

张乐琪, 刘韬, 张桂梅. 中国北方大气气溶胶微物理特性研究 [J]. 陕西气象, 2014 (3): 12-16.

文章编号: 1006-4354 (2014) 03-0012-05

# 中国北方大气气溶胶微物理特性研究

张乐琪, 刘 韬, 张桂梅

(横山县气象局, 陕西横山 719000)

**摘 要:** 利用 AERONET (Aerosol Robotic Network) 榆林、北京、香河、兰州四站点的数据分析中国北方大气气溶胶的光学和物理特性。分析内容包括: 气溶胶光学厚度、单次散射反照率、复折射指数、散射不对称因子、Angstrom 波长指数、气溶胶体积尺度谱分布。分析结果表明: 春季光学厚度为四季中最大; 沙尘源区的 Angstrom 波长指数和光学厚度的关系较为简单, 且随光学厚度的增加呈降低趋势, 下游地区 Angstrom 波长指数和光学厚度关系较为复杂; 所有站点的体积谱分布均呈双峰分布, 夏半年积聚态为主模态, 冬半年粗模态为主控模态; 粗粒子的散射不对称因子大于细粒子的。

**关键词:** 大气气溶胶; 微物理特性; 光学厚度

**中图分类号:** X513

**文献标识码:** A

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径为  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$  的液体、固体微粒体系。气溶胶的存在对于局地微气候、区域环境、全球环境、区域以及全球辐射收支平衡、酸沉降、人体健康等有着直接或者间接的关联<sup>[1-3]</sup>, 越来越受到世人以及学界的关注。大气气溶胶的组成成分较为复杂, 总的来说一般可将大气气溶胶分为几大类, 因此, 在了解不同地区不同类别的大气气溶胶情况下, 在比较具有代表意义的地区建立长期监测的地面观测站点, 以便获得相关大气气溶胶的微物理与辐射特性, 在此基础上建立相应的动态模式来研究各区域和类型的大气气溶胶, 对于大气气溶胶的辐射强迫和卫星遥感研究具有非常重要的意义。亚洲沙尘气溶胶的主要来源为中国和蒙古, 而中国的沙尘源主要为中国西北地区, 因此中国北方大气气溶胶微物理特性主要受到沙尘气溶胶和人为污染气溶胶的影响, 尤其是春季, 西风将大量的沙尘气溶胶输送到自由大气层并远距离输送, 对整个大气辐射强迫和大气环境造成影响<sup>[4-7]</sup>。以兰州和榆林为沙尘源区的代表站点,

北京和香河为下游地区的代表站点, 通过对两类区域站点的大气气溶胶微物理特性比对和差异分析, 从而揭示沙尘气溶胶长距离传输的生态环境效应及气候强迫的重要意义。

## 1 研究站点和数据资料简介

Aerosol Robotic Network (AERONET) 是由美国国家宇航局 NASA 及其合作单位在全球范围内设立的气溶胶光学特性监测网, 它包含全球海洋和陆地大约 400 个气溶胶观测站点。目前, 中国大约有 50 多个站点, 其中北京、兰州、榆林和香河 4 站的观测时间较长, 观测结果基本上能反应站点所在地的气溶胶光学特性, 这些数据已经在 AERONET 网站 (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) 共享。利用 4 站的大气气溶胶光学特性数据研究中国北方大气气溶胶的微物理特性。

兰州、香河、榆林、北京 4 站的地理位置和观测时间见表 1。季节的划分: 冬季为 12、1 和 2 月, 春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月。冬半年一般包括冬季与春季, 夏半年

收稿日期: 2013-08-07

作者简介: 张乐琪 (1990—), 女, 汉族, 陕西榆林人, 学士, 主要从事天气预报和人工影响天气。

一般包括夏季和秋季。

表 1 各观测站点的位置、海拔高度及观测时间

站点	纬度	经度	高度/m	观测时间
榆林	38.283°N	109.72°E	1 080	2001-04-12, 2002-03-10
北京	39.977°N	116.38°E	92	2001-03-04, 2002-04-2012-08
香河	39.754°N	116.94°E	36	2001-03-04, 2004-09-2012-05
兰州	35.570°N	104.08°E	1 965.8	2006-01-2012-12

## 2 结果分析

### 2.1 光学厚度

大气气溶胶的光学厚度 (AOT) 是气溶胶微物理特性的重要参数之一, 是表征大气混浊度和气溶胶含量的一个重要物理量。图 1 给出了中国北方 4 站月平均光学厚度 (670 nm) 变化图。可以看出, 各站点的光学厚度值随季节变化比较明显, 且春季光学厚度最高。兰州春冬季光学厚度较夏秋季高, 其原因为: 兰州春季主要受沙尘气溶胶影响, 冬季受供暖排放的燃烧气溶胶影响, 气溶胶浓度和粒径均增加。榆林春季月平均光学厚度较高, 夏季为春季的 88.9%, 而秋季仅为春季的 46%; 其 4 月平均光学厚度为 4 站全年最高, 其他站点 4 月也表现出了较高的月平均光学厚度值, 这与中国北方春季尤其是 4 月沙尘天气有关, 也与长期地面气象观测情况相符<sup>[8]</sup>。中国西部地区如瓦里关和格尔木的光学厚度也表现出了类似的季节变化趋势<sup>[9]</sup>。

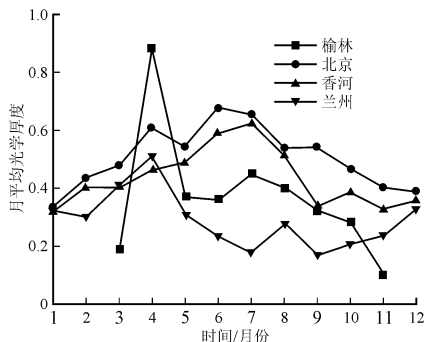


图 1 中国北方 4 站 679 nm 月平均光学厚度

另外, 6 月的北京 (0.68)、7 月的香河站 (0.62) 也出现较高的月平均 AOT, 甚至超过各

自 4 月的月平均 AOT, 其原因可能与大气较稳定、降水较少, 不利于污染物扩散和清除等因素有关<sup>[10]</sup>; 冬季 4 站月平均 AOT 相对于其他季节低一些, 这可能是由于中国北方受冬季风影响, 污染物扩散加快; 除 4 月外, 北京和香河月平均 AOT 均高于另外 2 站点。这说明人为污染气溶胶是中国北方东部地区主要的大气气溶胶。

### 2.2 Angstrom 波长指数

Angstrom 波长指数  $\alpha$  描述了气溶胶光学厚度随波长的变化, 是衡量气溶胶粒子大小的一个重要光学参数,  $\alpha$  的范围一般为  $0 < \alpha < 2$ , 平均值大约为 1.3<sup>[11]</sup>。 $\alpha$  越小说明气溶胶粒子平均半径越大, 粒子尺度越大; 反之,  $\alpha$  越大说明气溶胶粒子平均半径越小, 气溶胶粒子尺度越小, 越接近分子散射<sup>[12]</sup>。

图 2 为中国北方 4 站月平均 Angstrom 波长指数, 从图 2 可以看出: 北方 4 站月平均 Angstrom 指数的最低值都出现在 4 月, 榆林 4 月月平均  $\alpha$  (0.32) 在沙尘气溶胶的  $\alpha$  值范围内, 而兰州 4 月月平均  $\alpha$  (0.54) 略高于沙尘气溶胶的  $\alpha$  值, 表明中国北方西部地区 4 月主要受沙尘气溶胶的影响。从季节来看, Angstrom 指数春季相对较小, 夏季相对较大, 说明春季大气气溶胶粒子的粒径比较大, 中国北方春季多沙尘天气。中国北方东部地区全年  $\alpha$  介于 0.7 与 1.4 之间, 表明中国北方东部地区主要为城市-工业气溶胶、生物质燃烧气溶胶等人为污染气溶胶。

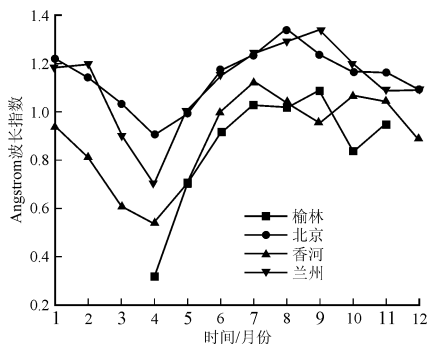


图 2 中国北方 4 站月平均 Angstrom 波长指数

图 3 给出了 4 站气溶胶光学厚度 (870 nm) 与 Angstrom 指数的函数关系。当 AOT < 0.2 时, 榆林和兰州沙尘源区站点的  $\alpha$  在负值到 2.0

之间变动;当  $AOT > 0.2$  时,  $\alpha$  保持在零左右。同时,榆林和兰州站在  $AOT > 0.2$  时,  $\alpha$  变动较小,  $AOT-\alpha$  关系相对比较简单,基本上随  $AOT$  增大  $\alpha$  表现出减小的趋势,而北京和香河的  $AOT-\alpha$  关系复杂。图 3 体现出的  $AOT-\alpha$  的关系也说明了沙尘源区主要以粗的沙尘气溶胶粒子为主控粒子,经过远距离传输和粗粒子的干、湿沉降作用,北方东部地区的气溶胶粒子主要是不同粒径大小的沙尘粒子和人为污染粒子<sup>[13]</sup>。

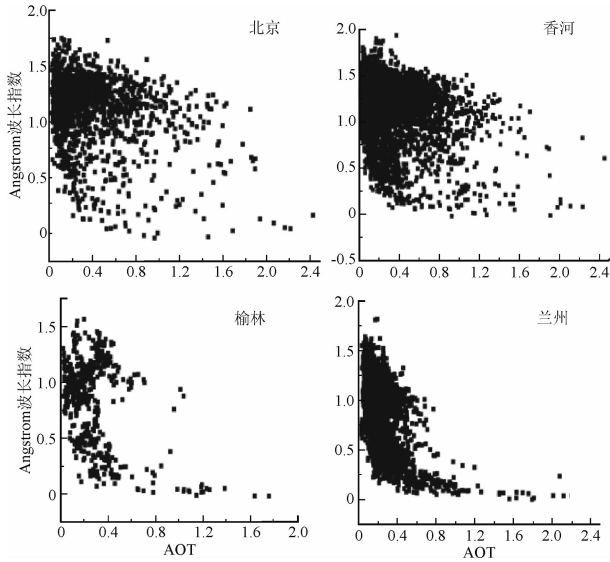


图 3 中国北方 4 站不同气溶胶光学厚度条件下 Angstrom 波长指数

### 2.3 体积尺度谱分布

气溶胶粒子的体积谱分布是研究大气气溶胶的微物理特征和大气辐射强迫的一个重要参数。图 4 为中国北方香河、北京、榆林和兰州 4 站冬半年的平均体积尺度谱分布。可以看出,4 站具有类似的谱分布特征,均呈双峰分布。其中积聚态的粒子半径主要集中在  $0.07 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ,而粗模态的粒子半径主要集中在  $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 。并且当  $AOT > 1$  时,兰州和榆林在半径为  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  出现了一个伪峰,而其它站点没有。

榆林和兰州积聚态峰值平均半径随  $AOT$  增大有减小的趋势。当  $AOT < 0.6$  时,峰值平均半径为  $0.11 \sim 0.15 \mu\text{m}$ ;当  $AOT > 0.6$  时,峰值平均半径在  $0.1 \mu\text{m}$  左右。而对于粗模态峰值半径却随着  $AOT$  增大而增大,当  $AOT < 0.6$

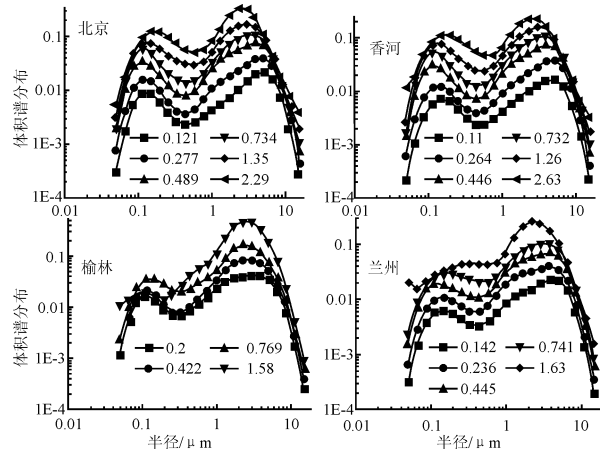


图 4 冬半年中国北方 4 站气溶胶体积尺度谱分布

时,峰值平均半径为  $3 \mu\text{m}$  左右,当  $AOT > 0.6$  时,峰值平均半径  $5 \mu\text{m}$  左右。

北京和香河的积聚态峰值平均半径随  $AOT$  增大而增大。当  $AOT < 0.6$  时,平均半径为  $0.11 \mu\text{m}$  左右;当  $AOT > 0.6$ ,最高峰值平均半径在  $0.11 \sim 0.15 \mu\text{m}$  左右。而粗模态峰的平均半径却随着  $AOT$  的增大而减小,如在  $AOT < 0.6$  时平均半径集中在  $7 \mu\text{m}$  左右,  $AOT > 0.6$  时又降至  $4.6 \mu\text{m}$ 。

图 5 给出夏半年期间中国北方 4 站的平均体积尺度分布。4 站积聚态半径主要集中在  $0.09 \sim 0.15 \mu\text{m}$ ,粗模态半径主要集中在  $3.8 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 。从图 5 也可以看出,积聚态和粗模态半径随  $AOT$  增大表现出增大的趋势,尤其是  $AOT < 0.6$  时表现较明显。当北京和香河地区的  $AOT > 1.5$ ,榆林和兰州站的  $AOT > 1$  时,积聚态峰半径上升到  $0.25 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。

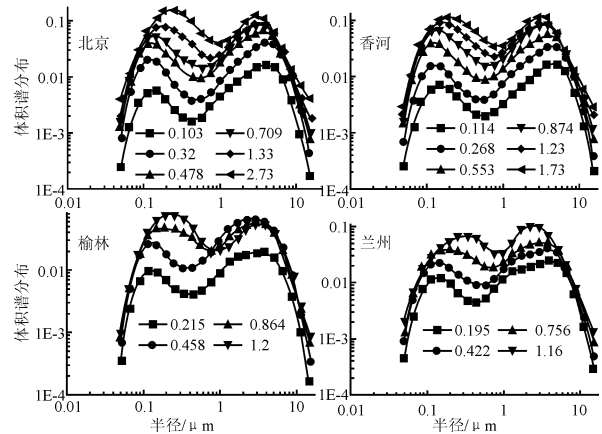


图 5 夏半年中国北方 4 站气溶胶体积尺度谱分布

分析可知, 在冬半年期间沙尘源区的粗模态峰占主要优势, 说明沙尘粒子为主控粒子。夏半年与冬半年情况相反, 下游地区的积聚态峰为主模态峰。对于榆林和兰州两个沙尘源区测站, 由于所在城市工业建设频繁、机动车辆较多, 因此, 两站点在夏半年粗模态和积聚态相平衡。

## 2.4 不对称因子

大气气溶胶粒子的不对称因子是表明粒子前向散射能力的一个重要参数。散射不对称因子值在 $\pm 1$ 之间变动, 对于瑞利散射而言, 其值为0, 而当其值为 $-1$ 时为完全后向散射, 当其值为 $1$ 时为完全前向散射。

图6给出了冬半年中国北方4站粗粒子( $r > 1.0 \mu\text{m}$ )和细粒子( $r \leq 1.0 \mu\text{m}$ )所对应的不对称因子随波长的变化关系图, 从图中可以得出: 各站点粗粒子所对应的不对称因子值比细粒子高; 粗粒子和细粒子所对应的不对称因子随波长增加均呈现下降趋势, 粗粒子不对称因子在 $440 \sim 670 \text{ nm}$ 波长范围内体现出了敏感性。沙尘源区站点细粒子所对应的不对称因子的值随光学厚度值的增大表现出增大趋势, 下游站点当 $\text{AOT} > 0.6$ 时也表现出相似的情况; 当波长为 $440 \text{ nm}$ 时, 沙尘源区站点所对应的的不对称因子的值大于下游站点; 粗粒子和细粒子的不对称因子的平均值分别为 $0.57$ 和 $0.86$ 。

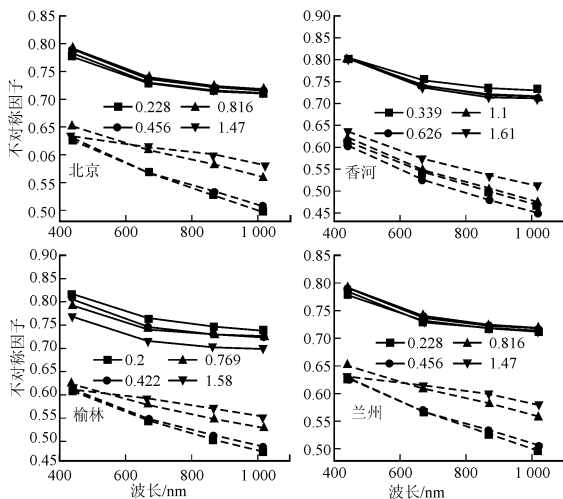


图6 冬半年中国北方4站粗粒子(实线)和细粒子(虚线)不对称因子随波长的变化

图7给出了夏半年各站点粗粒子和细粒子所对应的不对称因子随波长的变化关系图, 从图中可看出: 各站点粗粒子所对应的不对称因子值比细粒子高; 粗粒子和细粒子所对应的不对称因子随波长增加均呈现下降趋势, 粗粒子在 $440 \sim 670 \text{ nm}$ 随波长的变化体现出了敏感性; 各站点细粒子的不对称因子的值随AOT的增大而增大。上述结论与冬半年相同, 整体而言, 夏半年中国北方4站点当波长介于 $440 \sim 1020 \text{ nm}$ 时细粒子和粗粒子不对称因子值的变化范围分别为 $0.45 \sim 0.7$ 和 $0.75 \sim 0.9$ 。

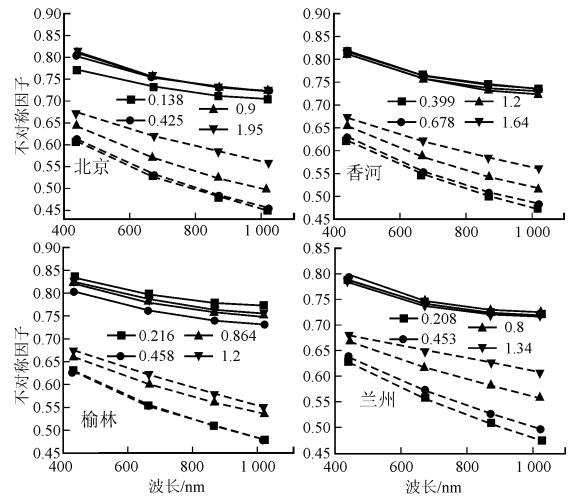


图7 夏半年中国北方4站粗粒子(实线)和细粒子(虚线)不对称因子随波长的变化

从图6和图7看出, 沙尘气溶胶源区的不对称因子大于下游地区的不对称因子, 粗粒子对应的不对称因子值高于细粒子的, 说明沙尘源区的粗粒子具有更强的前向散射能力。

## 2.5 单次散射反照率

单次散射反照率定义为气溶胶散射消光与总消光的比, 是衡量气溶胶粒子吸收特性的参数。图8给出了各观测站点单次散射反照率的月变化, 从图中看出, 北京、榆林、香河和兰州单次散射反照率最大值分别为 $0.937$ 、 $0.938$ 、 $0.96$ 、 $0.937$ , 分别出现在8、7、7和7月; 北京、香河和兰州单次散射反照率最小值分别为 $0.84$ 、 $0.85$ 和 $0.89$ , 并且分别出现在12、12和2月。单次散射反照率呈夏季高、冬季低的特点; 兰州

和榆林常年单次散射反照率值较高,反映了兰州和榆林地区的气溶胶散射能力较强。

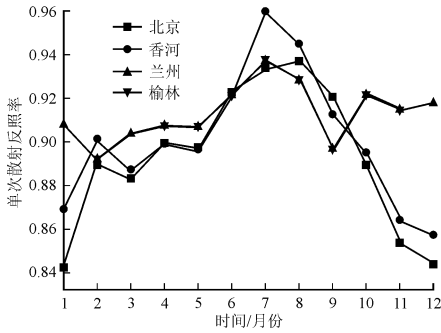


图8 中国北方4站单次散射反照率月变化

#### 4 结论

利用 AERONET 2001—2013 年反演数据对中国北方大气气溶胶的微理特性进行了研究。通过比较分析可以得到以下结论。

(1) 中国北方光学厚度季节变化比较明显,春季主要受沙尘气溶胶粒子影响,夏季主要以人为气溶胶为主,使得春季和夏季都有较高的光学厚度,春季最高;沙尘源区榆林和兰州的 Angstrom 波长指数与光学厚度的关系比较简单,随光学厚度的增加呈下降趋势;对于下游地区,Angstrom 波长指数和气溶胶的光学厚度关系较为复杂,表明了下游地区受沙尘气溶胶粗粒子和人为污染的细粒子等不同粒径的气溶胶共同影响。

(2) 中国北方4站表现出类似的体积谱分布特征:峰值半径分别集中在  $0.1\sim 0.15\ \mu\text{m}$  的积聚态和  $3.8\sim 6\ \mu\text{m}$  的粗模态。冬半年期间沙尘源的粗模态峰占主要优势,而夏半年下游区的积聚态峰为主模态峰。榆林和兰州夏半年粗模态和积聚态均表现出均衡的趋势。

(3) 北京、香河和兰州站单次散射反照率有季节性变化,夏季>春季>秋季>冬季;沙尘源区兰州和榆林两站的气溶胶粒子散射能力较强。

(4) 中国北方4站不论是冬半年还是夏半年,粗粒子对应的散射不对称因子总是大于细粒

子所对应的散射不对称因子;粗粒子和细粒子的散射不对称因子均随波长增加呈现下降趋势。

#### 参考文献:

- [1] 朱恩云, 马骏. 中国大气气溶胶的研究现状 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33 (12): 57-59.
- [2] 汪安璞. 大气气溶胶的研究新动向 [J]. 环境化学, 1999, 18 (1): 11-15.
- [3] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 2007, 22 (1): 13-22.
- [4] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气 [J]. 高原气象, 2003, 2 (22): 185-190.
- [5] 刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 近沙尘源区气溶胶光学特性的季节变化及其统计学描述 [J]. 中国沙漠, 2009, 29 (1): 174-182.
- [6] 李韧, 季国良. 敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化 [J]. 高原气象, 2003, 22 (1): 84-87.
- [7] 章文星, 吕达仁, 王普才. 北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析 [J]. 中国环境科学, 2002, 22 (6): 495-500.
- [8] Xia Xiangao, Chen Hongbin, Wang Pucai. Aerosol properties in a Chinese semiarid region [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38 (27): 4571-4581.
- [9] 周自江. 近45年中国扬尘和沙尘暴天气 [J]. 第四纪研究, 2001, 21 (2): 9-17.
- [10] 车慧正, 石广玉, 张小曳. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24 (5): 699-704.
- [11] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- [12] 白鸿涛, 陈勇航, 王洪强. 黄土高原半干旱区气溶胶光学特性季节变化特征 [J]. 干旱区地理, 2011, 34 (2): 292-299.
- [13] 于兴娜. 东亚地区大气气溶胶的微观特性及表面化学反应对其影响 [D]. 上海: 复旦大学, 2008.