

杨东旭, 刘毅, 夏俊荣, 等. 2012. 华北及其周边地区秋季气溶胶光学性质的星载和地基遥感观测[J]. 气候与环境研究, 17 (4): 422-432, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10149. Yang Dongxu, Liu Yi, Xia Junrong, et al. 2012. Measurements of aerosol optical properties over North China and its surrounding areas in autumn by satellite and ground based remote sensing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 422-432.

华北及其周边地区秋季气溶胶光学性质的星载和地基遥感观测

杨东旭¹ 刘毅¹ 夏俊荣^{1,2} 王普才¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 利用 2004~2009 年秋季臭氧监测仪的 3 级观测资料, 分析了华北及周边地区的气溶胶光学性质。结果表明: 大部分区域气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)和气溶胶紫外吸收指数(UltraViolet Aerosol Index, UVAI)平均值分别高于 0.8 和 0.75; 高气溶胶事件发生频次统计表明, AOD 高值(>0.4)频发于北京及其周边地区, UVAI 高值(>1.0)频发于河北中部及南部地区; 华北及其周边地区绝大多数城市平均 AOD 和 UVAI 分别高于 0.7 和 0.60, 而张家口、承德和阳泉 3 个城市的平均 AOD 和 UVAI 值分别低于 0.6 和 0.65。作者进一步研究了 2006 年 10 月 30 日的一次霾事件中气溶胶的光学性质以及其时空分布特征。结果表明, 霾由华北地区输送至渤海海域, 并向东北方向输送; 香河地基 ELIAR 激光雷达的垂直观测结果进一步表明, 工业和城市型气溶胶主要集中在 1500 m 以下, 其中高浓度部分集中于 650 m 以下, 平均峰值位于 285 m, 平均消光系数达 2.15 km^{-1} ; CALIOP 卫星观测资料结合后向轨迹分析表明, 大气低层气溶胶类型以工业和城市型气溶胶为主, 而高层则由于上游大气输送沙尘粒子的混入使气溶胶类型转变为污染—沙尘型。霾事件期间, 香河站 CE-318 太阳光度计观测的 AOD 平均值(标准差)从背景值 0.08 (0.04)升高至 1.17 (0.14); Ångström 指数平均值(标准差)从背景值 0.90 (0.10)升至 1.12 (0.09); 核模态、积聚模态和粗模态的气溶胶粒子数柱总量均增加, 其中细粒子所占比例明显升高。

关键词 气溶胶光学参数 华北地区 臭氧监测仪 激光雷达 霾

文章编号 1006-9585 (2012) 04-0422-11

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10149

Measurements of Aerosol Optical Properties over North China and Its Surrounding Areas in Autumn by Satellite and Ground Based Remote Sensing

YANG Dongxu¹, LIU Yi¹, XIA Junrong^{1,2}, and WANG Pucai¹

1 Key Laboratory of the Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Aerosol optical properties over North China and its surrounding areas in autumn have been studied by using Ozone Monitoring Instrument (OMI) level 3 data during 2004–2009. The average aerosol optical depth (AOD) and ultraviolet aerosol index (UVAI) over the most regions are larger than 0.8 and 0.75. High frequency of large value of

收稿日期 2010-11-19 收到, 2011-04-05 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划 2011AA12A104, 国家自然科学基金资助项目 41075014, 中国科学院战略性先导科技专项资助 XDA05040201

作者简介 杨东旭, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为气溶胶光学性质及其遥感反演。E-mail: yangdx@mail.iap.ac.cn

AOD (>0.4) event was observed in Beijing and its surrounding areas, and high frequency of large value of UVAI event was observed in the southern and middle parts of Hebei Province. Average AOD and UVAI over the cities of North China Plain were larger than 0.7 and 0.60, while the averaged AOD and UVAI values of Zhangjiakou, Chengde, and Yangquan were smaller than 0.6 and 0.65, respectively. Satellite and ground based observations were applied to a haze event on 30 October 2006. The result indicates the haze transported from the North China Plain to the Bohai Sea. EZLidar observation results indicate that most of the polluted aerosols were in the layer less than 1 km, and the peak value of extinction coefficient is 2.15 km^{-1} within the altitude of 285 m. CALIOP and back trajectory results indicate that the dust aerosol mixed with polluted aerosols in higher layer, and became polluted dust aerosols. During the haze event, AOD increased from a background value (standard deviation) of 0.08 (0.04) to 1.17 (0.14) from the measurement of CE-318 at Xianghe station, and the Ångström index increased from 0.90 (0.10) to 1.12 (0.09). The particle size distribution indicated that the ratio of fine particles increased while all of the columns of nuclei, accumulation, and coarse mode increased.

Key words aerosol optical property, North China, Ozone Monitoring Instrument, lidar, haze

1 引言

近年来, 全球气候和环境问题逐渐成为人们关注的焦点, 而气溶胶作为气候和环境变化的不确定因素, 成为大气科学界所关注的热点问题(王明星和张仁健, 2001; IPCC, 2007)。大气气溶胶是悬浮于大气中的微小颗粒物, 其不仅可以通过直接和间接辐射强迫作用影响大气辐射的收支, 导致大气温度发生变化, 而且还会污染人类和其他生物的生存环境。随着人类科技水平的进步, 工业生产和日常生活向大气排放的人为气溶胶快速增加, 造成工业和城市集中地区经常受到霾天气的影响。霾作为工业和城市型气溶胶大量聚集的一种表现形式, 正逐渐被人类关注。Wang et al. (2009) 利用全球气溶胶自动观测网 (AEROSOL RObotic NETwork, AERONET) (Holben et al., 1998) 和全球气象站能见度资料, 分析并指出 1973~2007 年期间, 全球大部分地区, 特别是东、南亚地区, 陆地晴空能见度逐渐降低。已有大量的集中观测实验针对亚洲地区, 如 ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiments-Asia) (Huebert et al., 2003) 和 ABC-EAREX (Atmospheric Brown Clouds-East Asian Regional Experiments, <http://abc-gosan.snu.ac.kr/prog.html> [2010-07-20])。结果表明, 由于大量化石燃料的燃烧, 亚洲地区经常出现高浓度的含碳和硫酸盐气溶胶 (Arndt et al., 1997)。

中国地处亚洲东部, 作为一个发展中国家, 在经济和国民生产力大幅发展的同时, 环境问题也日益显露出来, 华北地区是中国工业发展规模较大、速度较快的地区, 同时也是工业和城市型气溶胶排放较严重的地区, 大量的气溶胶造成华北及周边地

区多发严重的霾天气。根据 Che et al. (2008) 利用 1981~2005 年中国气象局国家气象信息中心所提供的 6 h 能见度资料对全国 31 个城市 25 年能见度的观测分析的结果, 华北及周边地区大部分城市, 四季均受到霾的影响, 且能见度呈下降趋势。闵敏等 (2009) 利用香河观测站的资料, 对一次伴有沙尘的霾事件中气溶胶光学性质进行了分析, 结果表明该过程中气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 上升, Ångström 指数下降。

借助卫星观测, 很容易发现高气溶胶影响并不集中于城市, 而是大部分华北地区 (包括河北、山西、内蒙古、北京、陕西、山东、河南、江苏北部和安徽北部等), 中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 多年观测的结果表明, 该地区平均 AOD 可达 0.5 以上 (Kim et al., 2006)。海面观测表明, 大量工业和城市气溶胶被输送至中国近海海域上空 (Streets et al., 2001; Bates et al., 2004), 可以导致春季无沙尘影响条件下气溶胶光学厚度和 Ångström 指数高达远海船测结果的两倍 (Liu et al., 2010)。目前针对华北及周边地区霾的研究还很缺乏, 大部分的工作主要集中于对南方的珠江三角洲地区 (Wu et al., 2005; 吴兑, 2006; 吴兑等, 2006)。所以, 针对华北及周边地区 (本文定义的华北周边地区包括华北地区相邻的省、市、自治区等地区, 以及渤海和黄海等的近海海域) 工业和城市气溶胶以及霾天气中气溶胶光学性质的研究是非常有价值的。

气溶胶的时间—空间分布变化很大, 连续观测其光学性质比较困难。地基遥感仪器观测的时间分辨率较高, 但其有效观测范围受限于仪器安放的位置; 极轨卫星可以在同一时间内观测较大空间范围内的气溶胶光学性质, 但其每天仅可能对同一地区

做一次有效观测。两种观测的优点和缺点并存,本研究将地面和卫星的观测资料结合,用来分析中国华北及周边地区气溶胶光学性质。

2 仪器与观测

2.1 OMI 气溶胶产品

臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 是由荷兰宇航计划总局 (Netherlands's Agency for Aerospace Programs) 和芬兰气象研究所 (Finnish Meteorological Institute, FMI) 联合开发, 搭载于 NASA 极轨卫星 EOS/Aura 上的高光谱推扫式成像仪。Aura 每天经过华北地区上空约为 05:30 (协调世界时), 位列 A-TRAIN 卫星的第一位。OMI 可以探测可见光和紫外波段的太阳后向散射辐射, 具有 740 个波段, 星下点分辨率 $13\text{ km} \times 24\text{ km}$, 可以对 O_3 等大气痕量气体以及气溶胶进行有效探测。OMI 的紫外波段遥感观测气溶胶光学性质的优势在于, 很多种类的地表 (包括干旱和半干旱地区) 在近紫外的反射率较低, 所以有效的观测数据在空间覆盖较广; 且在近紫外波段分子散射很强, 其与气溶胶吸收相互作用, 更有利于获取气溶胶吸收性质 (Torres et al., 2007)。但在边界层内, 这种强散射的作用也会在一定程度上影响到紫外波段在边界层内对气溶胶的探测能力。本研究中, 选用 OMI 3 级格点产品资料中的 483.5 nm 气溶胶 AOD 和近紫外波段的气溶胶指数 (ultraviolet aerosol index, UVAI) (Torres et al., 2002) 资料对华北及周边地区的气溶胶光学性质进行了统计分析, 资料的格点为 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度) (Ahn et al., 2008)。其中, UVAI 可以表征气溶胶在紫外波段的吸收能力, UVAI 越高, 其吸收性越强 (Torres et al., 1998, 2007)。

2.2 CALIPSO 资料

云—气溶胶光达和红外探险者卫星观测 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO) 极轨卫星隶属美国宇航局, 为 A-Train 系列卫星之一, 每天过境时间大约为 05:30 (协调世界时, 下同)。云和气溶胶正交偏振激光雷达 (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) 为该卫星搭载的主要探测器, 目的是利用主动遥感获取气溶胶的垂直分布信息。选用 Nd:Yag 固体激光器, 利用 2 倍频技术, 可以产生 1064 nm

和 532 nm 波长的激光脉冲, 能够对小粒子, 尤其是气溶胶进行有效的观测 (Winker et al., 2006)。该探测器在 $0\sim 5\text{ km}$ 海拔高度的垂直分辨率可达 33 m , 水平分辨率为 333 m 。本研究使用其 532 nm 的后向散射系数资料, 分析气溶胶的垂直分布信息; 利用 CALIOP 分类产品分析气溶胶成分的垂直分布。

2.3 AERONET 数据产品

法国 CIMEL 公司研制的 CIMEL CE-318 太阳/天空光辐射计, 部署于中国科学院大气物理研究所河北省香河大气综合观测试验站 (39.79°N , 116.95°E , 海拔约 20 m), 该站位于北京市东南方向约 60 km 处, 站点周边以平原为主, 四季分明, 并于 2004 年加入世界气溶胶自动观测网 (AEROSOL RObotic NETwork, AERONET)。CE-318 可以自动进行太阳直射辐射观测, 也可以进行等高度角和主平面天空光扫描观测。通过相应的反演算法可以获得 AOD、Ångström 指数和粒子尺度谱分布等参数 (Nakajima et al., 1996)。本研究中气溶胶光学参数和粒子尺度谱分布分别使用通过云检测和质量控制的 2.0 级和 1.5 级产品 (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> [2010-07-20])。

2.4 EZ 激光雷达数据产品

中国科学院大气物理研究所的 ALS-300 型激光雷达 EZLidar, 安置于香河观测站内, 其采用 Nd:Yag 固态激光器, 利用 3 倍频技术, 发射波长 355 nm 、脉冲频率 20 Hz 的激光束, 用来探测 15 km 以下大气气溶胶光学特性 (夏俊荣和张镭, 2006)。雷达 24 h 连续运行, 无雨时自动观测, 有雨时自我保护, 雨停时自动恢复观测。探测数据经过各雷达因子订正后, 应用一套适用于香河地区实际观测的、基于 Welton 发展的 Fernald 反演方法 (Fernald, 1984; Welton et al., 2000; 夏俊荣, 2010), 并同时采用 AERONET 太阳光度计获取的 AOD 资料进行约束, 从而反演得到气溶胶消光系数廓线, 雷达的探测盲区是 200 m , 这里假定 200 m 以下气溶胶均匀混合。反演方法通过使用系留气艇获得的逆温层高度信息, 进行了间接验证, 还与雷达研制厂家提供的 Fernald 方法进行了对比验证, 结果表明该反演方法结果可靠 (夏俊荣, 2010)。

3 结果与讨论

华北及周边地区终年受到多种类型气溶胶的

影响,如春季多发的沙尘天气所携带的矿物质气溶胶和冬季北方取暖而排放的含碳类气溶胶等,所以对工业和城市型气溶胶的研究可能受到其较大程度的影响;另外,由于夏季华北及周边地区多云、雨天气,会降低卫星资料质量,所以这3个季节都不是研究工业和城市型气溶胶的理想时间。本文选取秋季(9~11月)作为时间背景,尽可能地减小其它类型气溶胶对工业和城市型气溶胶光学性质的影响,能够更准确地获取工业和城市型气溶胶的光学性质以及其对华北及周边地区的影响程度。

3.1 气溶胶光学性质分布状况

工业和城市型气溶胶在近紫外波段的吸收性质较强(Dubovik et al., 2002),所以利用 Aura/OMI 的近紫外和可见光观测,能够有效地对其光学特性进行研究。由 2004~2009 年 OMI 3 级秋季 AOD 和 UVAI 平均值可见(如图 1a 和 1b 所示),华北地区

AOD 和 UVAI 远远高于其周边地区,大部分区域 AOD 高于 0.8、UVAI 高于 0.75。AOD 高值中心位于山东西南部和河南东北部,平均值可达 1.1 以上;UVAI 的高值中心位于河北中部和南部地区,平均值高于 0.9。

Barnaba and Gobbi (2004) 的研究结果表明,如果没有沙尘天气的影响,高于 0.4 的 AOD,可以归因于工业和城市型气溶胶。本研究分别选取 0.4 和 1.0 作为阈值,计算了高 AOD ($AOD > 0.4$) 和高 UVAI ($UVAI > 1.0$) 出现的天数(如图 1c 和 1d 所示)。高 AOD 多出现于北京、天津、山东以及河北等地区,其分布结果与 AOD 的平均值不同;高 UVAI 多发地区分布与平均值相似。值得注意的是,华北东部的沿海地区以及近海海域, AOD 和 UVAI 值均较高,甚至高于华北周边地区。

工业和城市型气溶胶的排放源大都集中于城

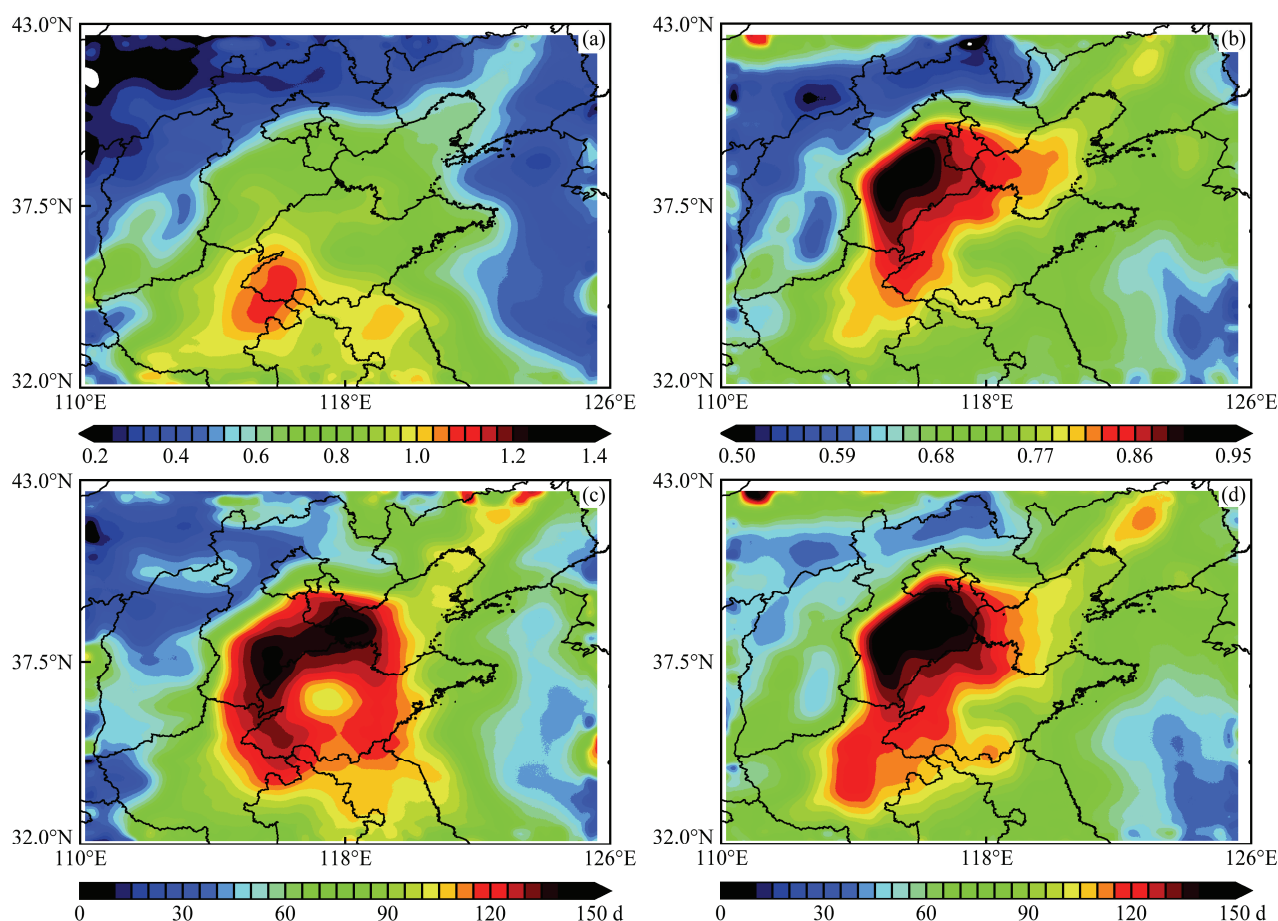


图1 2004~2009年 OMI 观测华北及周边地区平均 (a) AOD 和 (b) UVAI, 以及 (c) AOD 高值 (>0.4) 和 (d) UVAI 高值 (>1.0) 出现的天数

Fig.1 Distributions of mean value of (a) aerosol optical depth (AOD) and (b) ultraviolet aerosol index (UVAI), and the day numbers of (c) high value of AOD (>0.4) and (d) high value of UVAI (>1.0) over North China and its surrounding areas from Ozone Monitoring Instrument (OMI) during 2004–2009

市及其周边地区,利用 6 年平均 AOD 和 UVAI 的格点数据,以城市为中心,选取相邻的 4 个格点,通过距离平方反比加权平均,计算得到华北及周边地区 38 个城市的 AOD 和 UVAI 平均值(表 1)。从 AOD 的分布来看,除了几个城市平均值低于 0.6 以外,其他城市 AOD 均较高,大部分城市平均值高于 0.7;从 UVAI 的分布来看,所有城市 UVAI 均分布在 0.6~1.0 之间,其中小部分城市低于 0.7。值得注意的是:北京、保定以及石家庄等城市 UVAI 值较其他地区最高,均高于 0.9;商丘、济宁以及

表 1 华北地区 31 个城市平均 AOD 和 UVAI 值

Table 1 The mean values of AOD and UVAI of 38 cities in North China and its surrounding areas

城市名称	中心纬度	中心经度	AOD 值	UVAI 值
北京	39.91°N	116.41°E	0.70	0.92
天津	39.12°N	117.22°E	0.90	0.87
廊坊	39.52°N	116.71°E	0.79	0.90
保定	38.88°N	115.46°E	0.88	0.95
张家口	40.77°N	114.89°E	0.51	0.64
石家庄	38.04°N	114.51°E	0.90	0.93
衡水	37.74°N	115.70°E	0.95	0.88
德州	37.45°N	116.30°E	0.92	0.90
沧州	38.30°N	116.84°E	0.83	0.90
阳泉	37.86°N	113.58°E	0.52	0.65
晋中	37.69°N	112.75°E	0.72	0.64
太原	37.87°N	112.55°E	0.83	0.68
承德	40.98°N	117.94°E	0.41	0.62
郑州	34.75°N	113.62°E	0.93	0.78
洛阳	34.62°N	112.46°E	0.76	0.74
开封	34.80°N	114.31°E	1.01	0.83
新乡	35.30°N	113.93°E	1.00	0.86
焦作	35.22°N	113.24°E	1.00	0.80
鹤壁	35.75°N	114.30°E	0.98	0.83
安阳	36.10°N	114.39°E	0.96	0.79
淮阳	35.76°N	115.03°E	1.09	0.85
济南	36.66°N	116.10°E	0.90	0.78
聊城	36.45°N	115.99°E	1.04	0.85
滨州	37.38°N	117.97°E	0.94	0.89
东营	37.43°N	118.68°E	0.94	0.80
淄博	36.81°N	118.05°E	0.90	0.84
济宁	35.41°N	116.59°E	1.18	0.85
菏泽	35.23°N	115.48°E	1.12	0.88
泰安	36.20°N	117.09°E	0.99	0.83
莱芜	36.21°N	117.68°E	0.88	0.73
商丘	34.41°N	115.66°E	1.22	0.86
周口	33.61°N	114.66°E	1.01	0.79
漯河	33.58°N	114.02°E	1.04	0.84
许昌	34.03°N	113.85°E	1.01	0.84
平顶山	33.74°N	113.31°E	0.98	0.82
南阳	32.99°N	112.53°E	1.03	0.80
驻马店	32.98°N	114.03°E	0.98	0.80
唐山	39.63°N	118.18°E	0.76	0.88

菏泽等城市 AOD 值较其他地区最高,均高于 1.1;张家口、承德和阳泉的 AOD 和 UVAI 值均较低,都分别低于 0.6 和 0.65,其中承德的两值均最低,分别为 0.41 和 0.62。该结果同时表明,华北及周边地区 38 个城市均受到工业和城市型气溶胶的影响。

对比各城市的平均 AOD 和 UVAI,可以发现,AOD 高值并非对应 UVAI 高值。为了进一步研究这一现象,图 2a 给出了 AOD 和 UVAI 的相关关系。UVAI 低于 0.87 时,AOD 随 UVAI 增加而增加,当 UVAI 大于 0.87 时,AOD 随 UVAI 增加有递减的趋势。图 2b 给出了 UVAI/AOD 随纬度的变化,纬度相对较低的城市的 UVAI/AOD 保持在 0.8 附近、变化不大;当高于 36°N 时,UVAI/AOD 随着纬度的增加直线上升。结合表 1 可以看出,北京、天津、保定和石家庄等北部城市表现出 UVAI 较高但 AOD 不是很高的现象;而济宁、菏泽、洛阳和商丘等偏南的城市具有高 AOD 和相对不高的 UVAI;偏西部的城市,例如晋中和太原则出现低 UVAI 对应较高 AOD 的现象。从以上结果来看,UVAI 和 AOD 相关关系会随着区域的不同而具有差异,导致这种现象的原因有两点:不同区域、来源气溶胶性质的差异;地域差异导致的湿度等气象要素的差异,造成气溶胶在大气中参与的物理化学过程有差别。

3.2 一次霾事件的光学性质以及传输特征

为了进一步研究华北及周边地区工业和城市气溶胶光学性质,选取一次较强的霾事件,结合多种观测资料,对其进行综合分析。Aqua/MODIS 卫星影像表明(图 3),2006 年 10 月 30 日,在华北地区爆发了一次较强的低能见度事件;香河观测站纪录表明此为一次霾事件;根据 NCEP 再分析资料,该区域相对湿度在 35%~70%之间,符合吴兑(2006)提出的霾相对湿度低于 80%的阈值判断标准。另外,根据 MODIS 火点资料,10 月 30 日前,华北地区没有发现过多的火源,所以可认为该霾事件主要是由于工业和城市气溶胶所导致。北京、天津、河北和辽宁等省、市受污染较严重,渤海和黄海部分海域也同时受到影响。利用 OMI 的 3 级 UVAI 观测资料,能够更清晰地表示出霾的空间分布特征(图 4)。此次霾事件影响范围主要包括华北的东、北部地区,部分东北地区以及东部近海海域,UVAI 高值中心主要集中在渤海北部沿岸,最高值可达 2.4 以上。另外,值得注意的是,霾影响范围几乎全部覆盖住了渤海海域,对比图 1 给出的平均 UVAI 分

布，可以断定，渤海海域上空受到高 UVAI 气溶胶的影响严重，并不仅限于此个例。

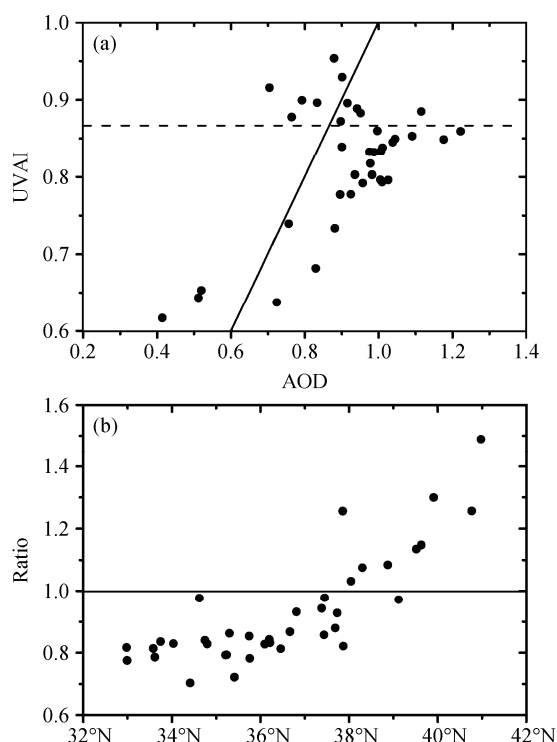


图2 华北地区城市 (a) 平均 AOD 和 UVAI 的相关关系以及 (b) UVAI 与 AOD 的比值随纬度的变化 (实线表示 $UVAI/AOD=1$, 虚线表示 $UVAI=0.87$)
 Fig.2 (a) The correlationship between averaged AOD and UVAI, and (b) the ratio of UVAI and AOD varied with latitude (solid line indicates $AOD/UVAI=1$, the dashed line denotes $UVAI=0.87$)

为了进一步了解此次霾事件的空间分布特征，利用 CALIPSO/CALIOP 的观测资料，对该次霾的垂直分布进行了分析，图 4 中给出了 CALIOP 17:30 的观测结果 (约 OMI 观测后 13 h)，同时，针对高浓度气溶胶层，给出了利用 NOAA/HYSPLIT (Air Resources Laboratory HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 模式和空间分辨率为 1° (纬度) $\times$ 1° (经度)、时间分辨率为 3 h 的 NCEP 全球数据同化系统 (Global Data Assimilation System, GDAS) 的气象数据集计算得到的 13 h 气块后向轨迹，通过后向轨迹将 UVAI 的观测结果和 CALIOP 的垂直廓线相联系。CALIOP 的垂直廓线表明，在陆地上空，气溶胶高浓度层较低，但在海面上空，明显高于地面上空的高度，超过 2 km，甚至接近 4 km。后向轨迹表明，在高气溶胶浓度层，陆地上空气块来自较低气层，海洋上空气块来自较高气层。

从 UVAI 的分布来看，本次霾事件影响了 AERONET 香河站，利用 CE-318 太阳光度计的观测资料，能够获得较准确的气溶胶光学性质。同时，选取 2006 年 10 月 31 日作为无霾影响的背景观测，与 10 月 30 日的观测结果 (见图 5) 进行对比分析：10 月 30 日和 31 日 AOD 对比明显，30 日 AOD 较高，持续保持在 1.0~1.5，平均值 (标准差) 为 1.17

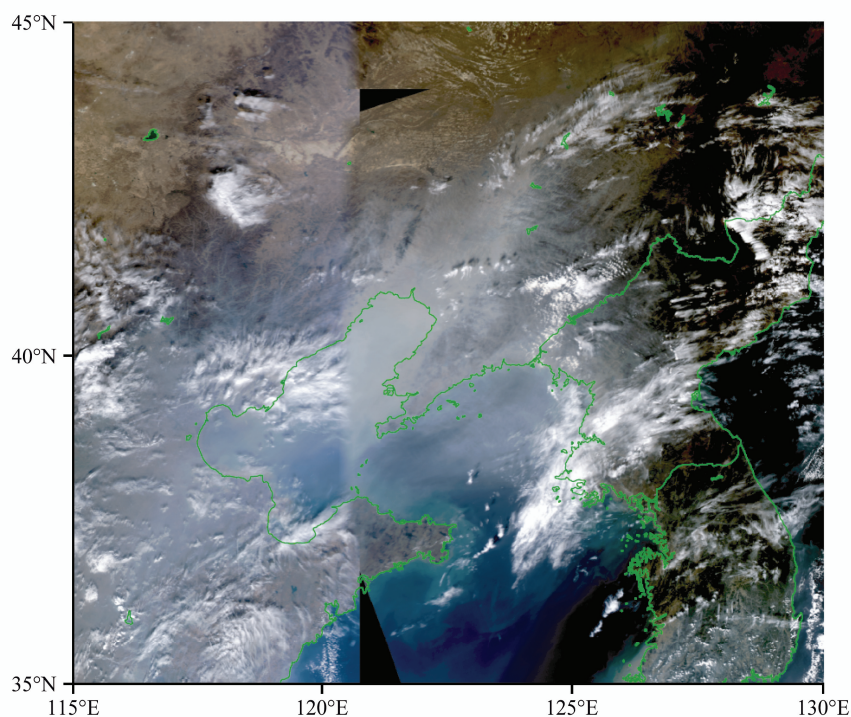


图3 2006 年 10 月 30 日华北地区 Aqua/MODIS RGB 真彩合成影像
 Fig.3 Aqua/MODIS RGB true color image over North China on 30 Oct 2006

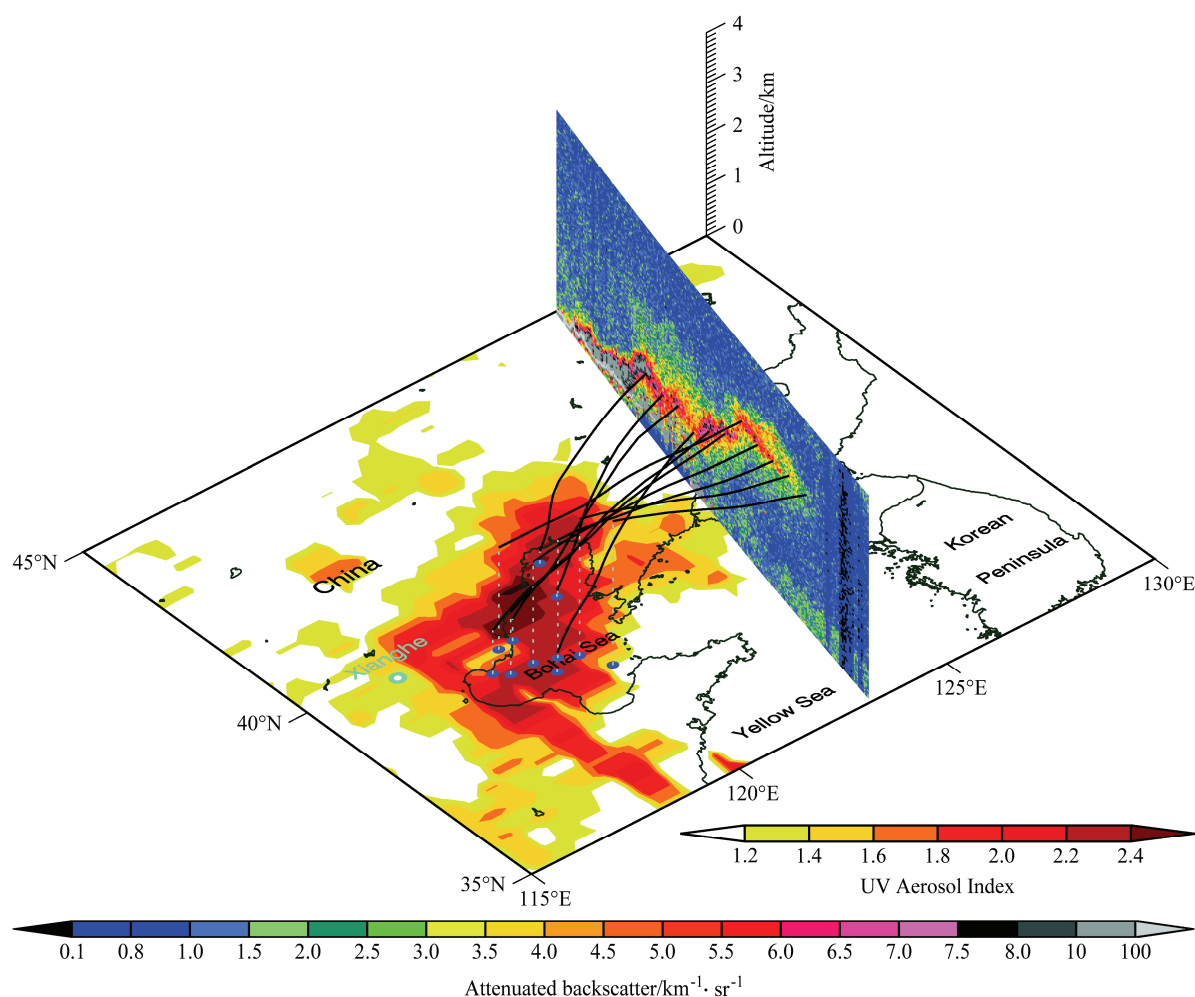


图4 2006年10月30日霾事件三维图(黑色实线表示起自后向散射系数廓线的13 h气块后向轨迹,蓝色圆点表示后向轨迹终点对应的地面位置)
Fig.4 3D plot of the haze event on 30 Oct 2006 (black solid lines indicate back trajectories from attenuated backscatter profiles and blue points indicate the projections on surface of the ends of back trajectories)

(0.14); 而31日AOD很低,所有观测结果都在0.2以下,大部分集中在0.1以下,平均值(标准差)为0.084(0.038)。两天的Ångström指数也有明显的变化:30日,Ångström指数较高,平均值(标准差)为1.12(0.09),表明粒子的有效尺度相对较小;31日,Ångström指数较低,平均值(标准差)仅为0.90(0.10)。对比30日和31日的AOD和Ångström指数的变化可以看出,在霾的影响下(30日)AOD和Ångström指数均升高,并且分别升高至原来的14倍和1.2倍,表明AOD的变化主要是由于细粒子气溶胶的增加所导致。但从AOD与Ångström指数的相关关系来看,在霾事件期间(30日)AOD和Ångström指数呈现反相关关系,表明AOD同时也会受到粗粒子气溶胶的影响。

分析气溶胶粒子谱分布(图6)可以看出,在

霾事件期间,核模态、积聚模态和粗模态的气溶胶粒子数柱总量均升高,其中核模态的粒子数柱总量增加最多,其次是积聚模态,而粗模态增加最少,该结果表明细粒子所占比例上升,与Ångström指数的变化结果一致。但粗模态的增加表明在本次霾事件过程中,气溶胶光学性质不仅受到细粒子气溶胶含量增加的影响,同时也受到粗粒子气溶胶的影响。

利用香河站的EZlidar观测结果,了解本次霾过程中气溶胶的垂直分布特征。在有霾影响时,气溶胶有效消光层大部分集中在1500 m以内,其中主要部分集中在650 m以内,平均峰值位于285 m处,平均消光系数达 2.15 km^{-1} (如图7所示)。峰值以上,随着高度增加,消光系数迅速递减,至1500 m处,其值接近于0,并在1500~1900 m处出现第

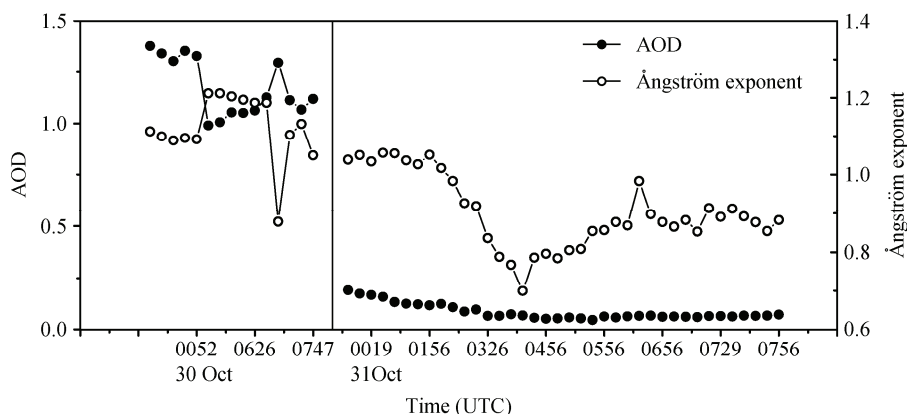


图5 2006年10月30~31日 AERONET 香河站观测到的 AOD 和 Ångström 的变化

Fig.5 The time series of AOD and Ångström exponent measured at Xianghe station of AERONET during 30 Oct and 31 Oct 2006

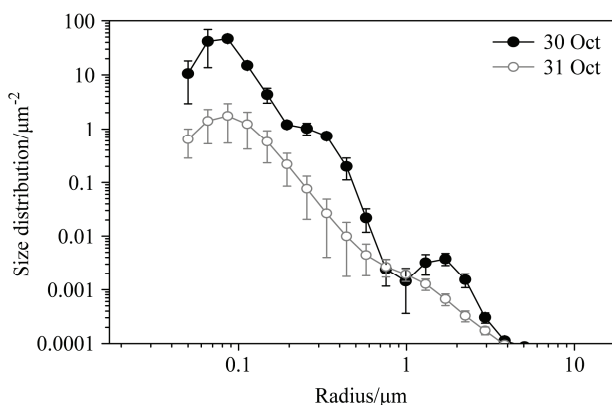


图6 2006年10月30~31日 AERONET 香河站观测到的平均气溶胶粒子谱分布

Fig.6 The particles size distribution of aerosol measured at Xianghe station of AERONET during 30 Oct and 31 Oct 2006

二个弱峰值, 消光系数为 0.22 km^{-1} 。在无霾影响的情况下可以看出, 近地面区域消光系数最高, 为 0.12 km^{-1} , 随高度增加迅速减小, 在 240 m 处, 减小至 0.1 km^{-1} 。

3.3 讨论

通过上文对 2006 年 10 月 30 日较强的霾事件中气溶胶光学特性的分析可以看出, 多种观测方法相结合的分析结果依然存在一些较难解释的现象: 比较香河 EZLIDAR 和 CLIPSO 的观测结果可以发现, 高消光层在陆地上的高度远远低于在海面上空的高度; 香河 AERONET 的观测结果表明, 10 月 30 日, AOD 和 Ångström 指数出现了负相关关系; 粒子谱分布表明, 霾事件期间除了细粒子增多外, 粗粒子的含量也有增加。这些现象表明, 在此次霾事件期间, 除了工业和城市型气溶胶外, 可能还存

在其他气溶胶的影响。

为分析除工业和城市型气溶胶外其他气溶胶可能的影响, 图 8 给出了 CALIOP 提供的气溶胶分类信息产品。可以看出, 近地面地区的气溶胶主要是一些人类活动所产生的工业和城市型气溶胶, 而随着高度的增加, 气溶胶组分中混入了沙尘, 部分气溶胶类型转变为污染—沙尘型 (polluted dust aerosol), 而在海面上空, 污染气溶胶类型完全转变为污染—沙尘型。进一步分析 2006 年 10 月 30 日 1000、700 hPa 风场 (见图 9), 可以发现, 近地面层的空气流向和边界上方的空气流向相差较大: 其中近地面层的空气主要来自华北地区南部, 向东北方向传输; 而边界层上空的空气主要来自华北地区以外的西北方向, 向东传输。

在 CALIOP 气溶胶分类结果上选取典型的 3 个点 (图 8), 分别表示低层的工业和城市型气溶胶, 较低层的工业和城市型以及污染—沙尘型混合的气溶胶和高层的污染—沙尘型气溶胶, 计算其 72 h 的后向轨迹。结果表明, 不同高度、不同位置的空气来向相差较大, 从后向轨迹的三维特征可以看出: 低层和较低层的气块在华北平原上空处于边界层以内, 较适合与边界层内的工业和城市型气溶胶混合, 并携带其向东北方向传输, 所以造成了这两个高度的气溶胶组分中均含有工业和城市型气溶胶; 高层和较低层气溶胶又都来自于西北方向, 这就会造成其气溶胶成分中含有沙尘气溶胶, 但是经过长距离、长时间的输送, 沙尘的含量较低, 所以并未在 MODIS 可见光合成图中表现出沙尘的特征。以上分析结果表明, 除了大量的细粒子的城市和工业

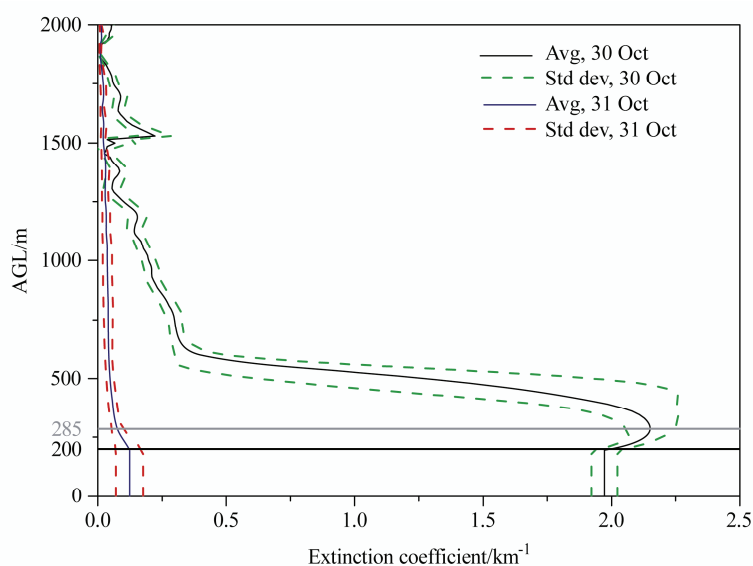


图7 2006年10月30~31日香河站EZlidar观测到的平均气溶胶消光系数廓线及其标准差

Fig.7 Mean values and their standard deviations of aerosol extinction exponent measured by EZlidar at Xianghe station during 30 Oct and 31 Oct 2006

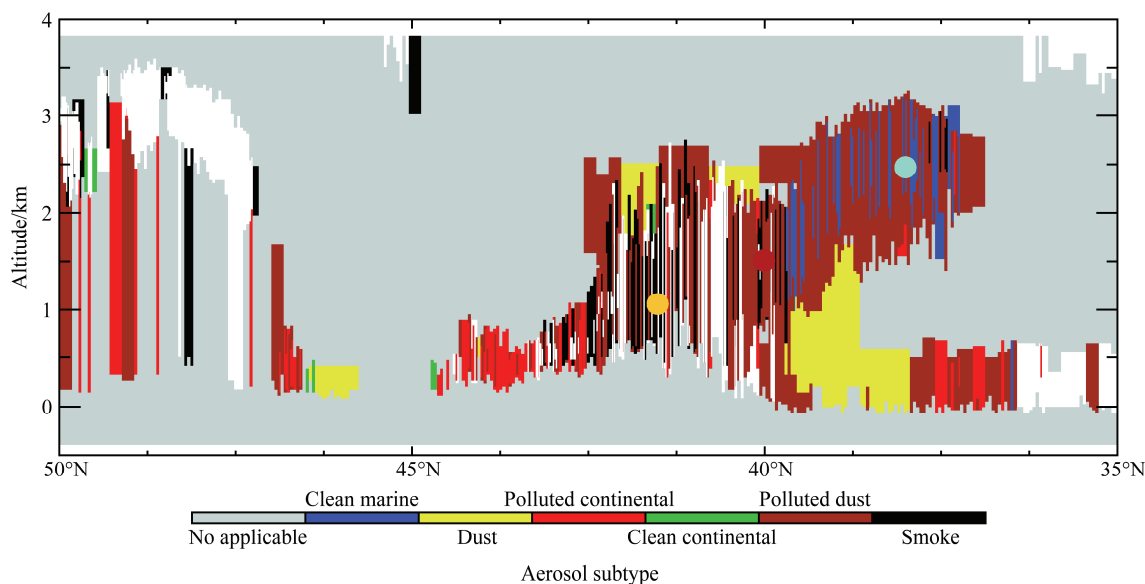


图8 CALIOP气溶胶类型识别产品垂直分布(青绿色、酒红色和橙色圆点表示不同混合类型、不同高度的气溶胶所在区域)

Fig.8 Aerosol subtype of CALIOP product (the cyan, wine, and orange points indicate different type mixing aerosols in different altitudes)

型气溶胶外,本次霾事件期间,华北及周边地区也同时受到了沙尘气溶胶的影响。但从前文的分析结果来看,由于在MODIS影响上并未发现较强的沙尘特征,空气块传输至海面时间较长、高度较高,地面观测未见到很强沙尘的特征(粗粒子个数增加并不是很多),所以表明沙尘对本次霾事件中气溶胶光学性质的影响较小。

4 结论

本文利用2004~2009年秋季OMI 3级资料,

分析了华北及周边地区气溶胶光学性质。结果表明,大部分区域AOD和UVAI平均值分别高于0.8和0.75,AOD高值中心位于山东西南部和河南东北部,而UVAI的高值中心在河北中部和南部地区;渤海海域AOD和UVAI值均较高。AOD和UVAI高值发生频次统计表明,AOD高值多发于北京及其周边地区,UVAI高值多发于河北中部及南部地区,其中UVAI的高平均值和高值多发地区相似。

华北及周边地区城市平均AOD和UVAI分析表明,绝大多数城市平均值分别高于0.70和0.60;而张家口、承德和阳泉3个城市AOD和UVAI值

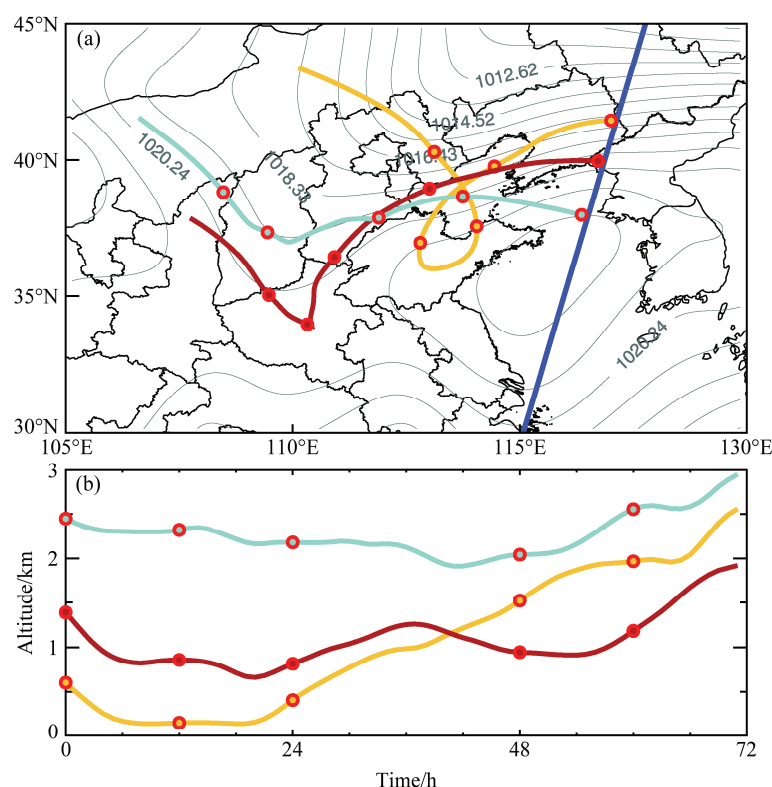


图9 2006年10月30日(a)海平面气压场(灰色实线)分布和(b)后向轨迹的高度分布(蓝色实线表示CALIPSO过境的星下点观测位置,青绿色、酒红色和橙色实线表示72 h后向轨迹,起点对应于图8中的相同颜色的圆点)

Fig.9 (a)Sea surface pressure (gray solid line) and (b) altitude of back trajectories from CALIPSO measurements on 30 Oct 2006 (blue solid lines indicate the CALIPSO nadir track, and cyan, wine, and orange solid lines indicate the 72-h back trajectories corresponding to the points in the same color in Fig.8)

均较低,分别低于0.60和0.65。各个城市的AOD和UVAI平均值的对比结果表明,北京等北部城市表现出UVAI较高但AOD并不是很高的现象;商丘等偏南的城市具有高AOD和相对不高的UVAI;太原等偏西部的城市出现低UVAI对应高AOD的特征。

针对2006年10月30日的一次华北地区霾事件,利用多种仪器的观测结果,研究了霾气溶胶的光学性质以及时空分布。本次事件主要影响了华北东部地区和部分东北地区,UVAI高值中心主要集中在渤海北部沿岸地区,最高值可达2.4,渤海海域受到较严重的影响。对比统计结果可以发现,这种现象并不罕见。空气后向轨迹结合CALIOP和EZLidar观测结果,表明霾经过气流的输送,可由华北地区输送至渤海海域,向东北方向传播;伴随本次霾事件,较高气层中,有少量沙尘气溶胶与城市和工业型气溶胶混合,形成污染—沙尘型气溶胶。进一步分析表明,由于不同高度对应气块来向不同,造成了低层主要为城市和工业型气溶胶,而较高层则混入了少量沙尘气溶胶,形成混合的污染—沙尘

型气溶胶。香河地区的垂直观测表明,此次灰霾过程中,工业和城市型气溶胶主要集中在1500 m以下,其中高浓度部分集中于650 m以下,平均峰值位于285 m,平均消光系数达 2.15 km^{-1} 。

将香河站10月31日的观测作为无霾影响的背景观测,与10月30日霾天气的观测进行对比分析。结果表明,当有霾影响时,AOD变化明显,平均值(标准差)从背景值0.08(0.04)升高至1.17(0.14);Ångström指数也有明显的变化,平均值(标准差)从背景值0.90(0.10)升至1.12(0.09)。在霾事件期间,核模态、积聚模态和粗模态的气溶胶粒子数柱总量均大幅升高。这表明本次霾过程中,不仅细粒子气溶胶的含量增高,同时粗粒子气溶胶的含量也稍有提高。从CALIOP气溶胶分类结果和后向轨迹分析结果来看,粗粒子气溶胶含量的增加是由于少量沙尘气溶胶的混入所导致。

参考文献 (References)

Ahn C, Torres O, Bhartia P K. 2008. Comparison of ozone monitoring

- instrument UV aerosol products with aqua/moderate resolution imaging spectroradiometer and multiangle imaging spectroradiometer observations in 2006 [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D16S27.
- Arndt R L, Carmichael G R, Streets D G, et al. 1997. Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia[J]. *Atmos. Environ.*, 31 (10): 1553–1572.
- Barnaba F, Gobbi G P. 2004. Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 2001[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4: 2367–2391.
- Bates T S, Quinn P K, Coffman D J, et al. 2004. Marine boundary layer dust and pollutant transport associated with the passage of a frontal system over eastern Asia[J]. *J. Geophys. Res.*, 109: 1–18.
- Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Li Yang, et al. 2008. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981–2005[J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 97: 235–242.
- Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (3): 590–608.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Appl. Opt.*, 23: 652–653.
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 66 (1): 1–16.
- Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. 2003. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 108 (D23): 1–20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007[R]. Geneva, Switzerland. 104.
- Kim S W, Yoon S C, Kim J, et al. 2006. Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET sun/sky radiometer measurements [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 1634–1651.
- Liu Yi, Yang Dongxu, Chen Wenzhong, et al. 2010. Measurements of Asian dust optical properties over the Yellow Sea of China by shipboard and ground-based photometers, along with satellite remote sensing: A case study of the passage of a frontal system during April 2006[J]. *J. Geophys. Res.*, 115: 1–11.
- 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 Pucai, 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.
- Nakajima T, Tonna G, Rao R Z, et al. 1996. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J]. *Appl. Opt.*, 35 (15): 2672–2686.
- Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. 2001. Black carbon emissions in China[J]. *Atmos. Environ.*, 35 (25): 4281–4296.
- Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. 1998. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis[J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D14): 17099–17110.
- Torres O, Decae R, Veefkind P, et al. 2002. OMI aerosol retrieval algorithm[M]// Stammes P. OMI Algorithm Theoretical Basis Document: Clouds, Aerosols, and Surface UV Irradiance, 3: 47–71.
- Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, et al. 2007. Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview[J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D24): 1–14.
- Wang K C, Dickinson E R, Liang S L. 2009. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007 [J]. *Science*, 323: 1468–1470.
- 王明星, 张仁健. 2001. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. *气候与环境研究*, 6(1): 119–124. Wang Mingxing, Zhang Renjian. 2001. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (1): 119–124.
- Welton E J, Voss K J, Gordon H R, et al. 2000. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE-2: Instrument description, results, and comparisons with other ground-based and airborne measurements[J]. *Tellus*, 52B: 636–651.
- Winker D M, Hostetler C A, Vaughan M A, et al. 2006. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document, Part 1: CALIOP Instrument, and Algorithms Overview [R]. NASA, 1–29.
- Wu D, 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 the 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.
- 夏俊荣. 2010. 华北地区大气气溶胶垂直分布特性的观测与分析[D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1–80. Xia Junrong. 2010. Observational study of the vertical distribution of atmospheric aerosol optical properties over Northern China[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1–80.
- 夏俊荣, 张镭. 2006. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. *干旱气象*, 24 (4): 68–72. Xia Junrong, Zhang Lei. 2006. Advances in detecting aerosols with Mie Lidar[J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 24 (4): 68–72.