小于 10nm)来测量大气对太阳直接辐射的消光, 由这些消光信息反演大气气溶胶光学厚度和粒子谱。这是目前气溶胶遥感方法中比较准确、应用较多的一种方法。

赵柏林等是中国较早使用多波段光度计研究气溶胶的学者, 他们利用自己研制的 7 波段光度计对北京地区进行了一年(1980 年 7 月—1981 年 7 月)的观测并反演了粒子谱^[10]。毛节泰等分析了这次遥感得到的气溶胶光学厚度的特性、变化规律及其与气象条件的关系^[11]。

张军华等利用 10 波段光度计在西藏当雄地区进行了为期两个月观测, 研究了该地气溶胶光学特性及其变化规律。研究结果表明, 当雄地区气溶胶光学厚度较小, 光学厚度与大气相对湿度呈正相关, 气溶胶粒子谱分布符合干洁大陆气溶胶

的特性^[12]。

多波段光度计可以准确遥感气溶胶光学厚度,并可反演 0.1~5 μm 气溶胶粒子谱等特性^[13],为了获得更大粒子半径的气溶胶信息,还应该考虑气溶胶的散射信息。吕达仁等提出了同时测量太阳直接辐射和小角度散射辐射来确定气溶胶光学厚度和谱分布的方法^[14]。邱金桓等应用该方法进行了实验研究。结果表明,该方法可以较好地提供 0.1~10 μm 范围内气溶胶分布信息。目前该方法已经在地面气溶胶遥感中得到应用^[15]。

(4) 激光雷达遥感

激光雷达是一种主动式遥感手段,利用激光雷达可以得到气溶胶的垂直分布信息。邱金桓等利用激光雷达和光度计对北京大气气溶胶进行了综合遥感,分析了北京大气柱气溶胶光学厚度、谱分布、折射率以及粒子浓度的高度分布。研究结果显示,春季期间,北京混合层厚度较大,可高达 3km 左右,在 1.5 至 3km 高度附近,常出现消光系数的次峰,这可能是导致春季大气柱光学厚度较大的一个重要原因^[16]。

周军等用 L625 激光雷达在安徽合肥探测分析了菲律宾 Mt. Pinatub 火山爆发形成的平流层火山云峰值散射比、云层高度、厚度以及平流层气溶胶光学厚度时空演变的主要特征^[17]。邱金桓等利用多波段激光雷达探测了北京地区对流层中上部云和气溶胶,发现沙尘气溶胶可以达到 6~10km 高度上远距离输送^[18]。

刘金涛等利用碘分子吸收光谱和双边缘检测技术,提出了一套同时测量大气气溶胶光学特性和风速的 HSRL 系统,该系统可以分离大气气溶胶和分子散射,因而不需任何假设,可以直接反演出大气的后向散射比和气溶胶的后向散射系数。根据该系统,他们模拟分析了系统测量性能,结果表明可以获得高精度的气溶胶后向散射系数和大气风场^[19]。

激光雷达可以遥感气溶胶粒子随高度的分布特征,近几年利用激光雷达遥感气溶胶的研究得到很大重视,但激光雷达设备费用较高,目前仅在合肥、北京等地利用激光雷达进行长期的气溶胶遥感观测^[4]。

(5) 卫星遥感

以上对气溶胶的遥感研究都是在地面单点进行的观测,但是大气气溶胶的寿命只有几小时到几天的时间,物理化学特性的空间变化也很大,因此气溶胶具有

极大的时间和空间变率，仅仅依靠地面的观测难以评估全球的气溶胶状况。而卫星遥感弥补了一般地面观测难以反映气溶胶空间分布和变化趋势的不足。

卫星遥感气溶胶的基本原理是：卫星传感器接收到的短波光谱辐射包括被地表反射的太阳辐射和大气在传感器方向散射的太阳辐射。被地表反射的光同时也要受到大气的影响，光谱和偏振特性都要受到大气和地表的影响。到达传感器的光是一次散射或多次散射的结果。气体和气溶胶对短波辐射的吸收也随着频段和偏振角不同而改变。

卫星遥感气溶胶的理论研究始于七十年代中期，1977 年 NOAA 开始利用 AVHRR 可见光第一通道 ($0.63\mu\text{m}$) 进行海洋上空气溶胶光学厚度的遥感^[20]。目前已发展到了第二代反演方法，利用双通道遥感的第三代反演方法也正在研究过程中^[21]。现在利用 AVHRR 可见光通道遥感海洋上空气溶胶已作为 NOAA 的业务运行，每周提供一次全球海上气溶胶光学厚度分布图，用来分析全球海上气溶胶的分布特性^[22]。

我国科学家从 80 年代中期开始进行卫星遥感气溶胶的研究。赵柏林^[23]等利用 NOAA AVHRR 资料进行了遥感海上大气气溶胶的研究。张军华等^[24]研究了利用 GMS-5 卫星的可见光通道资料遥感湖面上空大气气溶胶光学厚度的可行性，并指出了 GMS-5 可见光通道资料的优点和局限性。毛节泰、李成才等利用 NASA 发射的 Terra 卫星搭载的 MODIS 传感器资料，进行了北京地区以及中国东部地区气溶胶光学特性，并进行了 MODIS 遥感反演资料与光度计观测资料的对比分析^[25,26]。

到目前为止，利用卫星遥感气溶胶已经形成了一个非常丰富的研究体系。根据遥感仪器的不同，可以把卫星遥感气溶胶的方法简单地分为单通道遥感、多通道遥感、多角度多通道遥感以及偏振特性遥感四大类。卫星遥感产品也从反演气溶胶光学厚度，发展到反演气溶胶粒子谱分布、折射率指数以及气溶胶类型等，为全面、深入、细致地研究气溶胶提供了丰富的信息和广阔的前景。

0.3 本文的目的意义和主要内容

近三十年来，国内外学者使用不同的物理、化学以及光学手段对气溶胶进行了广泛的研究。但是一方面气溶胶采样方法和分析手段之间缺乏可比性，如何获取全面并具有代表性的资料成为气溶胶特性研究的重要问题；另一方面，气溶胶的时空

变率较大, 准确评估气溶胶的区域和全球分布是研究气溶胶气候效应以及环境影响的基础。

青岛位于山东半岛南部, 三面环海, 是亚热带与温带的过渡区, 兼备季风气候与海洋气候特点, 独特的地理和气候环境使青岛地区的大气气溶胶受大陆和海洋的共同影响。

很多学者对青岛地区气溶胶作了观测研究, 陈兴茂等在青岛近海三个采样点采集了100 多个大气气溶胶样品, 研究了Al、Fe、Mn、Cu、Pb、Zn等元素入海通量的季节变化和年平均值^[27]; 徐新华等应用实验和酸碱平衡计算的方法, 研究了青岛地区气溶胶的酸碱特性^[28]; 王珉等采用离子色谱法不仅研究了青岛区大气气溶胶的海盐来源^[29], 还进行了青岛气溶胶无机组分的研究^[30,31]。

以上这些研究主要是针对青岛地区气溶胶的化学特性进行的, 而有关青岛地区气溶胶的光学性质以及谱分布等研究还很缺乏。本文主要对青岛气溶胶光学特性以及青岛气溶胶粒子的谱分布进行研究。主要内容:

- (1) 利用分光光度计观测的辐射资料进行了气溶胶光学特性的反演, 并分析了青岛地区气溶胶的光学特性及其受气象因素的影响。
- (2) 利用气溶胶采样资料分析了青岛地区气溶胶的质量浓度的变化情况。利用分光光度计反演得到的体积浓度谱资料, 分析了体积浓度的变化及其受气象条件的影响。
- (3) 将 MODIS 卫星遥感气溶胶光学厚度资料与地面分光光度计观测资料以及空气污染指数进行对比分析, 并利用 MODIS 资料分析了 2002 年 3 月 15~17 日和 4 月 6~8 日的沙尘暴过程对青岛的影响。

1 气溶胶光学特性的计算原理

1.1 引言

太阳辐射在地球大气中传输时受到大气分子的散射和吸收, 以及悬浮于大气中的气溶胶粒子的散射和吸收。大气的散射和吸收效应将导致辐射的衰减, 使辐射强度、频率、传播方向以及偏振状态发生变化。

大气的吸收效应主要由 CO_2 、 H_2O 、 O_3 、 O_2 等气体分子对太阳辐射的选择吸收作用。分子吸收作用使太阳辐射在大气中传输时随传输路程的增大而减小, 被吸收的辐射能量将转化为热能。气体分子吸收造成的太阳辐射的衰减程度与辐射波长、大气的温度、压强以及吸收气体的含量有关。

大气中包含了无数大小不等的微粒, 尺度范围在 $10^{-8}\sim 10^0\text{cm}$ 之间, 例如大气分子、尘埃、云滴、雾滴、雨滴、雪花、冰雹等。太阳辐射在大气传输过程中遇到这些微粒发生散射效应而使辐射偏离原来传输方向, 并改变偏振状态, 结果就从这些散射源向各个方发出了散射辐射, 从而使原传输方向上的辐射能量受到衰减, 辐射能量在空间重新分配。辐射能量的分配方式与辐射强度、波长、偏振状态以及粒子的尺度、形状、折射率有关。散射效应根据入射辐射波长与粒子尺度的关系分为 Rayleigh 散射、Mie 散射以及几何光学散射^[32, 33]。

1.2 资料来源

辐射观测仪器为日本产 POM-02 型 11 波段太阳光度计, 最小视场角为 3° , 11 个波段的中心波长分别位于 340nm、380nm、400nm、500nm、675nm、870nm、940nm、1020nm、1225nm、1600nm 和 2200nm, 滤光片的半波宽度为 10nm。该辐射计可以对太阳自动跟踪, 并按照设定的程序每 10 分钟进行太阳直接辐射、天空散射辐射观测。

仪器安装在中国海洋大学校园内的八关山上($120^\circ 20.134'\text{E}$, $36^\circ 3.809'\text{N}$), 观测场海拔高度约 77m。观测时间是 2002 年 4 月至 2003 年 10 月, 其中 2002 年 8 月 22 日仪器遭受雷击损坏, 因此缺少 2002 年 9、10、11 月 3 个月的资料。

考虑到水汽分子对红外辐射的强烈吸收, 选取不处于水汽主要吸收带的 340nm、380nm、400nm、500nm、675nm、870nm、1020nm 等 7 个波段的辐射资料进行处理。在这些波段, 对太阳辐射造成衰减的主要因子是大气分子散射、臭

氧吸收以及大气气溶胶的散射和吸收。

1.3 气溶胶光学特性计算原理

1.3.1 气溶胶光学厚度的计算

由 Beer 定律^[32,33], 地面上接收到的单色太阳直接辐射通量密度 F_λ 可以表示为

$$\begin{aligned} F_\lambda &= F_{\lambda,0} \exp[-m\tau_\lambda] \\ &= aF_{\lambda,0} \exp\{-m[\tau_{\lambda,m} + \tau_{\lambda,ab} + \tau_{\lambda,a}]\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $F_{\lambda,0}$ 是大气层顶的辐射通量密度, m 为大气质量数, $\tau_{\lambda,m}$ 为大气分子瑞利散射光学厚度, $\tau_{\lambda,ab}$ 为气体吸收光学厚度, $\tau_{\lambda,a}$ 为大气气溶胶光学厚度。

$$\text{因此, } \tau_{\lambda,a} = -\frac{1}{m} \ln \frac{F_\lambda}{aF_{\lambda,0}} - \tau_{\lambda,m} - \tau_{\lambda,ab} \quad (2)$$

大气质量数 m 是太阳光自 θ_0 角入射与自天顶 ($\theta_0 = 0$) 处入射时整层大气光学厚度的比值, 即 $m = \frac{\tau_\lambda(\theta_0)}{\tau_\lambda(0)}$, 它表示太阳光斜射经过的路程比直射路程大多少倍。

太阳高度角 $\theta_0 \leq 75^\circ$ 时, m 可以用近似关系 $m \approx 1/\cos\theta_0$ 计算。

$$\tau_{\lambda,m} \text{ 由公式 } \tau_{\lambda,m} = \frac{p}{p_0} \times 0.00864 \lambda^{-(3.916+0.074\lambda+0.05\lambda^{-1})} \text{ 求出, 其中 } p \text{ 为地面大气压, } p_0$$

为标准大气压, $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$ 。

$\tau_{\lambda,ab}$ 由光度计相应波段吸收气体的吸收系数与吸收气体的含量决定, $\tau_{\lambda,ab} = k_\lambda \times w$, k_λ 为吸收气体在 λ 波段的吸收系数, w 为吸收气体的含量。本文根据辐射波段的选取, 只考虑臭氧的吸收。臭氧资料来源于雨云 7 号 TOMS (全球臭氧测绘光谱仪) 卫星数据。以本观测站经纬度为中心, 选取距离本站 100 公里以内的格点臭氧值, 利用 Cressman 线性插值获得本站大气柱臭氧总量资料。

1.3.2 体积谱与单次散射返照率的反演

根据 RTE (Radiative transfer equation) 方程, 天空散射辐射通量密度可以表示为:

$$E_\lambda(\theta_0, \phi) \equiv E_\lambda(\Theta) = F_\lambda m \Delta\Omega [\omega_\lambda \tau_\lambda P(\Theta) + q(\Theta)] \quad (3)$$

其中 ω_λ 为单次散射反照率 (Single Scattering Albedo, 以下简称为 SSA), 是散射光学厚度与总光学厚度的比值, 反映了粒子的散射能力; $P(\Theta)$ 为散射角为 Θ 时的总散射相函数; $q(\Theta)$ 表示多次散射的贡献; $\Delta\Omega$ 为仪器的视场角; τ_λ 为大气光学厚度。散射角 Θ 与太阳高度角 θ_0 、太阳方位角 ϕ_0 以及观测高度角 θ 、观测方位角 ϕ 有关, 表示为

$$\cos \Theta = \cos^2 \theta_0 + \sin^2 \theta_0 \cos(\phi - \phi_0)。 \quad (4)$$

利用观测的太阳直接辐射对散射辐射进行归一化处理, 得到散射辐射率

$$R_\lambda(\Theta) \equiv \frac{E_\lambda(\Theta)}{F_\lambda m_0 \Delta\Omega} = \omega \tau_\lambda P(\Theta) + q(\Theta) = \beta(\Theta) + q(\Theta) \quad (5)$$

Nakajima 等^[34]指出在辐射传输过程中, 多次散射的贡献不容忽视, 而且随散射角 Θ 的增大多次散射的贡献是加大的, 因此在辐射传输方案中采用 Nakajima 与 Tanaka 提出的基于平面平行大气的改进的多次散射辐射方案 (IMS—improved multiple scattering)^[35]。

由米散射理论, 大气气溶胶光学厚度定义为

$$\tau_{\lambda,a} = \int_{r_m}^{r_M} \pi r^2 Q_{ext}(x, \tilde{m}) n(r) dr \quad (6)$$

其中尺度参数 $x = 2\pi r / \lambda$, $n(r)$ 为大气柱中气溶胶粒子的数浓度, r_m 和 r_M 分别为气溶胶粒子的最小和最大半径, $\tilde{m}$ 为气溶胶粒子复折射率指数, $\tilde{m} = m - ki$, Q_{ext} 是球型粒子 Mie 消光效率因子, 定义为

$$Q_{ext}(x, \tilde{m}) = \frac{\sigma_{ext}}{\pi r^2} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) R_e(a_n + b_n) \quad (7)$$

(6) 式中的消光效率因子 Q_{ext} 替换为散射效率因子 Q_{sca} , 可以得到气溶胶散射光学厚度 τ_{as} 。散射效率因子定义为

$$Q_{sca}(x, \tilde{m}) = \frac{\sigma_{sca}}{\pi r^2} = \frac{2}{x^2} \sum_n (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (8)$$

气溶胶散射光学厚度除以气溶胶总的光学厚度, 可以得到单次散射反照率, 即 $\omega_a = \tau_{as} / \tau_a$ 。

由定义，整个气柱的气溶胶散射辐射系数 β_a 写为

$$\beta_a(\Theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \int_{r_m}^{r_M} [i_1(\Theta, x, \tilde{m}) + i_2(\Theta, x, \tilde{m})] n(r) dr \quad (9)$$

其中 i_1 、 i_2 为米散射强度函数。

由 Mie 散射相函数定义， $P_a(\Theta) = \beta_a(\Theta) / \omega_{\lambda,a} \tau_{\lambda,a}$ 。

在实际计算中用 V_λ （光度计地面观测电压值）和 $V_{\lambda,0}$ （仪器标定常数）代替 F_λ 和 $F_{\lambda,0}$ ，即气溶胶光学厚度表示为

$$\tau_{\lambda,a} = -\frac{1}{m} \ln \frac{V_\lambda}{a V_{\lambda,0}} - \tau_{\lambda,m} - \tau_{\lambda,ab}。$$

使用体积谱 $v(r)$ 定义为 $v(r) = dV / d \ln r$ ，体积浓度与数浓度之间的关系为

$$v(r) = (4\pi/3) r^4 n(r)，因此$$

$$\tau_{\lambda,a} = (2\pi/\lambda) \int_{r_m}^{r_M} K_{ext}(x, \tilde{m}) v(r) d \ln r，\quad \beta_{\lambda,a}(\Theta) = (2\pi/\lambda) \int_{r_m}^{r_M} K(\Theta, x, \tilde{m}) v(r) d \ln r$$

其中 $K_{ext}(x, \tilde{m})$ 与 $K(\Theta, x, \tilde{m})$ 为核函数，表示为

$$K_{ext}(x, \tilde{m}) = \left(\frac{3}{4}\right) \frac{Q_{ext}(x, \tilde{m})}{x}，\quad K(\Theta, x, \tilde{m}) = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{i_1 + i_2}{x^3}。$$

气溶胶光学参数迭代求解流程由图 1.1 给出。图中 $R^{meas}(\lambda_i, \Theta_j)$ 为对散射辐射进行归一化得到的散射辐射率； $\Lambda(\lambda_i)$ 为地表反射率； $\tau(\lambda_i)$ 为光学厚度； Θ_j 为散射角； θ_0 为太阳高度角； r_m 、 r_M 分别为粒子的最小、最大半径； $\tilde{m}(\lambda_i)$ 为气溶胶粒子的复折射率指数； $v(r)$ 为气溶胶粒子体积谱； ε_j^n 为第 j 个散射角第 n 次迭代余差， $\varepsilon_j^n = [\beta_j^n / \beta_j^{n-1}] - 1$ ； $P_a(\lambda_i, \Theta_j)$ 为散射相函数。

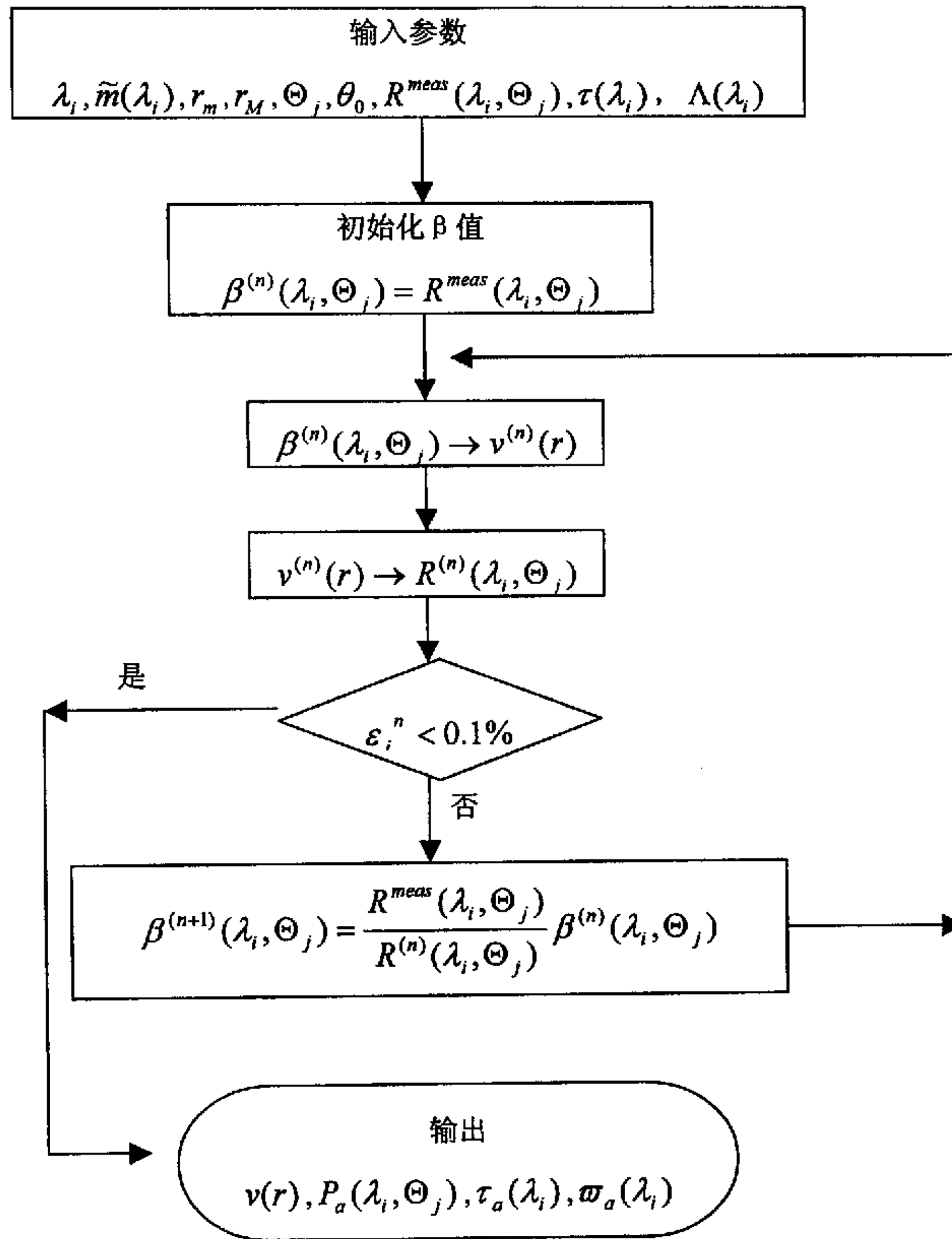


图 1.1 气溶胶光学参数计算迭代流程

2 青岛地区气溶胶光学特性分析

本章利用多波段太阳光度计观测的太阳直接辐射和散射辐射资料, 计算了气溶胶光学厚度、单次散射反照率以及 Ångström 浑浊度与波长指数, 并结合同期的气象资料分析了风向、雾、霾以及相对湿度对青岛气溶胶光学特性的影响。

2.1 资料处理

为了避免云的影响, 只对晴天资料进行分析。晴天的选取以青岛地面观测资料中总云量为参考, 只选取北京 08 时、11 时、14 时、17 时 4 次观测总云量的平均值小于等于 2 的日期。以此为标准, 共选取了 85 天的观测资料进行分析。在这 85 天中, 有 29 天出现轻雾天气, 23 天出现霾天气, 有 11 天既出现轻雾又出现了霾, 另有 2 天出现浮尘, 没有出现任何天气现象记录的有 20 天。地面观测规范中, 霾与轻雾的区别是相对湿度的不同: 在能见度小于 10 公里, 相对湿度小于 60% 时记为霾, 相对湿度大于 60% 时记为轻雾, 即轻雾天气较霾天湿润。对 85 天中主导风向的确定仍以青岛地面观测资料为依据, 选取白天 4 次观测中风向出现最多的为主导风向。统计得出主导风向是南风的有 48 天, 主导风向为北风的有 32 天, 东西风向风别只出现了 2 天和 3 天。在无雾和霾的 20 个晴天中, 主导风向为北向风的有 11 天, 南向风 9 天。

2.2 气溶胶光学特性分析

气溶胶光学参数主要有气溶胶光学厚度、单次散射反照率、Ångström 浑浊度以及 Ångström 波长指数。气溶胶光学厚度是气溶胶对辐射消光能力的反映, 是气候研究中的重要参数之一, 其中 500nm 波段光学厚度定义为浑浊度系数, 1000nm 波段处光学厚度定义为 Ångström 浑浊度。单次散射反照率是气溶胶散射光学厚度与气溶胶总光学厚度的比值, 反映了气溶胶的散射辐射能力。Ångström 波长指数反映了气溶胶粒子的尺度。

2.2.1 气溶胶光学厚度日变化

计算结果表明青岛地区气溶胶光学厚度日差别较大, 以 500nm 波段为例, 日平均气溶胶光学厚度最小值为 0.138, 最大值为 2.073 (图 2.1), 最大值接近于最小值的 15 倍。从各波段光学厚度标准差也可以看出各日气溶胶光学厚度离散度较大, 而且标准差随波长的减小而增大 (表 2.1), 从 1020nm 的 0.242 增大到 340nm

的 0.553。观测期间气溶胶光学厚度日平均值一般在 0.2-0.8 范围内（图 2.2），占 60%，日平均光学厚度大于 1.0 的占 29%。

从图 2.1 可以看出冬季月份光学厚度较小，春夏季节光学厚度相对较大，2003 年春夏季的光学厚度大于 2002 年的光学厚度。统计计算的结果也证实了这一点（表 2.2）。

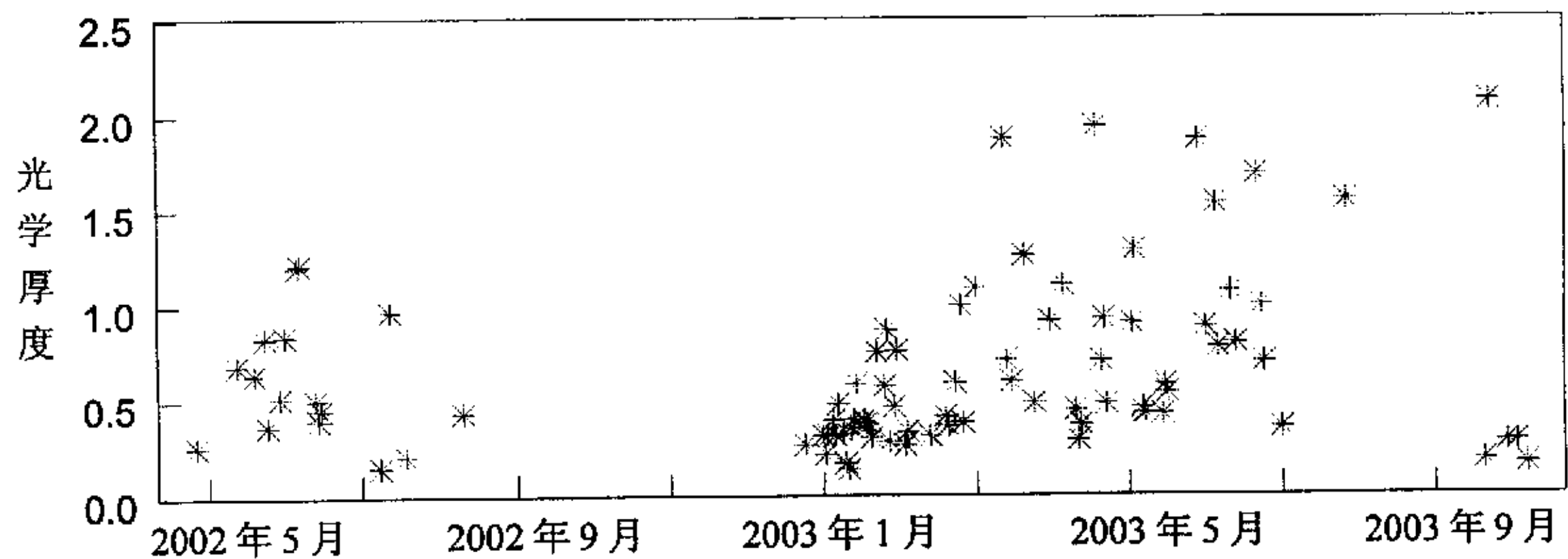


图 2.1 500nm 波段日平均气溶胶光学厚度

表 2.1 各波段气溶胶光学厚度和单次散射返照率的平均值及其标准差

（ $\overline{\tau_\lambda}$ 为光学厚度平均值， $\Delta\tau_\lambda$ 为标准差； $\overline{\omega_\lambda}$ 为单次散射返照率平均值， $\Delta\omega_\lambda$ 为标准差）

波长(nm)	340	380	400	500	675	870	1020
$\overline{\tau_\lambda}$	0.890	0.826	0.794	0.654	0.473	0.351	0.294
$\Delta\tau_\lambda$	0.553	0.528	0.514	0.445	0.343	0.272	0.242
$\overline{\omega_\lambda}$	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93
$\Delta\omega_\lambda$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

表 2.2 气象资料和 500nm 光学厚度的统计平均

时间	资料数	光学厚度		平均风速	南风发生频率	平均相对湿度
		平均值	标准差			
2002 年 4-7 月	15	0.59	0.32	4.75m/s	65%	61%
2003 年 4-7 月	25	0.74	0.49	4.0m/s	76%	67%

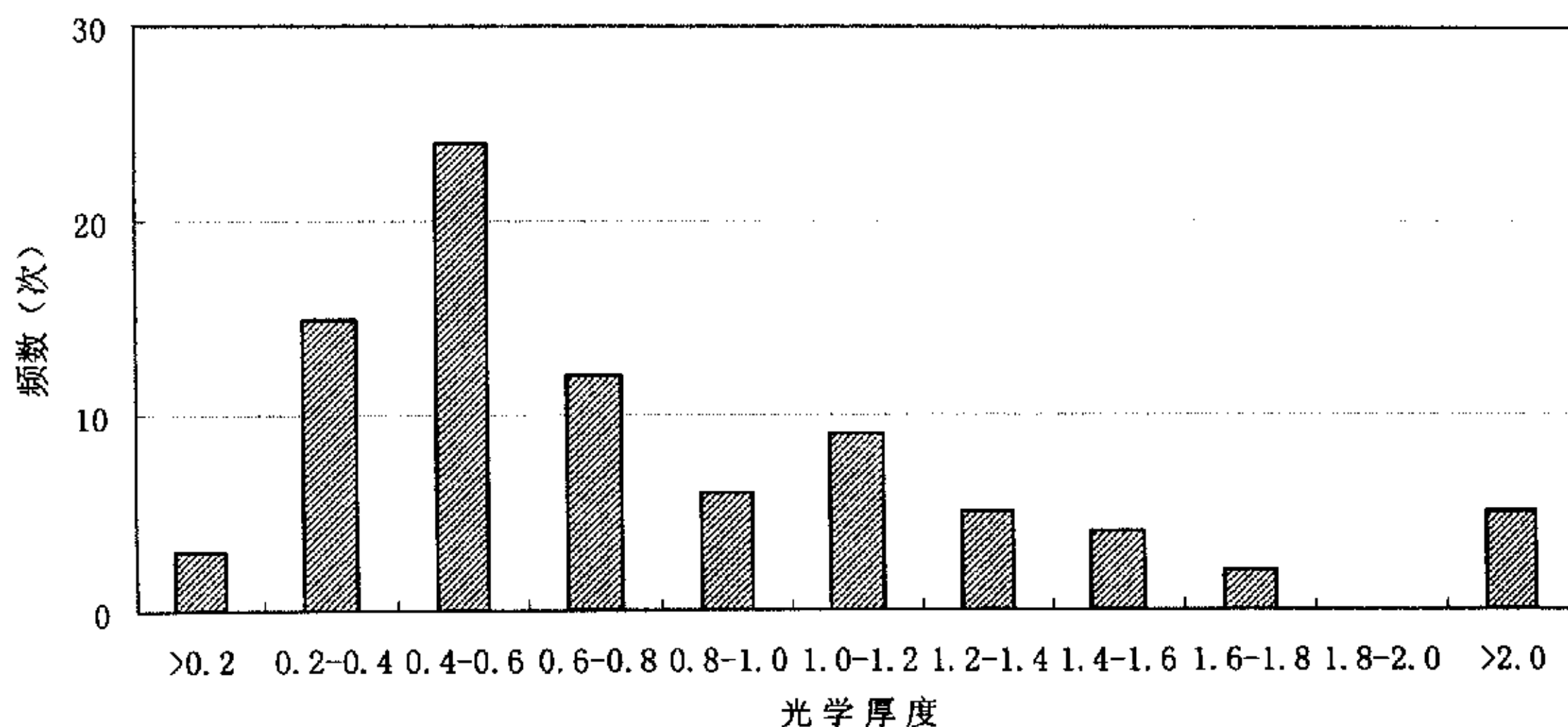


图 2.2 500nm 波段日平均气溶胶光学厚度频数

2.2.2 气象条件对光学厚度的影响

从 2002 年与 2003 年 4 至 7 月的对比结果可以看出 (表 2.2), 气象条件对光学厚度有明显的影响: 南风的盛行有利于气溶胶光学厚度的增大; 空气的相对湿度越大, 气溶胶光学厚度也越大。为了进一步区别不同气象因素对气溶胶光学厚度的影响, 根据地面气象观测资料, 分别统计了不同风向以及不同天气现象下气溶胶光学厚度 (表 2.3a), 结果显示: 气溶胶光学厚度在盛行南风时较大, 而在北风情况下较小; 扣除雾和霾的影响, 气溶胶光学厚度明显减小, 日差别不大 (图略)。盛行北向风时, 各波段平均气溶胶光学厚度明显小于盛行南向风时的光学厚度, 而且波长越小, 差别越大。

表 2.3a 不同天气条件下气溶胶光学厚度

波长(nm)	晴天 (无雾或霾)	北向风	南向风	只出现雾	只出现霾	出现霾和雾
340	0.480	0.632	1.084	1.234	0.671	1.065
380	0.432	0.585	1.008	1.157	0.615	0.99
400	0.410	0.563	0.969	1.116	0.587	0.951
500	0.322	0.465	0.798	0.934	0.467	0.777
675	0.229	0.345	0.573	0.682	0.323	0.541
870	0.175	0.263	0.419	0.502	0.232	0.376
1020	0.152	0.226	0.348	0.416	0.19	0.298

根据主导风向作 500nm 波段日平均气溶胶光学厚度图 (见图 2.3)。从图中可以清楚地看出盛行南风时气溶胶光学厚度较大, 日差别也很明显; 盛行北风时气溶胶光学厚度较小, 一般在 0.1~0.5 之间, 其中出现的两个接近 2 的异常高值分

别是 2003 年 3 月 7 日和 2003 年 4 月 12 日。这两日中 3 月 7 日全日为轻雾天气，能见度较低；4 月 12 日上午是轻雾天气，下午出现浮尘天气。

青岛地区相对湿度较大，多出现轻雾和霾等天气。从表 2.3a 给出的统计结果可以看出，轻雾和霾对青岛光学厚度的贡献较大，而轻雾和霾对气溶胶光学厚度的影响很不同，出现轻雾时气溶胶的光学厚度较大，而霾天的光学厚度相对小些。然而在雾和霾共同出现时，它们对气溶胶光学厚度的影响不是简单的二者迭加的关系。另外，不同的雾天，气溶胶光学厚度差别较大，从 1020nm 到 340nm，标准差在 0.22 到 0.643 之间变化；而霾天光学厚度的日较差相对较小，从 1020nm 到 340nm，标准差在 0.108 到 0.300 之间。这种变化特点与上述不同风向影响下的情形很类似，这说明雾和南风的盛行会引起气溶胶光学特性的复杂变化。

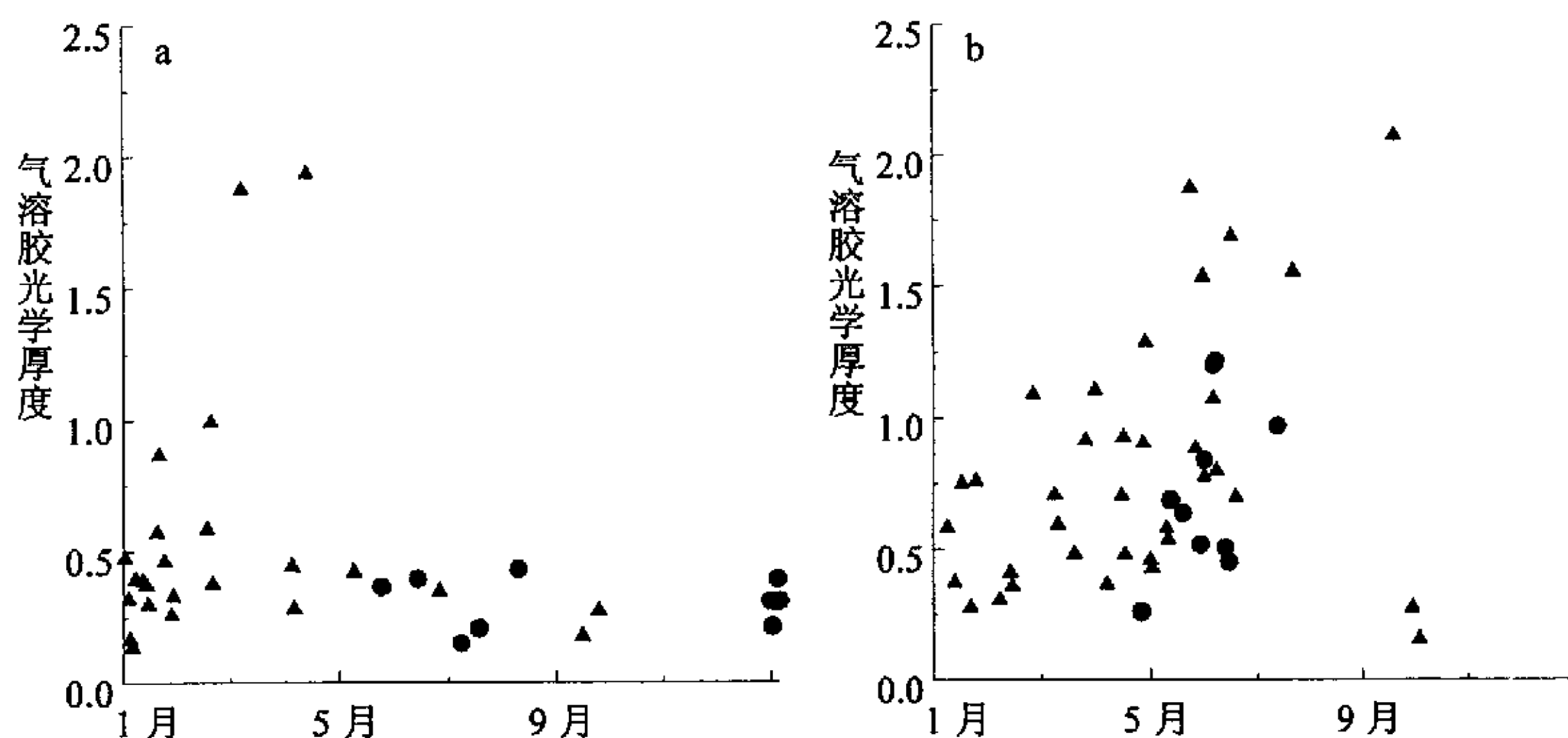


图 2.3 500nm 波段日平均气溶胶光学厚度

a.盛行北向风, b.盛行南向风; ● 2002 , ▲ 2003

进一步分析气象条件对气溶胶光学厚度的影响（表 2.3b）发现，同时出现南风 and 雾的天气时，气溶胶光学厚度相对较大，无雾的北风天气，气溶胶光学厚度相对较小。通过与表 2.3a 比较发现，在无雾天气，风向差别所引起的气溶胶光学厚度的差别较有雾的天气小得多。

南向风从海上吹来，空气湿度相对较大，轻雾天气比霾天气湿度大，因此天气和风向的转变引起气溶胶光学厚度的变化与大气湿度有关。计算得到观测期间 500nm 波段日平均气溶胶光学厚度与日平均相对湿度的相关系数为 0.569，在 0.01 的信度要求下，通过显著性检验。图 2.4 给出了相对湿度与 500nm 波段光学厚度

和单次散射反照率的关系。从图中也可以看出相对湿度的加大往往引起较大的光学厚度。在相对湿度大于 60% 时, 青岛气溶胶光学厚度一般大于 0.5, 而相对湿度小于 60% 时的光学厚度一般小于 0.5。

表 2.3b 不同天气条件下气溶胶光学厚度

波长(nm)	雾、南向风	雾、北向风	无雾、北向风	无雾、南向风
340	1.183	0.741	0.403	0.573
380	1.105	0.690	0.364	0.514
400	1.064	0.664	0.346	0.487
500	0.883	0.554	0.276	0.379
675	0.641	0.412	0.201	0.264
870	0.472	0.313	0.156	0.198
1020	0.393	0.267	0.137	0.171

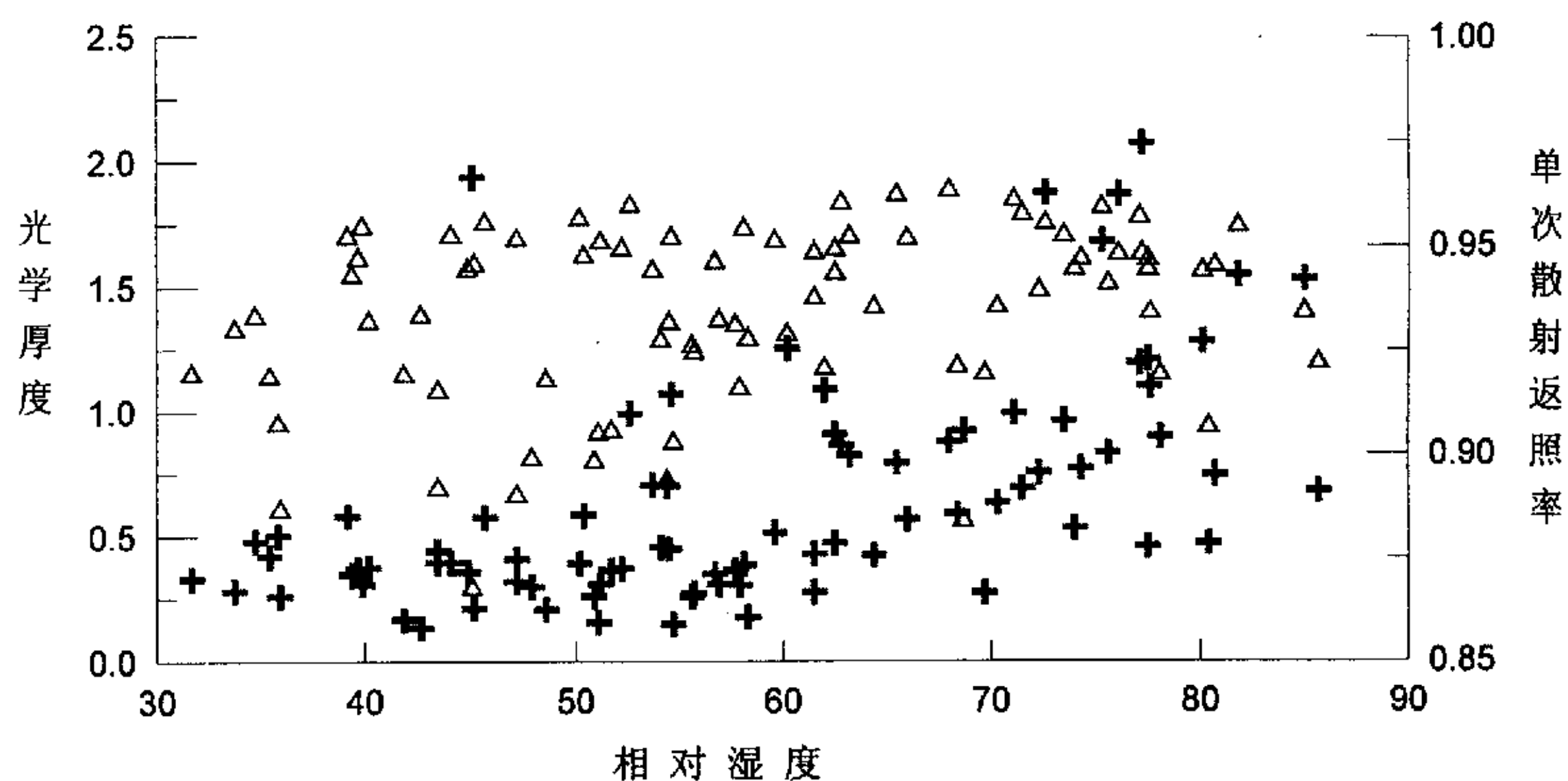


图 2.4 500nm 波段光学厚度和单次散射反照率与相对湿度的关系

(+ 气溶胶光学厚度, Δ 单次散射反照率)

2.2.3 气溶胶单次散射返照率

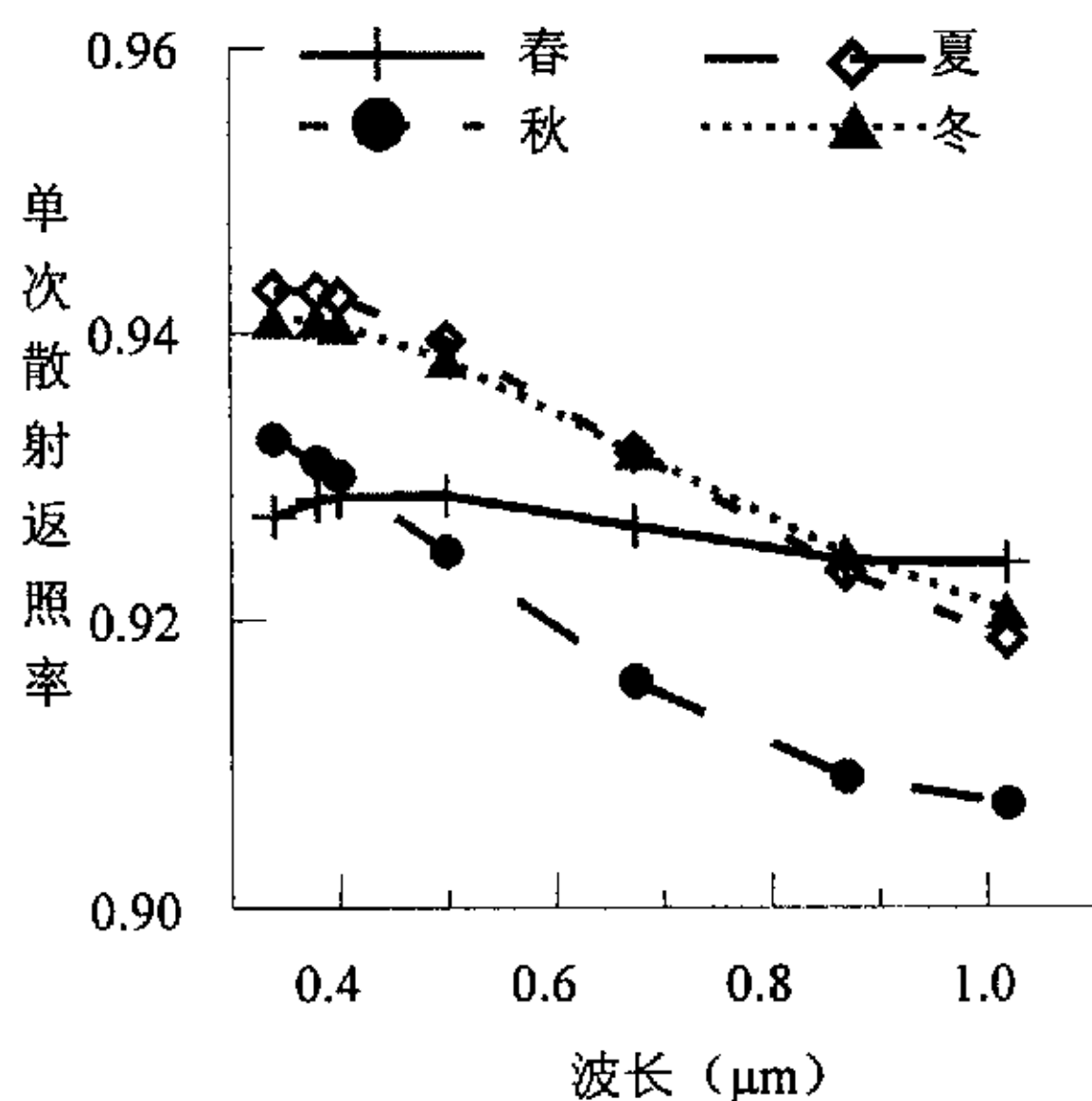


图 2.5 季节平均单次散射返照率随波长的变化

辐射, 气溶胶粒子在夏季散射能力最强, 春季散射能力最弱; 对波长大于 1000nm 波段的辐射, 春季气溶胶质粒散射能力较强。

根据前面对气象条件的分类, 分析不同气象条件对气溶胶单次散射返照率的影响 (图 2.6)。从图中可以看出气象条件对单次散射返照率有明显影响, 并且对不同波段的辐射, 影响程度也不同: 单次散射返照率在有雾或霾情况下高于无雾或霾的情况; 单次散射返照率在盛行北风时低, 盛行南风时高; 对波长小于 500nm 波段的辐射, 南北风向的转换对气溶胶粒子的散射辐射能力影响较小; 当波长大于 500nm 时, 盛行北风时的单次散射返照率明显低于盛行南风的情况; 对于波长小于 500nm 的辐射, 霾的散射能力雾比强, 对于波长在 500~1000nm 波段的辐射, 雾与霾的散射辐射能力相差不大, 当波长大于 1000nm 时, 雾的散射能力超过了霾。

500nm 波段单次散射返照率与相对湿度的相关系数为 0.288, 在 0.05 的信度要求下, 通过显著性检验, 但相关关系不似相对湿度与光学厚度明显 (图 2.3)。

太阳辐射通过地球大气时受到气溶胶粒子的散射和吸收作用, 单次散射返照率是气溶胶散射消光系数与总消光系数的比值, 反映了气溶胶粒子的散射辐射能力。从表 2.1 可以看出在短波到近红外波段, 气溶胶的消光能力中, 散射消光起主导作用, 占 90%以上。不同季节, 散射消光能力不同, 且随着波长的增长呈递减趋势 (图 2.5), 而春季气溶胶在各波段的散射消光能力相差不大; 对波长小于 500nm 波段的

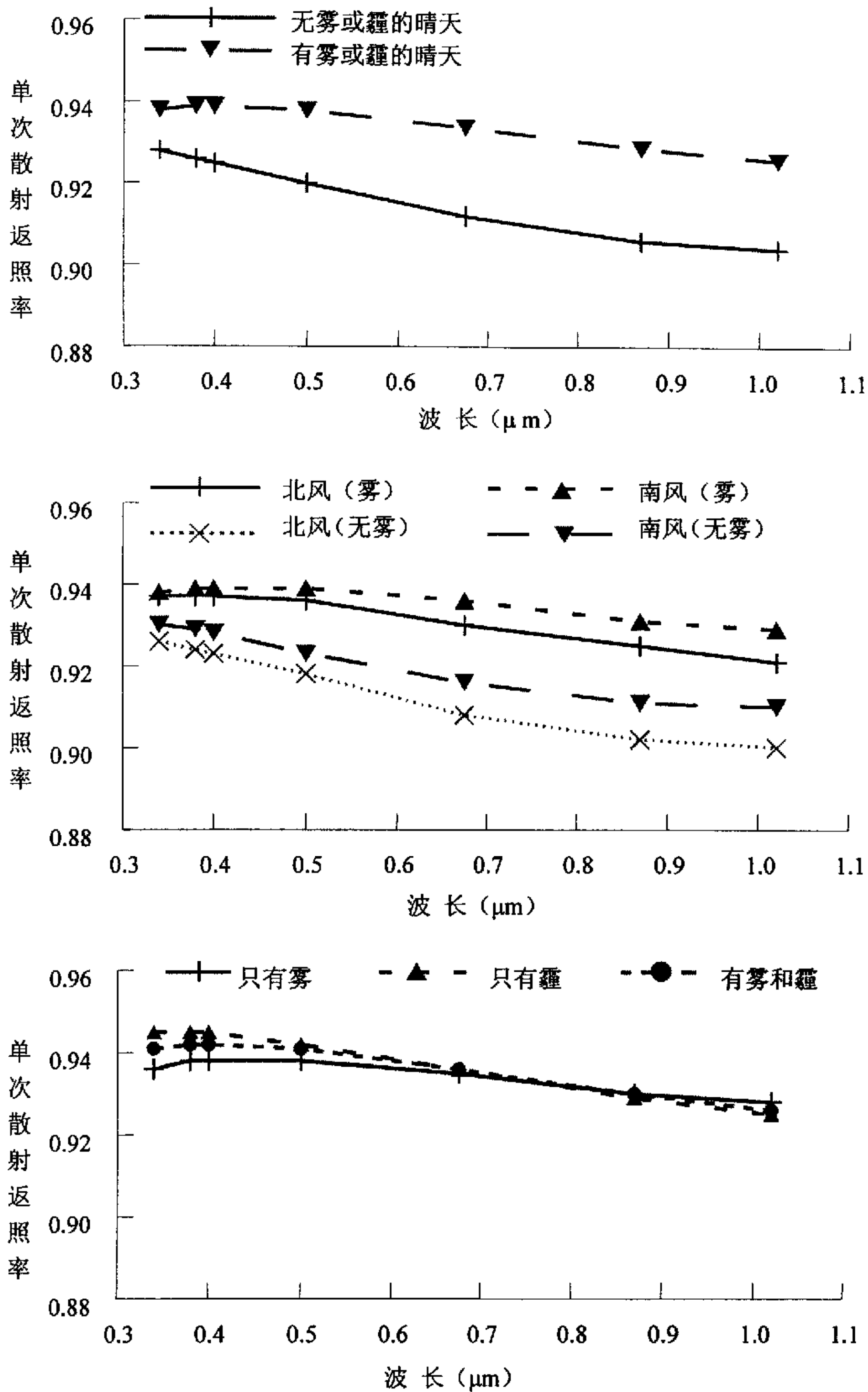


图 2.6 不同气象条件下各波段单次散射返照率

2.2.4 Ångström 浑浊度与波长指数

从 85 天的观测资料中按季节任意选取一天, 作光学厚度与波长之间的关系,

如图 2.7 所示。从图中可以看出，在对数坐标中，7 个波段的 $\tau_a(\lambda)$ 值近似成一条直线，即近似满足 $\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$ 的关系。其中 α 为 Ångström 波长指数，反映大气中气溶胶粒子的尺度， α 值越大，表示大气中小粒子占优势，当粒子尺度接近于大气分子时， α 接近于 4； β 为 Ångström 浑浊度， β 实际上是波长为 $1\mu\text{m}$ 处整层大气柱的气溶胶光学厚度。从统计学角度来看， α 和 β 满足 $\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$ 的关系必须保持数据的相关系数大于一定水平。选取信度为 0.01，使用 t 检验方法计算观测时刻的波长与光学厚度之间 t 检验值 ($n=7$)，其中最小检验值为 4.2008，查阅 t 分布表得 $t_{\alpha/2}(n-2) = 3.3649$ ，即观测期间的光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 与波长 λ 之间的相关关系满足置信要求。500nm 波段观测光学厚度与根据 $\tau_a(\lambda)$ 与 λ 关系计算得到的 500nm 波段光学厚度的关系(图略)具有很好的相关性，拟合直线斜率接近于 1。

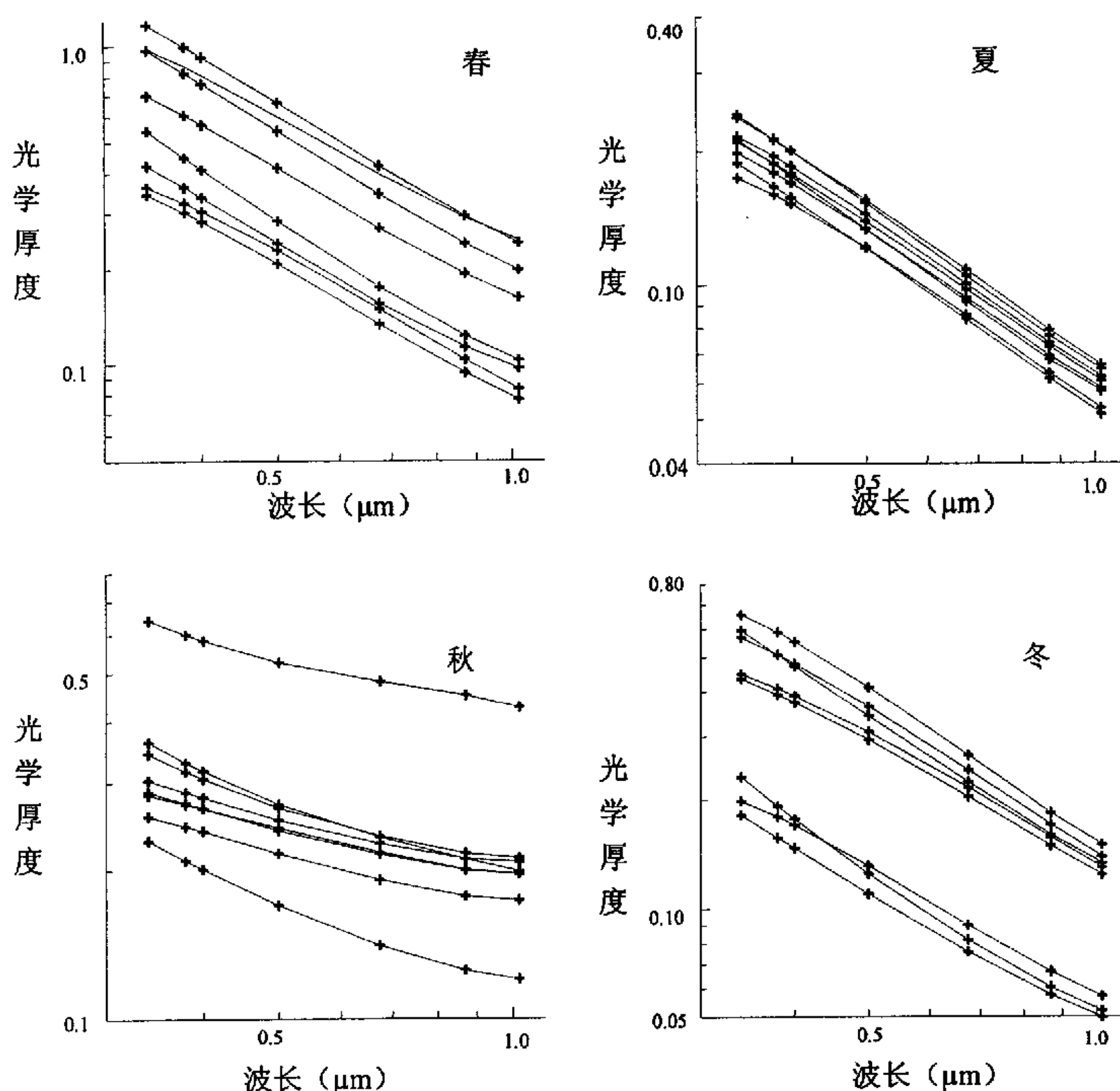
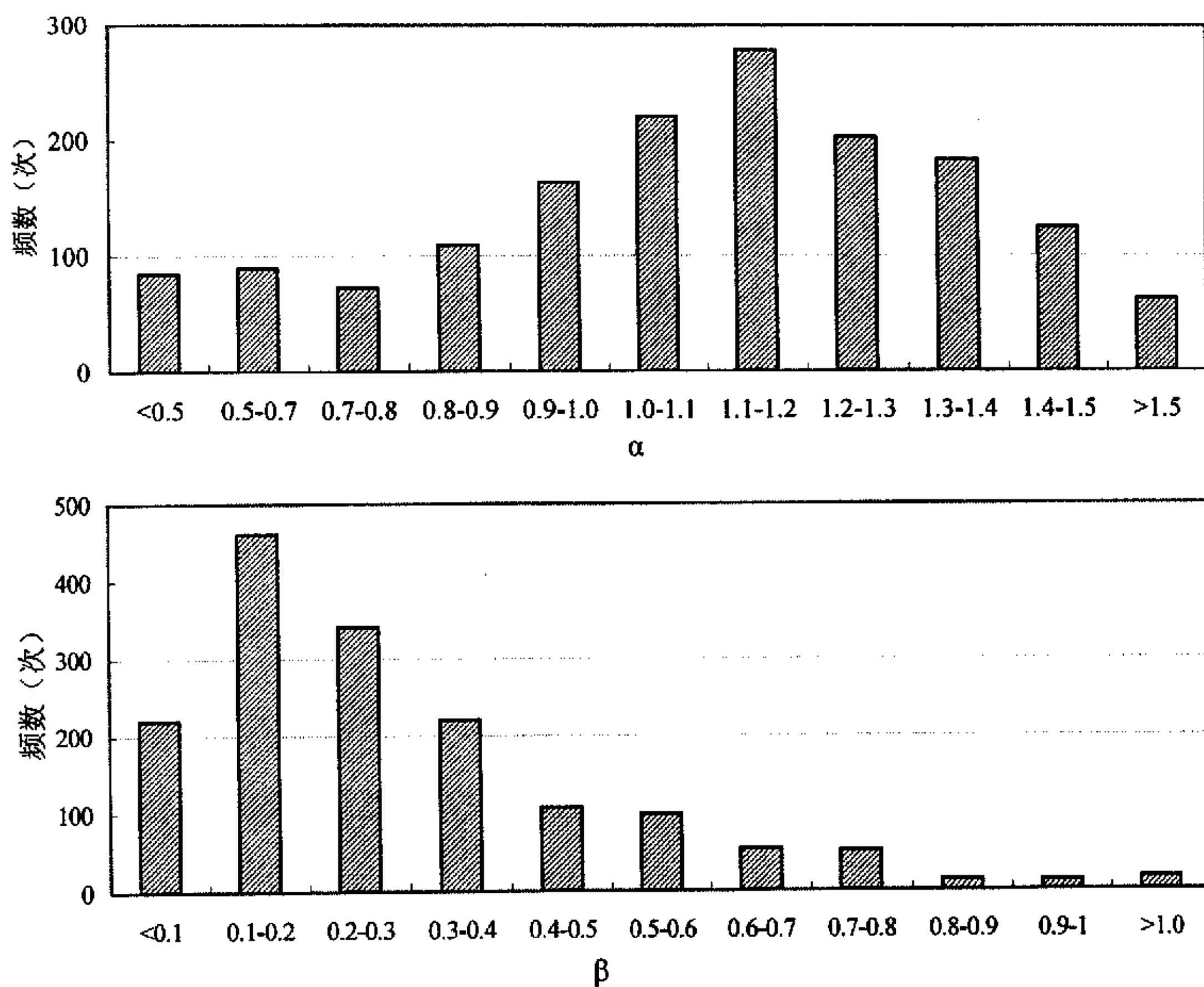
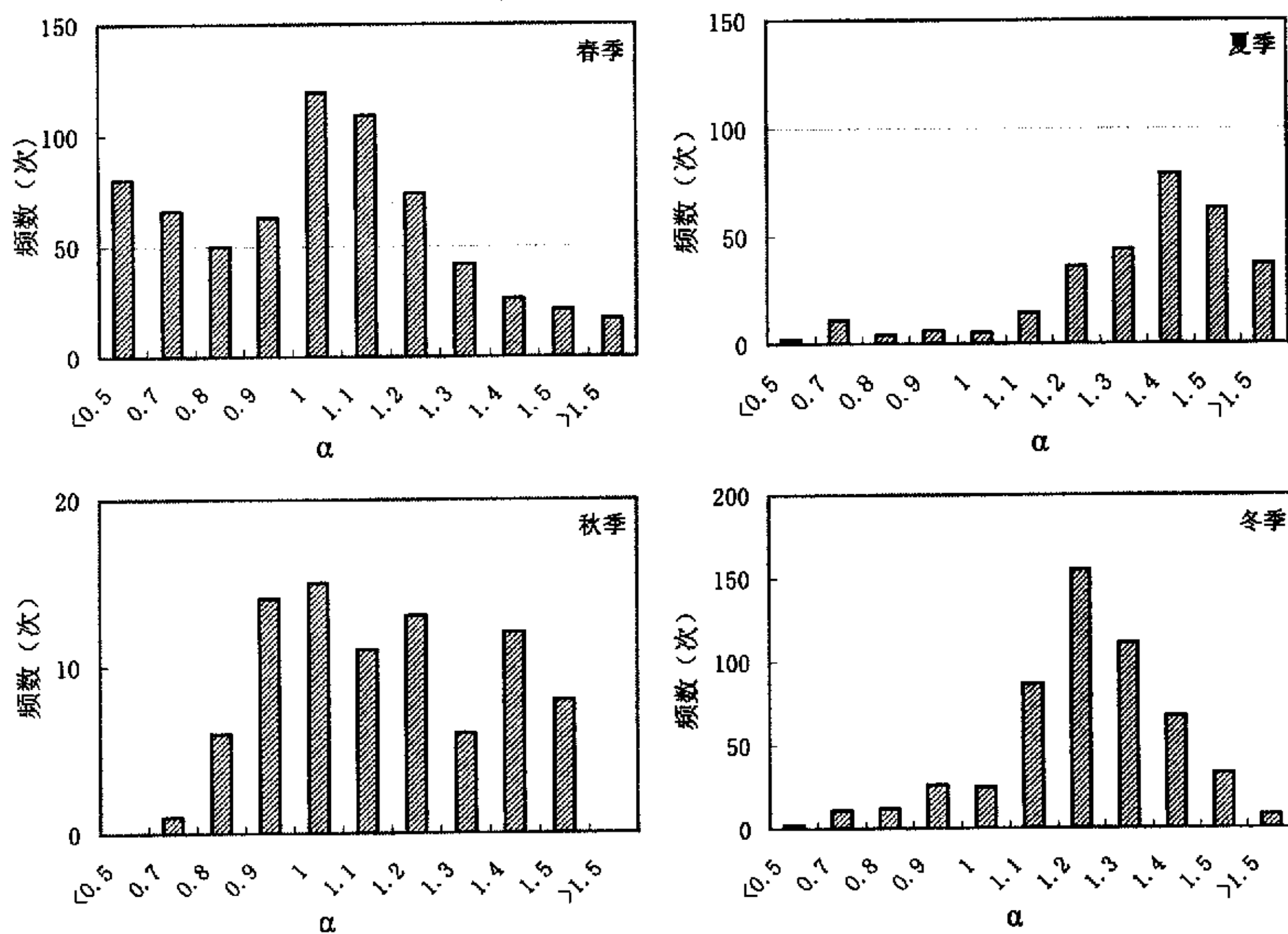
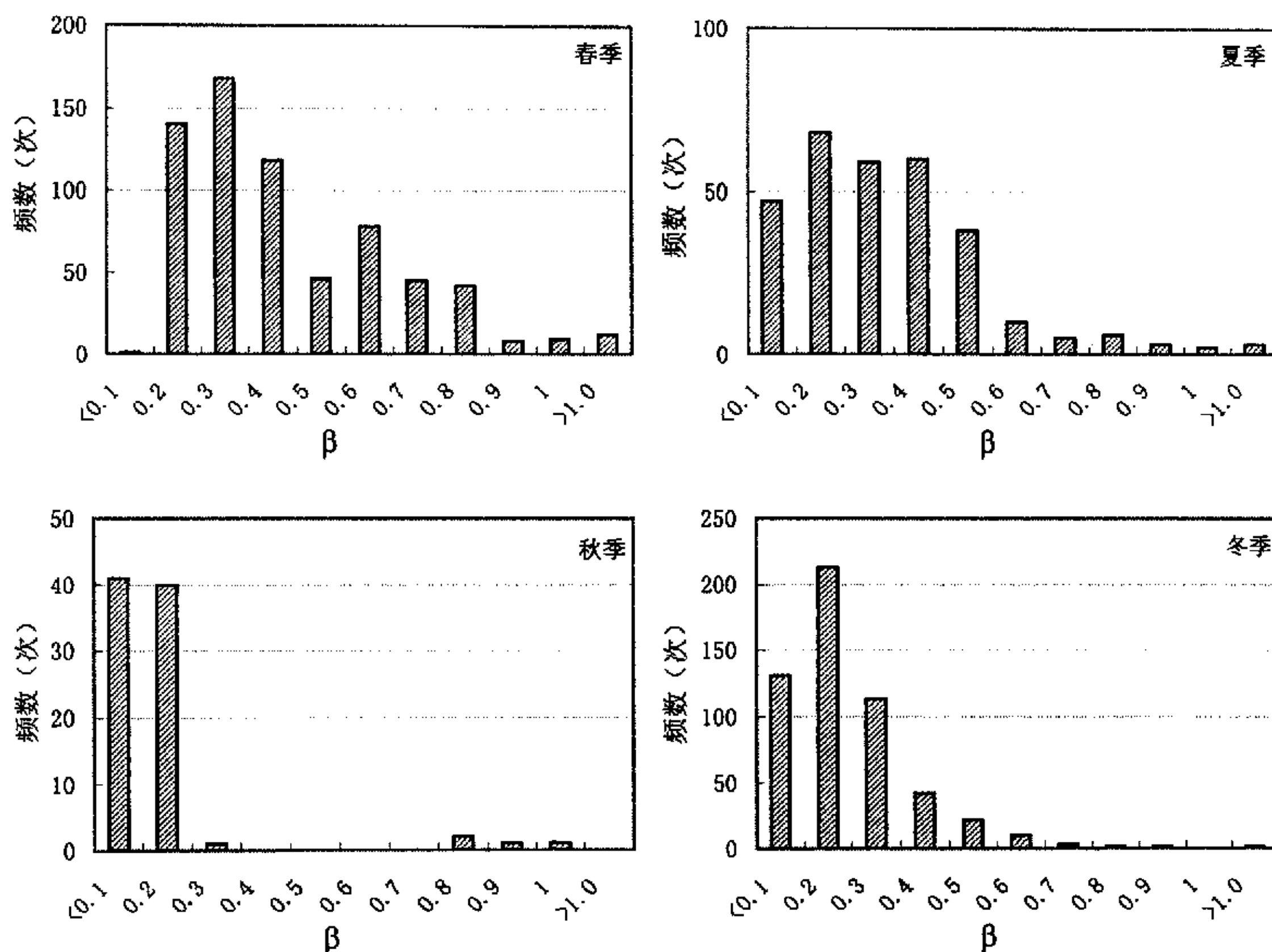


图 2.7 气溶胶光学厚度 $\tau(\lambda)$ 与波长 λ 之间关系图

图 2.8 逐次观测 α 、 β 频数图图 2.9 不同季节逐次观测 α 频数图


 图 2.10 不同季节逐次观测 β 频数图

利用 7 个波段的气溶胶光学厚度与波长之间的关系, 采用最小二乘法可以计算出 α 和 β 。观测期间 α 和 β 值出现频次如图 2.8 所示, 从图中可以看出青岛波长指数 α 主要出现在 0.9~1.4 范围内, 浑浊度 β 值一般小于 0.3。为进一步分析图 α 和 β 值出现的频次, 根据春夏秋冬四个季节分别作不同季节 α 、 β 频数图 (图 2.9 和图 2.10, 图中横坐标 α 和 β 的取值范围同图 2.8)。图 2.9 显示春秋季节 α 频次分布呈多峰型, 夏冬季节呈单峰型, 峰值分别出现在 1.4 和 1.2, 即春秋季节粒子尺度分布较丰富, 夏冬季节粒子尺度分布相对单一。这一结果与后文分析的质量浓度谱分布具有一定差别, 详见第四章。从图 2.10 可以看出秋冬季节大气浑浊度较小, 一般小于 0.3, 春夏季节较大浑浊度的出现频次较多。

为进一步分析 Ångström 波长指数和浑浊度, 给出 α 和 β 的季节平均值以及不同天气和风向情况下的平均值 (表 2.5)。从表中可以看出与前文分析一致的结果: 冬季的浑浊度较小, 秋季次之, 春季较大; 波长指数夏季较大, 春季较小, 说明春季粒子分布中大粒子较多, 夏季粒子分布中小粒子占优势。

表 2.5 α 、 β 的平均值

	北向风				南向风				天气	
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	晴天无雾和霾	晴天
α	0.925	1.179	1.296	1.154	0.935	1.278	1.037	1.171	1.074	1.085
β	0.338	0.129	0.091	0.172	0.396	0.408	0.348	0.246	0.154	0.309

比较晴天与晴天无雾或霾，以及盛行南向风与北向风时的 α 和 β 可以看出，没有雾或霾影响时，Ångström 浑浊度减小一倍；盛行北向风时，Ångström 浑浊度也明显小于盛行南向风时的浑浊度，这与前文分析光学厚度的结论一致。而波长指数受风向以及天气状况的影响较小。

2.3 小结和讨论

本章主要利用多波段光度计观测的太阳直接辐射和散射辐射资料，计算了青岛地区气溶胶光学厚度、单次散射反照率以及 Ångström 浑浊度和波长指数，分析研究了青岛地区气溶胶光学特性及其与气象条件的关系，研究结果表明：

(1) 青岛地区气溶胶光学厚度的日差别较大，这种较大的日差别与天气和风向的转变有关：扣除雾或霾的影响，青岛气溶胶光学厚度以及光学厚度的日差别明显减小；盛行南风时，气溶胶光学厚度较大，日差别明显，而盛行北风时光学厚度较小，日差别不大；轻雾和霾光学厚度在青岛气溶胶光学厚度中占有较大比重，轻雾的贡献又比霾大；

(2) 光学厚度与相对湿度之间具有正相关关系，相关系数为 0.569，通过信度 0.01 的显著性检验；在相对湿度大于 60% 时，光学厚度一般超过 0.5，在相对湿度低于 60% 时，光学厚度一般小于 0.5；

(3) 单次散射反照率具有明显的季节变化，各波段的季节变化有所不同：在波长小于 500nm 时，单次散射反照率是夏季较高，春季较低；在波长大于 1000nm 时，单次散射反照率在春季较高；春季气溶胶在各波段的散射消光能力相差较小；

(4) 气象条件对单次散射反照率影响明显，在有雾或霾情况下单次散射反照率较无雾或霾的情况下高，盛行北风时的单次散射反照率明显低于盛行南风的情况；

(5) 青岛地区波长指数 α 主要出现在 0.9~1.4 范围内，浑浊度 β 值一般小于 0.3；波长指数与浑浊度具有明显的季节变化特征，波长指数在春秋季节频次分布

呈多峰型，夏冬季节呈单峰型；大气浑浊度是秋冬季节较小，一般小于 0.3，而春夏季节较大浑浊度的出现频次较多。

(6) 浑浊度受风向的转变以及天气状况的影响明显，而波长指数在不同风向和天气状况下变化较小：浑浊度在盛行南向风时明显大于北向风，没有雾或霾的影响下，浑浊度减小一倍。

青岛三面环海，海盐气溶胶对青岛大气气溶胶贡献具有季节季节差异^[29]，并且对不同粒径范围的粒子，海盐源的影响也不同^[36]。另外，在青岛，雾的生消及滴谱具有很强的时空变化^[37, 38]，这些可能是引起青岛气溶胶光学特性复杂变化的主要因素。

3 青岛地区气溶胶粒子谱研究

本章根据 TSP (Total suspended particulate, 总悬浮颗粒物) 和分级采样得到的质量浓度资料, 以及由辐射观测反演得到的气溶胶体积谱资料, 分析了青岛地区的气溶胶粒子谱变化情况以及气象条件对谱分布的影响; 结合第三章气溶胶光学厚度资料, 研究了不同模态粒子消光能力的差异。

3.1 气溶胶采样

3.1.1 Andersen 分级采样

撞击式气溶胶粒子采样原理是携带质粒的气流通过采样仪器时, 质粒由于惯性撞击在不透气的收集片上而被附着, 空气则绕过收集片 (图 3.1)。为了防止质粒撞击弹离和被气流带走, 收集片表面涂有粘性材料。

采样器上端为样本空气入口, 气流依次通过一系列直径逐步减小的圆孔网, 正对圆孔网为收集片, 收集片离孔的距离等于圆孔半径。质粒在随气流行进中, 大质粒因其惯性大, 首先撞击第一级收集片并被粘住, 其它质粒随绕行气流进入第二级, 因第二级孔径较小, 气流加速, 使另一批较大质粒因惯性撞击第二级收集片而被粘住, 以此类推, 直到最小一批质粒被抽吸泵前的滤膜所收集。收集片放置在金属托盘上以增加其机械强度。

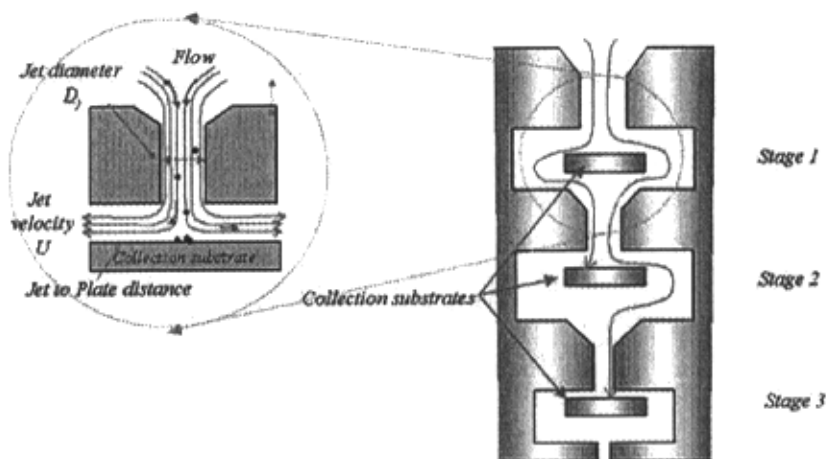


图 3.1 气溶胶分级采样原理示意图

撞击收集效率 E 取决于质粒的空气动力学直径 d_{ac} 、质粒密度 ρ_p 、气流速度

V 、空气粘滞系数 η 以及采样器管嘴直径 D_b , 收集效率 E 可写为

$$E = \frac{d_{ac}^2 V \rho_p}{18 \eta D_b}$$

本文使用的采样仪器为日本柴田公司生产的 Andersen 低流量撞击式分级粒子取样器 (AN-200)。采样器入口处维持恒定的流量, 流量为 28.3L/min, 收集的气溶胶样品分 9 级, 粒子空气动力学等效直径范围在 11~0.43 μm 之间 (具体分级范围见表 3.1)。采样器最后两级使用 2500QAT-UP 石英膜, 其它 7 级采用 PF050 聚四氟乙烯膜。

表 3.1 Anderson 分级采样器分级说明

0	1	2	3	4	5	6	7	8
>11 μm	7.0~ 11 μm	4.7~ 7.0 μm	3.3~ 4.7 μm	2.1~ 3.3 μm	1.1~ 2.1 μm	0.65~ 1.1 μm	0.43~ 0.65 μm	<0.43 μm

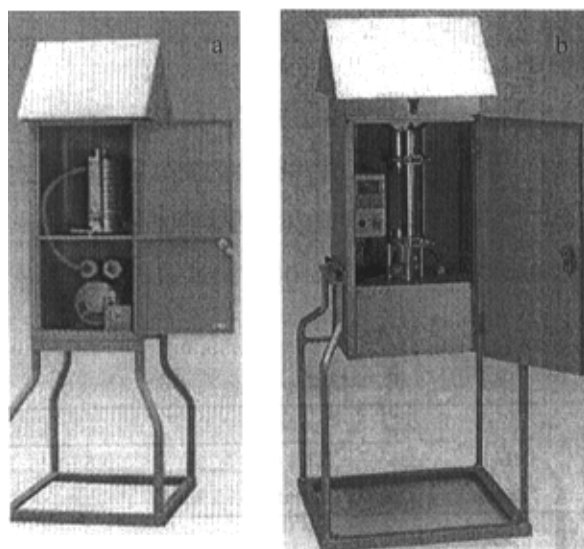
3.1.2 TSP 采样

TSP 采样由日本柴田公司提供的大流量空气采样仪 (HV-1000F) 完成, 流量为 1000L/min., 使用 PF040 聚四氟乙烯膜收集样品。采样时, 将采样滤膜固定在网状支架上置于抽气泵的进气口, 工作中, 大气气体成分通过滤膜而将大气中的颗粒物分离出来收集在滤膜上。

3.1.3 采样时间与地点

Andersen 分级和 TSP 大流量采样仪器安装在中国海洋大学校园内八关山 (120°20.134'E, 36°3.809'N), 海拔高度约 77m。该采样点东临黄海, 南面胶州湾, 视野开阔, 人为影响少。采样时间从 2001 年 5 月至 2003 年 5 月, 共 25 个月。Andersen 分级资料每个月取样 2 次, 共获得 51 组 455 个样品。HV 大流量资料在 2001 年 5 月至 2002 年 5 月期间每月采集 3~4 个样品, 2002 年 6 月至 2003 年 5 月每月采集 2 个样品。共得到 TSP 大流量资料 64 个。采样连续进行, 采样时间一般为 3~4 天, 并尽量避开雨天和大雾天气。采样前后将滤膜保存在装有硅胶的干燥器中, 待状态稳定后用电子天平称重, 天平的称重精度为万分之一克。采样前后滤膜的质量差即为气溶胶样品的质量, 将得到的气溶胶质量除以采样总体积 (采样时间与流量的乘积) 得到气溶胶质量浓度。

为防止较大颗粒由于重力自然沉降在滤膜上, 以及飞禽昆虫的干扰, HV-1000F 和 AN-200 采样仪器放置在四周通风的房状保护罩内, 如图 3.2 所示。



a. AN-200

b. HV-1000F

图 3.2 分级采样与大流量采样仪器图

3.2 体积谱资料

利用太阳光度计观测的直接太阳辐射和散射太阳辐射资料反演得到体积谱，具体方法见第二章。与第三章分析青岛地区光学特性相似，选取晴天资料进行分析。

3.3 结果分析

3.3.1 气溶胶质量浓度分析

3.3.1.1 TSP 质量浓度的季节变化

近两年的连续观测结果显示，青岛地区气溶胶质量浓度冬季月份明显高于其他月份，年平均 TSP 含量为 0.148 mg/m^3 ，优于国家空气质量二级标准（空气质量分级标准见附录）。64 次观测结果如图 3.3 所示，从图中可以看出青岛 TSP 质量浓度日平均状况一般低于 0.3 mg/m^3 ，优于国家二级标准（TSP 日平均浓度小于 0.3 mg/m^3 ）。其中 64 次观测中，优于国家环境空气质量一级标准(0.12 mg/m^3)的有 33 次，占一半，超过国家三级标准 (0.5 mg/m^3) 的只有一次，是由于 2002 年 3 月 21~23 日的沙尘暴过程影响。这次沙尘天气过程中，青岛气溶胶 TSP 浓度比平时增加了 4.1 倍^[39]。另一接近 0.5 mg/m^3 的高值也是由沙尘暴天气引起的（2002 年 3 月 15~17 日），这一沙尘暴过程强度较 3 月 21~23 日的沙尘暴过程弱，影响

小。

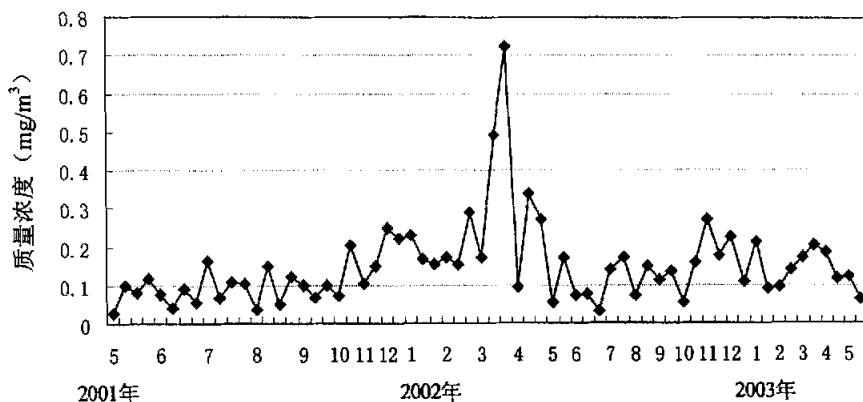


图 3.3 TSP 质量浓度图 (2001 年 5 月到 2003 年 5 月)

不考虑沙尘天气的影响, 从图 3.3 还可看出冬季月份的 TSP 质量浓度明显高于其它月份, 而夏季月份的浓度一般较低。TSP 质量浓度的季节平均分别 0.143 mg/m^3 (春)、 0.093 mg/m^3 (夏)、 0.130 mg/m^3 (秋)、 0.178 mg/m^3 (冬), 冬季的 TSP 质量浓度接近于夏季的两倍。青岛从 11 月中旬进入冬季开始燃煤供暖到次年 3 月, 燃煤排放出的污染物增加了大气中气溶胶的含量, 另一方面, 冬季气温较低, 混合层不高, 污染物不易扩散而在近地层堆积; 而夏季降水增多, 由于雨水的冲刷, 气溶胶浓度明显降低。这种自然的季节变化以及冬季集中燃煤供暖是形成青岛气溶胶 TSP 质量浓度季节变化的主要原因。

3.3.1.2 气溶胶质量浓度谱分布

从季节平均气溶胶质量浓度的谱分布 (图 3.4a) 来看, 春季谱分布呈单峰型, 峰值粒径在 $3.3\text{-}7.0\mu\text{m}$, 夏秋冬三季节呈双峰型, 夏季峰区位于 $3.3\text{-}7\mu\text{m}$ 和 $0.43\text{-}0.65\mu\text{m}$, 秋季峰区位于 $4.7\text{-}7.0\mu\text{m}$ 和 $0.65\text{-}1.1\mu\text{m}$, 冬季的峰值区在 $4.7\text{-}7.0\mu\text{m}$ 和 $0.43\text{-}0.65\mu\text{m}$ 。这与典型城市的气溶胶质量谱具有三峰特征^[40]存在差异, 原因可能在于采样器不能分级采集粒径大于 $11.0\mu\text{m}$ 的粒子, 另外, 由于采样器分级有限, 难以刻画粒子谱分布的详细信息。

比较各级季节平均质量浓度还可以看出春季粗粒子 ($3.3\text{-}7.0\mu\text{m}$) 浓度高于其他季节, 冬季粒径小于 $2.1\mu\text{m}$ 的粒子浓度很高。一般情况下燃煤产生的粒子集中在小于 $1\mu\text{m}$ 的区域; 汽车尾气产生的粒子则集中在粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的范围; 土壤粒子的粒径一般大于 $2\mu\text{m}$ ^[41]。因此, 春季的粗粒子峰值主要是由浮尘等土壤粒子

引起，冬季较高的小粒子浓度主要是由燃煤供暖和汽车尾气造成。

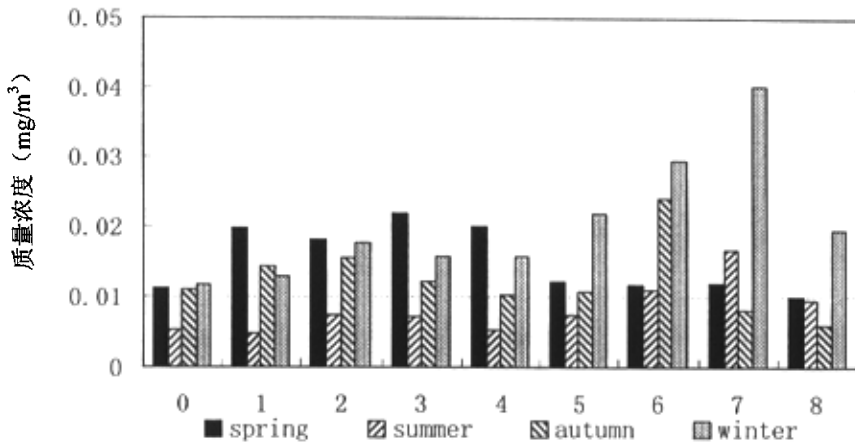


图 3.4a 季节平均气溶胶质量浓度谱（图中横坐标为分级序号）

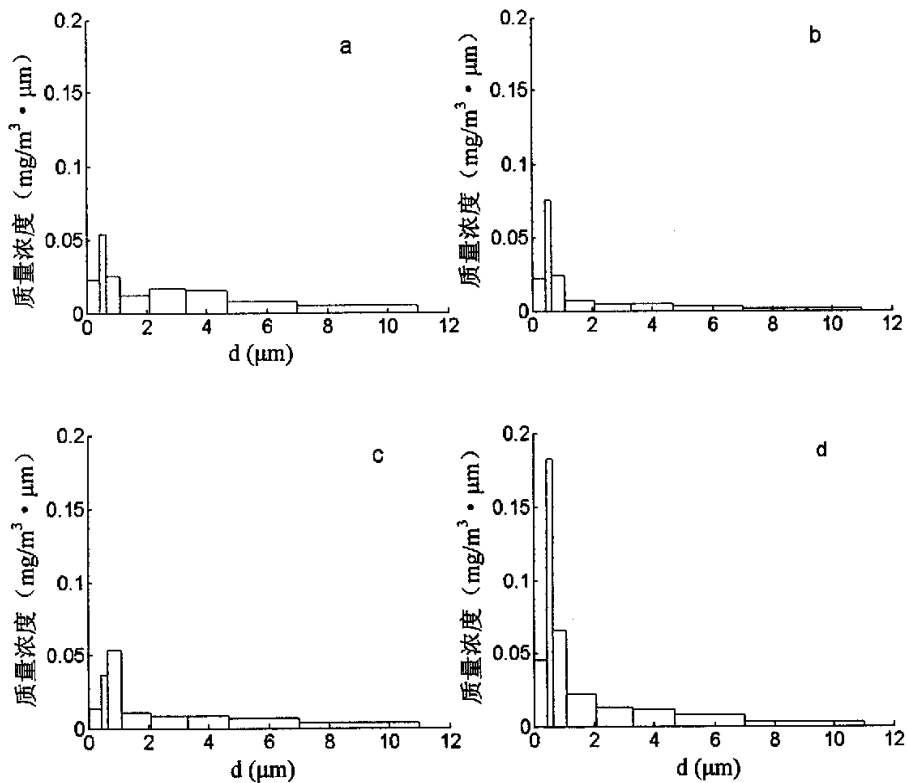


图 3.4b 季节平均气溶胶质量浓度谱（a.春季、b.夏季、c.秋季、d.冬季）

图 3.4a 给出的是各采样级粒子的质量浓度，其质量浓度值决定于尺度间隔的

宽度,该图难以显示质粒的真实分布,而且 Andersen 分级采样器的分级尺度间隔并不均匀,为此对分级资料进行归一化处理,将各级质量浓度除以相应分级尺度间隔,此时纵坐标变为单位尺度间隔的质量浓度(图 3.4b),相应于不同尺度宽度可作比较,而且每一直方的面积均与该尺度范围的质量浓度成比例。图 3.4b 显示对尺度间隔进行归一化后,各个季节细粒子的浓度明显高于粗粒子浓度,即在相同的尺度间隔下,各季节均是细质粒含量较高。从图中还可以看出春季粒子半径大于 $2\mu\text{m}$ 的粗粒子明显高于其他季节,而冬季细粒子的浓度是其它季节的 3 倍左右。另外,图 3.4b 还显示出秋季峰值粒子的半径较其他季节大。

3.3.2 体积浓度谱分析

采用撞击式粒子采样器收集到的气溶胶粒子分级较粗,很难详细刻画气溶胶粒子的尺度分布信息。利用太阳光度计观测得到的散射辐射信息可以反演得到粒径范围从 $0.012\mu\text{m}$ 到 $16.54\mu\text{m}$ 20 级的整层气柱气溶胶谱资料(图 3.5)。资料显示整个气柱粒子分布呈多峰型,各季节三个一致的峰值分别位于 $0.2-0.3\mu\text{m}$ 、 $1-2\mu\text{m}$ 以及 $3-7\mu\text{m}$ 。在粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 时,春夏秋季节存在一弱峰,冬季则没有。春季粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的粒子体积浓度明显高于其他季节,而粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子体积浓度冬季较低。这与前文分析气溶胶质量浓度的分布存在差别,这是因为分级采样器采集的是近地层的粒子,而光度计观测的是大气柱的粒子散射信息,反演出的粒子体积谱代表了整层大气的状况。

Whitby 将气溶胶按粒子尺度分成三个模态,即核模态($r < 0.05\mu\text{m}$)、积聚模态($0.05 < r < 1.0\mu\text{m}$)和粗模态($r > 1.0\mu\text{m}$)^[1]。以此模态划分,比较各季节体积浓度(图 3.6),结果显示,积聚模态粒子浓度随季节呈递减趋势,核模态粒子浓度秋季较高,冬季较低,粗模态粒子浓度是春季明显高于其他季节,秋季最低。各季节中都是核模态粒子体积浓度最小,粗模态粒子浓度较高。总粒子浓度春季较高,其它季节相差不大。表 3.2 给出各模态粒子的百分比,在春季和冬季的粒子总体积中,粗模态粒子占一半以上,各季节积聚模态的粒子在总体积浓度中的百分比相差不大,核模态粒子秋季百分比比较高,冬季较低。粒子模态的这种季节分布与第三章分析波长指数 α 有相似之处,也存在一定的差别。相似之处在于春季 α 指数较小,即大粒子比重较大,差别在于夏季 α 值较秋季大,但细粒子($r < 1\mu\text{m}$)所占比例较秋季低 11 个百分点。造成这种差别可能原因是 α 只是粒子尺度分布的粗

略判断，难以对粒子的谱分布进行详细刻画。

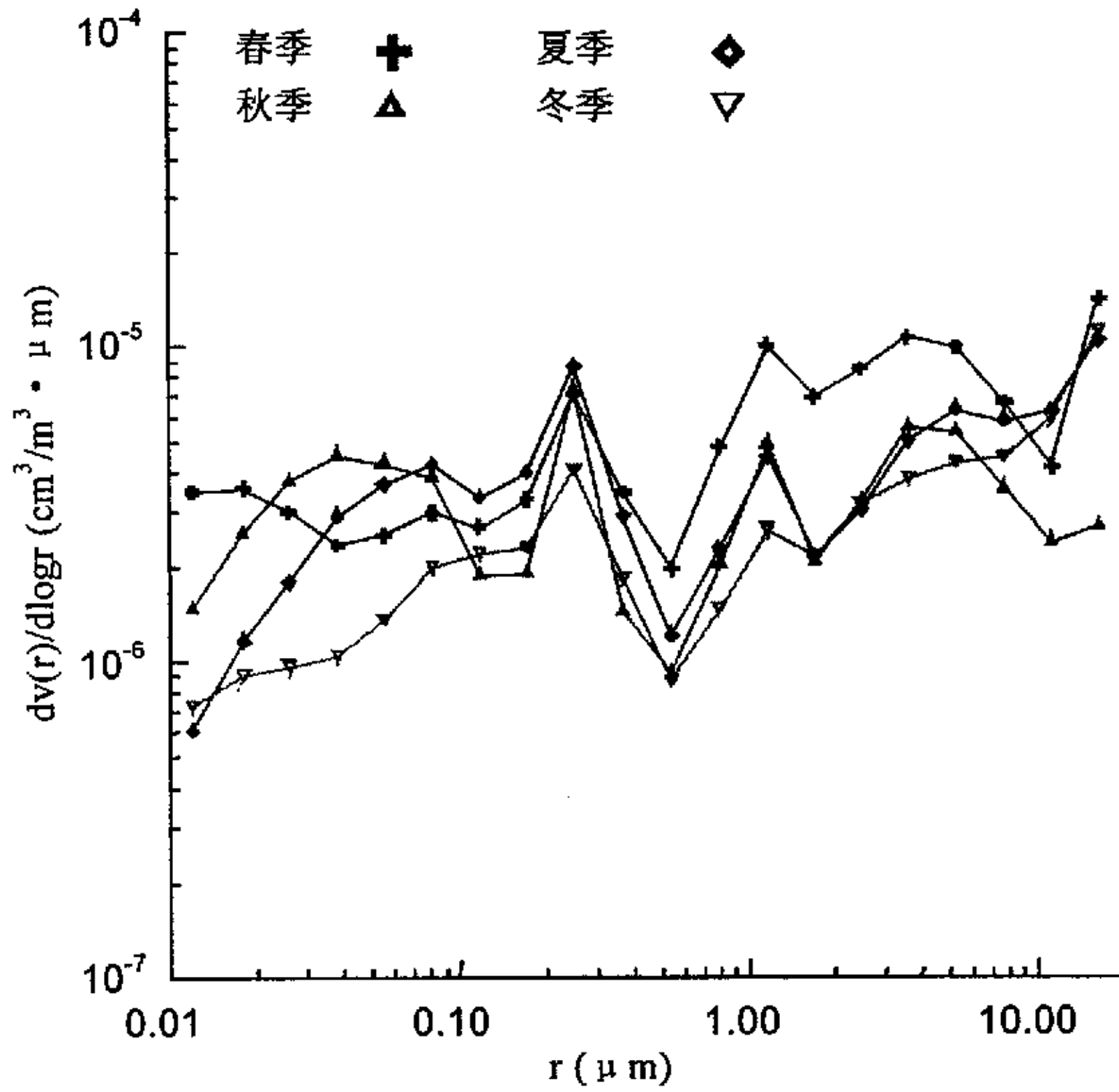
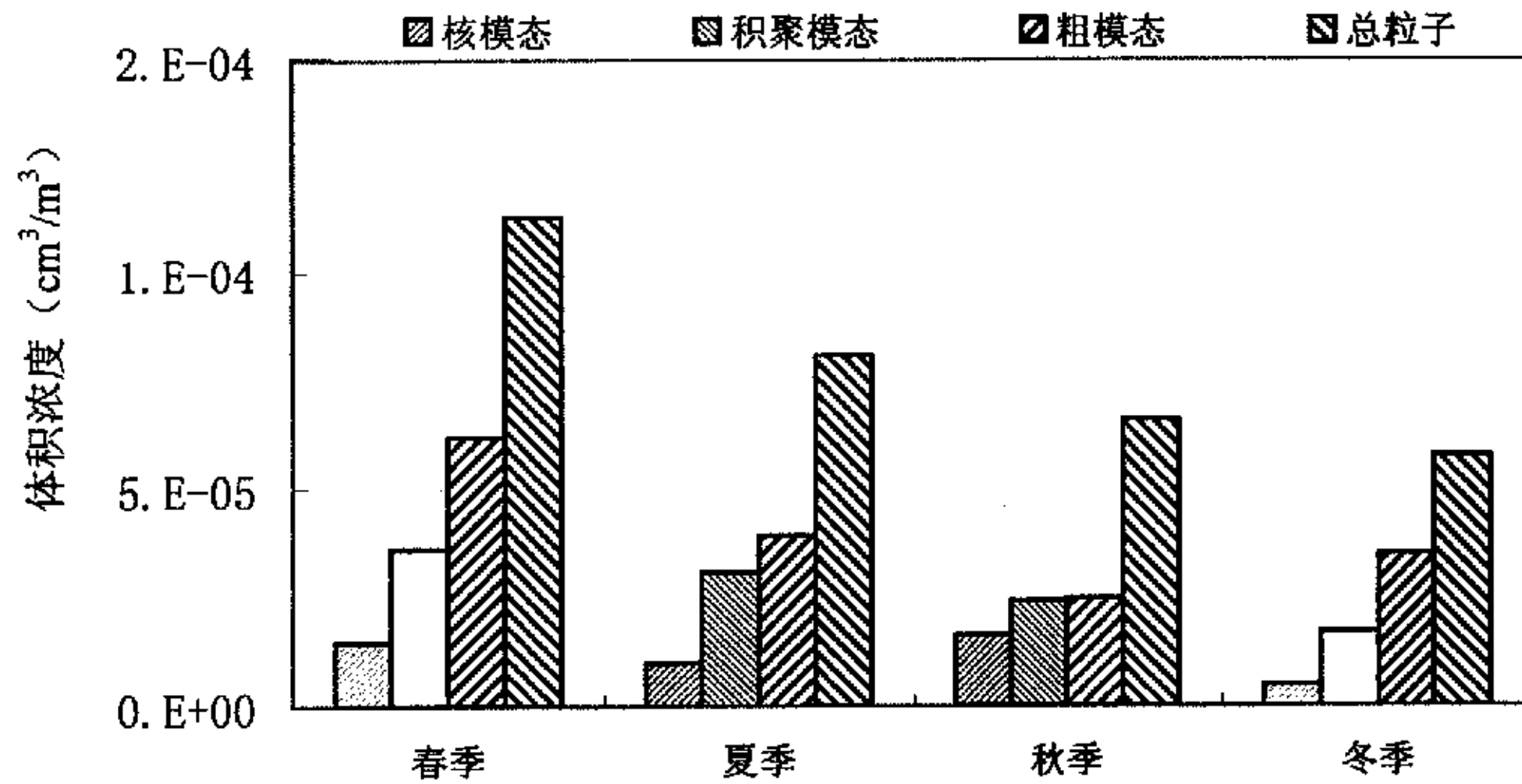


图 3.5 季节平均气溶胶体积浓度谱



(核模态: $r < 0.05 \mu\text{m}$; 积聚模态: $0.05 < r < 1 \mu\text{m}$; 粗模态: $r > 1 \mu\text{m}$)

图 3.6 体积浓度季节平均

前文分析 TSP 质量浓度时显示冬季气溶胶浓度明显较高，夏季较低，但是从图 3.6 可以看出春季粒子的总体积明显高于其它季节，而冬季的体积浓度与夏秋季节相差不大。两种观测结果的差异是由于青岛冬季气温较低，温差较小，污染

物不容易扩散而在近地层堆积，从而形成近地层浓度较高，而春夏秋季节气温升高，湍流活动可以将近地层气溶胶输运到较高气层充分混合，从而降低了近地层的气溶胶浓度。

表 3.2 气溶胶体积浓度季节平均各模态百分比

	春季	夏季	秋季	冬季
核模态	13%	13%	25%	9%
积聚模态	32%	39%	37%	30%
粗模态	55%	49%	38%	61%

3.3.3 气溶胶光学厚度与粒子模态的比较分析

比较月平均 500nm 波段气溶胶光学厚度与月平均不同模态粒子体积浓度之间的变化趋势（图 3.7），发现光学厚度的变化与核模态和积聚模态的粒子变化较为一致，而与粗模态粒子的变化相差较大，这是因为接近 90% 的消光是由粒径小于 1 μ m 的细粒子引起的^[42]。为进一步分析细粒子对太阳辐射的消光作用，作观测期间 500nm 波段气溶胶光学厚度与模态粒子体积浓度之间的相关关系点聚图（图 3.8），结果显示光学厚度与积聚模态粒子具有较好的线性相关关系，拟合直线为 $V = 4.128 \times 10^{-5} \times \tau_{500} + 5.164 \times 10^{-5}$ ，相关系数达 0.922。（图中拟合线显示的曲率是由纵坐标是以 10 为底的对数坐标，横坐标是线性坐标引起的。）

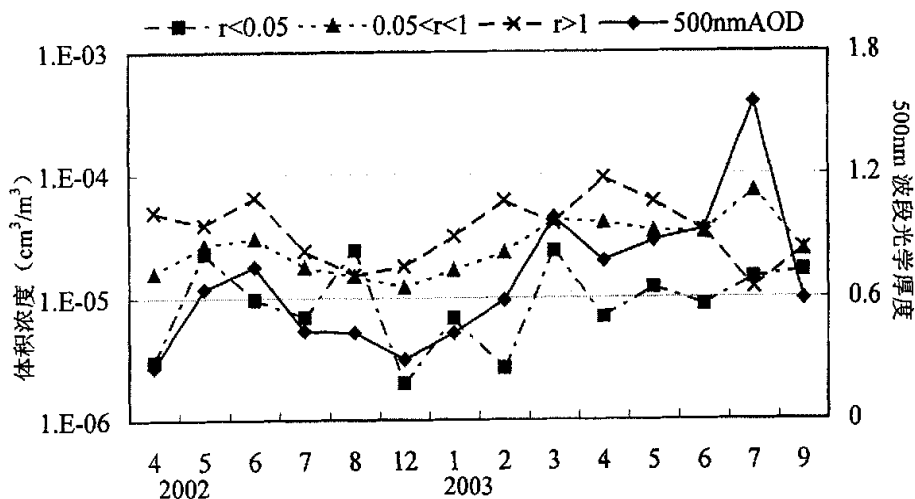


图 3.7 500nm 波段月平均气溶胶光学厚度与粒子模态的关系

（图例中 AOD 为 aerosol optical depth，即气溶胶光学厚度英文缩写）

计算气溶胶光学厚度与各模态粒子体积浓度之间的相关系数（表 3.3），表明

各波段光学厚度与积聚模态的粒子相关系数最大，达 0.9 以上。不同模态粒子与光学厚度之间的相关系数随波段的变化情况很不相同，积聚态粒子随着波长的增长，相关系数增长，到波长 675nm 时，相关系数最大，然后相关系数随波长递减；核模态粒子随波长的增长，相关系数单调下降，而粗模态粒子与光学厚度之间的相关系数随波长是单调增加。这说明从紫外到近红外波段太阳辐射能的衰减主要是由积聚模态粒子造成的；随着波长的增长，核模态粒子的消光作用逐渐减弱，而粗模态粒子的消光能力是增强的。

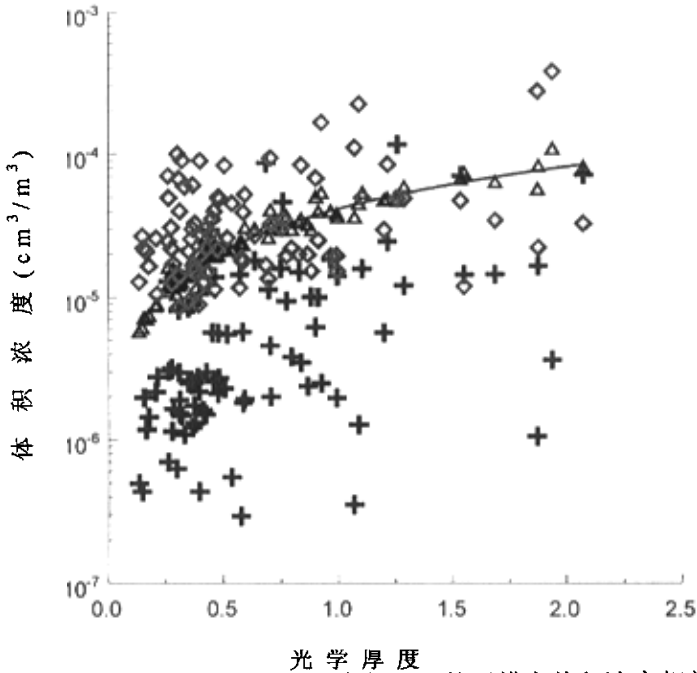


图 3.8 500nm 波段气溶胶光学厚度与不同粒子模态体积浓度相关关系图

(+ 核模态($r < 0.05 \mu\text{m}$); $\triangle$ 积聚模态($0.05 < r < 1 \mu\text{m}$); $\diamond$ 粗模态($r > 1 \mu\text{m}$))

气溶胶的单次散射返照率是气溶胶散射光学厚度与总光学厚度的比值，据此可以反算出气溶胶的散射光学厚度与吸收光学厚度。比较散射光学厚度和吸收光学厚度与粒子模态之间的相关关系（表 3.4），结果显示各波段散射光学厚度与粒子模态的关系和前文分析气溶胶总光学厚度与粒子模态的关系情况一致，这是因为粒子对太阳辐射的衰减主要是由散射消光引起的（占总 90% 以上）。不同波段吸收光学厚度和粒子模态的相关关系与散射情况有所不同。对于积聚模态与核模态的粒子，相关系数随波段增长呈递减趋势，而粗模态粒子情况则相反，是随波长

的增长, 相关系数是递增的。在作者研究的波段范围内, 核模态粒子与吸收光学厚度之间的相关系数明显低于积聚模态和粗模态粒子与气溶胶吸收光学厚度之间的相关系数。以上分析说明: 随着波长的增长, 积聚模态粒子的吸收消光能力减弱, 粗模态粒子吸收能力增强, 而核模态粒子对各波段辐射能的吸收消光能力均较弱。

表 3.3 气溶胶光学厚度与粒子模态的相关系数

	$r < 0.05 \mu m$	$0.05 < r < 1 \mu m$	$r > 1 \mu m$
340nm	0.435	0.925	0.367
380nm	0.427	0.932	0.386
400nm	0.424	0.938	0.396
500nm	0.415	0.96	0.442
675nm	0.389	0.987	0.527
870nm	0.339	0.98	0.618
1020nm	0.294	0.953	0.67

表 3.4 气溶胶散射光学厚度和吸收光学厚度与粒子模态的相关系数

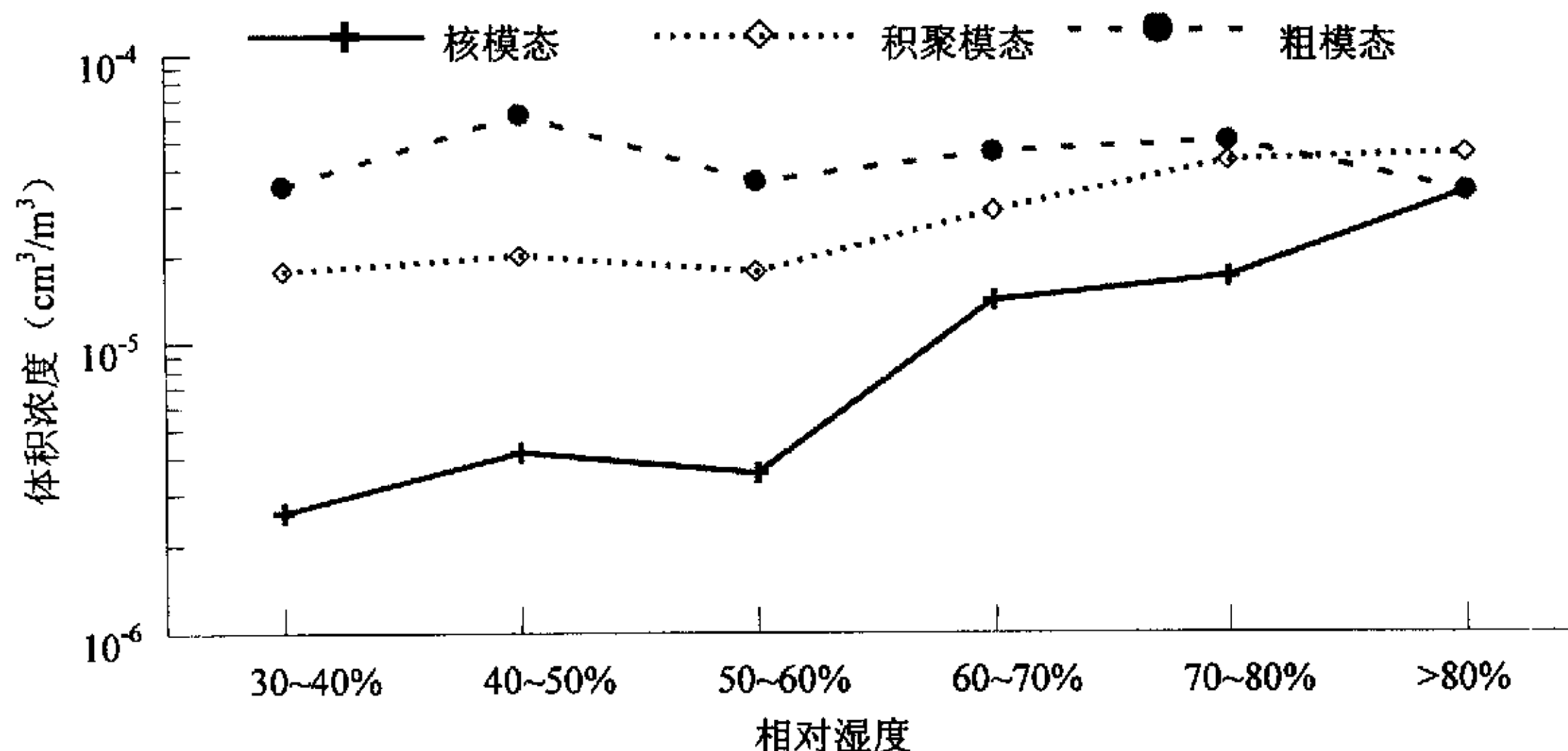
	散射 AOD 与粒子模态			吸收 AOD 与粒子模态		
	$r < 0.05$	$0.05 < r < 1$	$r > 1$	$r < 0.05$	$0.05 < r < 1$	$r > 1$
340nm	0.427	0.908	0.331	0.432	0.915	0.713
380nm	0.421	0.916	0.35	0.411	0.906	0.731
400nm	0.418	0.923	0.361	0.401	0.902	0.74
500nm	0.412	0.95	0.408	0.364	0.883	0.772
675nm	0.39	0.985	0.496	0.318	0.855	0.809
870nm	0.341	0.985	0.592	0.284	0.83	0.837
1.20nm	0.295	0.959	0.65	0.262	0.813	0.853

3.3.4 粒子模态与相对湿度的关系

观测期间日平均相对湿度与核模态和积聚模态粒子之间的相关系数分别为 0.32 和 0.37, 而相对湿度与粗模态粒子间的相关系数接近于 0。相对湿度与核模态和积聚模态粒子之间的相关系数在信度为 0.01 时, 通过相关显著性检验。表明相对湿度与核模态和积聚模态粒子之间显著相关, 而相对湿度与粗模态粒子之间不相关。

将日平均相对湿度以 10% 间隔分级, 比较相对湿度分级情况下不同模态粒子与湿度的关系 (图 3.9)。从图中可以发现粗模态粒子随相对湿度的增加基本没有变化, 这与计算两者相关系数的结果一致; 核模态和积聚模态粒子在相对湿度小于 60% 时随湿度的变化不明显, 当相对湿度大于 60% 时, 随湿度的增加核模态和

积聚模态粒子体积浓度明显增加,而核模态粒子增长的幅度较积聚模态大,在相对湿度大于80%时,核模态粒子体积浓度增加了一个量级。说明相对湿度的增加有利于细粒子的增加,这一结果与王庚辰^[43]的研究结果基本一致。



3.9 相对湿度与气溶胶不同粒子模态体积浓度的关系

3.3.5 气象条件对粒子模态的影响

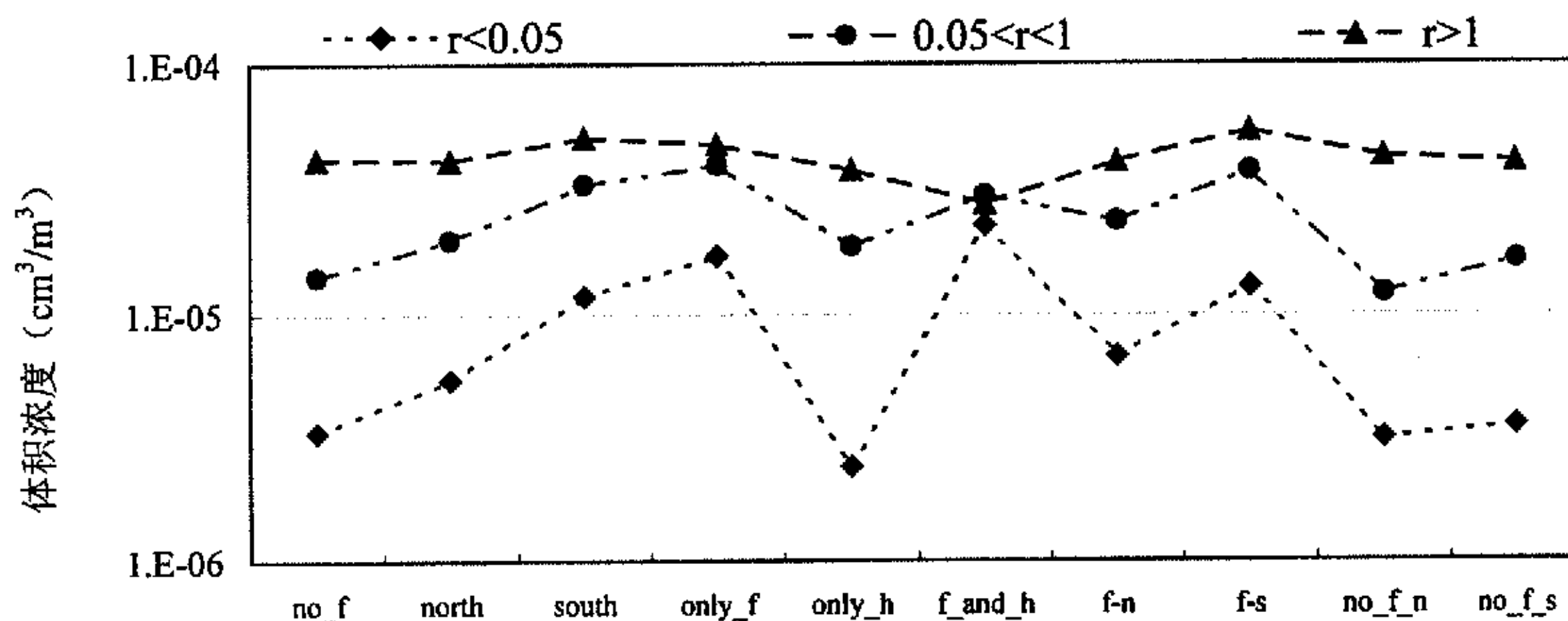


图 3.10 不同气象条件下气溶胶粒子模态体积浓度的变化

(坐标说明: no_f(无雾); north(北风); south(南风); only_f(只有雾); only_h(只有霾); f_and_haze(出现雾和霾); f_n(雾、北风); f_s(雾、南风); no_f_n(无雾、北风); no_f_s(无雾、南风))

图 3.10 给出了不同气象条件下气溶胶不同模态粒子体积浓度的变化。从图中可以看出天气和风向的变化对粗模态粒子基本没有影响,而对核模态粒子的影响达到一个量级,积聚模态粒子随气象条件的变化与核模态粒子基本一致,但变化幅度较核模态粒子小。从图中可以看出积聚模态与核模态粒子的体积浓度在盛行北

风时明显低于盛行南风；霾天气情况下，核模态粒子浓度较低，而当一日即出现了雾，又出现霾天气时，三个模态粒子的体积浓度相当；轻雾或霾的出现只是增加了积聚模态与核模态粒子的浓度，对粗模态粒子的浓度没有明显影响。

3.4 小结

本章利用气溶胶 TSP 和分级采样资料，以及气溶胶体积谱资料，分析了青岛地区气溶胶粒子的谱分布；通过气溶胶体积谱与光学厚度的对比分析，研究了不同模态粒子的消光能力，结果表明：

(1) 青岛地区地面气溶胶质量浓度具有明显的季节变化，冬季 TSP 质量浓度较高，达 0.178 mg/m^3 ，夏季较低，为 0.093 mg/m^3 ，冬季的 TSP 质量浓度接近于夏季的两倍；年平均 TSP 含量为 0.148 mg/m^3 ，优于国家空气质量二级标准；质量浓度谱分布显示各季节小粒子浓度较高，而冬季小粒子质量浓度是其他季节的三倍左右；气柱的体积浓度分布与地面质量浓度的分布有所不同，各季节都是粗模态粒子浓度较高，核模态粒子浓度较低；总粒子浓度是春季较高，而其它季节相差不大；

(2) 气溶胶光学厚度与不同粒子模态之间相关分析显示，对太阳辐射的衰减能力最强的是积聚模态粒子；随着波长的增长，核模态粒子的消光作用逐渐减弱，而粗模态粒子的消光能力是增强的；

(3) 相对湿度与核模态和积聚模态粒子相关显著，与粗模态粒子不相关；在相对湿度大于 60% 时，核模态和积聚模态粒子随湿度的增加而增加，即湿度的增加有利于小粒子的形成。

(4) 天气变化对粗模态粒子影响不大，而对核模态粒子的影响达到一个量级，积聚模态粒子随气象条件的变化与核模态粒子一致，但变化幅度较核模态粒子小；南风的盛行和轻雾天气有利于核模态和积聚模态粒子的生成。

4 卫星遥感资料与光度计的对比及应用

卫星遥感弥补了地面观测难以反映气溶胶空间具体分布和变化趋势的不足。但是光学厚度反演过程中源于地表反照率和气溶胶模型带来的误差难以估计,因此卫星遥感需要同时有地面太阳光度计观测进行对比。本章利用中国海洋大学校园内的分光光度计观测资料,与2002年MODIS资料进行对比分析,并利用MODIS资料分析了2002年两次沙尘暴过程对青岛空气质量的影响。

4.1 MODIS 资料介绍

EOS(Earth Observing System, 地球观测系统)是美国国家宇航局(NASA)建立的一个对全球变化进行观测研究的综合计划。Terra 是这一计划的第一颗极地轨道环境遥感卫星,1999年12月18日发射成功,2000年2月24日开始提供全球遥感资料。

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, 中分辨率成像光谱仪)是搭载在 Terra 卫星上的一个重要传感器。MODIS 传感器具有从可见光、近红外到红外共36个光谱通道,每日一次或两次获取有关陆地、云、气溶胶、水汽、臭氧、海洋水色、浮游植物、生物地理化学等全球观测数据^[44]。MODIS 传感器扫描宽度2330km,通道1(0.66 μm)和通道2(0.86 μm)具有星下点250m的分辨率,可见光和近红外的通道3~7星下点分辨率为500m,其他通道星下点分辨率为1000m。

长期以来,卫星遥感陆地气溶胶存在着地表反射率和气溶胶模型两方面同时未知的难题。Kaufman 等通过大量飞机试验发现:植被密集的具有较低反照率的地表在2.13 μm 近红外通道的反射率与0.47 μm 、0.66 μm 可见光通道的反射率具有很好的线性相关关系。这一结论成功地运用于MODIS的气溶胶反演^[45, 46, 47]。

MODIS 传感器中用于气溶胶分析的光谱通道是0.66 μm 、0.47 μm 和3.8 μm ,此外,还需要11 μm 窗区通道订正地表辐射(3.8 μm),以及气体吸收通道如近红外水汽通道(1.38 μm)订正大气可降水量和9.6 μm 通道订正臭氧总量。全球气溶胶光学厚度由以下步骤完成^[44]:

第一步确定地表反射率:以下列具有不同精确度的4个优先级进行蓝光0.47 μm 和红光0.66 μm 通道地表反射率的确定:

第一优先级: $0.01 \leq R_{2.1}^* \leq 0.5$, 则 $R_{0.47}^S = R_{2.1}^* / 4$, $R_{0.66}^S = R_{2.1}^* / 2$;

第二优先级: $R_{3.8}^* \leq 0.025$, 则 $R_{0.47}^S = 0.01$, $R_{0.66}^S = 0.02$;

第三优先级: $0.01 \leq R_{2.1}^* \leq 0.10$, 则 $R_{0.47}^S = R_{2.1}^* / 4$, $R_{0.66}^S = R_{2.1}^* / 2$;

第四优先级: $0.01 \leq R_{2.1}^* \leq 0.15$, 则 $R_{0.47}^S = R_{2.1}^* / 4$, $R_{0.66}^S = R_{2.1}^* / 2$ 。

其中 R_{λ}^* 为红外波段表观反射率, R_{λ}^S 为对应波段 (λ_i) 的地表反射率。

第二步初步估计光学厚度: 利用大陆模式从红和蓝通道 R_{λ}^* 和 R_{λ}^S 推算出气溶胶光学厚度, 在 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 网格区域中选定反射率最低的 10%~40% 部分的平均值进行反演, 作为 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的代表值。

第三步确定气溶胶模式: 在气溶胶模型的选取上, Kaufman 等采用了一种先假设为大陆型气溶胶进行反演, 然后计算红光、蓝光的单次散射路径辐射的比值进一步订正气溶胶类型和光学厚度的方法。

单次散射路径辐射定义为:

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \cdot P_{\lambda} \cdot \omega_{\lambda} / (4\mu \cdot \mu_0)$$

其中 τ_{λ} , P_{λ} , ω_{λ} 分别为光学厚度、相函数和散射比 (单次散射反照率)。 μ, μ_0 为观测方向和入射光方向天顶角的余弦。对于是否为沙尘型气溶胶, 具体确定方法如下:

1) $\tau_{red} < 0.15$, 预计观测到的光谱辐射在确定气溶胶模式不够敏感, 使用大陆型气溶胶;

2) $L_{red} / L_{blue} > A(\Theta)$, 使用沙尘型气溶胶;

3) $L_{red} / L_{blue} < B(\Theta)$, 为非沙尘型气溶胶。

其中 Θ 为散射角。阈值 $A(\Theta)$ 、 $B(\Theta)$ 是根据理论计算两条路径辐射的比值得出的, 表示如下:

当 $40^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$, $A(\theta) = 0.90$, $B(\theta) = 0.72$;

当 $150^\circ \leq \theta \leq 168^\circ$, $A(\theta) = 0.9 - 0.01(\theta - 150^\circ)$, $B(\theta) = 0.72$;

对于非沙尘型和非大陆气溶胶, 采用按地域和季节来确定气溶胶模式的方法, 在中国大陆的东部和南部, 取为工业城市型气溶胶。

第四步重新计算光学厚度: 一旦气溶胶模式确定下来, 就可以订正红光和蓝光通道的光学厚度。

按照两个通道的光学厚度,可进一步确定 Ångström 常数以及 550nm 的光学厚度。NASA 利用上述方法每天反演了全球气溶胶产品,该产品主要是为适应全球气候变化研究的目的,10km×10km 的分辨率已经基本满足全球气候研究的需要。

卫星遥感气溶胶光学厚度的反演过程中,源于地表反照率和气溶胶模型带来的误差难以估计,需要同时有地面太阳光度计观测进行对比。NASA 在大陆部分和少数海岛海岸建立了一个包含大约 70 个地面太阳光度计的全球自动观测网 AeroNet,为 MODIS 遥感气溶胶提供地面多通道遥感的对比资料。

4.2 MODIS 遥感资料与地面光度计观测的对比与应用

4.2.1 MODIS 遥感气溶胶光学厚度与地面光度计资料的对比分析

本文使用的 MODIS 气溶胶产品是 2002 年 550nm 波段气溶胶光学厚度,分辨率为 10km×10km。卫星基本上每天是 10:00~12:00 之间经过青岛上空。从 MODIS 资料中提取出距离前文中使用的青岛地面气溶胶光学特性观测站 25km 以内的网格,利用 Cressman 线性差值方法获取青岛站 MODIS 观测气溶胶光学厚度值。根据 MODIS 过境时间,从地面观测资料中,选取两者观测时间相距最近时刻(MODIS 资料时间前后半小时内)的 22 组资料进行两者相关关系分析(图 4.1)。其中光度计观测的 550nm 波段光学厚度是由前文计算出的 α 和 β 根据光学厚度与波长的关系反算得到。

从图 4.1 可以看出在光学厚度小于 0.7 时,MODIS 遥感光学厚度一般大于地面光度计观测,而当光学厚度大于 0.7 时,MODIS 观测值小于地面光度计观测,两者拟合直线的斜率达 1.4。图 4.2 给出这两组数据的时间序列比较情况。从图中可以看出两者变化趋势基本一致。变化情况差别较大的是在 99 和 101 两天,两者变化趋势相反。从理论上说,太阳分光光度计的观测具有较高的精度,但是太阳光度计是单点观测,其观测结果有很强的局地性,而 MODIS 观测结果代表的是 10km×10km 的平均状况,因此,气溶胶在小尺度上的空间分布是形成两者观测差异的一个重要原因。另一方面,由于 2002 年地面光度计观测时间序列较短,MODIS 资料一日基本只有一次观测,为了选取两者时间匹配较多的数据对,地面观测资料没有考虑云的影响,而 MODIS 气溶胶产品是建立在 250m 和 500m 分辨率多通道的晴空、云量识别算法基础上^[43]。

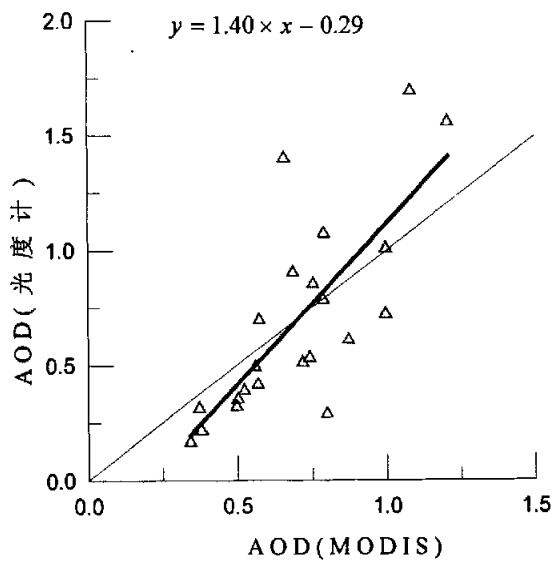


图 4.1 MODIS 遥感 AOD 与地面观测 AOD 相关关系
(图中 AOD 为 Aerosol Optical Depth, 即气溶胶光学厚度)

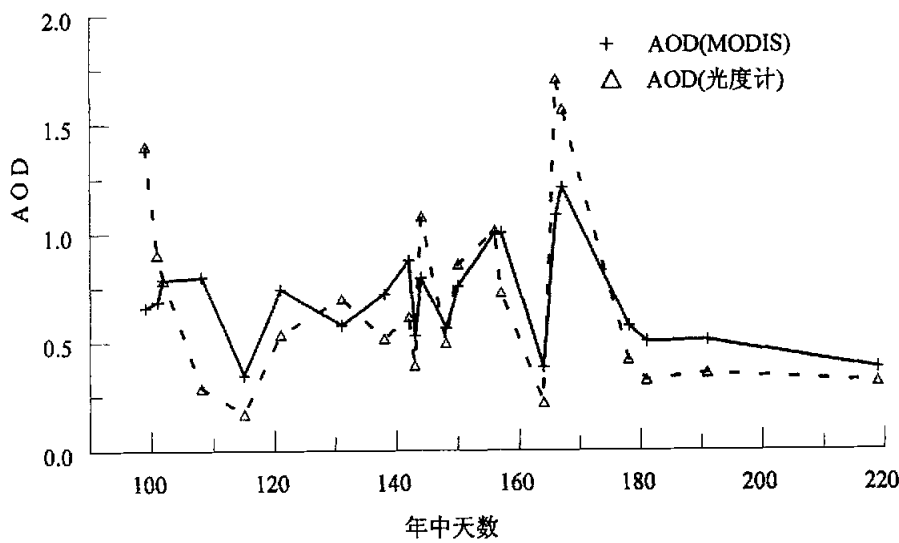


图 4.2 2002 年 MODIS 遥感 AOD 与地面观测 AOD 的时间序列

选取两者相差较小和较大的两日资料做气溶胶光学厚度区域分布情况 (如图 4.3)。图 4.3 显示 2002 年 6 月 13 日光学厚度较小, MODIS 观测结果与光度计观测结果基本一致, 而 3 天后的 16 日光学厚度较大, 两者观测结果相差接近 0.4。查阅这两日 11 时地面观测资料发现 13 日整个山东半岛天气晴好, 能见度一般在

20 公里以上, 而 16 日山东半岛从东向西能见度逐渐减小, 与 MODIS 观测结果分布形式基本一致。同时, 青岛上空卷云较多, 从而形成两者观测偏差。

两种观测手段获得的光学厚度值之间的相关系数达 0.77, 查阅相关系数检验表得到信度为 0.01 时, 两者相关关系显著。

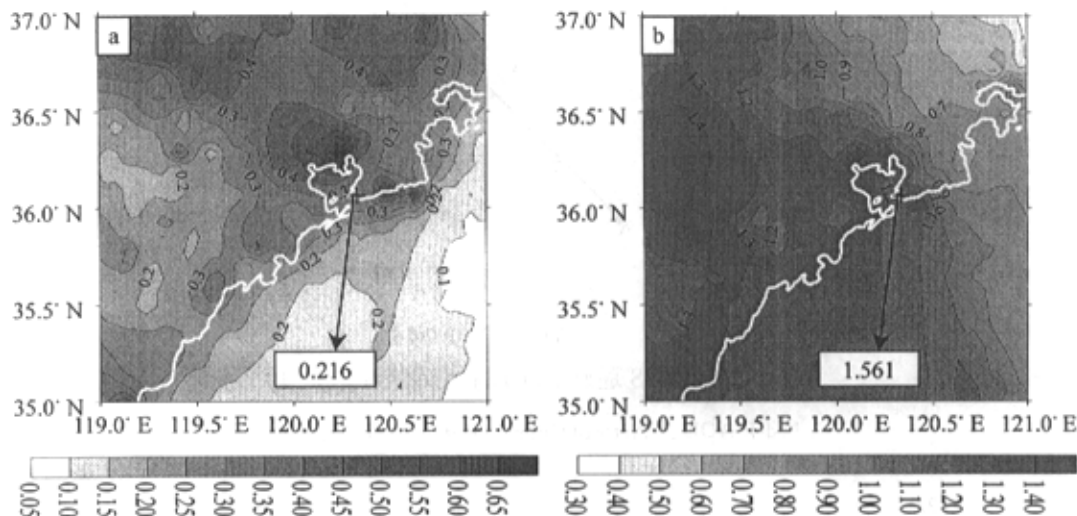


图 4.3 MODIS 遥感 AOD 与地面观测 AOD 的对比

a. 2002 年 6 月 13 日; b. 2002 年 6 月 16 日 (图中方框内数值为光度计观测值)

4.2.2 MODIS 遥感受光学厚度与不同模态粒子体积浓度的相关比较

MODIS 遥感受光学厚度与不同模态粒子的关系图 (图 4.4), 显示 MODIS 遥感受光学厚度与积聚模态粒子体积浓度具有明显的相关关系, 拟合线是 $V = 6.24 \times 10^{-5} \times \tau_{550} - 1.03 \times 10^{-5}$, 相关系数为 0.43。

MODIS 遥感受光学厚度与核模态、积聚模态以及粗模态粒子体积浓度的相关系数分别为 0.22、0.65 和 0.01, MODIS 遥感受光学厚度与积聚模态粒子相关显著。前文分析表明核模态和粗模态粒子与光学厚度的相关关系虽然不及积聚模态粒子与光学厚度的相关关系明显, 但这两个模态的粒子与光学厚度的相关关系显著, 而 MODIS 遥感受光学厚度与核模态和粗模态粒子体积浓度的相关关系没有通过显著性检验, 这可能由 MODIS 气溶胶光学厚度反演中气溶胶类型的选择以及实际气溶胶分布的局地性造成的。

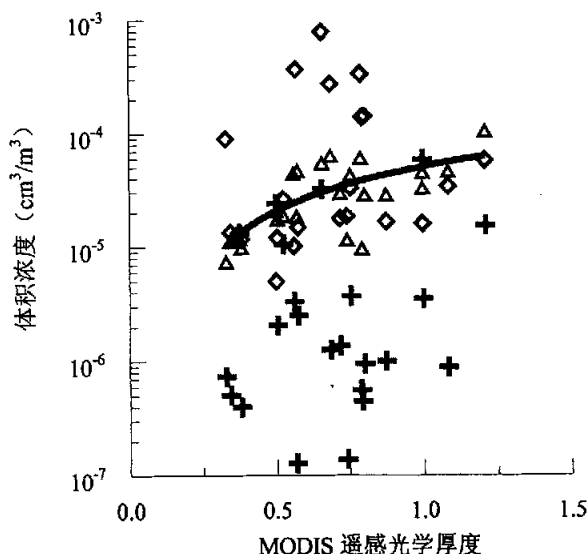


图 4.4 MODIS 遥感 AOD 与不同粒子模态体积浓度的关系

(+ 核模态; Δ 积聚模态; $\diamond$ 粗模态)

4.2.3 山东半岛气溶胶光学厚度季节分布特征

图 4.5 给出山东半岛气溶胶光学厚度的季节分布情况,在图中以“+”字符号标记出青岛的位置。从整体上来讲半岛区域的光学厚度较内陆地区小,陆地较海上小,海岸线存在季节性光学厚度梯度;春夏秋三季节青岛处于光学厚度梯度较大区域,冬季则在光学厚度的低值区域。

比较四个季节的光学厚度分布可以看出,春季和夏季在渤海湾西南部以及莱州湾西北部存在明显的光学厚度大值区。这两个区域对应着天津市和山东的东营市,前者是我国重要的综合性工业城市,后者是胜利油田所在地。这两个区域的光学厚度高值区在秋季仍然较大,但不是大值中心,而冬季大值中心主体存在并东移到海上。

从青岛东北部到烟台西南的广大区域以及鲁中山区,各季节光学厚度均较其它地方小,这两个区域是半岛地区光学厚度的低值中心。春、夏、冬三季节的中心值一般在 0.2~0.3 范围内;秋季光学厚度相对较大,低值中心范围的光学厚度达 0.5~0.6。这两个低值中心之间,在春季和冬季存在明显的光学厚度大值中心,而在夏秋季节不明显。

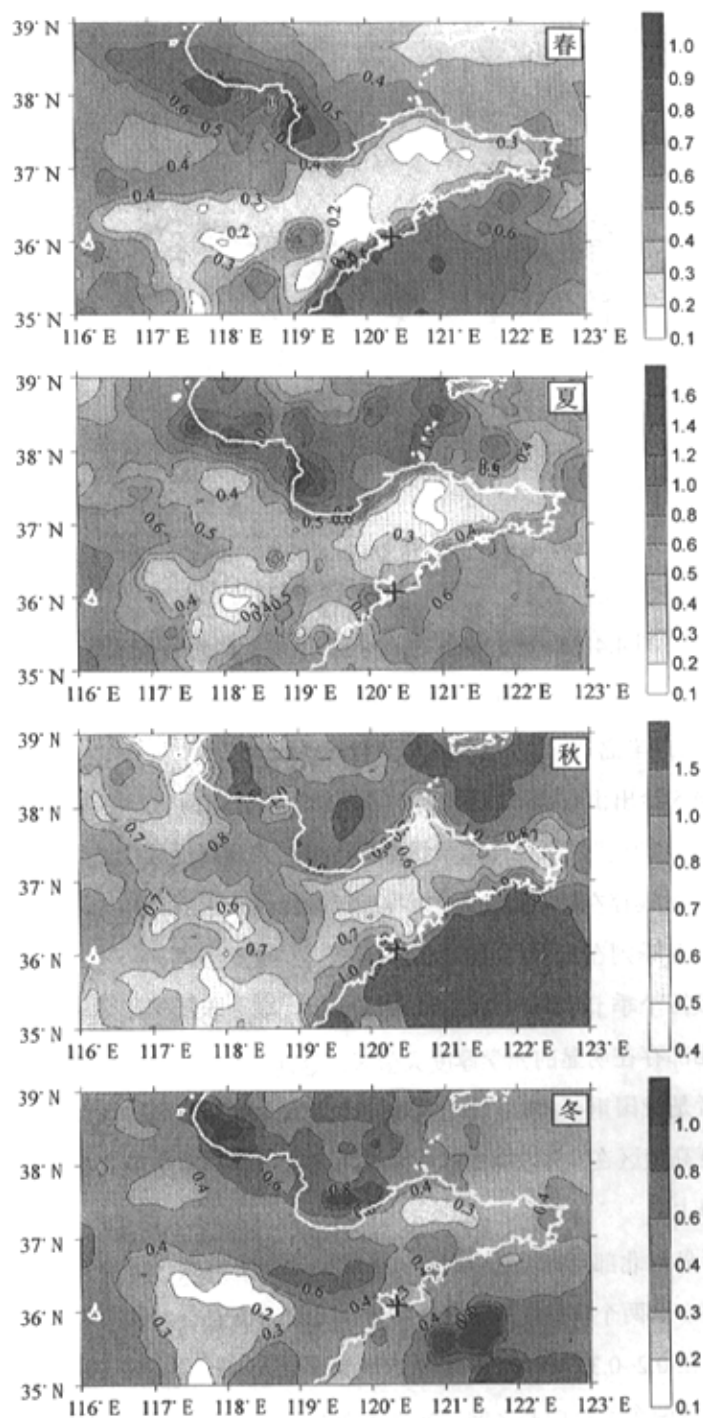


图 4.5 山东半岛气溶胶光学厚度季节分布

从气溶胶光学厚度的季节分布图可以看出, 沿着半岛海岸线存在明显光学厚度的梯度, 而这种光学厚度梯度较大的变化具有明显的季节性。半岛南岸在春秋季节梯度较大, 夏季和冬季相对较小, 而半岛北岸在夏秋季节光学厚度梯度大, 春季和冬季不明显。

从本文第二章分析地面观测结果知道春季与夏季的光学厚度相对较大, 而 MODIS 观测显示, 秋季的光学厚度高于其他季节。李正强等 2000 年 10-11 月在黄海海域的观测结果是 550nm 波段光学厚度在 0.1 左右^[48]。MODIS 资料与地面遥感结果的这种偏差可能与 MODIS 气溶胶光学厚度反演中气溶胶类型以及海陆地表反照率的选取有关。

4.3 利用 MODIS 资料研究沙尘天气过程对青岛气溶胶的影响

4.3.1 光学厚度与空气污染指数的相关分析

查阅青岛空气污染指数发现, 造成空气污染的主要因子是可吸入颗粒物, 即气溶胶粒子 (空气污染指数资料来源于中国环境保护总局网 <http://www.zhb.gov.cn>, 有关空气污染指数的介绍见附录)。大量气溶胶粒子的存在将会导致空气污染指数 (API, Air Pollution Index) 的增高, 另一方面, 也将会影响到到达地面的太阳辐射, 产生较大的光学厚度值。因此, MODIS 遥感气溶胶光学厚度与 API 之间存在一定的关系。只是 MODIS 是从高空观测地表反射率, 获取的是某一区域整层大气的基本状况, 而 API 代表的是城市范围内近地层的空气污染状况。

计算得到青岛空气污染指数与 MODIS 遥感光学厚度之间的相关系数为 0.168, 在信度为 0.05 时通过显著性检验, 表明 MODIS 遥感光学厚度与 API 之间具有相关关系, MODIS 资料可以用于空气污染研究。下文利用 MODIS 资料分析 2002 年春季两次沙尘天气过程对青岛气溶胶的影响。这两次沙尘过程发生时, 青岛太阳光度计还未安装, 因此缺少光度计观测资料。

4.3.2 利用 MODIS 资料分析两次沙尘天气过程对青岛气溶胶的影响

2002 年我国北方地区沙尘过程强度较大频数较高。3 月 15 日至 3 月 17 日、3 月 19 日至 3 月 21 日以及 4 月 6 日至 4 月 8 日的沙尘暴过程影响到处于我国东部的沿海城市青岛, 4 月 6 日至 8 日的沙尘暴过程甚至影响到朝鲜半岛和日本海。3 月 15 日至 17 日的沙尘过程是通过高空远距离输送, 较大粒子由于重力沉降作用

对青岛空气质量产生影响，而 4 月 6 日至 8 日的沙尘过程是从蒙古国南部向东南经过内蒙、北京长驱直入影响到青岛。表 4.3 给出了这两次沙尘过程对山东半岛三城市空气污染指数的影响。从污染指数可以看出这两次沙尘过程对青岛的影响远大于对济南和烟台的影响，而 4 月 6 至 8 日的沙尘过程影响范围广，强度大。

表 4.3 2002 年 3 月 15 至 17 日与 4 月 6 至 8 日沙尘过程 API 变化

	2002 年 3 月 15-17 日沙尘过程				2002 年 4 月 6-8 日沙尘过程				
	16 日	17 日	18 日	19 日	6 日	7 日	8 日	9 日	10 日
济南	84	129	125	97	61	159	124	104	99
青岛	78	429	150	104	55	229	500	476	98
烟台	66	135	81	85	35	188	286	269	75

3 月 15 日至 17 日的沙尘过程是：15 日 14 时左右从蒙古国南部到我内蒙中东部开始有部分地区出现扬沙天气，到该日 17 时，上述地区 16 个气象台站报告了浮尘、扬沙和沙尘暴，国内的 13 个站点中有 6 个站点的水平能见度小于 1km。图 4.6 给出了 3 月 15 日 17 时风速、风向、水平能见度以及天气现象的地面观测情况，其中实线所圈区域为沙尘范围。从图中可以看出沙尘源区风速一般在 10m/s 以上，这是发生沙尘暴的基本条件。到 3 月 16 和 17 两日，山东半岛以及东北部分地区零星出现了沙尘报告，3 月 18 日沙尘影响结束。图 4.7 给出了 2002 年 3 月 16、17 日沙尘报告范围。查阅地面资料可以看出青岛是从 16 日 17 时开始受到沙尘入侵。

2002 年 4 月 6 至 9 日的沙尘过程是：4 月 5 日蒙古国东南部已经有五个气象台站出现扬尘天气的记录，到 6 日 17 时，从蒙古国东南部到内蒙中东部和河北省的西北部，有二十多个台站出现浮尘、扬沙以及沙尘暴记录（图 4.8a 所示），其中国内接近 80%站点的水平能见度小于 1km。4 月 7 日出现沙尘天气区域从前文提到的沙尘源地向东扩展到从东北到山东半岛和江苏北部呈喇叭状分布的区域（图 4.8b 中细实线区域）。4 月 8 日国内区域沙尘范围缩小，但沙尘区域进一步东移，并影响到朝鲜半岛和日本海（图 4.8b 中粗实线区域），山东半岛仍然处于沙尘影响范围内。4 月 9 至 10 日沙尘主体基本移出山东半岛，青岛出现零星浮尘天气。

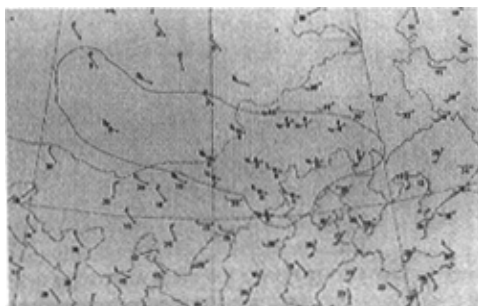
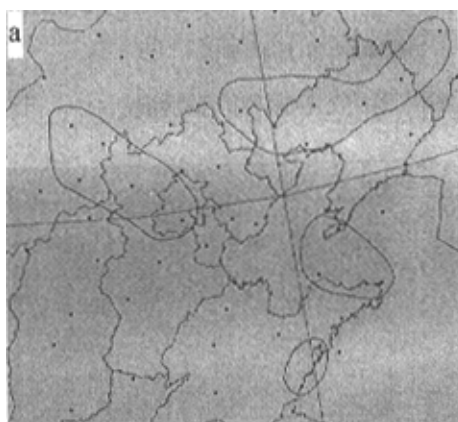
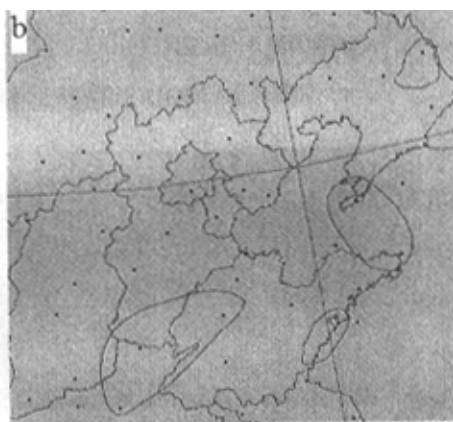


图 4.6 2002 年 3 月 15 日 17 时
地面观测



a. 3 月 16 日

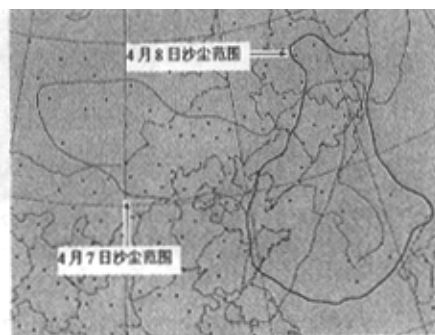


b. 3 月 17 日

图 4.7 2002 年 3 月 16、17 日沙尘报告范围

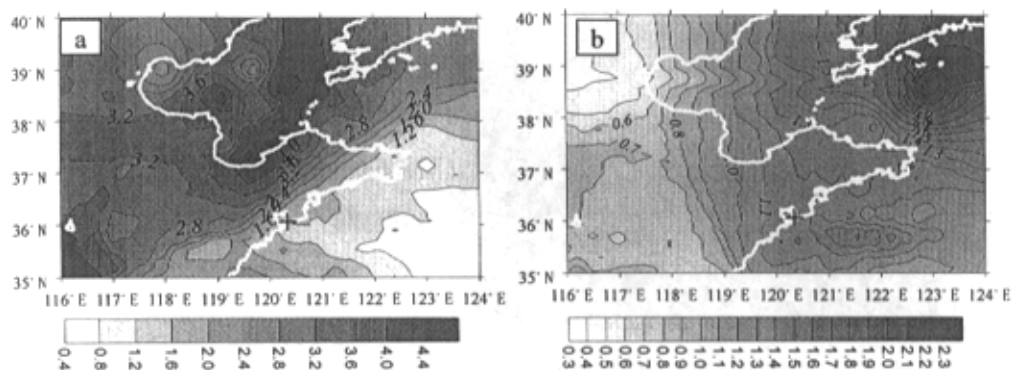


a. 4 月 6 日 17 时地面观测



b. 4 月 7—8 日地面沙尘范围

图 4.8 2002 年 4 月 6—8 日地面沙尘范围



a. 2002 年 3 月 16 日

b. 2002 年 3 月 17 日

图 4.9 MODIS 遥感沙尘暴过程气溶胶光学厚度分布状况

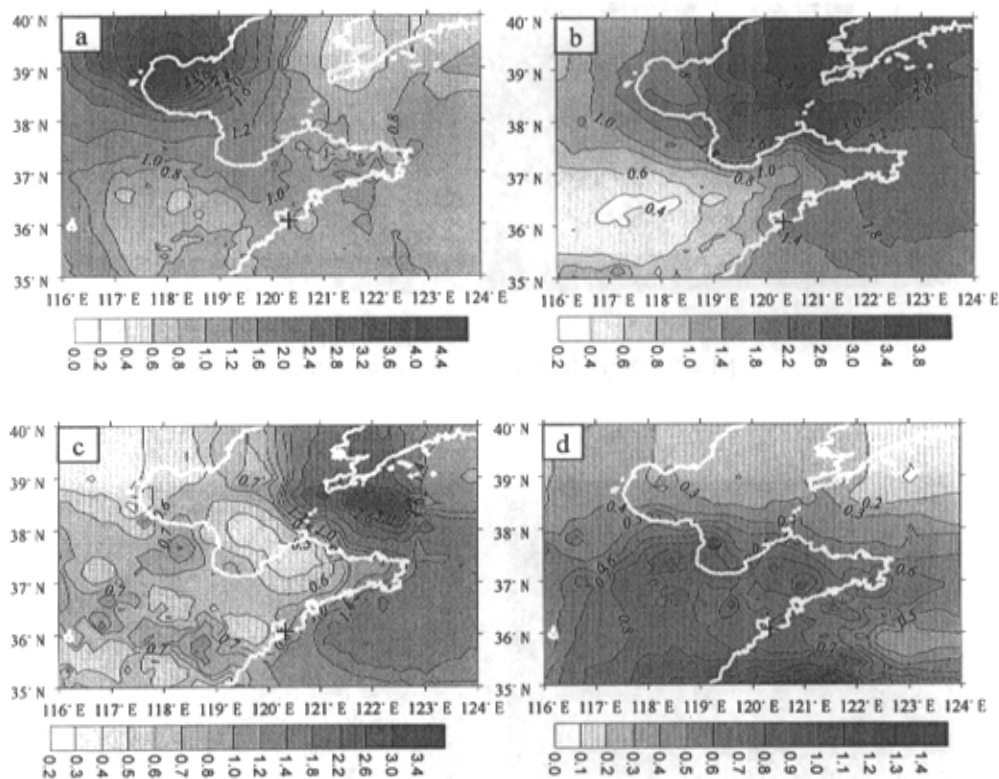


图 4.10 2002 年 4 月 6--10 日 MODIS 遥感气溶胶光学厚度图

a. 2002 年 4 月 6 日, b. 2002 年 4 月 8 日 c. 2002 年 4 月 9 日, d. 2002 年 4 月 10 日

图 4.9 给出了 3 月 16 日至 17 日山东半岛 MODIS 遥感气溶胶光学厚度分布状况, 图中用“+”标记出青岛的位置。a 图显示 3 月 16 日从渤海经莱州湾伸向半岛存在明显的光学厚度高值区, 高值中心接近于 5, 高值中心的西南方光学厚度

梯度很大,青岛处于该较大光学厚度梯度的边缘。这一日青岛的 API 指数小于 100,空气质量为二级。16 日处于渤海的光学厚度高值区域 17 日东移到辽东半岛东部 (4.9 图 b), 山东半岛靠内陆地区气溶胶光学厚度较小, 半岛区域光学厚度较大, 而该日青岛、济南和烟台三地的空气污染指数较前两日显著增加, 其中青岛上空空气严重污染, API 值高达 429, 远高于济南和烟台两地。

图 4.10 给出了 2002 年 4 月 6 日至 8 日沙尘过程气溶胶光学厚度的分布状况。从 a 图 (4 月 6 日) 上可以看出从天津到渤海湾有一光学厚度高达 3.5 大值区域, 对比地面沙尘区域和天津的 API 值 (63), 这个光学厚度大值区可能是 4 月 5 日小范围沙尘的远距离输送引起的。这日整个山东半岛光学厚度相对较小。7 日山东半岛上空云量较多, 该日图略。8 日光学厚度分布图上 (图 4.10b), 气溶胶光学厚度的高值分布与图 4.8 b 给出的沙尘范围基本一致: 从渤海到辽东半岛以及山东半岛的东部光学厚度较大 (大于 1.0)。9 日 (图 4.10c) 光学厚度大值区范围明显减小, 主体位于辽东半岛到渤海海峡, 山东半岛东部的光学厚度仍然较大, 与 API 分布相似。10 日 (图 4.10d) 沙尘对我国的影响基本结束, 辽东半岛到渤海海峡的光学厚度高值区消失, 这一区域的光学厚度很小, 山东半岛的光学厚度在 0.4~0.8 之间。

根据 MODIS 资料以及地面气象观测资料、空气污染指数资料, 可以判断: 3 月 16 日至 17 日的沙尘粒子是在沙尘源区上升到较高的高度上, 然后由高空气流远距离输, 在青岛地区沉降而影响到当地的空气质量状况; 4 月 6 至 8 日的沙尘过程是从低空由沙尘源地向东输送到山东半岛造成青岛空气质量的下降。

从 3 月 15 日至 19 日, 利用大流量采样器进行了总悬浮颗粒物的样品采集, 这次采样过程由于受 3 月 15 至 17 日的沙尘天气影响, TSP 质量浓度达 $0.488\text{mg}/\text{m}^3$, 接近于近两年春季 TSP 质量浓度平均值的 3 倍, 说明沙尘过程会引起青岛地区空气质量状况的急剧恶化。

4.4 小结

本章将 2002 年 MODIS 观测资料与地面光度计资料以及空气污染指数之间进行了对比研究, 利用 MODIS 资料分析了山东半岛光学厚度的季节分布, 并利用 MODIS 资料研究了 2002 年 3 月 15 至 17 日以及 4 月 6 至 8 日的沙尘过程对青岛气溶胶的影响。通过这些对比分析研究可以得出以下结论:

(1) 比较 MODIS 遥感光学厚度与地面光度计观测光学厚度显示, 在光学厚度小于 0.7 时, MODIS 遥感光学厚度一般大于地面光度计观测, 而当光学厚度大于 0.7 时, MODIS 观测值小于地面光度计观测, 两者的相关系数为 0.77, 相关关系显著;

(2) MODIS 遥感光学厚度与积聚模态粒子相关显著, 而与核模态以及粗模态粒子相关关系没有通过显著性检验。

(3) 比较两次沙尘过程显示, 3 月 16 日至 17 日的沙尘粒子是在沙尘源区上升到较高的高度上, 然后由高空气流远距离输, 在青岛产生沉降而影响到当地的空气质量状况; 4 月 6 至 8 日的沙尘过程是从低空向东输送, 造成青岛空气质量的急剧下降; 由于 3 月 16 日至 17 日的沙尘天气影响, 青岛 TSP 质量浓度增加了两倍, 严重影响了青岛空气质量。

5 总结与展望

5.1 本文研究的主要内容和结论

本文利用安装在中国海洋大学校园内的多波段太阳分光光度计观测的太阳直接辐射和散射辐射资料,反演计算了气溶胶光学厚度、单次散射反照率、波长指数和浑浊度以及气溶胶粒子体积谱等,与 MODIS 遥感光学厚度作了对比分析。

利用气溶胶光学特性参数资料,分析了青岛地区气溶胶光学特性,并根据气象条件的不同,研究了气象条件对青岛光学特性的影响。研究结果显示,风向的转变以及轻雾和霾是引起青岛气溶胶光学厚度较大日变化的原因:盛行南风时光学厚度较大,日差别明显,北风时光学厚度较小,日差别不大;扣除雾或霾的影响,光学厚度及其日差别明显减小。相对湿度与光学厚度呈正相关,在相对湿度大于 60% 时,青岛气溶胶光学厚度一般大于 0.5,而相对湿度小于 50% 时,光学厚度一般小于 0.5。单次散射反照率具有明显的季节变化,各波段的季节变化有所不同:在波长小于 500nm 时,单次散射反照率是夏季较高,春季较低;在波长大于 1000nm 时,单次散射反照率在春季较高;春季气溶胶在各波段的散射消光能力相差较小。青岛地区气溶胶粒子对太阳辐射能的散射衰减占总衰减能量的 90% 以上,而霾的散辐射能力高于轻雾;粒子对波长小于 500nm 的辐射散射能力相差较小。波长指数 α 主要出现在 0.9~1.4 范围内,浑浊度 β 值一般小于 0.3;波长指数与浑浊度具有明显的季节变化特征,波长指数在春秋季节频次分布呈多峰型,夏冬季节呈单峰型;大气浑浊度是秋冬季节较小,一般小于 0.3,而春夏季节较大浑浊度的出现频次增多。

利用在地面进行的总悬浮颗粒物和分级采样资料,以及由辐射资料反演得到的气溶胶体积谱资料,分析研究了青岛地区气溶胶粒子谱分布状况。地面粒子分布中,春季粗粒子质量浓度较高,冬季细粒子浓度是其他季节的三倍左右。季节平均体积谱具有多峰型,整个大气柱,春季粗模态粒子浓度较高,而冬季核模态粒子浓度较低。整个气柱的粒子谱分布状态与地面观测存在明显差异。

粒子谱分布与气象条件关系密切,在相对湿度大于 60% 时,核模态和积聚模态粒子随湿度的增加而增加,而粗模态粒子随湿度的变化不明显。天气变化对粗模态粒子影响不大,而对核模态粒子的影响达到一个量级,积聚模态粒子随气象

条件的变化与核模态粒子一致，但变化幅度较核模态粒子小。

气溶胶粒子对太阳短波辐射的衰减作用主要是由积聚模态粒子引起，随着波长的增长，核模态粒子的散射消光作用逐渐减弱，而粗模态粒子的散射消光能力和吸收消光能力是增强的。

比较 MODIS 遥感光学厚度与地面光度计观测光学厚度显示，在光学厚度小于 0.7 时，MODIS 遥感光学厚度一般大于地面光度计观测，而当光学厚度大于 0.7 时，MODIS 观测值小于地面光度计观测，两者的相关系数为 0.77，相关关系显著；MODIS 遥感光学厚度与积聚模态粒子相关显著，而与核模态以及粗模态粒子相关不明显。

利用 MODIS 遥感光学厚度资料，结合地面气象观测资料和 API 指数资料，分析了 2002 年两次沙尘暴过程对青岛空气质量的影响。

5.2 展望

POM02 型光度计对太阳辐射进行连续自动观测，本文仅仅使用了晴天观测资料，下一步的工作是利用光度计红外通道的观测，研究云的识别技术和水汽订正，进行云光学厚度的研究。

本文在气溶胶特性研究中，综合了太阳光度计观测、地面气溶胶 TSP 和分级采样，以及卫星遥感资料，获取了整层大气柱以及近地层气溶胶的光学特性和谱分布状况。根据目前气溶胶研究的发展现状，应当强化气溶胶的综合观测，进行综合对比试验。在本观测点，根据已有的气溶胶研究手段，可以发展激光雷达的垂直探测，了解实时的气溶胶垂直分布状况，利用粒子计数器，研究粒子的数浓度谱分布。

参考文献

- (1) 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程. 北京: 气象出版社, 1995.
- (2) Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G.-Y. Shi, and S. Solomon. Radiative forcing of climate change. In IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., et al., (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001: 881pp
- (3) 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124
- (4) 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634
- (5) 尹宏. 大气辐射学基础. 北京: 气象出版社, 1993. 144-145
- (6) 刘树华, 熊康. 南极瑞穗站大气光学特征研究. 北京大学学报(自然科学版), 1993, 30(1): 98-105
- (7) 邱金桓. 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论. 大气科学, 1995, 19(4): 385-394
- (8) 邱金桓, 潘继东, 杨理权等. 中国 10 个地方大气气溶胶光学 1980-1994 年间变化特征研究. 大气科学, 1997, 21(6): 725-733
- (9) 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 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, 2001, 59(1): 77-87
- (10) 赵柏林, 王强, 毛节泰等. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究. 中国科学 B 辑, 1983, 10: 951-962
- (11) 毛节泰, 王强, 赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测. 气象学报, 1983, 40(3): 332-331
- (12) 张军华, 刘莉, 毛节泰. 地基多波段遥感西藏当雄地区气溶胶光学特性. 大气科学, 2000, 24(4): 349-358
- (13) Michael D. King, Dale M. Byrne, Benjamin M. herman et al.. Aerosol Size Distribution obtained by Inversion of spectral optical Depth measurement. J. Atmos. Sci. 1978, 35: 2153-2167
- (14) 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 消光-小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值实验. 中国科学, 1981, 12: 1516-1523
- (15) 邱金桓, 王宏七, 周秀骥, 吕达仁. 消光-小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究. 大

- 气科学, 1983, 7(1): 33-41
- (16) 邱金桓, 孙金辉, 夏其林等. 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析. 气象学报, 1988, 46(1): 49-58
- (17) 周军, 胡欢陵, 龚知本. Mt. Pinatub 火山云激光雷达探测. 科学通报, 1993, 38(9): 811-813
- (18) 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测, 大气科学, 2003, 27(1): 1-7
- (19) 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究. 大气科学, 2003, 27(1), 115-122
- (20) Rao, P. K. 等编, 许健明等译. 气象卫星—系统、资源及其在环境中的应用. 北京: 气象出版社, 1994. 409-411
- (21) Stowe, L. L., A. M. Ignatov, R. R. Singh. Development, validation, and potential enhancements to the second generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. J. Geophys. Res., 1997, 102(D14): 16923-16934
- (22) Husar, R. B., J. M. Prospero, and L. L. Stowe. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer optical thickness operational product. J. Geophys. Res., 1997, 102(D14): 16889-16909
- (23) 赵柏林, 俞小鼎. 海上大气气溶胶的卫星遥感研究. 科学通报, 1986, 31: 1645-1649
- (24) 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 王美华. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. 大气科学, 2003, 27(1): 23-35
- (25) 毛节泰, 李成才, 张军华等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 127-135
- (26) 李成才, 毛节泰, 刘启汉等. 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, 2003, 48(19): 2094-2100
- (27) 陈兴茂, 冯丽娟, 张安慧等. 青岛地区总悬浮颗粒物中金属元素沉降通量. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 18-20
- (28) 徐新华, 姚荣奎, 李金龙. 青岛地区气溶胶的酸碱特性. 环境科学研究, 1996, 9(5): 5-8
- (29) 王珉, 胡敏. 青岛沿海大气气溶胶中海盐源的贡献. 环境科学, 2000, 21(5): 83-85

- (30) 王珉, 胡敏. 青岛沿海地区大气气溶胶浓度与主要无机化学组成, 环境科学, 2001, 22(1): 6-9
- (31) 王珉, 胡敏. 青岛沿海大气气溶胶中无机组分在粗、细粒子上的分布, 环境科学, 2001, 22(5): 35-37
- (32) Kuo-Nan Liou 著, 周诗键, 阮忠家, 陶丽君, 朱文琴译. 大气辐射导论. 北京: 气象出版社, 1985.
- (33) 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学. 南京: 南京大学出版社, 1990.
- (34) T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao, et al. . Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydisperions. Applied Optics, 1996, 35(15): 2672-2686
- (35) T. Nakajima and M. Tanaka. Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, J. Quant. Spectrocs. Radiat. Transfer, 1988, 40: 52-69.
- (36) 徐新华, 姚荣奎, 李金龙. 青岛地区大气气溶胶海洋因子贡献研究. 海洋环境科学, 1997, 16(2): 55-59
- (37) 徐静琦, 张正, 魏皓. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析. 海洋湖沼通报, 1994, 2: 174-178
- (38) 刁学贤. 青岛及其近海海雾的主要特征. 海洋通报, 1996, 15(3): 87-91
- (39) 盛立芳, 耿敏, 王园香等. 2002 年春季沙尘暴对青岛大气气溶胶的影响. 环境科学研究, 2003, 16(5): 11-13
- (40) 赵德山, 王明星. 煤烟型城市污染和大气气溶胶. 北京: 中国环境科学出版社, 1991: 81
- (41) 田文寿, 陈长河, 黄建国. 兰州冬季气溶胶的谱特征及其折射率. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 126-132
- (42) A. Molnár, E. Mészáros. On the relation between the size and chemical composition of aerosol particles and their optical properties. Atmospheric environment, 2001, 35: 5053-5058
- (43) 王庚辰. 大气气溶胶浓度及其谱分布的某些特征. 大气科学, 1982, 6(2): 211-216
- (44) 刘玉洁, 杨忠东等. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001: 1-66
- (45) Kaufman, Y. J., L. Remer, et al. . Remote sensing of tropospheric aerosols from EOS-MODIS over land. J. Geoph. Res., 1997, 102: 17051-17067
- (46) Kaufman, Y. J., D. Tanre. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS,

MODIS ATBD, 1998

- (47) Kaufman, Y. J., Wald, A. E.. The MODIS 2.1 μ m channel – correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. IEEE Transations on geoscience and remote sensing, 1997, 35(5): 1286-1298
- (48) 李正强, 赵凤生, 赵葳等. 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究. 量子电子学报, 2003, 20(5): 635-640

附 录

1 空气污染指数介绍

空气污染指数 (Air Pollution Index, 简称 API) 是一种反映和评价空气质量的方法, 就是将常规监测的几种空气污染物的浓度简化成为单一的概念性数值形式、并分级表征空气质量状况与空气污染的程度。其结果简明直观, 使用方便, 适用于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势。

空气污染指数的确定原则: 空气质量的好坏取决于各种污染物中危害最大的污染物的污染程度, 并根据环境空气质量标准和各项污染物对人体健康和生态环境的影响来确定污染指数的分级及相应的污染物浓度限值。目前我国所用的空气指数的分级标准是: (1) 空气污染指数(API)50 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值一级标准; (2) API100 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值二级标准; (3) API200 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值三级标准; (4) API 更高值段的分级对应于各种污染物对人体健康产生不同影响时的浓度限值, API500 点对应于对人体产生严重危害时各项污染物的浓度。

我国城市的空气污染以煤烟型污染为主, 针对煤烟型污染特征, 空气常规监测的指标主要为二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x) 和总悬浮颗粒物 (TSP), 空气质量污染指数分级标准见附表 1。空气污染指数范围、相应的空气质量类别以及对人体健康的影响效应见附表 2。

2 空气污染指数的计算

设 I 为某污染物的污染指数, c 为该污染物的浓度, 则

$$I = \frac{I_{\text{大}} - I_{\text{小}}}{c_{\text{大}} - c_{\text{小}}} (c - c_{\text{小}}) + I_{\text{小}}$$

式中, $c_{\text{大}}$ 与 $c_{\text{小}}$ 是在 API 分级限值表 5.1 中最贴近 c 值的两个值, 分别为大于 c 的限值和小于 c 的限值; $I_{\text{大}}$ 与 $I_{\text{小}}$ 是 API 分级限值表 (附表 1) 中与 $c_{\text{大}}$ 和 $c_{\text{小}}$ 对应的 API 值。

附表1 空气污染指数对应的污染物浓度限值表

污染指数 (API) I	污染物浓度 (mg/m^3)		
	$c(\text{SO}_2)$	$c(\text{NO}_x)$	$c(\text{TSP})$
50	0.050	0.050	0.120
100	0.150	0.100	0.300
200	0.800	0.150	0.500
300	1.600	0.565	
400	2.100	0.750	
500	2.620	0.940	

附表2 空气污染指数范围、质量类别与人体健康影响效应

空气污染指数 API	空气质量状况	对健康的影响	建议采取的措施
0~50	优	可正常活动	
51~100	良		
101~150	轻微污染	易感人群症状有轻度加剧, 健康人群出现刺激症状	心脏病和呼吸系统疾病患者应减少体力消耗和户外活动
151~200	轻度污染		
201~250	中度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧, 运动耐受力降低, 健康人群中普遍出现症状	老年人和心脏病、肺病患者应在停留在室内, 并减少体力活动
251~300	中度重污染		
>300	重污染	健康人运动耐受力降低, 有明显强烈症状, 提前出现某些疾病	老年人和病人应当留在室内, 避免体力消耗, 一般人群应避免户外活动

致 谢

在本文完成之际，我要衷心地感谢三年来给予我莫大支持和帮助的各位老师、同学和家人，是他们无私的教诲和关怀使我得以愉快地完成三年的求学生活。

衷心地感谢我的导师盛立芳博士在学术上给予我的精心指导和悉心帮助，在生活上对我的关心和照顾，感谢导师为我创造了良好的学习环境和实践机会。三年来，导师渊博的知识、严谨的治学态度、对科学研究的执著追求给我留下了深刻的印象，深深地影响着我，激励着我！

衷心地感谢中国科学院大气物理研究所石广玉研究员提供的项目支持，北京大学毛节泰教授为我提供了 2002 年的 MODIS 资料，青岛市气象台提供了地面观测资料。

衷心地感谢吴增茂教授和高山红博士在学习和学术上给予我的启发和帮助。

衷心地感谢气象系的各位老师给予我的关心和帮助；感谢我的室友、朋友对我的支持与帮助！

最后，感谢我的爱人、我的父母兄弟对我的一贯支持和鼓励，使我能够心无旁骛，专心致力于学业。

再次衷心地感谢他们！