

中国东部若干地区大气气溶胶 虚折射指数特征

胡欢陵 许军 黄正

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

提 要

利用直接取样和积分片方法对大气气溶胶的折射指数虚部 n_i 进行了大量的实际测量.根据测量结果,给出了中国东部不同类型地区气溶胶 n_i 的统计特征:城市地区为0.080;郊区为0.063;乡村地区为0.030;高山为0.012;南海区域为0.006.城市和郊区的 n_i 值,冬半年(11月至次年的5月)比夏半年(6月至10月)大,12月份的 n_i 为极大值.除南海外,中国东部各类地区的 n_i 值比国外同类地区偏大,这与把煤炭作为主要能源造成的燃煤烟尘污染有关.

关键词: 大气气溶胶; 折射指数; 积分片方法.

一、引 言

粒子的折射指数虚部 n_i 是决定大气气溶胶吸收特性的重要参数,它影响辐射在大气中的传输,在气候变化中起着重要的作用. Yamamoto 等人^[1]的数值试验表明,含量日益增多的大气气溶胶对地气系统产生增温效应还是冷却效应,主要取决于气溶胶折射指数虚部数值的大小.气溶胶粒子折射指数虚部 n_i 的测量研究已引起普遍的重视.

大气气溶胶折射指数虚部 n_i 取决于粒子的成分.由于气溶胶粒子的成分与诸多因素有关,例如粒子源分布、下垫面构成、季节和气象条件等,因此气溶胶的 n_i 值变化很

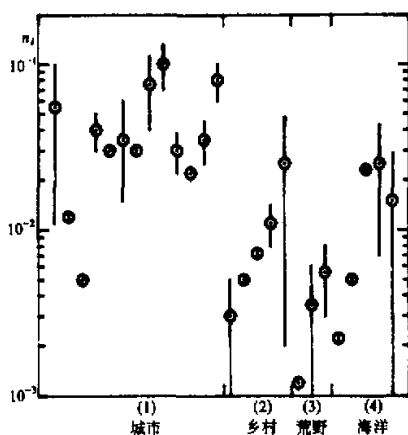
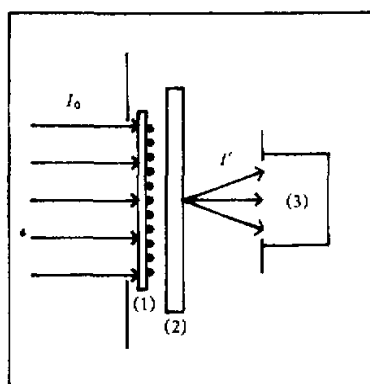


图1 Gerber等^[2]汇集的 n_i 测量值



(1) 滤膜 (2) 毛玻璃 (3) 探测器

图2 积分片法测量装置原理图.

1989年6月5日收到, 8月6日收到修改稿.

大. Gerber 等人^[2] 汇集的 n_i 测量结果如图 1 所示. 可以看到, n_i 的变化范围可达两个数量级以上.

人类活动对大气气溶胶特征包括折射指数虚部特征的影响是值得重视的. 中国东部地区人口稠密, 工业发达. 1984 年来, 我们先后在中国东部的城市、郊区、乡村、高山和海洋等典型地区, 通过直接取样, 利用积分片方法测量了各地的大气气溶胶折射指数虚部 n_i . 另外, 在合肥郊区还进行了逐旬的 n_i 值测量.

二、测量方法

在众多的粒子折射指数虚部 n_i 测量方法中, 由 Lin 等^[3] 提出后来经 Weiss^[4] 改进的积分片法是一种较简便易行的直接测量方法, 测量装置原理如图 2 所示. 测量中, 利用具有漫透射特性的毛玻璃片来收集由滤膜上取样粒子散射的光通量. 由于光散射不会引起光能量的损失, 滤膜上采样粒子造成的光能量损失只是由于粒子的吸收引起的. 当接收整个空间由散射引起的光通量后, 即可得到气溶胶的吸收系数.

设 I_0 是入射光强, I' 和 I 分别是气溶胶粒子取样前和取样后滤膜在积分片装置中所测量到的光强. 气溶胶粒子的吸收系数 b_a 及其光学厚度 τ_{ab} 满足下式

$$\tau_{ab} = b_a \cdot x = \ln \left(\frac{I'}{I} \right), \quad (1)$$

x 是取样空气柱的长度. 根据散射理论有

$$b_a = \int_0^\infty Q_{abs}(n_r, n_i, r, \lambda) \pi r^2 n(r) dr, \quad (2)$$

这里, Q_{abs} 是半径为 r , 折射指数实部和虚部分别为 n_r 和 n_i 的粒子对于波长为 λ 的光的吸收效率因子, $n(r)$ 是粒子的谱分布. 当粒子的相对大小 α 不太大, 且 $n_i \ll n_r$ 的情况下, 有近似式

$$Q_{abs} = f(n_r) \cdot n_i \cdot \alpha, \quad (3)$$

这里

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda},$$

$$f(n_r) = \frac{24n_r}{(n_r^2 + 2)^2}.$$

合并(1)至(3)式可得

$$n_i = \frac{2\tau_{ab} \cdot A \cdot \lambda \cdot \rho}{3\pi \cdot f(n_r) \cdot M}, \quad (4)$$

或

$$n_i = \frac{A \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \ln(I'/I) \cdot (n_r^2 + 2)^2}{36\pi \cdot n_r \cdot M}, \quad (5)$$

这里 A 是滤膜的取样面积, λ 是测试光的波长, ρ 是粒子的比重, M 是取样粒子的质量.

n_r 是粒子折射指数的实部, 由(5)式可得到 n_i 值.

测量光路上一些界面的反射、滤膜小孔的散射、以及多次散射等因素, 给积分片法测量的 n_i 值带来误差. Clarke^[5] 给出的分析结果表明, 积分片法所测量的 n_i 值最大可能偏高 30%. 文献[5] 中没有考虑近似式(3)引起的误差. (3)式的线性近似在 $\alpha < 5$ 的情况下是比较精确的, 但在 $\alpha > 5$ 特别当 $\alpha > 10$ 时, Q_{abs} 随 r 变化的斜率会明显减小. 因此, 当粒子大小分布是宽谱的情况下, 用(3)式作为近似式会引起 n_i 值偏小. 这样会部分抵消上述 Clarke 给出的使 n_i 值偏高的误差.

测量中, 使用的滤膜是核子小孔滤膜. 微孔直径为 $0.2\mu\text{m}$, 一般可收集直径为 0.2 至 $10\mu\text{m}$ 的粒子. 这种高纯度的聚碳酸酯半透明微孔滤膜吸湿性很小. 它的折射指数为 1.58, 与粒子的折射指数实部相近, 因而在两者的界面上较少发生反射. 粒子样品称重采用十万分之一克精度的电子微量天平. 根据误差理论, 由几个直接测量变量 $u, v, \dots$ 计算得到的函数 y , 它的误差可近似地表达为

$$(\delta y)^2 = (\delta u)^2 \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + (\delta v)^2 \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 + 2 C_{uv}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right) + \dots, \quad (6)$$

这里 δu 和 δv 是测量变量 u 和 v 的测量误差, C_{uv}^2 是 u 和 v 的协方差. 当 u 和 v 互为独立时, $C_{uv}^2 = 0$. 把(6)式用于(4)式, 并假定各参数之间互不相关, 则有

$$\left(\frac{\delta n_i}{n_i} \right)^2 = \left(\frac{\delta \tau_{ab}}{\tau_{ab}} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\delta M}{M} \right)^2 + \left(\frac{\delta f(n_r)}{f(n_r)} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2. \quad (7)$$

根据光辐射通量测量精度, τ_{ab} 的相对误差小于 10%. 天平称重精度为 $10\mu\text{g}$, 粒子样品称重相对误差小于 5%. 取样面积相对误差较小, 约为 1%. 计算中 n_r 取 1.50, 如果 n_r 在 1.45 和 1.55 之间变化, 则 $f(n_r)$ 的相对误差小于 4%. ρ 取 $1\text{g}/\text{cm}^3$, 设它的相对误差为 20%. 综上所述, 由(7)式可得 n_i 的测量相对误差小于 25%.

三、各典型地区 n_i 值的统计特征

1984 年 4 月至 1988 年 3 月, 分别在合肥、天津、沈阳和南京的市区和郊区、皖南农村的辅村、黄山光明顶(海拔高度 1840m)和南海(114.6 — 115.5 °E, 18.7 — 22.5 °N)等地取得了大量的大气气溶胶样品. 在天津郊区的气象铁塔的塔顶(220m 高)和塔底同时进行了取样测量. 计算中, 南海的气溶胶折射指数实部取为 1.45, 其余各地的 n_r 均取 1.50. 上述各测点可分为城市、郊区、农村、高山和海洋等五类地区, 测量结果如图 3 所示. 与图 1 比较后可以看到, 除了海洋区域外, 我国东部各地气溶胶 n_i 值与国外相应类别地区的气溶胶 n_i 相比偏大.

表 1 城市气溶胶 n_i 值

城 市	n_i	备 注
合 肥	0.060 ± 0.025	中等城市
天 津	0.080 ± 0.016	工业城市
沈 阳	0.100 ± 0.020	重工业城市
平均	0.080 ± 0.016	

1. 城市市区和郊区气溶胶的 n_i 值

1985 年和 1986 年分别在合肥市大西门环境监测站、天津市气象局以及沈阳市体育场三地对城市中心区的大气气溶胶粒子进行取样测量, n_i 的测量结果列于表 1. 可以看到, 我国东部这三个城市市区的 n_i 值平均高达 0.080. 纽约市 1967 年测量的 n_i 的平均值是 0.040^[1]. 图 1 中 Gerber^[2] 给出的城市气溶胶 n_i 值大部分在 0.05 以下, 我国东部这三个城市 n_i 值是它们的 2 倍左右. 这可能与我国这些城市的工业和民用能源主要是煤炭有关, 燃煤烟尘的吸收系数很大. Twitty 等人^[6] 给出的煤烟和煤屑的 n_i 值高达 0.5. 沈阳是重工业城市, 煤烟污染很严重, n_i 高达 0.1. 天津的 n_i 值虽比沈阳的低, 但也达 0.080, 粒子的吸收也是很高的. 合肥是一个中等城市, 由于测点位于大西门繁忙的交通主干道附近, 柴油汽车和拖拉机的不充分燃烧的排气中含碳量较大, 因此该测点的平均 n_i 值也高达 0.075. 在合肥市南门附近的中国科技大学校园里, 在约 25m 高的教学楼顶也进行了取样测量, 由于周围没有大的烟尘污染源, 测点的高度也较高, 因此所测的 n_i 最小值仅为 0.04. 就平均而言, 合肥市区气溶胶折射指数虚部为 0.060, 比沈阳和天津的 n_i 值小得多.

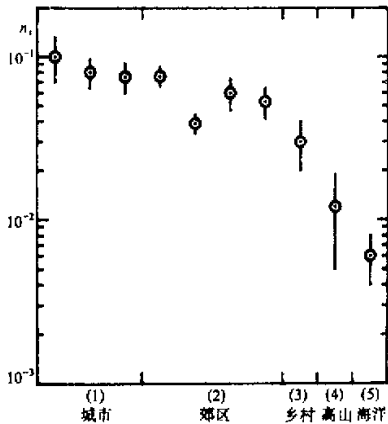


图3 我国东部地区 n_i 测量值

合肥、南京和天津三市的郊区气溶胶 n_i 测量结果列于表 2. 可以看到, 郊区 n_i 平均值为 0.063, 比市区的 n_i 值低. 这三个测量点中, 天津郊区 n_i 值最高, 达 0.076. 这与那里的煤烟污染较严重有关. 合肥郊区 n_i 的平均值与市区的 n_i 平均值相等, 这表明象合肥这样的中等城市, 在测点附近没有严重污染源的情况下, 由于地域范围不大, 因此就平均状况而言, 市区和郊区的气溶胶吸收特征相近. 天津郊区的测量是在气象铁塔上进行的, 在塔底和 220m 高的塔顶同时进行取样. 结果表明, 塔顶高度的气溶胶 n_i 值为 0.039, 大约是塔底粒子 n_i 值的一半. 这说明工厂排放的燃煤烟尘对 220m 高度的大气气溶胶影响较小. 未充分燃烧因而含碳量较高的烟粒可能是一些较大的粒子. 这些粒子对数密度谱特征不足以产生明显的影响, 但它们足以使取样片上粒子的吸收系数特别大, 从而使所得到的近地面气溶胶 n_i 值较大.

表2 郊区气溶胶 n_i

郊 区	n_i	测量点
合 肥	0.060 ± 0.013	安光所
南 京	0.053 ± 0.011	工程学院
天 津	0.076 ± 0.010	铁塔底
平 均	0.063 ± 0.010	
天 津	0.039 ± 0.005	铁塔顶

表3 乡村、高山和海洋的大气气溶胶 n_i

类 别	n_i	测 点
乡 村	0.030 ± 0.010	辅 村
高 山	0.012 ± 0.007	黄山光明顶
海 洋	0.006 ± 0.002	南 海

2. 乡村和高山地区气溶胶的 n_i 值

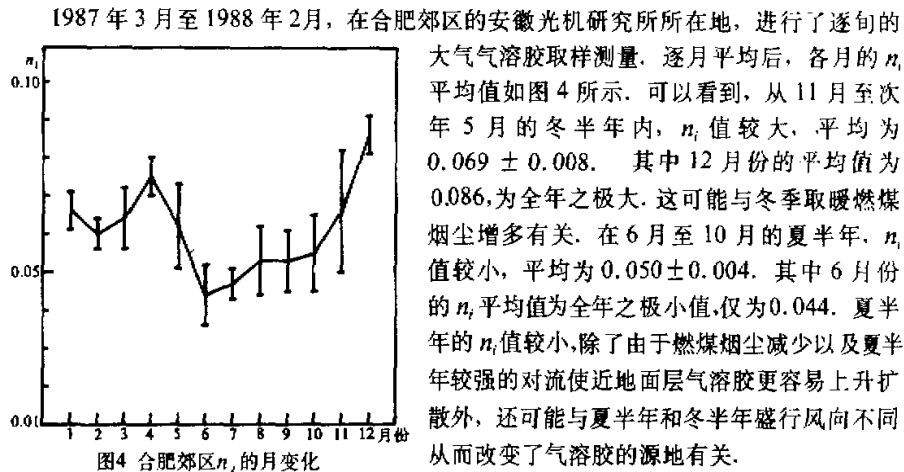
在皖南农村的辅村进行了农村地区气溶胶粒子的取样测量. 高山测点位于黄山光明

顶气象站。这两个测点的气溶胶 n_i 值列于表 3。图 1 中 Gerber 等^[2] 给出的乡村地区的 n_i 值约为 0.003 至 0.025, 荒野地区的 n_i 值约为 0.001 至 0.005。辅村所测 n_i 的平均值为 0.030, 黄山光明顶的 n_i 平均为 0.012, 它们都明显偏大。黄山远离城市的工业和生活污染源, 当地的污染程度很轻。光明顶海拔高度 1840m, 位置较高, 受当地污染的影响较小, 因此那里测量的气溶胶 n_i 值可能接近我国东部地区近地面层大气气溶胶 n_i 的背景值。

3. 南海海洋区域大气气溶胶 n_i 值

南海海域大气气溶胶 n_i 测量结果的平均值为 0.006。在近海区, n_i 为 0.0085, 这与受大陆影响有关。在远海区, n_i 为 0.0036。这些测量值处于图 1 给出的海洋气溶胶测量值范围之内, 比 Selby^[7] 给出的近海和远海气溶胶 n_i 值 0.006 和 0.002 稍大。

四、折射指数虚部 n_i 的时间变化



五、结 论

通过直接取样, 利用积分片方法对大气气溶胶的实际测量, 给出了中国东部不同类型地区大气气溶胶虚折射指数 n_i 的统计特征。城市和郊区的 n_i 分别为 0.080 和 0.063。在一年中, 冬半年各月的 n_i 值较大, 其中 12 月份出现全年的极大值。乡村地区为 0.030, 高山地区为 0.012, 它可能接近中国东部地区近地面层中大气气溶胶折射指数虚部的背景值。南海区域为 0.006。除了南海外, 中国东部各类地区气溶胶的 n_i 值比国外同类地区偏大, 这与把煤炭作为主要能源而造成燃煤烟尘污染有关。

参 考 文 献

- [1] Yamamoto, G. and M. Tanaka, 1971, Increase of global albedo due to air pollution, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1405 — 1412.

- [2] Gerber, H. E. and E. E. Hindman, 1981, First International Workshop on Light Absorption by Aerosol Particles: Background, Activities, and Preliminary Results, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **62**, 1321 — 1327.
- [3] Chin-I Lin, M. Baker and R. J. Charlson, 1973, Absorption coefficient of atmospheric aerosol: a method for measurement, *Appl. Opt.*, **12**, 1356 — 1363.
- [4] Weiss, R. E., 1980, Ph. D. Dissertation, University of Washington, Seattle.
- [5] Clarke, A. D., 1982, Effects of filter internal reflection coefficient on light absorption measurements made by using the integrating plate method, *Appl. Opt.*, **21**, 3021 — 3031.
- [6] Twitty, J. T. and J. A. Weinman, 1971, Radiative properties of carbonaceous aerosol, *J. Appl. Meteor.*, **10**, 725 — 731.
- [7] Selby, J. E. A., E. P. Shettle and R. A. McClatchey, 1976, Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μm : Supplement Lowtran 3B, AFGL-TR-76-0258, *Environmental Papers* **587**, 27 — 34.

CHARACTERISTICS OF IMAGINARY PART OF AEROSOL REFRACTIVE INDEX IN SOME AREAS OF EASTERN CHINA

Hu Huanling, Xu Jun and Huang Zheng

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

By using integrating plate method, the imaginary part in of aerosol refractive index is measured for the particles sampled at some places with different types of terrains in Eastern China. The measurement results reveal the statistic characteristics of imaginary part n_i of aerosol refractive index in Eastern China: 0.080 in cities; 0.063 in suburbs; 0.030 in rural area, 0.012 in mountainous district, which may be taken as the background value of n_i in Eastern China, and 0.006 in the South China Sea area. In city and suburb, in values in cool half year (November to next May) are larger than in warm half year's (June to October), and the n_i value measured in December is maximum. The n_i values in Eastern China except ocean region are larger than in corresponding types of terrains of other countries, which are relevant to the severe coal-fired smoke pollutants in Eastern China.

Key words: Aerosol; Refractive index; Integrating plate method.