

闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 2009. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 153–160. Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei, et al. 2009. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 153–160.

灰霾过程中的气溶胶特性观测研究

闵 敏^{1,2} 王普才¹ 宗雪梅¹ 夏俊荣^{1,2} 孟晓艳^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 结合太阳光度计、激光雷达以及其他相关数据对河北香河县 2007 年 4 月初的一次灰霾天气过程中的气溶胶特性进行了遥感研究。研究表明, 在这次灰霾的爆发期间, 能见度从 20 km 下降到 3 km 左右; 气溶胶光学厚度 (AOD) 在 3 个波段上都明显增加, 特别是 380 nm 处的 AOD 从 6 日的 0.31 增长到 10 日的 1.40; Angstrom 指数 (ALPHA) 也明显下降, 例如 340~440 nm 处的 ALPHA 从 7 日的 1.45 下降到 10 日的 0.99。从 AOD 和 ALPHA 在短波处的较大变化、体积浓度谱的粗模态粒子的大量增加和 PM10 浓度值的变化分析来看, 这次灰霾过程中的气溶胶数浓度明显增加, 其中还含有大颗粒物的大量导入。激光雷达探测消光系数的垂直分布也显示气溶胶在垂直高度上达到了近 3 000 m 左右。从微物理特征的变化上看, 这次灰霾过程中局地气溶胶的散射能力增强, 吸收能力减弱。另外, 通过 HYSPLIT 模式对后向轨迹的模拟和对 NCEP 数据的分析, 发现这次灰霾过程中所包含的大颗粒物的主要源地可能是蒙古地区, 所以气溶胶呈现了一定的沙尘气溶胶特征。

关键词 灰霾 气溶胶 激光雷达

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0153-08 **中图分类号** P415.3+4 **文献标识码** A

Observation and Study on Aerosol Properties in Hazy Days

MIN Min^{1, 2}, WANG Pucui¹, ZONG Xuemei¹, XIA Junrong^{1, 2}, and MENG Xiaoyan^{1, 2}

1 *Laboratory for Middle Atmosphere Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Combined observations of sun-photometer and lidar on aerosol properties have been conducted in the intense hazy days at the beginning of April 2007 at Xianghe in Hebei Province. It exhibits that the atmospheric visibility reduced from 20 km to approximate 3 km. There is a pronounced increase of aerosol optical depth (AOD) at 3 wavelengths, particularly the AOD increases from 0.31 on April 6 to 1.40 on April 10 at 380 nm, and an outstanding reduction of Angstrom exponent (ALPHA), such as ALPHA reduces from 1.45 on April 7 to 0.99 on April 10. The prominent increase of aerosol numerical density with big particles loading in the hazy days are confirmed by the relatively large changes in AOD and ALPHA at short wavelength, the increase of coarse mode of particle volume concentration, and changes in PM10 concentration. The vertical distributions of aerosol extinction coefficient derived from lidar show a mass of aerosols center at the height of about 3 000 m. The changes of microphysical parameters

收稿日期 2007-12-11 收到, 2008-12-22 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875084 和国家自然科学基金青年科学基金项目 40705012

作者简介 闵敏, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事云和气溶胶卫星和雷达遥感的研究。E-mail: mm1218x1x1@163.com

also demonstrate the enhancement of scattering ability and decrease of absorption ability of local aerosols. In addition, through the analysis of back-trajectory by HYSPLIT model and NCEP data, we find that Mongolia may be the principal source for the big aerosols. Therefore, the aerosols in the hazy days have some characteristics like sand particles.

Key words haze, aerosol, lidar

1 引言

近地面大气时刻都有霾的存在,灰霾是大量气溶胶粒子均匀地浮游在空中,使水平能见度下降的一种自然现象,其主要成分包括:黑碳、粉尘、硫酸盐、铵盐等。灰霾的频繁发生不仅对交通安全造成严重影响,而且还会对人的身心健康产生一定的危害(吴兑,2006)。从气候和环境的角度讲,在一定程度上增加了气溶胶辐射强迫的不确定性和降低了大气环境质量(Heintzenberg et al., 2003; 王明星, 2000)。这种天气现象发生的主要原因是在稳定天气系统背景下由于空气水平对流的不通畅导致气溶胶粒子大量聚集而产生的,在这种情况下空气主要是以人为源气溶胶为主。不过强对流天气对气溶胶粒子的大量输送也可能导致灰霾天气的发生(吴兑等, 2006),所以外来颗粒物也会导致灰霾。此外人们常常会将灰霾、雾和雾霾混合天气混淆,从而导致预报员的错报。而吴兑(2006)依据国际和我国通用气象标准提出了一种适用于常规气象观测的判别灰霾天气的判据,即空气中的相对湿度要小于80%,相对湿度在80%~95%时是湿霾。准确地记录灰霾天气的发生及其强度对研究灰霾成因以及对环境气候的影响是很有必要的。

国内鲜有对灰霾过程中气溶胶特征的研究工作。现有的工作主要是对处于我国南方的珠江三角洲地区的灰霾天进行了相关研究,并讨论了灰霾对多种环境要素的影响和分析了灰霾爆发过程中气溶胶光学特征以及区域分布的特征(Wu et al., 2005; 吴兑, 2006; 吴兑等, 2006)。为了解我国北方灰霾天气的气溶胶特征以及爆发的原因,本文结合 AErosol RObotic NETwork (AERONET) 太阳光度计、激光雷达和地面自动气象站等资料对河北省香河县2007年4月初(9~10日)爆发的一次灰霾天气中的气溶胶特征进行了遥感研究,

并分析了灰霾爆发前后气溶胶特征的变化以及灰霾气溶胶的可能来源。这项工作将为进一步研究华北地区灰霾天气发生的原因以及未来的治理工作打下一定的基础,也能够为发展一种以气溶胶光学参数为标准的灰霾判别方法提供实验依据。

2 观测地点、仪器和反演方法

香河县(39.75°N, 116.96°E, 海拔约为8 m)隶属河北省廊坊市,位于北京市(39.98°N, 116.38°E)东南面60 km处,以平原为主,四季分明。观测仪器全部放置在中国科学院大气物理研究所香河县大气综合观测站内。

便携式后向散射激光雷达 ALS-300 于2006年7月中旬从法国引进,以垂直向上的探测姿态安放在观测站内的一部雷达车内,经测试运行后于2006年8月1日正式投入观测。主要技术参数:波长355 nm(紫外);激光器类型 Nd:Yad;脉冲频率20 Hz;脉冲能量16 mJ;空间分辨率15 m以及完全填充距离200 m。激光雷达回波信号反演采用了相对稳定的 Fernald 双层大气后向积分法(Fernald, 1984),见方程(1),其中的各个简写符号的原计算式见方程(2)~(5)。

$$\beta_1(I-1) + \beta_2(I-1) = \frac{X(I-1)\exp[A(I-1, I)]}{\frac{X(I)}{\beta_1(I) + \beta_2(I)} + S_1\{X(I) + X(I-1)\exp[A(I-1, I)]\}\Delta Z}, \quad (1)$$

$$A(I-1, I) = (S_1 - S_2)[\beta_2(I-1) + \beta_2(I)]\Delta Z, \quad (2)$$

$$X(I) = P[Z(I)]Z^2(I), \quad (3)$$

$$\sigma_1 = S_1\beta_1, \quad (4)$$

$$\sigma_2 = S_2\beta_2, \quad (5)$$

式中, Z 是第 I 层对应的高度, ΔZ 是距离分辨率为15 m; I 代表所计算的大气层编号; $X(I)$ 是经过距离平方订正后的回波能量强度; σ_1 是气溶胶消光系数; β_1 是气溶胶后向散射系数; S_1 是气溶胶消光后向散射比,这个需要根据当地实际情况

进行选择，本文取为 50； σ_2 代表大气分子的消光系数； β_2 是大气分子的后向散射系数； S_2 是大气分子消光后向散射比，等于 $8\pi/3$ （通过瑞利散射理论计算得到），大气分子的参数是从美国标准大气模式的计算中得到。边界高度和边界值的选取采用了日本科学家（Sasano et al.，1989）提出的一种匹配法（Matching method）来确定。

香河县观测站于 2004 年加入 AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) 气溶胶监测网，CIMEL CE-318 型全自动太阳直接/散射辐射计安装在站内的办公楼顶，用于观测太阳直接和天空散射辐射。利用 AERONET 统一的反演算法（Dubovik et al.，2000b）可获得气溶胶光学厚度（AOD）、Angstrom 波长指数、复折射指数、体积浓度谱、不对称因子和单次散射反照率等气溶胶特征参数。其中 AOD 探测精度为 0.01~0.02（Eck et al.，1999；Dubovik et al.，2000a）。在太阳高度角 $>50^\circ$ 的情况下，AOD 较大时 (>0.4 ，波长为 440 nm）可以获得非常准确的复折射指数，其中虚部的相对误差为 30%~50%，实部的绝对误差大约是 0.04。AOD ≥ 0.05 时，440 nm 处的气溶胶体积浓度谱分布在 0.1~7 μm 的各个尺度峰值上的不确定性都 $<10\%$ （Dubovik et al.，2000a）。由于 2.0 级产品较难获得，本文选取的气溶胶数据是质量较好的经过云屏蔽处理的 1.5

级产品（Level 1.5）。

3 观测结果

3.1 气溶胶宏观特征

灰霾天气爆发在 2007 年 4 月 9~10 日。根据气象观测人员的记录，大气能见度从 9~10 日灰霾爆发前的 20 km 左右下降到灰霾入侵时的 3 km 左右。地面自动气象站观测资料显示，这两天的相对湿度在 40% 左右，这个数值明显低于由吴兑（2006）提出的适用于常规观测的 80%。尽管这个经验标准只是适用于广东地区，但较低的湿度还是证明了这次天气过程是灰霾而不是雾或雾霾混合天气，这主要是由于较低的空气湿度不利于灰霾气溶胶吸湿增长成雾滴。图 1 给出了太阳光度计获取的 4 月 6~10 日表征气溶胶消光性质的 AOD 和表征气溶胶粒子尺度谱特征的 Angstrom 指数的日平均时间序列。从图 1a 可以看出灰霾爆发前 3 天的 3 个波段的 AOD 都在 0.25 左右，而 9~10 日 380 nm 处的 AOD 达到了 1.25 左右，870 nm 处的 AOD 也达到了 0.5 左右。图 1b 显示 ALPHA 呈现了明显的下降趋势，尤其是短波（340~440 nm）处的 ALPHA 从灰霾爆发前 3 天的 1.4 左右下降到了灰霾爆发时的 1 左右。AOD 的增加和短波处 ALPHA 的明显降低说明了这次灰

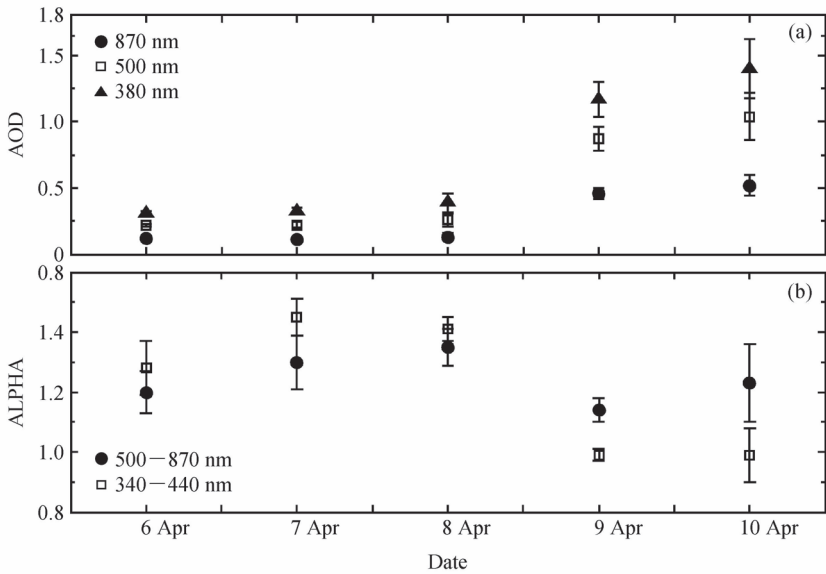


图 1 2007 年 4 月 6~10 日 (a) AOD 和 (b) ALPHA 的日平均时间序列
Fig. 1 Daily-mean time series of (a) AOD and (b) ALPHA during 6–10 Apr 2007

霾的爆发伴随了大尺度的气溶胶的导入。

图 2 给出了太阳光度计的气溶胶体积尺度谱分布和廊坊市可吸入性颗粒物 PM₁₀ 浓度的日平均时间序列。廊坊市环保局网上公布的 4 月 6~10 日的主要污染物均是可吸入性颗粒物 API 指数, 利用国家环保总局发布的转换方程 (<http://www.zhb.gov.cn/quality/background.php>) 将网上公布的 API 指数转化为气溶胶 PM₁₀ 浓度值, 见方程 (6)。

$$C = [(I - I_1) / (I_g - I_1)] \times (C_g - C_1) + C_1, \quad (6)$$

其中, C 为当日的日平均 PM₁₀ 浓度值, I 为网上公布的 PM₁₀ 的 API 指数值, I_1 和 I_g 分别对应 API 指数等级阈值的低值和高值, C_1 和 C_g 分别代表 I_1 和 I_g 所对应的 PM₁₀ 浓度值。从体积浓度谱的时间序列图 1a 上看, 灰霾爆发的 9~10 日不管是小尺度粒子还是大尺度粒子都明显高于前几天, 其中 9 日在粗粒子模态 $3.86 \mu\text{m}$ 处的体积浓度峰值达到了 $0.188 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$, 而在细粒子模态 $0.15 \mu\text{m}$ 处的峰值达到了 $0.093 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 。7 日相应的粗粒子模态 $3.86 \mu\text{m}$ 处的峰值却只达到 $0.028 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$, 细粒子模态 $0.11 \mu\text{m}$ 处的峰

值只达到 $0.026 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 。粗模态峰值的剧烈增加也再次说明这次灰霾过程中存在大颗粒物的大量导入。并且 9 日的大尺度气溶胶浓度高于 10 日的, 而小尺度气溶胶浓度却低于 10 日的, 这显示 9 日过后灰霾有逐渐消退的迹象。粗模态粒子的大量导入也说明气溶胶干沉降过程并没有有效的将大尺度气溶胶带到地面, 从而导致了这次严重的灰霾天气的发生。所以气溶胶体积浓度谱分布特征的变化也进一步证实了 ALPHA 指数明显降低的原因。从 PM₁₀ 浓度值日平均序列图 1b 看, 4 月 6 日的 PM₁₀ 浓度值最大, 达到了 $0.146 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 10 日的次之, 达到了 $0.12 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 而 7、8 日的最小, 都只有 $0.058 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

本次观测的激光雷达采用 5 min 一次、每次 1 200 次脉冲平均的方式进行 24 h 的连续观测。为了尽量消除背景噪音起伏对回波质量的影响, 对回波能量进行了小时平均的平滑处理。本文中剔除了有云干扰和背景噪音起伏过大的数据, 对有效数据计算得到的气溶胶垂直消光系数进行了日平均处理。图 3 给出了气溶胶消光系数的时间序列, 从图中看出 9~10 日的消光系数在 2 km 以下都明显大于其他几天, 尤其是 10 日在 2 300 m 处还出现了一个气溶胶消光系数高值。从日平均消光系数廓线的折点来判断准确的边界层高度并不是很有效, 不过从图 3 的日平均廓线初步判断 9~10 日的边界层高度要明显高于 7~8 日的。图 3 也可以看出 6 日近地面的气溶胶消光系数与 9~10 日接近, 甚至大于 9 日的, 在 200 m 处达到了 $0.8 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$, 但 1 200 m 边界层高度以上的消光系数却比 7~8 日的还低。所以 6 日的气溶胶在垂直方向上分布十分不均匀, 大量气溶胶粒子集中于近地面。这种分布特征有可能是由于当天大气层结较为稳定, 高低空的垂直对流不强烈和边界层高度相对较高 (高于 9~10 日) 引起的。

3.2 气溶胶微物理特征

图 4a 和 4b 分别给出了太阳光度计反演的气溶胶复折射指数的实部和虚部均值, 可以看出表征气溶胶散射性质的复折射指数实部变化不是很明显, 但是爆发后的还是高于灰霾爆发前的。其中最明显的是实部数值在 440 nm 波段高于爆发前的, 这是由于大尺度气溶胶在短波处更加敏感的原

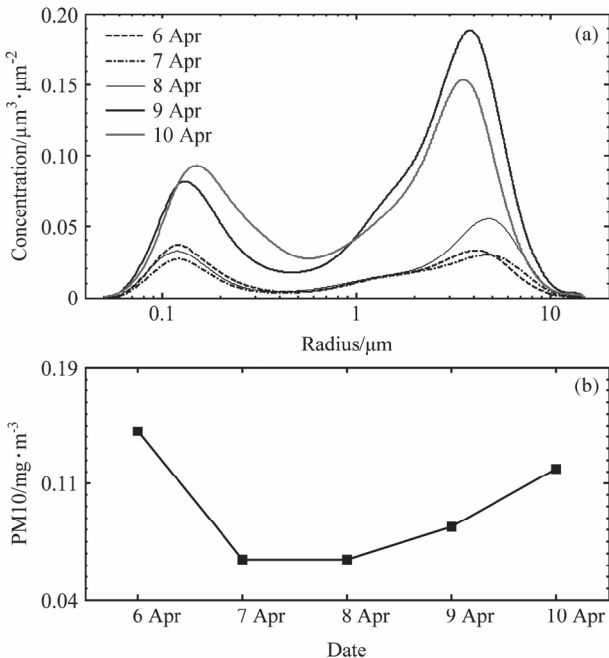


图 2 2007 年 4 月 6~10 日 (a) 气溶胶体积浓度分布和 (b) PM₁₀ 浓度的日平均时间序列

Fig. 2 Daily-mean time series of (a) aerosol volume concentration distribution and (b) PM₁₀ concentration during 6–10 Apr 2007

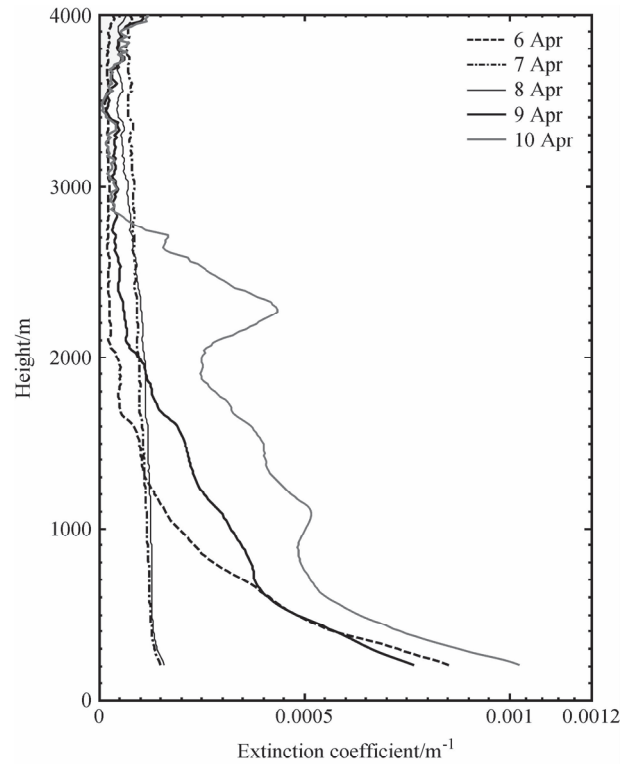


图 3 气溶胶垂直消光系数廓线时间序列
Fig. 3 Time series of vertical profiles of aerosol extinction coefficient

因。但从图 4c 上看，灰霾爆发后的气溶胶单次散射反照率（SSA）明显高于爆发前的，爆发后各波段的数值都集中在 0.89 左右，而爆发前的集中在 0.83 左右，所以这次灰霾过程中气溶胶的散射能力有一定的增强。相比之下，从图 4b 上看表征气溶胶吸收性质的复折射指数的虚部在爆发后明显低于爆发前的，爆发后仅在 0.01 左右，而爆发前却保持在 0.018 左右，这说明灰霾天气过程中气溶胶的吸收能力明显减弱。总的来说，大尺度颗粒物的导入增强了局地气溶胶的散射能力，却降低了吸收能力。

4 讨论

从图 1 中看出，较为敏感的短波处 ALPHA 的明显降低说明了这次灰霾过程中的气溶胶是以大粒子为主，在体积浓度谱时间序列图 2a 中也进一步证实了这个结论，并且 AOD 的增加也说明了气溶胶数浓度一定程度上的增加。这个结论与德国科学家研究的以大量人为小粒子污染物导入和

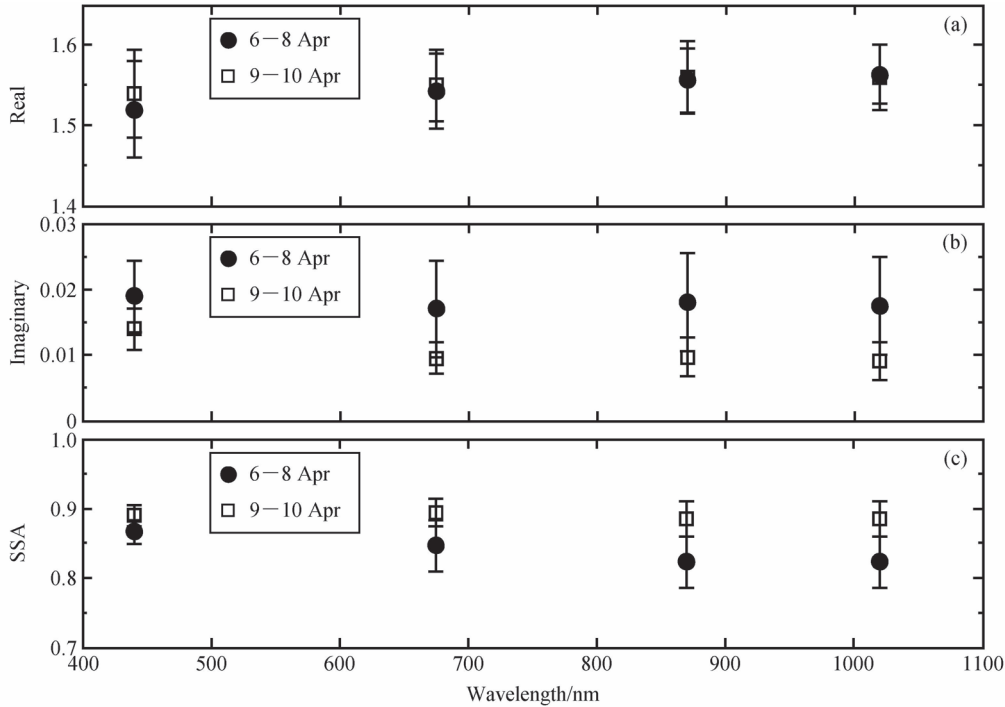


图 4 灰霾爆发前（4 月 6~8 日）后（4 月 9~10 日）气溶胶微物理参数日平均比较：（a）复折射指数的实部；（b）复折射指数的虚部；（c）单次散射反照率
Fig. 4 Comparison of daily mean microphysical parameters before (6–8 Apr) and after (9–10 Apr) the outbreak of the hazy days: (a) real part of complex refractive index; (b) imaginary part of complex refractive index; (c) single-scattering albedo (SSA)

呈现小粒子单峰分布谱特征的欧洲北极灰霾在气溶胶尺度特征上有明显的差异 (Müller et al., 2004)。虽然气溶胶数浓度的变化趋势与光度计的结果基本一致, 但是 PM₁₀ 浓度值在 6 日出现最高值, 这与图 1a 中 6 日相对较小的 AOD 值的结果矛盾。导致这种趋势差异产生的原因可能是: 1) 环保局采用的是全市各站点的日平均值, 而本文采用的是香河县单站点的数据。2) 环保局的 PM₁₀ 浓度值是近地面层的气溶胶浓度的观测值, 而太阳光度计测的是整层大气中的气溶胶柱总量。自动气象站的近地面风速数据显示 6~10 日的日平均风速和标准偏差分别为 1.20 ± 0.88 、 1.84 ± 1.25 、 1.29 ± 0.79 、 1.68 ± 1.10 、 1.69 ± 0.99 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以从气溶胶垂直消光系数分布情况 (图 3) 看, 6 日在较弱的风力 (最低的日平均风速) 所导致的较弱的空气对流背景条件下, 气溶胶通过干沉降作用都集中在近地面附近, 所以 6 日的地表消光系数大于 9 日, 而且也与 10 日的较为接近。而在高空, 6 日气溶胶消光系数小于 7~8 日的。所以在图 2b 中, 6 日 PM₁₀ 浓度值的高值与当日的 AOD 低值相对应。总之, 在这次灰霾天气过程中 (9~10 日), 随着大气边界层高度相对抬升, 气溶胶借助对流运动在垂直和水平方向上的分布极为不均匀。

图 4 中气溶胶的微物理性质特征显示, 这次灰霾爆发后, 气溶胶的散射能力明显增强, 而吸收能力明显减弱。相比以人为小粒子气溶胶为主导的欧洲北极灰霾 (Müller et al., 2004), 气溶胶散射能力两者相当, 而香河地区的吸收能力虽然下降但还是远远高于吸收能力相对增强的欧洲北极灰霾。从气候意义上看, 这次香河地区灰霾过程中气溶胶吸收能力的明显减弱将会减少气溶胶对大气和地表长波辐射的吸收, 从而起到降低温室效应的作用。还可看出这次灰霾过程中的各种气溶胶光学特性与亚洲沙尘具有一定的相似之处, 所以这种灰霾气溶胶的爆发源地可能相似 (Xia et al., 2005; Papayannis et al., 2007) 且灰霾过程中气溶胶微物理性质在短暂时间内的剧烈变化也说明这次灰霾过程不是以本地的乡村人为源气溶胶为主, 所以需要从流场的后向轨迹和当时的天气特征来综合分析气溶胶的来源。

采用了美国国家海洋大气局 (NOAA) 的

HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 在线免费模式 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>) 进行后向轨迹的研究。图 5 给出了香河县 4 月 7 日 12 时到 9 日 12 时 (世界时) 的后向轨迹, 可以看出各等压面层的主导气流基本来自西北面的蒙古地区, 尤其是高海拔的两支流线的后向轨迹都是源自北部的蒙古地区。图 6 是采用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) $1^\circ \times 1^\circ$ 格点数据描绘的 850 hPa (约 1 500 m) 的等压线图。从图 6a 看出, 在东北地区低压系统和我国中部地区高压系统的控制下, 香河地区的气流在低压系统后部成逆时针方向旋转, 所以风是从西北的蒙古地区吹向香河地区。图 6b 显示香河地区 9 日处在低压系统正下方, 低压系统利于周围空气向中心辐合, 因此这时香河地区的主导风向仍是西北气流, 这也是导致灰霾持续到 4 月 10 日的主要原因。蒙古地区是亚洲沙尘的源地之一, 经过综合分析后发现这次灰霾过程的气溶胶中很可能包含有从这个区域输送来的大尺度沙尘性气溶胶。图 7 是 4 月 8 日和 9 日 0000 UTC 的温度廓线图, 该图

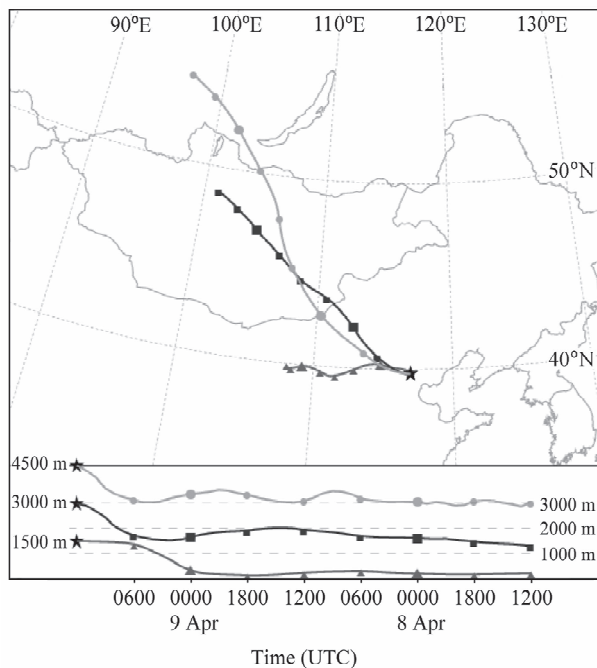


图 5 香河县 4 月 7~9 日的后向轨迹, 3 条曲线代表不同高度层的轨迹 (单位: m)

Fig. 5 Back-trajectory during 7~9 Apr in Xianghe. Three curves represent the trajectories at the different layers (units: m)

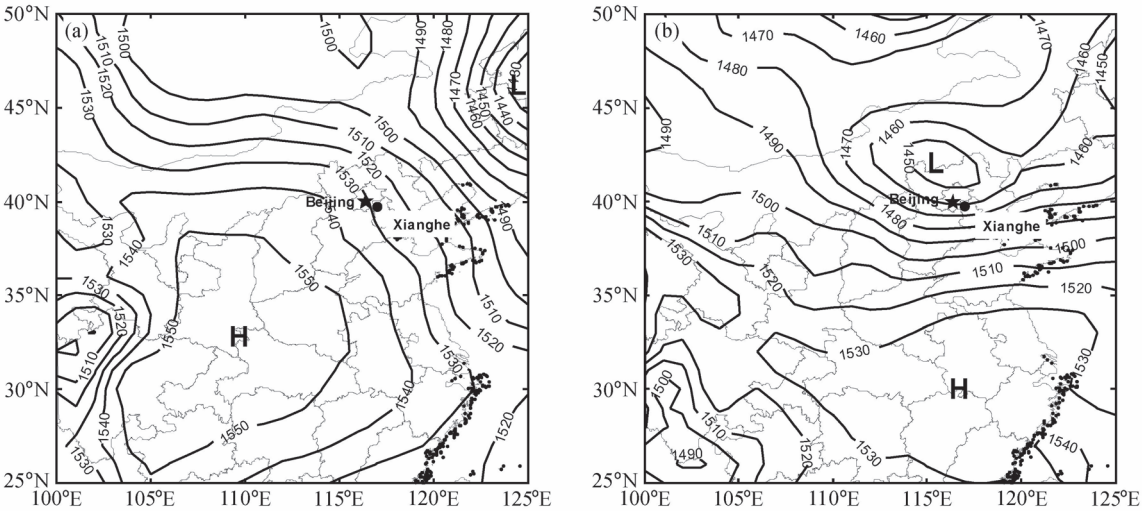


图 6 850 hPa 的天气图：(a) 4 月 8 日 0000 UTC；(b) 4 月 9 日 0000 UTC
Fig. 6 Synoptic chart at 850 hPa; (a) 0000 UTC 8 Apr; (b) 0000 UTC 9 Apr

选取的是最靠近香河地区（50°N，117°E）的 NCEP 格点 0000 UTC 数据。从图 7 可以清晰看见相对于 8~9 日在 850~1 000 hPa 的高度上明显存在一个逆温，在上下对流不畅的情况下将导致局地人为源小颗粒物和外来大颗粒物的同时积累。所以太阳光度计反演得到的气溶胶尺度谱分布显示出各个尺度的颗粒物数浓度都明显增加，而且微物理性质也表现出一定的沙尘气溶胶入侵时的散射增强和吸收减弱特征。

5 结论

本文利用太阳光度计和激光雷达数据并结合后向轨迹 HYSPLIT 模式和 NCEP 数据，分析了 2007 年 4 月 6~10 日灰霾天气过程爆发的原因和气溶胶性质的变化特征，得出以下主要结论：

- (1) 在灰霾天气过程中，大气能见度明显降低，3 个波段（380、500 和 870 nm）的 AOD 明显增加，ALPHA 明显下降。AOD 和 ALPHA 在短波处的变化较为明显，而短波对大颗粒物又较为敏感，由此判断该过程中大颗粒物数量明显增加。不过从体积浓度谱粗细模态的峰值变化来看，无论是小尺度还是大尺度的气溶胶都明显增加，尤其是大尺度气溶胶浓度增加明显。
- (2) 从激光雷达反演结果来看，剧烈的对流运动和边界层高度的抬升导致气溶胶上升到近 3

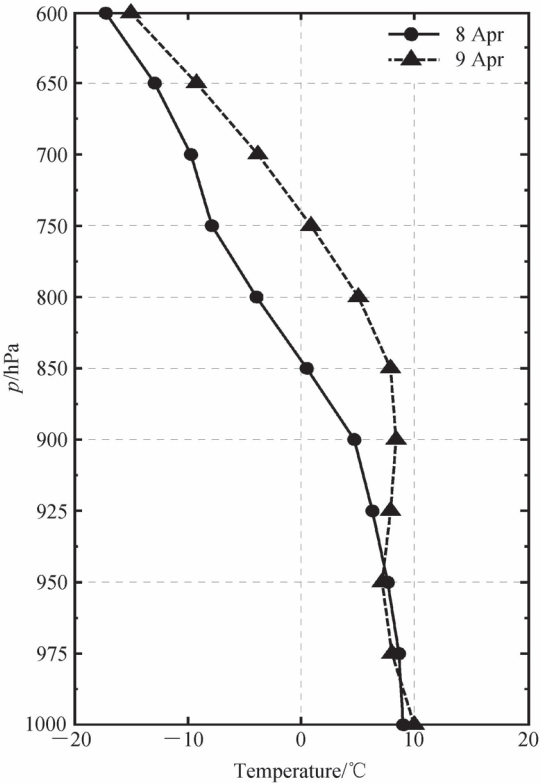


图 7 4 月 8 日和 9 日（40°N，117°E）0000 UTC 的温度廓线
Fig. 7 Temperature profile of (40°N，117°E) at 0000 UTC on 8 and 9 Apr

km 左右的高度，特别是 4 月 10 日在 2 300 m 处存在一个气溶胶强消光层。上层大气气溶胶的明显增加是这次灰霾过程中气溶胶柱总量特征变化的主要原因之一。

(3) 从微物理性质、后向轨迹模式以及 NCEP 资料的结果判断, 这次灰霾天气过程中不仅含有局地小尺度气溶胶的累积, 还包含了从蒙古地区输送来的大尺度沙尘性气溶胶。这种气溶胶的入侵导致该地区气溶胶对辐射的散射能力增强和吸收能力的减弱。

致 谢 感谢香河观测站内的工作人员对激光雷达和太阳光度计的精心维护和中国科学院大气物理研究所 2007 级博士班的刘传熙和胡开喜同学在作图方面给予的一些宝贵意见。同时还要感谢河北省廊坊市环保局提供的 API 指数值, 美国 NASA AERONET 工作组免费提供的太阳光度计数据、美国 NOAA 免费提供的 HYSPLIT 在线后向轨迹模式和美国环境预报中心免费提供的 NCEP 气象数据。

参考文献 (References)

Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000a. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 9791–9806.

Dubovik O, King M D. 2000b. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 20673–20696.

Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 31333–31350.

Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations; Some comments [J]. *Appl. Opt.*, 23 (5): 652–653.

Heintzenberg J, Tuch T, Wehner B, et al. 2003. Arctic haze over Central Europe [J]. *Tellus (B)*, 55: 796–807.

Müller D, Mattis I, Ansmann A, et al. 2004. Closure study on optical and microphysical properties of a mixed urban and Arctic haze air mass observed with Raman lidar and sunphotometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D13): 1–10.

Papayannis A, Zhang H Q, Amiridis V, et al. 2007. Extraordinary dust event over Beijing, China, during April 2006: Lidar, sun photometric, satellite observations and model validation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (7): 1–5.

Sasano Y, Browell E V. 1989. Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations [J]. *Appl. Opt.*, 28 (9): 1670–1679.

Wu Dui, Tie X X, Li C C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (35): 6568–6577.

吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别 [J]. *气象*, 32 (4): 9–15.

Wu Dui. 2006. More discussions on differences between haze and fog in city [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 32 (4): 9–15.

吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. *气象学报*, 64 (4): 510–518.

Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (4): 510–518.

王明星. 2000. 气溶胶与气候 [J]. *气候与环境研究*, 5 (1): 1–5.

Wang Mingxing. 2005. Aerosol in relation to climate change [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (1): 1–5.

Xia X, Chen H, Wang P, et al. 2005. Aerosol properties and their spatial and temporal variations over North China in Spring 2001 [J]. *Tellus (B)*, 57: 28–39.