

高中明, 闭建荣, 黄建平. 基于 AERONET 和 SKYNET 网观测的中国北方地区气溶胶光学特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1293-1307, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00116.

基于 AERONET 和 SKYNET 网观测的中国北方地区气溶胶光学特征分析

高中明, 闭建荣, 黄建平

(半干旱气候变化教育部重点实验室/兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用 AERONET 和 SKYNET 两个国际气溶胶网站提供的 2.0 等级气溶胶数据产品, 分析了中国北方地区榆中、北京、香河、榆林、敦煌和蒙古国达兰扎达嘎德 6 站气溶胶光学特征的日变化规律和季节变化特征, 并对其影响机制进行了研究。结果表明, 由于受沙尘天气的影响, 中国北方地区和蒙古国各测站春季气溶胶光学厚度均出现了较高值, 而波长指数则出现了最低季节平均值, 气溶胶粗、细粒子的体积谱分布也表现出明显的特征差异。此外, 由于受局地人类活动的影响, 各测站气溶胶光学参数也表现出不同的变化特征, 即在夏季相对湿润的环境下, 北京和香河站受当地城市污染气溶胶吸湿增长的影响, 其气溶胶光学厚度比其他季节都大, 同时该地区夏季单次散射反照率也出现了明显增大。

关键词: 气溶胶光学厚度; 波长指数; 体积谱分布; 单次散射反照率

文章编号: 1000-0534(2013)05-1293-15 **中图分类号:** P402 **文献标志码:** A

doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00116

1 引言

气溶胶作为地球一大气系统的一个重要组成部分, 能够影响全球辐射能量平衡和水分循环进而引起区域甚至全球的气候变化^[1-2]。它通过几种方式影响气候, 即直接辐射效应、间接效应和半直接效应^[3]。然而, 由于缺乏对气溶胶光学、微物理和化学特征及其时空分布的全面了解, 气溶胶的辐射强迫和气候效应仍然存在很大的不确定性^[4]。

中国北方和蒙古国南部的戈壁沙漠地区是东亚沙尘气溶胶的主要源区之一。该地区频繁发生的沙尘暴每年都会向大气中输入大量的沙尘气溶胶粒子, 这些沙尘粒子可以在气流的携带下进行长距离输送^[5]。同时, 人类活动、生物质燃烧产生的气溶胶以及 SO₂ 和 NO_x 在大气中通过非均相化学反应逐渐转化成的硫酸盐、硝酸盐粒子等二次气溶胶^[6]也是该地区气溶胶的重要来源。近年来, 中国北方地区气溶胶的环境和气候效应问题已得到广泛关注^[7-13]。同时, 一些气溶胶监测网也在该地区广泛布设气溶胶观测仪器, 如美国 NASA 全球气溶胶

监测网 AERONET、日本气溶胶/辐射观测网 SKYNET 以及中国太阳分光观测网 CSHNET 等, 提供对气溶胶长期、连续的地基观测数据。

气溶胶光学厚度(AOD)、Ångström 波长指数(α)、单次散射反照率(SSA)以及不对称因子(ASY)是估算其辐射强迫的关键参数。Ramanathan et al^[14]指出, 当 SSA>0.95 时, 气溶胶在大气层顶产生的辐射强迫为负值, 即冷却地气系统; 当 SSA<0.85 时, 气溶胶在大气层顶产生的辐射强迫为正值, 对地气系统有增暖作用。同时, 气溶胶体积谱分布特征可一定程度辨别人为气溶胶(如城市气溶胶和生物质燃烧气溶胶)和自然气溶胶(如沙尘和海盐气溶胶)^[15], 而不同类型的气溶胶对地球辐射平衡的影响也是不同的。因此, 分析中国北方地区不同测站气溶胶参数的长期时空变化特征, 对于研究该地区的气溶胶辐射强迫及其对气候变化的影响是十分必要的。

然而, 目前针对该地区气溶胶光学及微物理特性长期时空变化的研究还较少。Lee et al^[16]利用 CSHNET 观测网在 EAST-AIRE 试验期间 24 个

收稿日期: 2012-01-24; 定稿日期: 2012-04-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(40725015); 中央高校基本科研业务费重点项目(lzujbky-2010-k06, lzujbky-2010-211)

作者简介: 高中明(1986-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事大气物理与大气环境研究. E-mail: gaozm10@lzu.edu.cn

测站的观测资料反演获得的 2005 年 AOD₅₅₀、 α 和 SSA₅₅₀ 的全国平均值分别为 0.69 ± 0.17 、 1.06 ± 0.26 和 0.89 ± 0.04 。Huang et al^[13] 利用 CERES 资料反演获得的塔克拉玛干沙漠地区沙尘气溶胶的 SSA₆₇₀ 为 0.89, ASY₆₇₀ 为 0.74。此外, Che et al^[17] 利用 Cimel 太阳光度计(AERONET)和 Prede 天空辐射计(SKYNET)的观测资料,对比分析了北京气溶胶的物理特性和光学特性,结果表明,两套仪器 AOD 的偏差 ($(\text{平均}_{\text{SKYNET}} - \text{平均}_{\text{AERONET}}) / \text{平均}_{\text{AERONET}}$) < 1.3%; α 的偏差约为 10%~12%; 当波长 < 670 nm 时, SSA 的偏差 < 4%; 由于两套仪器观测协议和反演算法的不同,所以造成两者的体积谱分布存在一定的差异。

为了进一步增加对中国北方地区气溶胶光学特性和物理特性的时空分布特征及其长期变化的理解,本文利用 AERONET 和 SKYNET 两个国际气溶胶网站提供的 2.0 等级数据产品,分析中国北方地区榆中(SACOL)、北京、香河、榆林、敦煌和蒙古国达兰扎达嘎德 6 站气溶胶光学参数的月变化和季平均变化特征。

2 资料选取

AERONET 网站提供的数据分为三个等级,即 Level 1.0, Level 1.5 和 Level 2.0。其中, Level 2.0 数据是经过除云处理^[20]和人工检查保证的高精度数据产品。榆中、北京、香河、榆林和蒙古国达兰扎达嘎德 5 站的气溶胶特性(AOD、 α 、体积谱分布、单次散射反照率和不对称因子)数据等级均为 Level 2.0。AOD 是由除 936 nm 通道的观测资料反演获得的^[21]。 α 由 440, 675 和 870 nm 通道的 AOD 数据根据 Ångström 经验公式对 $\ln\tau_a$ 与 $\ln\lambda$ 进行最小二乘法线性拟合获得的,其中 λ 表示波长,单位是 μm ^[22]。体积谱分布和单次散射反照率是利

用太阳直接辐射测量数据和天空等天顶角辐射测量数据反演获得的^[23]。AOD 的误差约为 0.01~0.02^[24]。

SKYNET 网站提供的数据分为两个等级,即 Level 1.0 和 Level 2.0。其中, Level 2.0 数据是经过除云处理^[25]的高质量数据产品。敦煌站的气溶胶特性数据等级为 Level 2.0。AOD、单次散射反照率(400, 500, 675, 870 和 1 020 nm)、波长指数和体积谱分布等数据的反演是利用 Nakajima et al^[26]发展的软件(SKYRAD. pack Version 4.2)进行计算的。Kim et al^[27]对数据的质量控制、反演方法以及敏感性分析给出了详细的说明。

同时,为了使各测站气溶胶日平均光学厚度更具有代表性,在分析过程中仅对观测获得的数据个数 > 10 的天数进行统计。表 1 给出了各测站的数据时段和总个数以及各季节数据所占的比例等信息。

3 观测站概况和仪器介绍

3.1 观测站概况

图 1 给出了 6 个测站的地理分布情况和多年平均 AOD₆₇₅、 α 以及年平均等降水量线(降水资料来自中国气象局地面观测站,时间为 1961—2002 年)。不同的地理环境和气象条件等因素在一定程度上会影响该地区气溶胶的特征,因此,有必要先了解各测站的地理信息和气候条件。

榆中站,即兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University,简称 SACOL),位于甘肃省兰州大学榆中校区海拔约 1 965 m 的萃英山顶,地处兰州市东南方向,离市区约 47 km,该站下垫面属于典型的黄土高原地貌,受人类活动的直接影响较小。北京站位于北京市中国科学院大气物

表 1 各测站观测数据时段和总个数

Table 1 Period of observational data and total number at stations

观测站	经纬度	数据时段/(年-月)	总个数	春季	夏季	秋季	冬季
榆中	35.95°N, 104.14°E	2006-08—2009-07	554	160(29%)	150(27%)	118(21%)	126(23%)
北京	39.98°N, 116.38°E	2006-08—2009-07	506	152(30%)	94(19%)	131(26%)	129(25%)
香河	39.75°N, 116.96°E	2006-08—2009-07	600	145(24%)	113(19%)	158(26%)	184(31%)
榆林	38.28°N, 109.72°E	2001-04—2002-10	189	61(32%)	69(37%)	59(31%)	0
敦煌	40.15°N, 94.80°E	2004-02—2007-01	169	58(34%)	56(33%)	36(21%)	19(11%)
达兰扎达嘎德	43.58°N, 104.42°E	2004-02—2007-01	519	93(18%)	172(33%)	134(26%)	120(23%)

注:括号内数值为季节数据所占的比例

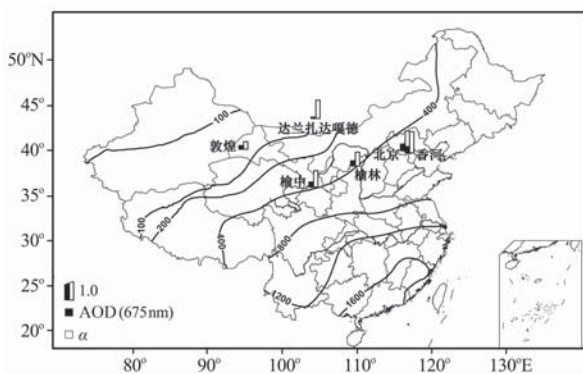


图 1 各测站地理位置及年平均 AOD(675 nm) 和 α (440~870 nm)

等值线表示 1961—2002 年平均年降水量值

Fig. 1 Geographical location of observation stations and annual averages of aerosol optical depth AOD (675 nm) and Ångström exponent α (440~870 nm) at stations. Isoline denotes mean annual values of precipitation in 1961—2002

理研究所楼顶, 该站点属于城市站, 除了春季受到从蒙古国和中国北方地区输送沙尘气溶胶的影响外, 当地的人为排放也是重要的气溶胶来源。香河站位于河北省香河县境内, 距北京市中心约为 65 km, 站点周围是平坦的农田和稀疏落叶乔木, 主要受自然气溶胶和人为污染(城市和农村)的影响。榆林站位于毛乌素沙地(中国北方中部的一个沙漠活动中心)的南缘, 平均年降水量为 400 mm 左右, 属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候。敦煌站位于塔克拉玛干沙漠以东, 平均年降水量约为 40 mm, 蒸发量为 2 490 mm, 属典型的暖温带干旱性气候。蒙古国达兰扎达嘎德站位于蒙古南部的戈壁沙漠地区, 年降水量约为 120 mm, 属大陆性温带草原气候。

3.2 仪器介绍

CE-318 型自动跟踪扫描太阳光度计是由法国 Cimel 公司研制的, 分为极化式和普通式太阳光度计两种, 它们在可见—近红外波段均设有 8 个观测通道(极化式的通道为 1 020, 870, 675, 440 和 936 nm, 870P1, 870P2 和 870P3, 其中, P1, P2 和 P3 为 3 个极化通道; 普通式的通道为 1020, 870, 675, 500, 440, 380, 340 和 936 nm), 仪器的视场角为 1.2° , 太阳跟踪精度为 0.1° , 340 nm 通道带宽为 2 nm, 380 nm 通道带宽为 4 nm, 其余通道带宽均为 $10 \text{ nm}^{[18]}$ 。本文选取榆中、北京、香河、榆林和蒙古国达兰扎达嘎德 5 站的观测仪器均为 CE-

318 型多波段太阳光度计。

敦煌站的观测仪器为天空辐射计(型号 POM-01L, 日本 Prede 公司), 它在可见—近红外有 7 个观测通道(1 020, 940, 870, 675, 500, 400 和 315 nm), 仪器的视场角为 1.0° , 315 nm 通道带宽为 3 nm, 其余通道带宽均为 $10 \text{ nm}^{[19]}$ 。

4 结果分析

4.1 AOD 和 α

AOD 是描述气溶胶对太阳辐射总消光(散射和吸收)的一个定量指标。 α 通常反映气溶胶粒子的谱分布特征, 值越大表示气溶胶中细粒子越多。当 α 接近零时, 表明主要是粗模态颗粒; 当 $\alpha > 1.5$ 时, 主要为细模态颗粒^[24]。

图 2 和图 3 分别给出了各测站 $\ln(\text{AOD}_{675})$ 和 α 的频率分布直方图。春季由于受到来自中国北方和蒙古国沙尘气溶胶的影响, 各测站 AOD_{675} 和 α 的日均值都有较剧烈的变化特征。从图 2a 中可看到, 榆中站 AOD_{675} 频率分布为单峰模态, AOD_{675} 的变化范围较大(0.06~2.3), 出现频率的最大值为 0.25, 约占 14%; 最大日均值可达 2.3, 出现在 2007 年夏初, 同时, $\text{AOD}_{675} > 0.7$ 约占 7%。 α (图 3a)的变化范围为 0.0~1.8, 其频率分布也表现为单峰模态, 出现频率的最大值为 1.0, 约占 13%。

北京和香河站相距几十公里, 全年 AOD_{675} 和 α 的逐日变化均较剧烈。北京站 AOD_{675} 的变化范围为 0.03~3.35, α 的变化范围为 0.03~1.8; 香河站 AOD_{675} 的变化范围为 0.02~3.36, α 的变化范围为 0.01~1.87。但是, 两个站点 $\ln(\text{AOD}_{675})$ 的频率分布(图 2b, 2c)存在一定的相似性, 均未表现出明显的模态, $\text{AOD}_{675} > 0.7$ 的约占 26%。同时, α 的频率分布(图 3b, c)也表现出一定的相似性, 出现频率的最大值都是 1.3, 分别约占 20%和 17%。

榆林站没有冬季观测资料, 而且也缺少 2001 年 7, 8 和 9 月的资料。但是, AOD_{675} 和 α 仍存在较大的变化范围, $\ln(\text{AOD}_{675})$ 的频率分布(图 2d)没有明显的模态, 最大值为 0.3, 约占 14%。

敦煌站, AOD_{675} 和 α 的变化范围较其他测站要小。 AOD_{675} 的变化范围为 0.04~0.92, α 的变化范围为 $-0.10 \sim 1.43$ 。 AOD_{675} (图 2e)的频率最大值为 0.2, 约占 17%; α (图 3e)的频率最大值为 0.2, 约占 16%, 同时 $\alpha < 0.6$ 的约占 83%, 表明该地区主要以粗模态气溶胶占优。

达兰扎达嘎德站, $\ln(\text{AOD}_{675})$ 的频率分布(图

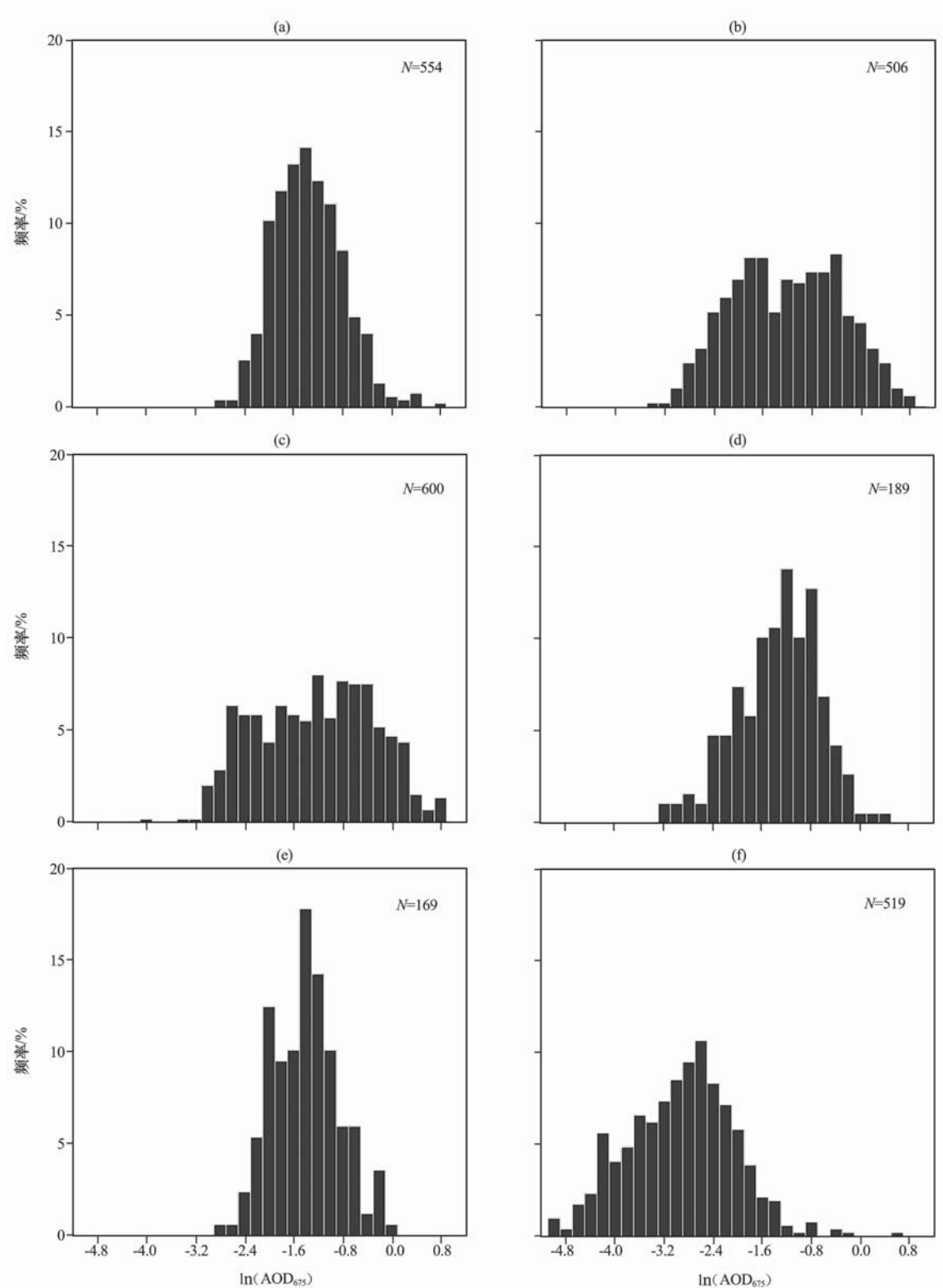


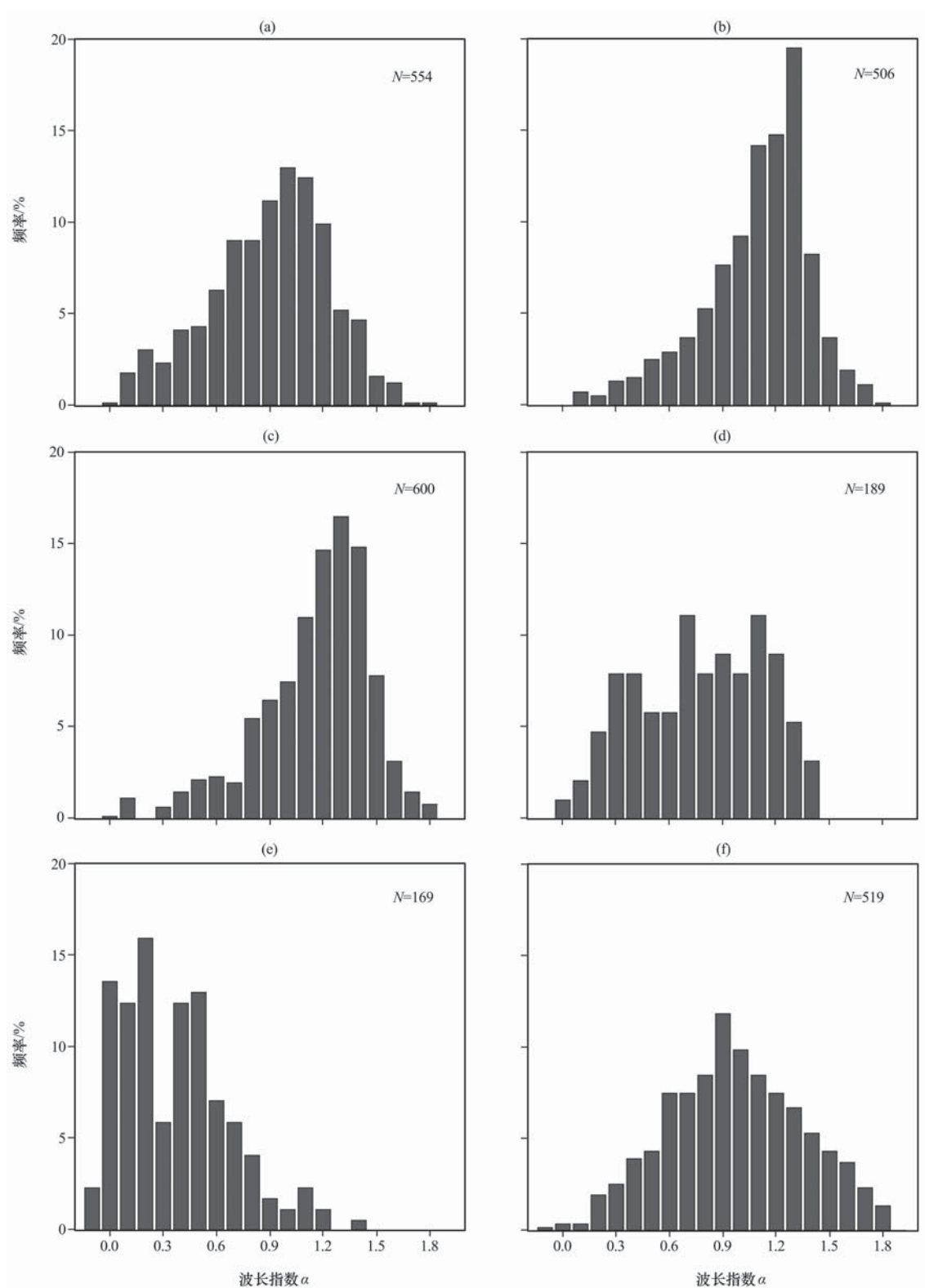
图 2 各测站 AOD(675 nm)的对数正态频率分布

(a) 榆中站, (b) 北京站, (c) 香河站, (d) 榆林站, (e) 敦煌站, (f) 达兰扎达嘎德站

N 是各站点数据总个数, 各站点的数据时段见表 1

Fig. 2 Lognormal frequency distributions of AOD (675 nm) at stations. (a) Yuzhong station, (b) Beijing station, (c) Xianghe station, (d) Yulin station, (e) Dunhuang station, (f) Dalanzadgad station. N is the observed total number at each station.

Period of measurement at each station is given in Table 1

图 3 同图 2，但为 α 的频率分布Fig. 3 The same as Fig. 2, but for frequency distributions of α

2f) 表现为单峰模态, $AOD_{675} < 0.3$ 的约占 98%; 同时, α 的频率分布 (图 3f) 也表现为单峰模态, 频率最大值为 0.9, 约占 12%。

图 4 和图 5 分别给出了各测站 AOD_{675} 和 α 多年平均的月变化特征和季节变化特征, 以及年平均均值, 表 2 给出了各测站 AOD_{675} 和 α 的季节平均值。

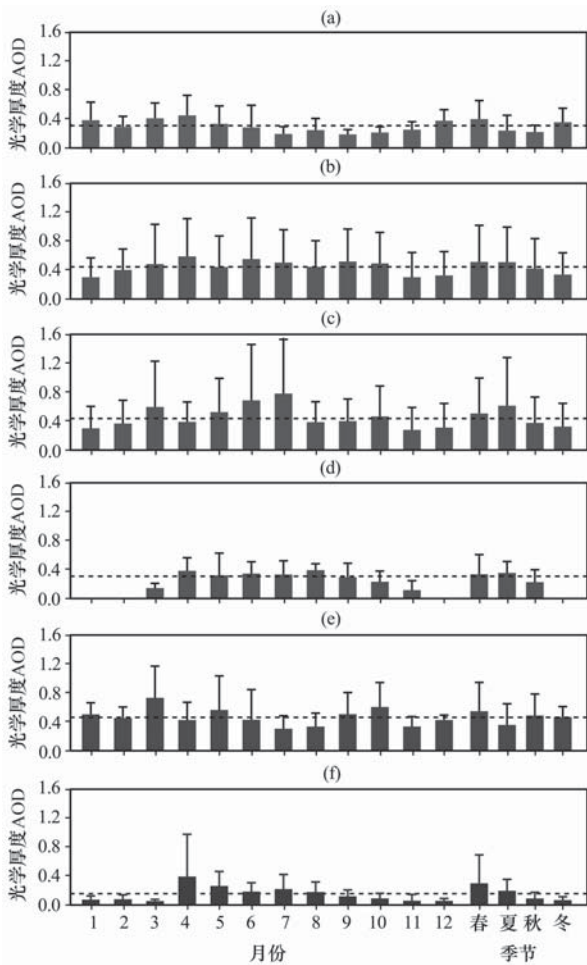


图4 各测站光学厚度 AOD(675 nm)的月平均和季节平均值

(a) 榆中站, (b) 北京站, (c) 香河站, (d) 榆林站, (e) 敦煌站, (f) 达兰扎达嘎德站, 虚线表示总的平均值, 柱状表示正负标准差

Fig. 4 Monthly and seasonal means of AOD (675 nm) at stations. (a) Yuzhong station, (b) Beijing station, (c) Xianghe station, (d) Yulin station, (e) Dunhuang station, (f) Dalanzadgad station. Dashed lines indicate overall average of the whole period, vertical bars indicate positive or negative standard deviations

其中季节的划分是: 春季为3—5月, 夏季为6—8月, 秋季为9—11月, 冬季为12月至次年2月。

榆中站, AOD₆₇₅和 α 的月平均和季节平均(图4a和图5a)存在明显的变化特征。就月平均值来看, AOD₆₇₅在4月的平均值最大, 为 0.45 ± 0.27 ; 9月的平均值最小, 为 0.18 ± 0.07 。而 α 的平均值在4月最小(0.56 ± 0.32)、7月最大(1.18 ± 0.27)。同时, 6—11月 AOD₆₇₅的平均值都小于其年平均值(0.31 ± 0.22), 而对应的 α 却都在0.85以上。说明夏、秋季榆中地区的气溶胶主要以细模态粒子占优, 且气溶胶的负载较小。此外, 从 AOD₆₇₅和 α 季

节平均也可以看出, 春季 AOD₆₇₅的值最大(0.40 ± 0.25), 而 α 的值最小(0.61 ± 0.30), 表明榆中地区春季受粗模态沙尘气溶胶的影响较大。同时, AOD₆₇₅的次大值(0.35 ± 0.19)和 α 的次小值(0.90 ± 0.23)均出现在冬季, 这可能是受榆中地区冬季燃煤采暖的影响。

北京和香河站的地理位置虽比较接近, 但 AOD₆₇₅和 α 的月平均变化特征仍存在一定的差异。北京站 AOD₆₇₅最大月均值出现在4月, 为 0.60 ± 0.52 ; 次大值出现在6月, 为 0.56 ± 0.57 , 最小值出现在1月(0.31 ± 0.27)。香河站 AOD₆₇₅最大月均值出现在7月, 为 0.80 ± 0.75 ; 次大值出现在6月, 为 0.71 ± 0.77 ; 最小值出现在11月, 为 0.30 ± 0.31 。北京站 α 的最大月均值出现在9月, 为 1.31 ± 0.16 ; 最小值出现在5月, 为 0.91 ± 0.35 。香河站 α 的最大月均值出现在8月, 为 1.41 ± 0.20 ; 最小值也出现在5月, 为 0.94 ± 0.39 。值得注意的是, 除5月 α 的平均值 < 1.0 , 两个测站其他各月 α 的平均值都在1.0以上, 说明北京和香河地区全年都以细模态气溶胶粒子占优。同时, 从 AOD₆₇₅和 α 的季节平均变化来看, 北京站春季 AOD₆₇₅的值最大, α 的值最小, 香河站 AOD₆₇₅的次大值和 α 的最小值也出现在春季, 表明北京和香河地区春季也受粗模态沙尘气溶胶的影响。

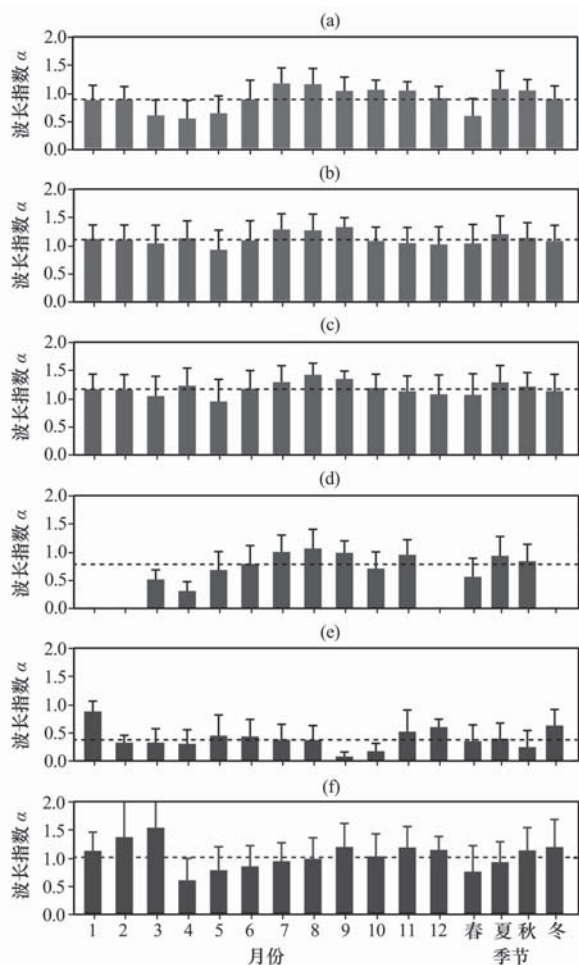
榆林站(没有冬季观测资料, 并且3月的数据只有2天, 11月的数据只有12天), AOD₆₇₅的最大月平均值出现在8月, 为 0.40 ± 0.09 ; 次大值出现在4月, 为 0.39 ± 0.18 。 α 的最大值出现在8月, 为 1.05 ± 0.34 ; 最小值出现在4月, 为 0.30 ± 0.17 , 与榆中站出现的时间一致。表明榆林站春季也受粗模态沙尘气溶胶的影响, 而在夏季受细模态气溶胶的影响。

敦煌站靠近沙尘源区, AOD₆₇₅和 α 的变化特征存在明显的差异。就月平均变化来看, AOD₆₇₅的最大月均值为 0.37 ± 0.22 , 出现在3月; 最小值为 0.17 ± 0.07 , 出现在11月。 α 的最大月均值为 0.86 ± 0.18 , 出现在1月; 最小值为 0.07 ± 0.08 , 出现在9月。同时, 2—10月 α 的平均值都 < 0.5 。这表明敦煌地区全年都受粗模态沙尘气溶胶的影响, 冬季的影响相对较小。

达兰扎达嘎德站的年平均 AOD₆₇₅只有 0.08 ± 0.11 , AOD₆₇₅的最大值出现在4月(0.20 ± 0.29); 而年平均 α 为 1.01 ± 0.45 , α 的最小值也出现在4月(0.61 ± 0.39)。同时, 春季 AOD₆₇₅的平均值最

表 2 各测站 AOD₆₇₅ 和 α 的季节平均值和标准偏差Table 2 Seasonal means and standard deviations of AOD₆₇₅ and α (440~870 nm) at stations

观测站	参数	季节平均值				总体平均
		春季	夏季	秋季	冬季	
榆中	AOD ₆₇₅	0.40±0.25	0.24±0.21	0.22±0.09	0.35±0.19	0.31±0.22
	α	0.61±0.30	1.08±0.32	1.06±0.19	0.90±0.23	0.90±0.34
北京	AOD ₆₇₅	0.52±0.51	0.52±0.48	0.43±0.41	0.35±0.30	0.45±0.44
	α	1.03±0.33	1.19±0.32	1.12±0.27	1.07±0.28	1.09±0.31
香河	AOD ₆₇₅	0.53±0.49	0.63±0.66	0.40±0.36	0.35±0.32	0.46±0.47
	α	1.06±0.37	1.27±0.30	1.20±0.25	1.12±0.30	1.16±0.31
榆林	AOD ₆₇₅	0.35±0.27	0.37±0.16	0.24±0.17	—	0.32±0.21
	α	0.55±0.33	0.92±0.34	0.83±0.30	—	0.77±0.36
敦煌	AOD ₆₇₅	0.28±0.20	0.19±0.14	0.25±0.15	0.24±0.07	0.24±0.16
	α	0.34±0.29	0.39±0.27	0.24±0.29	0.62±0.28	0.37±0.30
达兰扎达嘎德	AOD ₆₇₅	0.15±0.20	0.10±0.08	0.05±0.04	0.03±0.02	0.08±0.11
	α	0.76±0.46	0.93±0.36	1.13±0.40	1.19±0.49	1.01±0.45

图 5 同图 4, 但为波长指数 α Fig. 5 The same as Fig. 4, but for α (440~870 nm)

大, 为 0.15 ± 0.20 ; 而 α 的平均值最小, 为 0.76 ± 0.46 。说明该地区春季也受沙尘气溶胶的影响。秋、冬季 AOD₆₇₅ 的平均值分别为 0.05 ± 0.04 和 0.03 ± 0.02 , 而 α 的平均值分别为 1.13 ± 0.40 和 1.19 ± 0.49 , 表明达兰扎达嘎德地区秋、冬季主要受细模态粒子的影响, 且气溶胶的负载很小。

整体而言, 本文所选的中国北方地区 6 个测站 AOD₆₇₅ 和 α 的季节变化特征与 Xia et al^[28] 2005 年 9 月—2006 年 8 月在太湖地区的分析结果差异较大, 太湖地区四季 AOD₆₇₅ 的平均值分别为 0.62 ± 0.28 (春季)、 0.61 ± 0.51 (夏季)、 0.59 ± 0.35 (秋季)、 0.43 ± 0.21 (冬季), 除香河站夏季 AOD₆₇₅ 大于太湖站外, 其他站各季节 AOD₆₇₅ 的平均值均小于太湖站; 太湖地区 α 的季节平均值分别为 0.90 ± 0.29 (春季)、 1.35 ± 0.19 (夏季)、 1.33 ± 0.18 (秋季)、 1.11 ± 0.23 (冬季)。值得注意的是, 北京和香河站春季 α 的平均值比太湖地区的大。

4.2 体积谱分布

不同类型的气溶胶具有不同的体积谱分布特征。图 6 给出了各测站气溶胶体积谱分布季节平均的变化情况。榆中站(图 6a)春季的细模态气溶胶峰值半径约为 $0.11 \mu\text{m}$, 粗模态气溶胶的峰值半径约为 $2.2 \mu\text{m}$; 夏、秋季的细模态峰值半径约为 $0.15 \mu\text{m}$, 粗模态约为 $3 \mu\text{m}$ 和 $3.8 \mu\text{m}$; 冬季的细模态峰值半径约为 $0.2 \mu\text{m}$, 粗模态峰值半径为 $3.8 \mu\text{m}$ 。夏、秋季细模态峰值半径的增大可能是由于

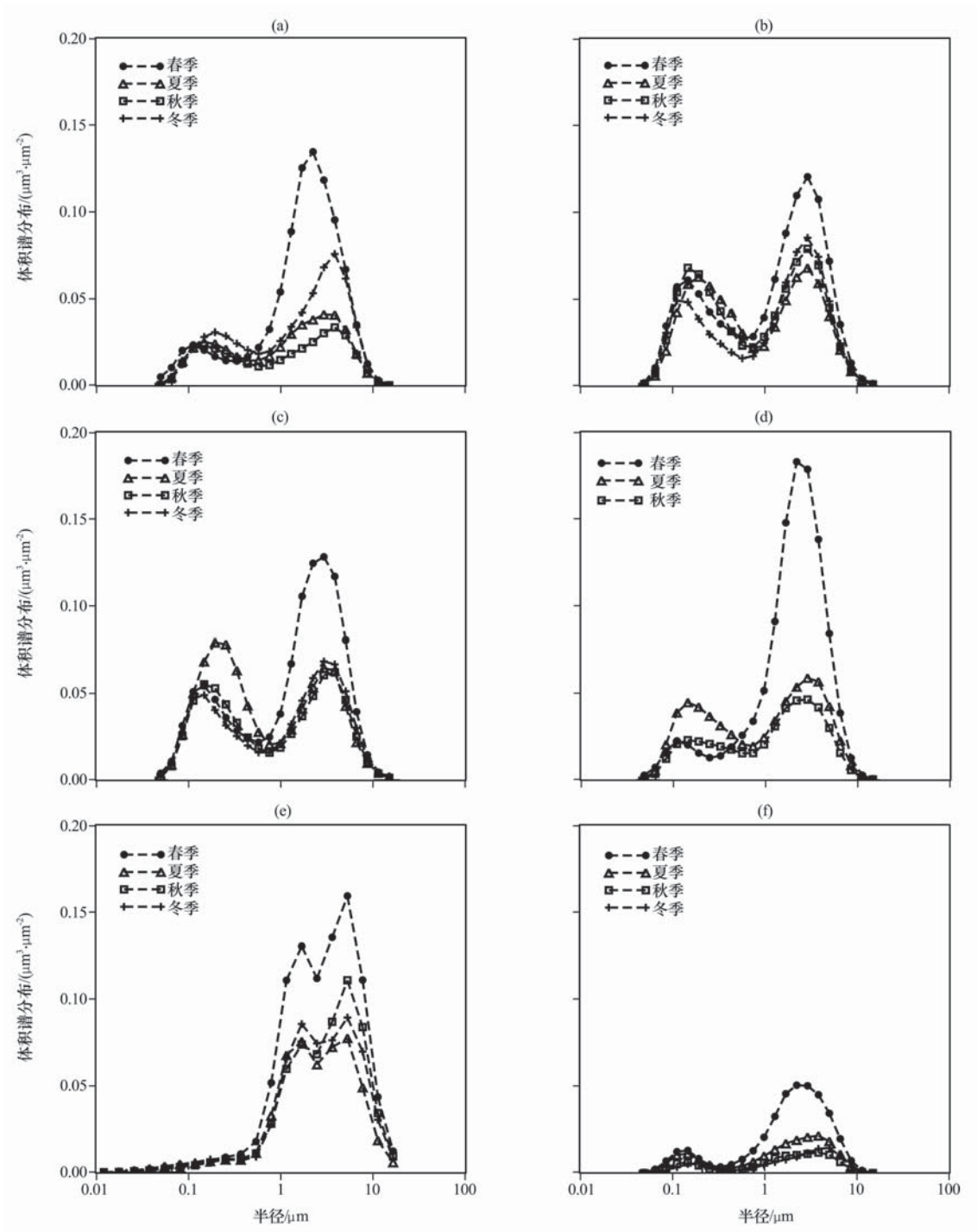


图 6 各测站气溶胶体积谱分布的季节平均变化

(a) 榆中站, (b) 北京站, (c) 香河站, (d) 榆林站, (e) 敦煌站, (f) 达兰扎达嘎德站

Fig. 6 Seasonal mean changes of aerosol volume size at stations. (a) Yuzhong station,

(b) Beijing station, (c) Xianghe station, (d) Yulin station,

(e) Dunhuang station, (f) Dalanzadgad station

细模态气溶胶吸湿增长造成的, 而冬季细模态峰值半径的增大可能是由于当地冬季采暖产生的煤烟型气溶胶造成的。春季由于受沙尘气溶胶的影响, 粗、细模态气溶胶体积浓度的比值为 5.63。另外,

冬季由于当地矿物燃料的燃烧使其细模态的振幅比其他季节大, 而且粗模态的振幅也比夏、秋季大。

北京站(图 6b)的细模态气溶胶峰值半径的变化范围为 0.11~0.19 μm, 粗模态气溶胶峰值半径

约为 $3.0 \mu\text{m}$ ，春、秋季细模态峰值半径为 $0.15 \mu\text{m}$ ，夏季为 $0.19 \mu\text{m}$ ，冬季为 $0.11 \mu\text{m}$ 。夏季细模态峰值半径的增大主要是由于城市气溶胶的吸湿增长造成的。春季，由于受沙尘气溶胶的影响该地区粗、细模态气溶胶体积浓度的比值为 2。另外，与榆中站相比，北京站四季细模态的振幅和夏、秋季粗模态的振幅均比榆中的大。究其原因，可能是受城市气溶胶的影响。

香河站(图 6c)春、秋和冬季的细模态峰值半径约为 $0.15 \mu\text{m}$ ，夏季细模态峰值半径约为 $0.19 \mu\text{m}$ ，而四季粗模态峰值半径都约为 $3.0 \mu\text{m}$ 。春季由于受沙尘气溶胶的影响，粗、细模态气溶胶体积浓度

的比值为 2.37；夏季城市气溶胶的吸湿增长导致细模态峰值半径增大，同时夏季细模态的振幅与其他季节相比要大，比同季节粗模态的振幅还大，表明夏季该地区的污染气溶胶是很复杂的。

榆林站(图 6d)春季的细模态峰值半径约为 $0.11 \mu\text{m}$ ，夏、秋季的细模态峰值半径均为 $0.15 \mu\text{m}$ ；春季粗模态峰值半径约为 $2.2 \mu\text{m}$ ，夏、秋季为 $3.0 \mu\text{m}$ 。由于受沙尘气溶胶的影响，春季粗细模态体积浓度的比值为 7.96。另外，夏季细模态气溶胶的振幅要明显大于春、秋季。

敦煌站(图 6e)的气溶胶体积谱分布与其他站点的分布情况存在明显的区别。该站各季节的气溶

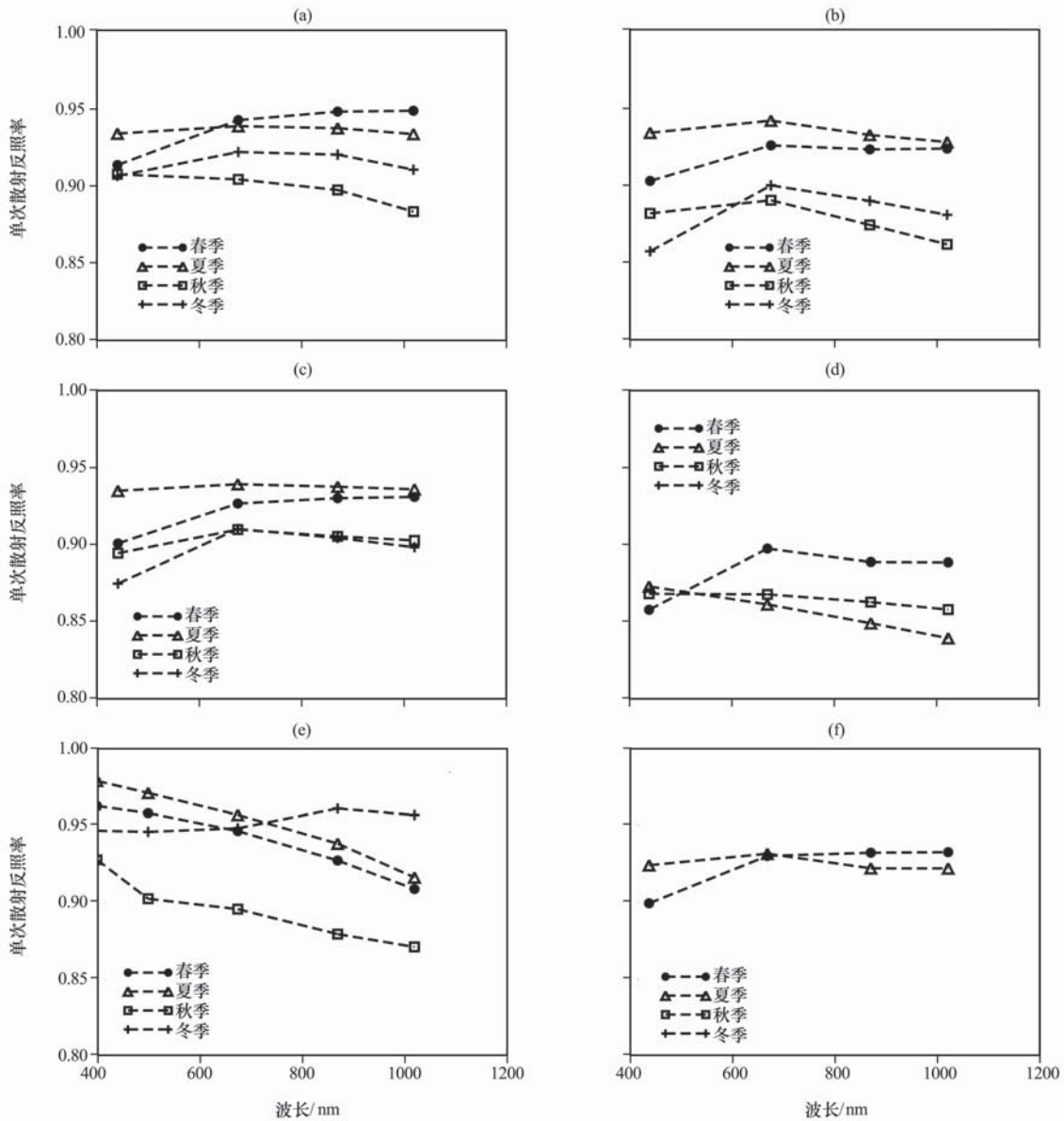


图 7 各测站气溶胶单次散射反照率的季节平均变化

其余说明同图 6

Fig. 7 Seasonal mean changes of the retrieved single scattering albedo at stations. Others are the same as Fig. 6

胶体谱分布在 $r > 0.6 \mu\text{m}$ 范围内且有两个粗模态峰值: 一个峰值的半径约为 $1.7 \mu\text{m}$, 另一个约为 $5.3 \mu\text{m}$; 而在 $r < 0.6 \mu\text{m}$ 范围内的细模态峰值却很不明显, 这表明该地区四季主要都是受粗模态沙尘气溶胶的影响。若在细模态处取细模态气溶胶体积浓度的平均值, 则该地区粗、细模态体积浓度的比值可达到 30。

达兰扎达嘎德站(图 6f)的气溶胶细模态峰值半径在春、夏和秋季均为 $0.15 \mu\text{m}$, 冬季约为 $0.19 \mu\text{m}$; 粗模态峰值半径的范围为 $2.2 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 。该地区春季也受到沙尘气溶胶的影响, 粗、细模态体积浓度的比值约为 3.92。另外, 该地区各季节粗、细模态的振幅要比其他测站小得多。

4.3 单次散射反照率

单次散射反照率(SSA)定义为散射系数和总消光系数的比值, 常用来描述气溶胶的吸收特性, 主要与气溶胶粒子的形状、大小和化学组成有关, 是评估气溶胶辐射强迫的一个重要因子。北半球大多数地区 SSA 的变化范围为 $0.85 \sim 0.95$ ^[29]。

图 7 给出了各测站 SSA 的季节平均值随波长的变化特征, 表 3 给出了各测站 SSA 的月平均值。榆中站(图 7a), SSA 的变化范围较小($0.88 \sim 0.94$), 但各季节 SSA 随波长的变化还是存在明显的区别。春季, SSA 在可见光波段随波长的增大而明显增大, 而在红外波段随波长增大 SSA 的增长趋势并不显著; 夏、冬季, 在可见光波段 SSA 随波

表 3 各测站 SSA 的月平均值
Table 3 Monthly average values of SSA at stations

观测站	参数	月平均值												总体平均
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
榆中	SSA ₄₄₀	0.90	0.89	0.93	0.90	0.91	0.91	0.95	0.94	0.86	0.92	0.91	0.92	0.91
	SSA ₆₇₅	0.92	0.91	0.94	0.94	0.94	0.92	0.95	0.95	0.85	0.90	0.91	0.93	0.93
	SSA ₈₇₀	0.92	0.90	0.95	0.95	0.95	0.92	0.94	0.95	0.86	0.89	0.90	0.93	0.93
	SSA ₁₀₂₀	0.91	0.90	0.94	0.95	0.95	0.92	0.94	0.94	0.86	0.88	0.89	0.92	0.92
北京	SSA ₄₄₀	0.88	0.89	0.92	0.91	0.89	0.93	0.96	0.94	0.92	0.90	0.85	0.84	0.90
	SSA ₆₇₅	0.92	0.92	0.94	0.92	0.92	0.94	0.96	0.93	0.92	0.90	0.86	0.86	0.92
	SSA ₈₇₀	0.90	0.90	0.93	0.92	0.92	0.93	0.95	0.91	0.90	0.89	0.84	0.85	0.90
	SSA ₁₀₂₀	0.89	0.89	0.93	0.92	0.93	0.93	0.94	0.90	0.89	0.87	0.83	0.82	0.90
香河	SSA ₄₄₀	0.87	0.89	0.90	0.90	0.88	0.92	0.97	0.94	0.91	0.90	0.86	0.84	0.90
	SSA ₆₇₅	0.90	0.92	0.93	0.91	0.92	0.93	0.97	0.93	0.92	0.92	0.89	0.88	0.92
	SSA ₈₇₀	0.89	0.91	0.93	0.91	0.93	0.93	0.97	0.93	0.91	0.92	0.88	0.87	0.92
	SSA ₁₀₂₀	0.89	0.91	0.93	0.92	0.94	0.92	0.96	0.92	0.91	0.92	0.88	0.86	0.91
榆林	SSA ₄₄₀	—	—	—	0.86	0.86	0.85	0.90	0.87	0.87	0.87	—	—	0.87
	SSA ₆₇₅	—	—	—	0.93	0.87	0.87	0.88	0.85	0.84	0.88	—	—	0.87
	SSA ₈₇₀	—	—	—	0.94	0.85	0.86	0.86	0.83	0.84	0.88	—	—	0.86
	SSA ₁₀₂₀	—	—	—	0.94	0.84	0.85	0.85	0.82	0.83	0.87	—	—	0.86
敦煌	SSA ₄₀₀	0.97	0.95	0.94	0.97	0.97	0.97	0.99	0.98	0.95	0.92	0.91	0.93	0.95
	SSA ₅₀₀	0.97	0.95	0.94	0.98	0.95	0.96	0.99	0.96	0.93	0.89	0.89	0.92	0.94
	SSA ₆₇₅	0.94	0.94	0.92	0.97	0.93	0.95	0.98	0.93	0.93	0.87	0.88	0.96	0.93
	SSA ₈₇₀	0.97	0.93	0.90	0.95	0.92	0.94	0.97	0.90	0.90	0.86	0.88	0.97	0.92
	SSA ₁₀₂₀	0.97	0.93	0.89	0.94	0.89	0.93	0.95	0.87	0.87	0.85	0.88	0.97	0.91
达兰扎	SSA ₄₄₀	—	—	—	0.87	—	—	0.94	0.90	—	—	—	—	0.90
达嘎德	SSA ₆₇₅	—	—	—	0.96	—	—	0.96	0.89	—	—	—	—	0.94
	SSA ₈₇₀	—	—	—	0.98	—	—	0.95	0.87	—	—	—	—	0.93
	SSA ₁₀₂₀	—	—	—	0.98	—	—	0.96	0.87	—	—	—	—	0.93

长增大仍有弱的增长趋势,而在红外波段夏季 SSA 随波长的变化基本保持不变,冬季 SSA 反而减小;秋季 SSA 随波长的增大一直是减小的。同时,就 675 nm 波段来说,春季 SSA 最大、秋季最小,SSA₆₇₅ 随季节的变化与 AOD₆₇₅ 随季节的变化一致。值得注意的是,7,8 月各波段 SSA 均较大,而 9 月 SSA 的低值是由于数据较少造成的代表性较差。

北京站(图 7b),春、夏季 SSA 的变化范围为 0.90~0.94,秋、冬季的变化范围为 0.86~0.90。夏季各波段的 SSA 均比其他季节要大,春季次之。各季节 SSA 随波长增大的变化存在一定的相似性:

在可见光波段 SSA 随波长的增大而增大,而在红外波段 SSA 又随波长的增大而减小。同时,从表 3 中可看出,冬季各月的 SSA 要小于夏季。

香河站(图 7c),SSA 随波长的变化与北京站存在一定的相似。春、夏季 SSA 的变化范围为 0.90~0.94,而秋、冬季的变化范围为 0.87~0.91。夏季各波段 SSA 的值均为最大,而且 SSA 随波长的变化基本保持不变;春、秋和冬季 SSA 在可见光波段有显著的增大,而春季 SSA 在红外波段有弱的增加,秋、冬季的 SSA 在红外波段存在略微的减小。

表 4 各测站 ASY 的月平均值

Table 4 Monthly average values of ASY at stations

观测站	参数	月平均值												总体平均
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
榆中	ASY ₄₄₀	0.74	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71	0.72	0.71	0.72	0.71	0.71	0.72	0.72
	ASY ₆₇₅	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.68	0.68
	ASY ₈₇₀	0.68	0.68	0.70	0.69	0.69	0.67	0.65	0.65	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67
	ASY ₁₀₂₀	0.67	0.67	0.70	0.70	0.69	0.68	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	0.66	0.67
北京	ASY ₄₄₀	0.69	0.69	0.70	0.70	0.70	0.71	0.73	0.71	0.71	0.71	0.69	0.69	0.70
	ASY ₆₇₅	0.63	0.63	0.65	0.65	0.67	0.65	0.69	0.64	0.65	0.66	0.64	0.64	0.65
	ASY ₈₇₀	0.60	0.61	0.63	0.63	0.66	0.63	0.65	0.61	0.63	0.64	0.63	0.63	0.63
	ASY ₁₀₂₀	0.60	0.62	0.64	0.63	0.67	0.63	0.64	0.60	0.63	0.64	0.63	0.62	0.63
香河	ASY ₄₄₀	0.69	0.69	0.69	0.69	0.71	0.71	0.75	0.71	0.71	0.71	0.70	0.69	0.70
	ASY ₆₇₅	0.64	0.64	0.65	0.64	0.67	0.66	0.70	0.65	0.65	0.66	0.65	0.64	0.65
	ASY ₈₇₀	0.63	0.62	0.64	0.63	0.66	0.63	0.66	0.62	0.62	0.64	0.64	0.63	0.64
	ASY ₁₀₂₀	0.63	0.63	0.64	0.63	0.67	0.62	0.64	0.62	0.62	0.63	0.65	0.63	0.64
榆林	ASY ₄₄₀	—	—	0.72	0.74	0.72	0.71	0.73	0.73	0.71	0.74	0.72	—	0.72
	ASY ₆₇₅	—	—	0.71	0.71	0.68	0.67	0.68	0.67	0.66	0.69	0.68	—	0.68
	ASY ₈₇₀	—	—	0.71	0.71	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.68	0.67	—	0.67
	ASY ₁₀₂₀	—	—	0.71	0.72	0.68	0.67	0.64	0.64	0.64	0.68	0.67	—	0.67
敦煌	ASY ₄₀₀	0.69	0.72	0.72	0.69	0.69	0.67	0.66	0.68	0.70	0.74	0.72	0.69	0.70
	ASY ₅₀₀	0.69	0.71	0.71	0.69	0.69	0.68	0.67	0.69	0.71	0.74	0.72	0.69	0.70
	ASY ₆₇₅	0.67	0.70	0.70	0.69	0.70	0.68	0.68	0.70	0.71	0.73	0.71	0.67	0.70
	ASY ₈₇₀	0.66	0.70	0.70	0.69	0.71	0.69	0.68	0.70	0.71	0.73	0.71	0.67	0.69
	ASY ₁₀₂₀	0.66	0.70	0.70	0.70	0.72	0.70	0.69	0.72	0.72	0.73	0.71	0.67	0.70
达兰扎	ASY ₄₄₀	0.72	0.72	0.78	0.71	0.70	0.70	0.70	0.71	0.70	0.71	0.72	0.73	0.72
达嘎德	ASY ₆₇₅	0.67	0.69	0.73	0.68	0.65	0.65	0.66	0.67	0.65	0.68	0.68	0.68	0.67
	ASY ₈₇₀	0.65	0.67	0.70	0.68	0.64	0.64	0.65	0.65	0.63	0.66	0.66	0.66	0.66
	ASY ₁₀₂₀	0.64	0.67	0.70	0.68	0.65	0.64	0.65	0.66	0.64	0.67	0.65	0.65	0.66

榆林站(图 7d), 春季 SSA 在可见光波段有显著的增大, 而在红外波段又有减小的趋势; 夏、秋季 SSA 随波长的增大一直是减小的, 变化范围为 0.84~0.87, 明显小于其他测站, 说明该地区的气溶胶吸收性相对较强。

敦煌站(图 7e), 春、夏季 SSA 的变化趋势非常一致, 都是随波长的增加而减小, 变化范围为 0.91~0.98, 春季的 SSA 在各波段均大于夏季; 秋季的 SSA 在 400~500 nm 波段有明显的减小, 减小的程度比春季大, 而在 500~1 020 nm 波段 SSA 的减小程度比春季小; 冬季的 SSA 与其他季节相比存在明显的差别, 在 400~675 nm 波段 SSA 几

乎保持不变, 在 675~870 nm 波段略有增大, 而在 870~1 020 nm 波段又减小。该站 SSA 随波长的变化趋势与其他测站存在明显的差异, 可能是数据反演方法的差异造成的。

达兰扎达嘎德站(图 7f), 由于反演获得的 SSA 可用数据非常少, 春季的数据个数只有 6 个, 夏季只有 5 个, 但从春季的 SSA 变化趋势来看, 该地区还是受到沙尘气溶胶的影响。

整体来看, 中国北方地区 SSA 的时空变化很大, 在北京及周边地区 SSA 的变化范围为 0.90~0.92, 440 nm 波段处 SSA 的值为 0.90, 这与太湖地区的观测结果一致^[28]。同时, 北京地区 SSA 的

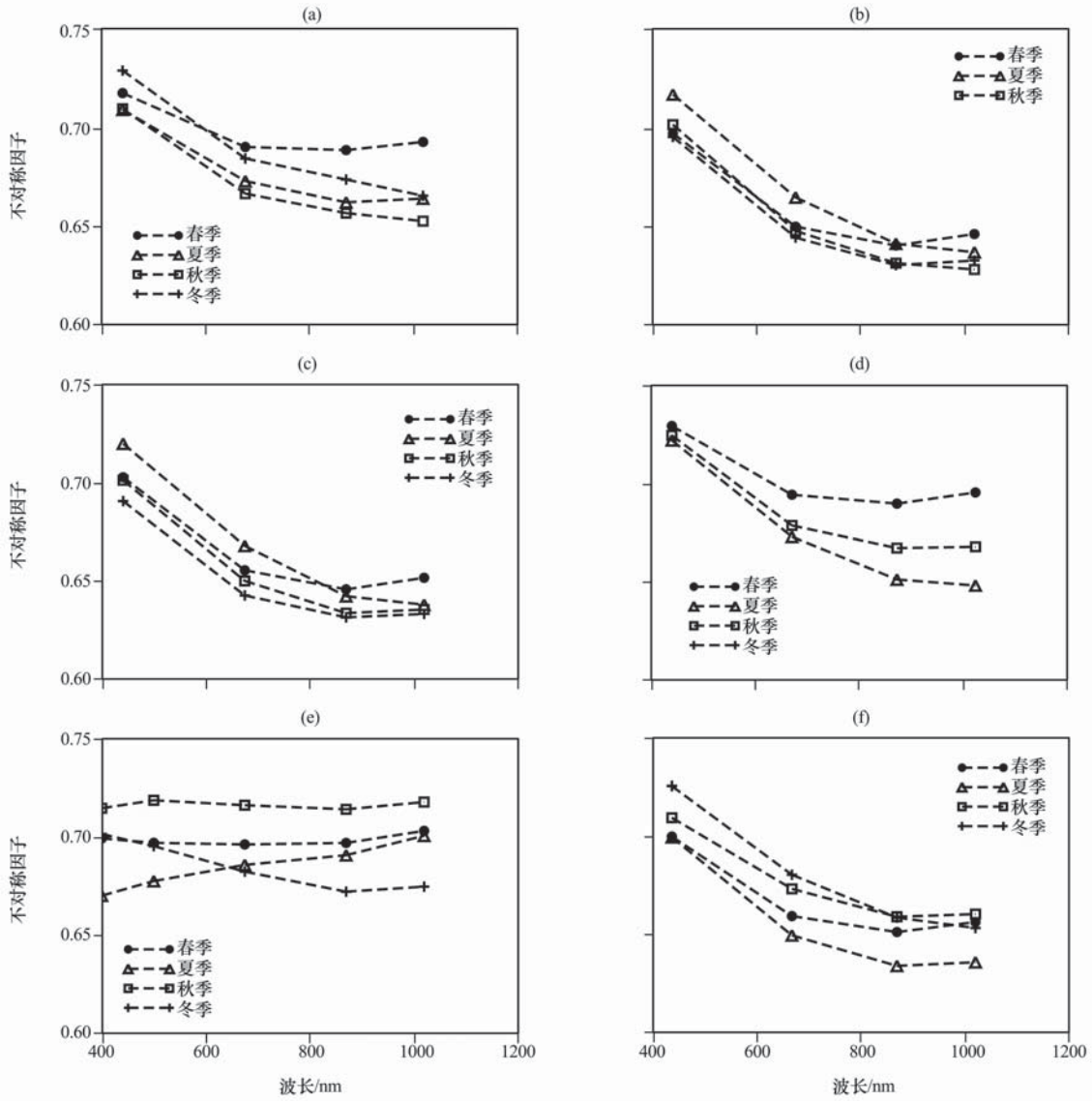


图 8 各测站气溶胶不对称因子的季节平均变化

其余说明同图 6

Fig. 8 Seasonal mean changes of the retrieved asymmetry factor at stations.

Others are the same as Fig. 6

月变化特征也与太湖地区^[30]存在一定的相似性。榆中地区 SSA 的变化范围为 0.91~0.93, 榆林地区为 0.86~0.87。

4.4 不对称因子

不对称因子(ASY)是散射介质的基本特征之一,也是辐射传输的一个重要参数,它影响着辐射能量在介质中的传输。它是对散射辐射不对称分布的一个估计,对于瑞利散射(对称散射)来说,认为其 ASY 值为零;而对于只有前向散射的气溶胶,认为其 ASY 值为 1。在晴空条件下,ASY 的变化范围从清洁条件下的 0.1 到受污染状况下的 0.75^[31]。

图 8 给出了各测站 ASY 季节平均随波长的变化,表 4 给出了各测站 ASY 的月平均值。榆中站(图 8a),ASY 随波长的变化范围为 0.65~0.73,春、夏季在可见光波段,ASY 随波长的增大而减小,而在红外波段 ASY 又略有增加;秋、冬季 ASY 随波长的增大而减小,而且冬季 ASY 的值要比秋季的大。值得注意的是,ASY₆₇₅ 在春季最大、秋季最小,与 AOD₆₇₅ 随季节的变化一致。同时,ASY₄₄₀ 冬季最大、春季次之,而且春季的 ASY₆₇₅、ASY₈₇₀ 和 ASY₁₀₂₀ 都比其他季节大。

北京站(图 8b),ASY 随波长变化的范围要比在榆中站的大(0.63~0.72),所有季节的 ASY 在 440~870 nm 波段均是减小的,在 870~1 020 nm 波段只有春、冬季 ASY 存在弱的增大。就季节变化来看,夏季 ASY₄₄₀ 和 ASY₆₇₅ 均为最大,而冬季 ASY₁₀₂₀ 最大。

香河站(图 8c),ASY 的变化与北京站基本一致,最大的差别就是在 870~1 020 nm 波段只有夏季 ASY 仍是减小的。

榆林站(图 8d),ASY 的变化范围(0.65~0.73)与榆中站的一致,春季 870 nm 波段 ASY 的值最小,约为 0.71。但就季节平均来看,春季各波段 ASY 的值均为最大,秋季次之,夏季最小。

敦煌站(图 8e),由于反演 ASY 的理论存在一定的差异,因此与其他测站的结果存在很大的差别。虽然该站 ASY 的变化范围为 0.67~0.72,与其他测站的差别不大,但是各季节 ASY 随波长的变化却与其他测站存在明显的不同,春、秋季 ASY 随波长的减小有增大的趋势,而冬季在 400~870 nm 波段 ASY 是减小的。

达兰扎达嘎德站(图 8f),ASY 的变化范围为 0.63~0.73,春、夏和秋季 ASY 先随波长的增加

而减小。当波长为 870 nm 时,ASY 达到最小值;而在 870~1 020 nm 波段,ASY 又略有增加。冬季 ASY 随波长的增加一直是减小的。

总体而言,中国北方地区 ASY 存在较大的时空变化。北京及周边地区 ASY₄₄₀ 的值为 0.70,榆中和榆林地区均为 0.72,这与太湖地区的结果一致^[27]。

5 结论

利用位于东亚北方地区 5 个 AERONET 站和 1 个 SKYNET 站的太阳光度计观测数据,分别分析了各测站的 AOD 和 α 月平均和季节平均分布,以及气溶胶体积谱分布、单次散射反照率和不对称因子的季节变化,得到以下主要结论:

(1) 中国北方地区春季由于受沙尘气溶胶的影响,各测站 AOD₆₇₅ 值均很大,对应的 α 均为最小;北京及周边地区由于受人为活动的影响较大,尤其在夏季城市污染气溶胶在较湿润的环境下吸湿增长造成这些地区 AOD₆₇₅ 值达到最大,对应的 α 也出现最大值,表明这些地区夏季以细粒子占优。

(2) 中国北方地区春季各测站粗细模体浓度的比值均大于其他季节,其中,榆中为 5.62,北京为 2.0,香河为 2.37,榆林为 7.96,敦煌为 30(在细模态范围内取其平均值),达兰扎达嘎德为 3.92。而在其他季节各测站两者的比值要明显小于春季,这也说明中国北方地区春季受沙尘气溶胶的影响较大。

(3) 中国北方地区 SSA 和 ASY 存在较大的时空变化。由于 SKYNET 和 AERONET 在反演 SSA 和 ASY 时所依据的理论不同,造成敦煌与其他测站的 SSA 和 ASY 随波长的变化存在一定的差异。因此,除敦煌站外,各测站春季 SSA 在可见光波段随波长增大而增加,秋季 SSA 随波长的增大而减小,冬季 SSA 在可见光波段随波长的增大而减小,在红外波段随波长的增大而减小。除敦煌站外,在 440~870 nm 波段各测站 ASY 随波长的增大而减小,ASY 的变化范围为 0.63~0.73。敦煌站夏季 ASY 随波长的增大而变大。

致谢: 感谢美国 AERONET 网站提供的各站点资料,日本 SKYNET 网站提供的敦煌站资料和中国气象局提供的地面降水资料。同时,感谢各站点的负责人及观测人员对仪器进行维护和管理。

参考文献:

[1] Ackerman T P, Toon O B. Absorption of visible radiation in

- atmosphere containing mixtures of absorbing and nonabsorbing particles[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(20): 3661—3667.
- [2] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols [J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423—430.
- [3] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826—840.
- [4] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report*[R]//Solomon S, Qing D H, Manning M, et al. eds. *Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007: 996.
- [5] Huang J, Minnis P, Chen B, et al. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, D23212, doi:10.1029/2008JD010620.
- [6] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. *气候与环境研究*, 2001, 6(1): 119—124.
- [7] 李刚, 季国良. 中国西北地区大气气溶胶散射光学厚度分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 283—290.
- [8] 牛生杰, 孙照渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J]. *高原气象*, 2005, 24(4): 605—610.
- [9] 黄艇, 陈长和, 陈勇航, 等. 利用 MODIS 卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 886—892.
- [10] 张玉洁, 张武, 陈艳, 等. 黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(6): 1416—1422.
- [11] 曹贤洁, 张镭, 李霞, 等. 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(5): 1246—1253.
- [12] 田磊, 张武, 史晋森, 等. 河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 1050—1057.
- [13] Huang J, Fu Q, Su J, et al. Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints [J]. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(12): 4011—4021.
- [14] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2119—2124.
- [15] Yang X, Wenig M. Study of columnar aerosol size distribution in Hong Kong [J]. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(16): 6175—6189.
- [16] Lee K, Li Z, Wong M, et al. Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- [17] Che H, G Shi, Uchiyama A, et al. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(12): 3199—3214.
- [18] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization [J]. *Rem Sens Env*, 1998, 66(1): 1—16.
- [19] Xiangao X, Hongbin C, Pucai W. Aerosol properties in a Chinese semiarid region [J]. *Atmos Env*, 2004, 38(27): 4571—4581.
- [20] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. *Rem Sens Env*, 2000, 73: 337—349.
- [21] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 9791—9806.
- [22] Holben B N, Tanr D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D11): 12067—12098.
- [23] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for the retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20673—20696.
- [24] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 31333—31350.
- [25] Khatri P, Takamura T. An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis [J]. *J Meteor Soc Japan*, 2009, 87: 189—204.
- [26] Nakajima T, Tonna G, Rao R, et al. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(15): 2672—2686.
- [27] Kim D, Sohn B, Nakajima T, et al. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, D02209, doi: 10.1029/2003JD003387.
- [28] Xia X, Li Z, Holben B, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, D22S12, doi: 10.1029/2007JD008859.
- [29] Jacobson M. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D2): 1551—1568.
- [30] 徐记亮, 张镭, 吕达仁. 太湖地区大气气溶胶光学及微物理特征分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(6): 1668—1675.
- [31] Zege E P, Ivanov A P, Katsev I L. *Image transfer through a scattering medium*[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.

Analysis on Aerosol Optical Property over Northern China from AERONET and SKYNET Observations

GAO Zhong-ming, BI Jian-rong, HUANG Jian-ping

*(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education/College of Atmospheric Sciences,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: The column-integrated optical properties of aerosol over northern China and southern Mongolia were investigated based on sun/sky radiometer measurements made at five Aerosol Robotic Network (AERONET) sites and one SKYNET site. Multi-year averaged daily and monthly changes of aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent were presented, and seasonal mean of aerosol volume size distribution, single scattering albedo, and asymmetry factor were also analyzed. The result shows that with the influence of dust storm activity every spring, the annual cycle of AOD show a spring and/or summer maximum, and Ångström exponent exhibited a springtime minimum, as well as the aerosol volume size distributions of coarse/fine mode presented different variation features. In addition, the aerosol optical properties of each station show the different changing trends associated with local anthropogenic pollution and biomass burning. For example, due to the influences of hygroscopic growth of aerosols from relative humidity increases in summer, the annual cycle of aerosol optical depth over Beijing and Xianghe stations show a summer maximum, and the single scattering albedo increase significantly.

Key words: Aerosol optical depth; Ångström exponent; Volume size distribution; Single scattering albedo