

孙乃秀, 张镭, 徐丽丽, 等. 2018. 黄土高原半干旱区典型日吸收性气溶胶综合观测分析 [J]. 大气科学, 42 (2): 323–338. Sun Naixiu, Zhang Lei, Xu Lili, et al. 2018. Comprehensive observations and analysis of absorptive aerosols on typical days in the semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 323–338, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17120.

黄土高原半干旱区典型日吸收性气溶胶 综合观测分析

孙乃秀 张镭 徐丽丽 王雯璟

兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要 利用兰州大学半干旱气候与环境观测站的太阳光度计、激光雷达、微波辐射计综合观测资料, 结合辐射传输模式分析了该地区秋季典型日 2012 年 9 月 3~4 日、21 日和 28 日气溶胶物理特性、垂直分布特征, 及其与气象条件的关系。研究时期的气溶胶主要为局地沙尘与人为污染混合气溶胶, 吸收性明显, 尺度较小。其中, 4 日西北风增强, 远距离传输沙尘气溶胶, 气溶胶光学厚度最大, 粒子尺度明显增大。尝试利用灰色关联度法确定参考高度, 分别为 7.41 km、8.47 km、7.13 km 和 7.66 km, 反演气溶胶消光系数, 由此积分得到的光学厚度与太阳光度计观测值相关性可达 0.975, 反演效果较好。研究时期气溶胶的抬升主要受白天热力湍流作用, 边界层发展, 气溶胶向上传输, 每日 12 时 (当地时间, 下同) 至 14 时传输至最大高度, 气溶胶抬升的高度对应大气加热率的高值区, 低层加热率可达 1 K d^{-1} 。气溶胶在大气层顶和地面造成负辐射强迫, 分别为 -12.707 W m^{-2} 、 -25.398 W m^{-2} , 大气中表现为正辐射强迫, 为 12.692 W m^{-2} , 大气层顶的辐射强迫对气溶胶的物理特性最为敏感, 当气溶胶吸收性明显时, 大气层顶的瞬时辐射强迫会出现正值。

关键词 吸收性气溶胶 物理特性 垂直传输 辐射强迫

文章编号 1006-9895(2018)02-0323-16

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17120

Comprehensive Observations and Analysis of Absorptive Aerosols on Typical Days in the Semi-arid Region of the Loess Plateau

SUN Naixiu, ZHANG Lei, XU Lili, and WANG Wenjing

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract The physical properties of absorptive aerosols on typical autumn days, i.e. 3–4, 21, and 28 September 2012, in the semi-arid region of the Loess Plateau are analyzed using a radiative transfer model and comprehensive observation data provided by the SACOL (Semi-arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University). The data include simultaneous observations of sunphotometer, lidar, and microwave radiometer. The relationship between aerosols and meteorology situation is studied. Local dust mixed with anthropogenic aerosols form the major source of aerosols during the period, which have obvious absorptive effects and the aerosol particle sizes are commonly small. However, due to the increased northwesterly winds on the 4 September 2012, there existed more dust transport through long distance, and the aerosol optical depth was the largest and the particle size increased sharply. The reference height was determined to be

收稿日期 2017-02-13; 网络预出版日期 2017-08-21

作者简介 孙乃秀, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事气溶胶物理辐射特性研究。E-mail: sunnx15@lzu.edu.cn

通讯作者 张镭, E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475008、41521004

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475008 and 41521004)

7.41 km, 8.47 km, 7.13 km, and 7.66 km, respectively by the gray pertinence method, and the extinction coefficient was also retrieved. The AOD (Aerosol Optical Depth) calculated from the retrievals agreed well with observations from the sunphotometer with a correlation coefficient up to 0.975. The aerosol uplift is mainly attributed to effects of thermal turbulences during the daytime in the study period, when the aerosols were transported upward as the boundary layer developed and reached the maximum height from 1200 LT (Local Time) to 1400 LT every day. Meanwhile, the altitude of aerosols could reach corresponded to level of high heating rate, which at lower levels could be up to 1 K d^{-1} . The aerosols had negative radiative forcing at the top of the atmosphere and the surface with the daily average values of 12.707 W m^{-2} and -25.398 W m^{-2} , but they had positive radiative forcing in the atmosphere with a daily average value of -12.692 W m^{-2} . The radiative forcing at the top of the atmosphere is most sensitive to aerosol properties, and the aerosol forcing would be positive at the top of the atmosphere if the aerosols have obvious absorption effects.

Keywords Absorptive aerosols, Physical properties, Vertical transport, Radiative forcing

1 引言

大气气溶胶指大气与悬浮于其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。气溶胶粒径从几纳米到几十微米不等,形态多样,物理化学特性复杂,时空分布不均匀,参与大气中多种化学过程,作为云的凝结核影响云微物理特性,通过直接、间接和半直接效应对地气系统的能量收支、水汽循环产生重要影响,是气候评估和环境评价中的主要不确定因子之一 (Rosenfeld, 2000; Ramanathan et al., 2001, 2005; Rosenfeld et al., 2001; Qian et al., 2006; Wilcox et al., 2016)。黄土高原地区作为中国最大的干旱和半干旱区域,靠近塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠,是沙尘气溶胶的主要源地之一,同时其位于中纬度内陆地区,是对气候变化最为敏感的地区之一 (Huang et al., 2008a, 2010a)。随着西北工业的发展以及人口的扩张,该区域的人为污染气溶胶增多并与沙尘气溶胶混合,使气溶胶类型复杂化,成为地球上最大的气溶胶源地之一。为探究黄土高原半干旱区在全球气候变化以及人类活动对该区域环境的影响,兰州大学大气科学学院于 2005 年建立了兰州大学半干旱气候与环境观测站 (Semi-Arid Climate & Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)。SACOL 配备了太阳光度计、积分浑浊度仪、多角度吸收分光光度计、黑碳仪、双波长偏振激光雷达、微脉冲激光雷达等仪器,结合卫星资料可以全面地探究黄土高原半干旱区气溶胶的时空分布及物理辐射特性 (Huang et al., 2008a)。

SACOL 气溶胶来源主要包括远距离传输和局地产生的沙尘气溶胶以及人为污染气溶胶,沙源地包括塔克拉玛干沙漠、内蒙古戈壁等 (Wang et al., 2010)。非沙尘暴多发时期, SACOL 污染物主要来源于人类生产生活,沙尘暴发生时, PM_{10} 浓度迅速

增加,氮氧化物、硫化物混合比明显下降 (Wang et al., 2015)。SACOL 光学厚度多年平均值为 0.38, 且变化范围较大:春季以粗模态非球形沙尘气溶胶为主,光学厚度最大,平均值为 0.42, 波长指数最小,激光雷达退偏比较大,可达 0.3 左右;冬季以细模态球形粒子为主,光学厚度仅次于春季,可达 0.36;夏秋季降水集中,大气较清洁,光学厚度较小,平均值分别为 0.21 和 0.36,退偏比明显减小。SACOL 气溶胶物理特性受沙尘气溶胶影响明显,光学厚度整体小于中国东南部和华北平原,气溶胶季节变化主要由粗模态体积浓度不同造成 (高中明等, 2013; 周碧等, 2013; 张志薇等, 2014a; 王宏斌等, 2015; Tian et al., 2015)。黄土高原半干旱区存在明显的气溶胶垂直分布结构,地表产生的非沙尘气溶胶可传输到 9 km 的高度,早晨浅薄的沙尘层有几百米厚,白天强湍流传输气溶胶可达到 1.5 km。低层气溶胶大部分由局地产生,消光系数高值主要分布在 1~3 km,高层气溶胶消光系数高值很有可能是从源地通过水平气流传输而来的气溶胶产生 (Huang et al., 2008b)。SACOL 气溶胶主要集中于 2 km 以下,强沙尘过程中沙尘气溶胶主要集中于 1.5 km 内,其垂直分布随季节变化,夏季最高,可达 3 km,秋季 2.5 km,春季 2 km,冬季 1.5 km。消光系数一般在 00 时 (当地时间,下同)至 12 时逐渐增大,主要受白天边界层发展的影响 (曹贤洁等, 2009; Zhang et al., 2010; Huang et al., 2010b; 周碧等, 2014)。气溶胶的物化特性及其垂直分布最终会影响地气系统的辐射平衡和温度场结构。张华等 (2008, 2009) 研究发现黑碳在大气层顶造成正辐射强迫,地面负辐射强迫,沙尘的短波辐射强迫在大气层顶和地面为负,长波辐射强迫均为正。宿兴涛等 (2011) 研究表明东亚地区沙尘气溶胶使对流层下层温度降低,随高度增加降温幅度逐渐减小。

张志薇等(2014b)分析获得 SACOL 大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫日均值分别为 $(-7.2 \pm 7.1) \text{ W m}^{-2}$ 、 $(-21.9 \pm 12.2) \text{ W m}^{-2}$ 和 $(14.7 \pm 9.7) \text{ W m}^{-2}$ 。衣娜娜等(2017)研究发现西北地区气溶胶大气加热率最大值出现在 $0 \sim 2 \text{ km}$ 。

本文利用太阳光度计、激光雷达、微波辐射计、气象站常规气象观测资料以及 FNL 再分析资料等综合资料,首次尝试利用灰色关联度法确定参考高度反演消光系数,研究黄土高原半干旱区典型日吸收性气溶胶的物理特性、垂直分布特征及其与气象条件的关系,结合辐射传输模式探讨气溶胶辐射强迫及加热率特征,为深入理解黄土高原半干旱区吸收性气溶胶物理特性—气象场—辐射过程的相互作用提供一定依据。

2 数据与仪器

本文数据来自于兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)和榆中县气象观测站。SACOL 位于兰州大学榆中校区萃英山顶(35.5°N , 104.08°E),海拔高度为 1965.8 m 。榆中气象站(35.5°N , 104.08°N)海拔高度为 1874.4 m ,距离 SACOL 仅 7 km 。本文选取典型日为 2012 年 9 月 3~4 日、21 日和 28 日。

2.1 气溶胶数据

气溶胶数据由 SACOL 自动追踪太阳光度计(CE-318, Cimel)观测计算得到,包括气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)、 $440 \sim 870 \text{ Angstrom}$ 波长指数($\alpha_{440 \sim 870}$)、单次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)、不对称因子(Asymmetry Factor, g)、粒子体积尺度分布谱、复折射指数等。CE-318 具有八个可见光和近红外通道,分别为 340 nm 、 380 nm 、 440 nm 、 500 nm 、 670 nm 、 870 nm 、 940 nm 和 1020 nm ,可观测得到太阳和天空辐射、气溶胶、地表反照率、臭氧和大气可降水量等相关参数。SACOL 已加入地基遥感气溶胶观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)。本文所用气溶胶数据均从 AERONET 网站(https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data.html[2016-08-15])下载获得。

2.2 温度、相对湿度、液态水含量数据

温度、相对湿度和液态水含量数据由 SACOL 微波辐射计(TP/WVP-3000)观测反演得到。TP/

WVP-3000 为被动大气遥感仪器,用于大气温度、水汽和低精度液态水的垂直廓线探测,探测高度为 10 km ,垂直分辨率在 1 km 以下为 0.10 km 、 1 km 以上为 0.25 km 。

2.3 激光雷达数据

激光雷达数据来源于 SACOL 微脉冲偏振激光雷达系统(Micro Pulse Lidar, MPL)。MPL 激光波长为 527 nm ,含有水平和垂直两个偏振通道,二者之比可获得退偏比。MPL 垂直探测范围为 20 km ,垂直分辨率为 0.03 km ,时间分辨率为 1 min 。该数据是经过探测器延时订正、后脉冲信号订正、背景噪音订正以及重叠因子订正的标准化相对后向散射信号。

2.4 常规气象要素数据

本文所用常规气象要素数据来自于榆中县气象观测站,包括温度(Temperature, T)、风向(Wind Direction, WD)、风速(Wind Speed, WS)、能见度(Visibility, VIS)、低云高(Low Clouds Height, LCH)、低云量(Low Clouds Cover, LCC),每天 8 个观测时次。

3 研究方法

3.1 激光雷达反演消光系数

激光雷达方程(Fernald et al., 1972)为

$$P(Z) = E \cdot C \cdot Z^{-2} [\beta_1(Z) + \beta_2(Z)] T_1^2(Z) T_2^2(Z), \quad (1)$$

其中, $P(Z)$ 代表 Z 高度范围内大气后向散射回波信号, E 代表出射脉冲能量, C 代表雷达常数, $\beta_1(Z)$ 和 $\beta_2(Z)$ 分别代表气溶胶和大气分子的后向散射系

数, $T_1(Z) = \exp \left[-\int_0^Z \sigma_1(z) dz \right]$ 代表气溶胶透过率,

$T_2(Z) = \exp \left[-\int_0^Z \sigma_2(z) dz \right]$ 代表大气分子透过率,

$\sigma_1(Z)$ 和 $\sigma_2(Z)$ 分别代表气溶胶和大气分子的消光系数,其中字母 Z 代表高度范围(常量),字母 z 代表不同高度(变量)。引入消光散射比,气溶胶和大气分子的消光散射比分别表示为: $S_1 = \sigma_1/\beta_1$, $S_2 = \sigma_2/\beta_2$,气溶胶的消光散射比又叫激光雷达比。其中,大气分子的消光散射比为常数即 $S_2 = 8\pi/3$ 。而激光雷达比的确定较为复杂,是激光雷达反演的关键难题之一,其大小与气溶胶粒子的尺度分布、成分和形状有关,同时受大气温度和湿度影响,具有高度依赖性(Fernald, 1984; Kovalev, 1993;

Marenco et al., 1997; Welton et al., 2002)。

将激光雷达比和大气分子消光散射比带入方程 (1), 同时为了消去雷达常数 C 和发射脉冲能量 E , 确定一个参考高度 Z_m , 假设该高度基本不含气溶胶, 激光雷达方程 (1) 变为

$$\beta_1(Z) + \beta_2(Z) = \frac{X(Z) \exp \left[-2(S_1 - S_2) \int_{Z_m}^Z \beta_2(z) dz \right]}{\left\{ X(Z_m) / [\beta_1(Z_m) + \beta_2(Z_m)] - 2S_1 \int_{Z_m}^Z X(z) \exp \left[-2(S_1 - S_2) \int_{Z_m}^z \beta_2(z') dz' \right] dz \right\}}, \quad (2)$$

其中, $X(Z) = P(Z)Z^2$ 。

采用更加稳定且成熟的 Fernald (Fernald, 1984) 后向积分方案, 其迭代公式为

$$\beta_1(I-1) + \beta_2(I-1) = \frac{X(I-1) \exp[A(I-1, I)]}{X(I) / [\beta_1(I) + \beta_2(I)] + S_1 \{ X(I) + X(I-1) \exp[A(I-1, I)] \} \Delta Z}, \quad (3)$$

其中, $A(I-1, I) = (S_1 - S_2) [\beta_2(I) + \beta_2(I-1)] \Delta Z$, I 表示迭代步数。

根据 Welton et al. (2000) 提出的方法反演气溶胶消光系数。利用 SACOL 太阳光度计直接观测的光学厚度资料控制激光雷达反演过程, 获得消光系数, 激光雷达比和后向散射系数 (Welton et al., 2000; 张朝阳等, 2013)。具体反演流程见图 1。

由气溶胶消光系数计算大气柱光学厚度的公式为

$$\tau = \int_{Z_0}^{Z_m} \sigma(z) dz, \quad (4)$$

其中, τ 表示光学厚度, $\sigma(z)$ 表示 z 高度处气溶胶消光系数, Z_0 代表地面, 按公式 (4) 将反演得到的消光系数从地面积分到参考高度, 得到气溶胶光学厚度反演值, 与太阳光度计观测值进行对比, 验证激光雷达反演结果, 具体见 4.1 节。

3.2 灰色关联度法确定参考高度

激光雷达反演消光系数的另一难题是确定参考高度, 所谓参考高度即 Fernald 后向积分方案进

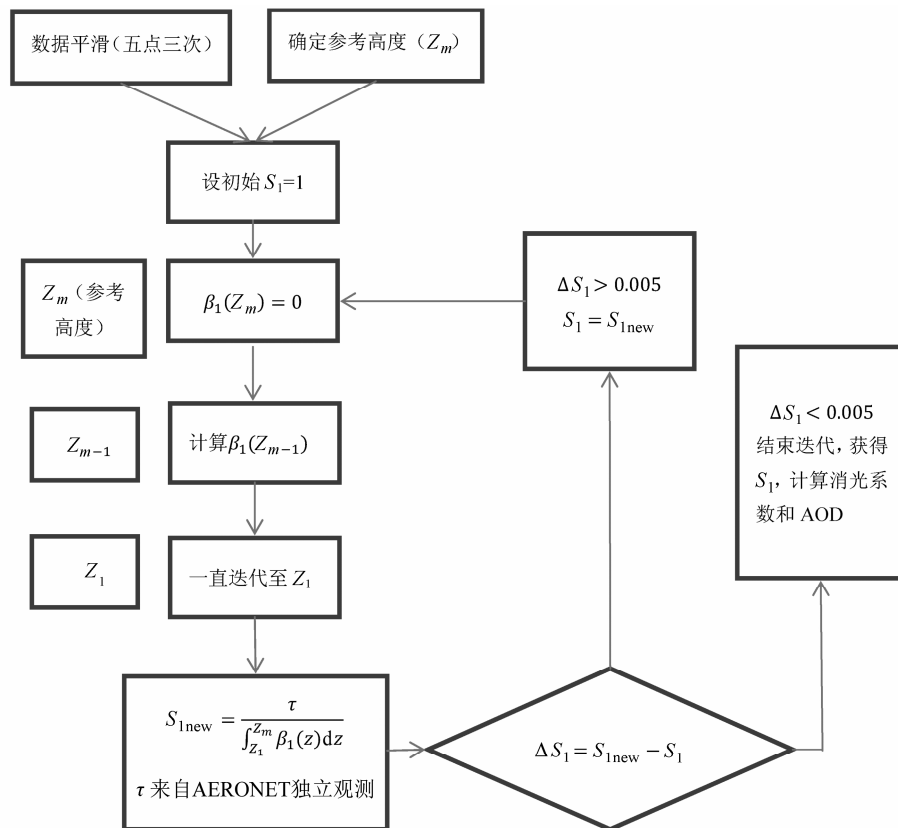


图 1 反演消光系数流程图。 S_1 、 Z_m 、 β_1 、 τ 分别代表激光雷达比、参考高度、气溶胶后向散射系数、太阳光度计观测得到的光学厚度

Fig. 1 Flowchart of the aerosol extinction retrieval. S_1 , Z_m , β_1 , τ represent the lidar ratio, the reference height, the backscattering coefficient of aerosol, the optical depth observed from sun photometer, respectively

行迭代的初始高度。该高度要保证大气基本不含气溶胶。本文首次尝试利用灰色关联度法确定参考高度。灰色关联度法的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度判断其联系是否紧密, 曲线越接近, 序列之间的关联度就越大, 反之越小, 应用于本文具体步骤如下:

(1) 根据 2012 年 9 月份全月的激光雷达信号图, 挑选出晴朗干净大气若干天, 结合太阳光度计观测的 AOD 确定含气溶胶最少的时刻作为背景序列, 记为

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)), \quad (5)$$

(2) 计算典型日每一时刻与背景序列的关联系数, 典型日时刻序列记为

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), \quad (6)$$

关联系数 (Correlation Coefficient, COR) 计算公式为 (7) ~ (10):

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|, k = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$\Delta(\max) = \max_k \Delta_i(k), \quad (8)$$

$$\Delta(\min) = \min_k \Delta_i(k), \quad (9)$$

$$Y_{0i}(k) = [\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)] / [\Delta_i(k) + \rho \Delta(\max)], \quad (10)$$

其中, i 代表时刻, k 代表高度, ρ 为分辨系数, 用以提高关联系数间的差异显著性。关联系数 $Y_{0i}(k)$ 越高说明典型日时刻序列与背景序列越相似, 即可确定研究时刻基本不含气溶胶的高度, 将其作为每个时刻的参考高度。

3.3 SBDART 模式介绍

本文利用 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiation Transfer (SBDART) 模式模拟典型日气溶胶在大气层顶、地面以及大气的瞬时辐射强迫, 小时辐射强迫和大气加热率。

SBDART 模式用于计算地球大气在晴空和有云情况下的行星平行辐射传输。模式考虑了所有影响紫外、可见光和红外辐射的吸收和散射过程。模式主要结合了精确离散坐标辐射传输模式 (DISORT)、低分辨率大气投射模式 (LOWTRAN) 和云滴、冰晶的 Mie 散射结果。已有大量学者利用该模式计算大气辐射能量平衡、气溶胶和云的辐射强迫, 并证明该模式可以很好的模拟地气系统的辐射传输过程 (Ricchiazzi et al., 1998; Valenzuela et al., 2012; 张志薇等, 2014b)。

4 结果与讨论

4.1 典型日天气形势分析

根据历史天气数据 (表 1), 本文选取的典型日除 2012 年 9 月 4 日夜间出现阵雨外, 均属于晴好天气, 由于本文只讨论白天情况, 所以 4 日夜间降水不造成影响。根据榆中气象站天气数据 (图 2~3) 可知, 研究时期以南风为主, 白天风速最高可达 3 m s^{-1} 左右, 温度最高超过 20°C 。一般夜间 02 时至早上 05 时和下午 17 时至 20 时出现云, 云量可达七成左右, 高度 2 km。4 日 11 时至下午 17 时以及 21 日 11 时能见度较低。

根据 500 hPa 天气形势图 (图 4a-d) 可以看出, 典型日 SACOL 整体处于槽后脊前, 一直在高压控制下。3 日至 4 日等温线变密集, 说明高空西风有所加强。从 700 hPa 形势图 (图 4e-h) 来看, 地面风速整体较小, 4 日有弱槽经过 SACOL, 导致地面西北风增强, 可能远距离传输气溶胶。

表 1 典型日天气状况

Table 1 Weather situations on typical days

时间	最高温/ $^\circ\text{C}$	最低温/ $^\circ\text{C}$	天气状况	
			白天	夜间
2012 年 9 月 3 日	23	8	晴	晴
2012 年 9 月 4 日	23	8	晴	阵雨
2012 年 9 月 21 日	22	7	晴	晴
2012 年 9 月 28 日	18	5	晴	晴

4.2 气溶胶物理特性分析

本文研究时期处于九月初, 属于夏秋转换时期。根据前人研究可知, SACOL 夏秋季主要以局地沙尘和人为污染产生的细粒子气溶胶为主, 光学厚度多年平均值为夏季 0.21, 秋季 0.30。虽然 SACOL 夏秋季污染整体偏小, 但此时段气溶胶波长指数分布较广, 沙尘和非沙尘气溶胶并存, 使气溶胶成分更为复杂 (Bi et al., 2011)。根据激光雷达反演与太阳光度计观测的光学厚度对比图 (图 5, 本文只分析白天情况。分析时段为 07 时至 16 时, 4 日和 28 日缺测, 其中 4 日分析 07 时至 14 时, 28 日分析 10 时至 14 时) 可以看出, 本文研究时期气溶胶光学厚度平均值为 0.296, 其中 4 日光学厚度最大, 日均值达到 0.358。AOD 激光雷达反演值与太阳光度计观测值变化趋势一致, 数值稍有差异, 激光雷达反演值较观测值整体偏小, 二者相关性达 0.975, 由此断定激光雷达结果可靠, 可用于研究气溶胶的垂直分布特征。根据图 6, 本文研究时期吸

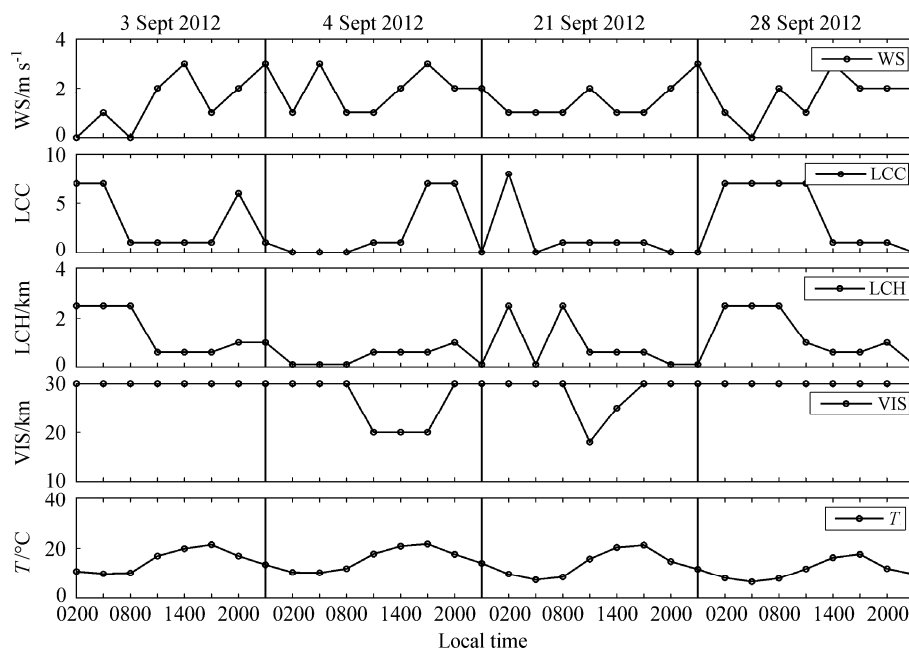


图2 研究时段风速 WS、低云量 LCC、低云高 LCH、能见度 VIS、温度 T 的时间序列

Fig. 2 Time series of WS (wind speed), LCC (Low Clouds Cover), LCH (Low Clouds Height), VIS (Visibility), T (Temperature) during the study period

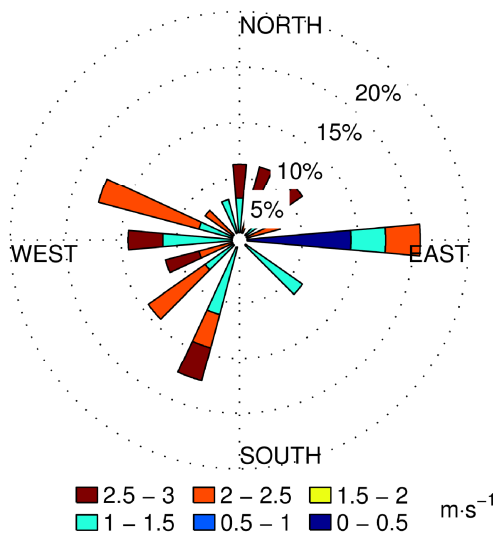


图3 研究时段平均的风玫瑰图。色标代表风速，辐射轴代表风的频率
Fig. 3 Mean wind rose during the study period. The color scale represents the wind speed, the radial axis represents the wind frequency

收光学厚度随波长增加而减小，其中 3 日吸收光学厚度最大，440 nm 吸收光学厚度达到 0.036，且其他三日 440 nm 吸收光学厚度均大于 0.025。气溶胶复折射指数实部和虚部分别反映了气溶胶粒子对入射辐射散射和吸收的能力，根据多年统计可知 SACOL 气溶胶复折射指数实部月均值主要集中在 1.4~1.6，范围集中，而虚部变化范围较大，且具

有强波长依赖性。Bi et al. (2011) 指出 2007 年 9~11 月，复折射指数虚部相对较大，介于 0.01~0.04，表明该季节存在吸收性细粒子，春季虚部值比较低（约为 0.005），说明 SACOL 沙尘粗粒子具有较弱的吸收性。本文分析表明研究时期四个波段复折射指数实部介于 1.43~1.50 之间，28 日气溶胶四个波段复折射指数实部最大，3 日最小；除 4 日外，其他三日 440 nm 复折射指数虚部均大于 0.01，其中 3 日最大，可达 0.012。气溶胶单次散射反照率定义为气溶胶散射系数与消光系数之比，是衡量气溶胶吸收强弱的一个重要光学参数（范学花等, 2013）。SACOL 常年 SSA 介于 0.87~0.96，春季随波长增加，其他季节整体呈现随波长递减趋势。由于不同类型气溶胶的 SSA 具有显著不同的波长依赖性，因而 SSA 已成为区分气溶胶类型的重要参数（Dubovik et al., 2002）。研究表明黑碳等生物质燃烧或工业产生的吸收性气溶胶 SSA 随波长递减，因为其在（近）红外波段有强吸收作用，沙尘气溶胶则在短波段表现出强吸收作用，因而其 SSA 随波长增加（Dubovik et al., 2002; Giles et al., 2012; Noh et al., 2017）。结合图 6 发现 3 日 SSA 最小，吸收性最明显；4 日 SSA 随波长增加而增加，其他三日 SSA 在短波段随波长增加而增加，长波段随波长增加而减小，说明本文研究时期气溶胶的吸收性强于

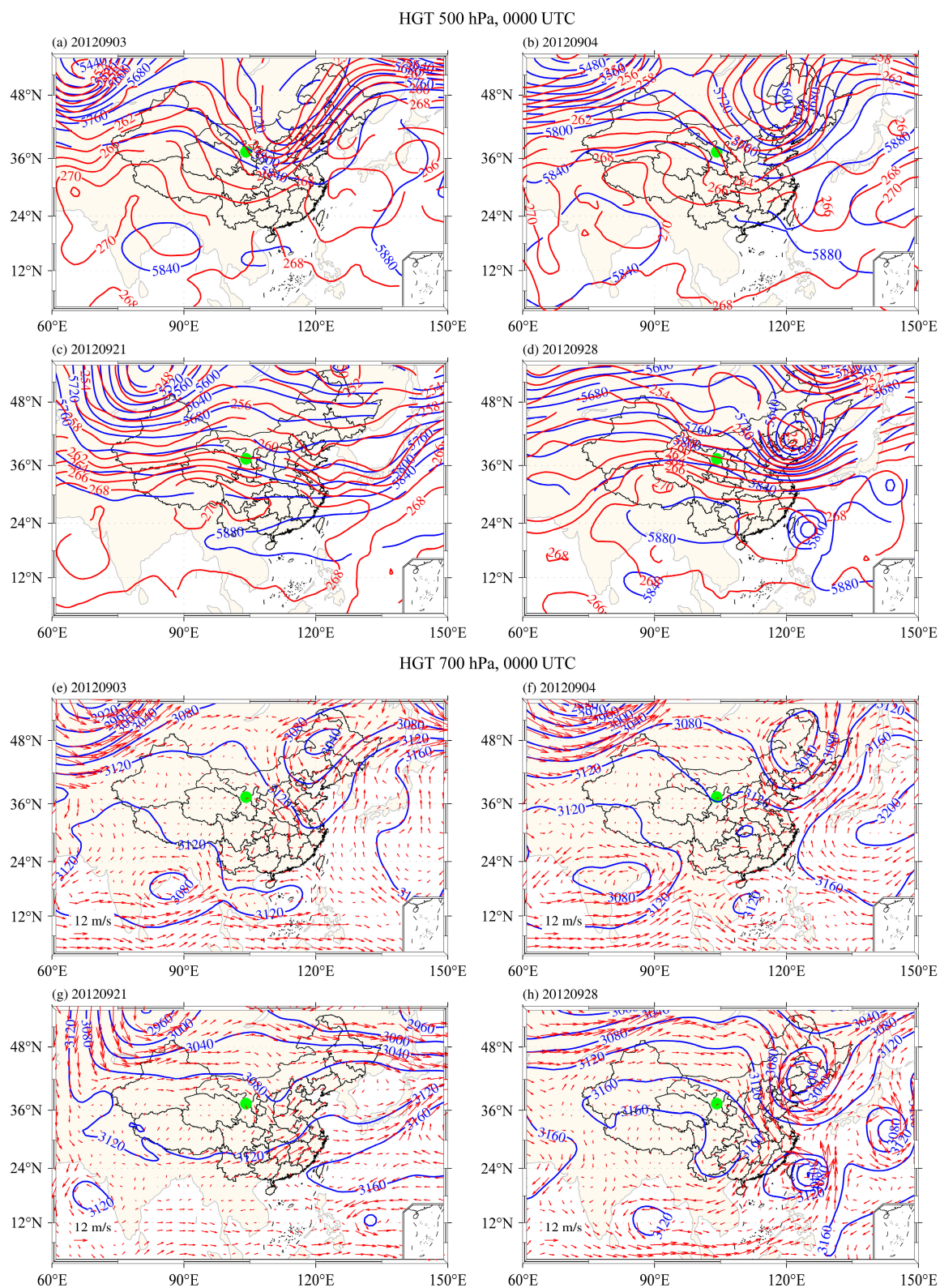


图4 (a-d) 500 hPa 位势高度 (蓝色线, 单位: gpm) 和温度 (红色线, 单位: K) 分布; (e-h) 700 hPa 位势高度 (蓝色线, 单位: gpm) 和风向 (箭头, 单位: m s^{-1}) 分布。绿色圆点代表站点 SACOL

Fig. 4 (a-d) Distributions of 500-hPa geopotential height (blue lines, units: gpm) and temperature (red lines, units: K); (e-h) distributions of 700-hPa geopotential height (blue lines, units: gpm) and wind (arrows, units: m s^{-1}). The green dots represent station SACOL (Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University)

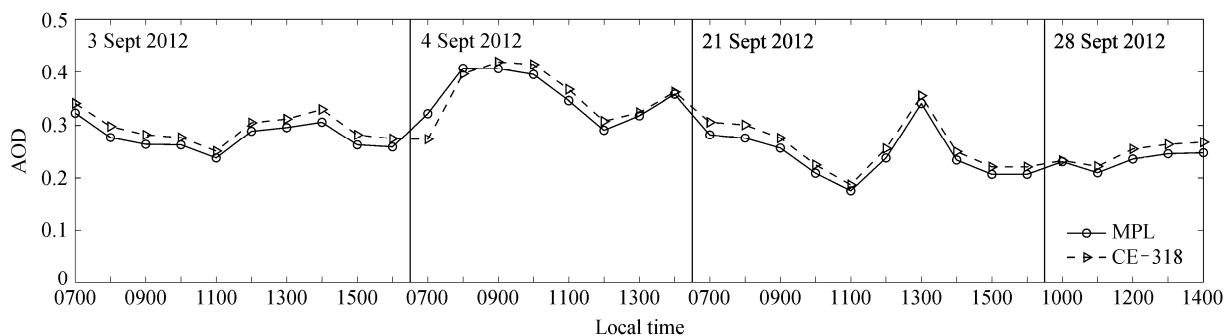


图5 MPL反演的光学厚度与太阳光度计观测的光学厚度对比

Fig. 5 Comparison of the AOD (Aerosol Optical Depth) between MPL (Micro Pulse Lidar) retrieval and sun photometer (CE-318)

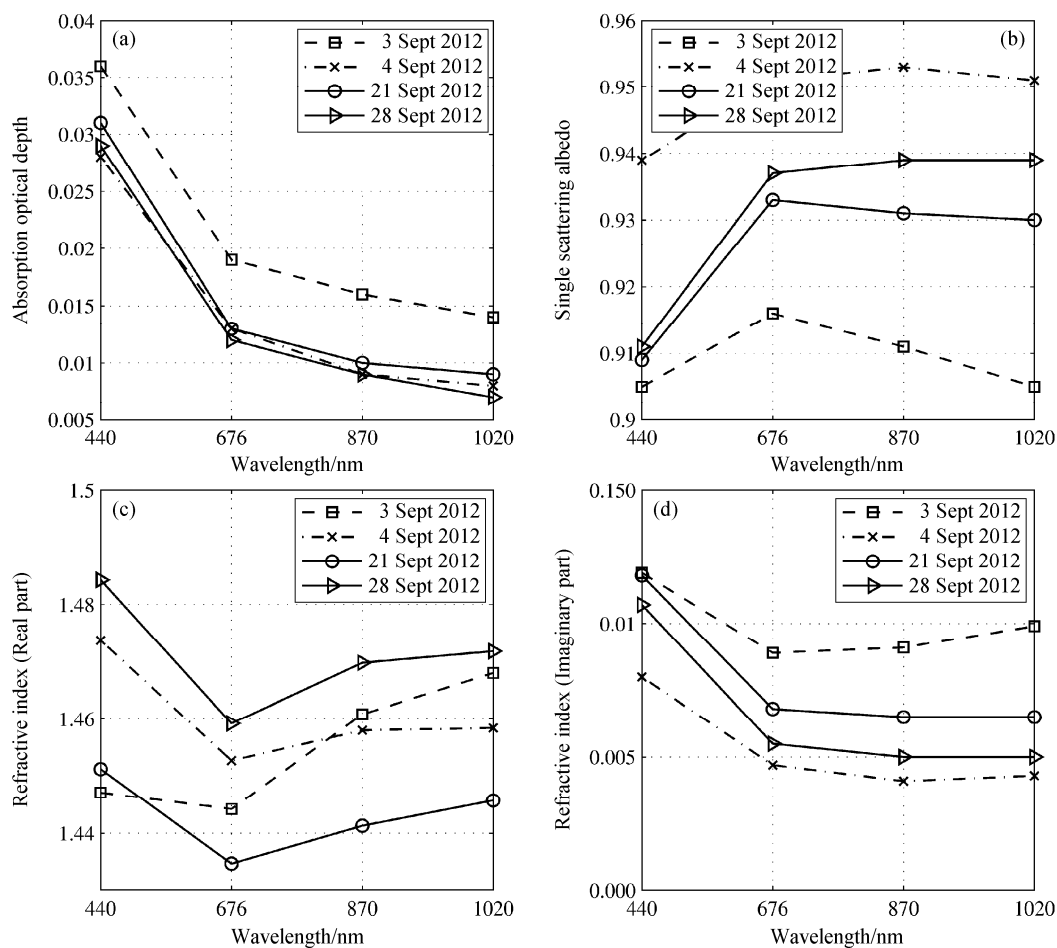


图6 (a) 吸收光学厚度、(b) 单次散射反照率、复折射指数的 (c) 实部和 (d) 虚部随波长变化

Fig. 6 Variations of (a) absorption optical depth, (b) single scattering albedo, (c) real part and (d) imaginary part of refractive index as a function of wavelength

纯沙尘, 弱于纯生物质燃烧气溶胶, 属于二者的混合。

波长指数指示了气溶胶的大小特征。波长指数小, 粒子主要为粗模态, 反之以细模态粒子为主。本文研究时期波长指数的变化范围介于 0.979~

1.414 之间, 主要分布于 1.15~1.40, 平均值为 1.257 (图 7), 表明本文研究时期以细模态粒子为主, 与高中明等 (2013) 和胡蝶等 (2013) 研究一致。气溶胶的体积尺度分布存在两个明显的大值区, 呈现双峰结构 (图 8)。两个大值区对应的尺度分别为

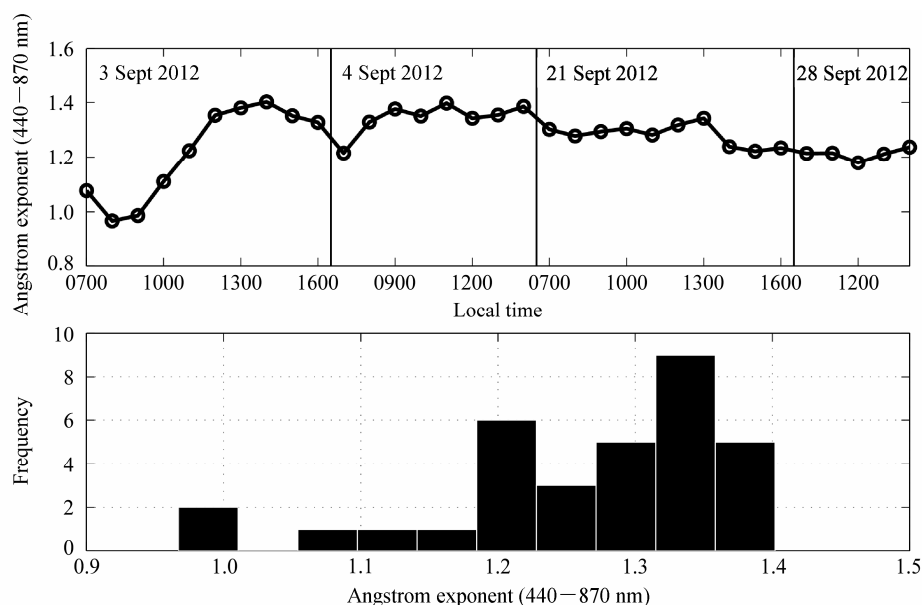


图 7 440~870 波长指数时间变化 (上) 及其频数分布 (下)
Fig. 7 Variations of 440–870 nm Angstrom exponent (upper) and its frequency distribution (lower)

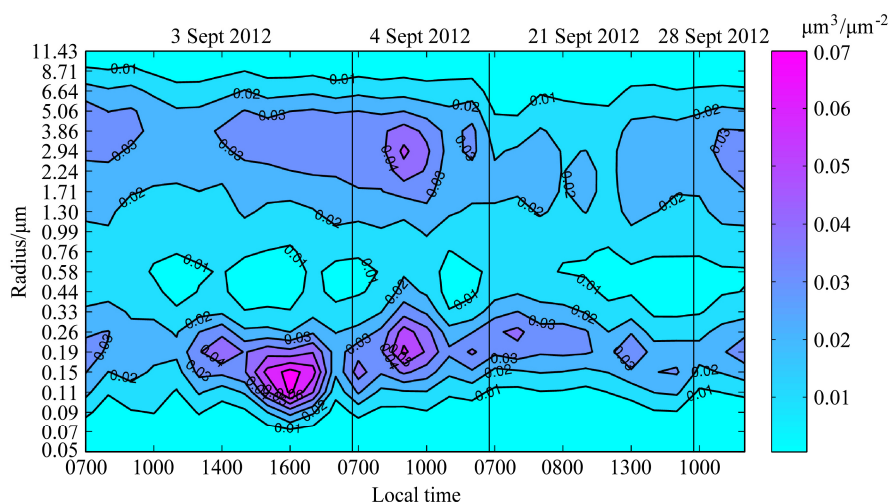


图 8 气溶胶粒子体积尺度分布。色标代表气溶胶体积浓度 ($dV/d\ln R$, 单位: $\mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$), V 表示体积, R 表示粒子半径
Fig. 8 Volume size distribution of aerosols. The color scale represents aerosol volume concentration ($dV/d\ln R$, units: $\mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$), V represents the volume, R represents the particle radius

0.09~0.33 μm 和 1.30~6.64 μm , 与 Bi et al. (2011) 研究发现 SACOL 气溶胶细粒子平均几何半径为 $0.18 \pm 0.03 \mu\text{m}$, 粗粒子平均几何半径为 $2.53 \pm 0.25 \mu\text{m}$ 较为一致。而且分布于 0.09~0.33 μm 范围内的粒子体积浓度明显高于 1.30~6.64 μm 范围内的, 说明本文研究时期以细粒子为主, 与波长指数较大相对应。值得注意的是, 4 日在 1.30~6.64 μm 范围内的气溶胶粒子明显增加, 结合前面天气形势分析可知, 4 日地面和高空西北风增强, 推断可能有西北沙尘粒子传输过来, 导致大粒径粒子增多, 与 4

日光学厚度增大对应。

4.3 气溶胶垂直分布特征

图 9 给出了典型日消光系数、关联度系数及连续小波变换系数小时平均廓线。根据关联系数廓线可以看出关联系数与消光系数呈现明显相反的变化, 一般随着高度增加, 消光系数减小, 关联系数增加, 说明高度增加, 气溶胶减少。典型日时刻序列与背景序列越相近, 当高空出现气溶胶层或是云层, 关联度会急剧减小, 结果表明灰色关联度法可以很好的确定激光雷达反演所需的参考高度, 即基

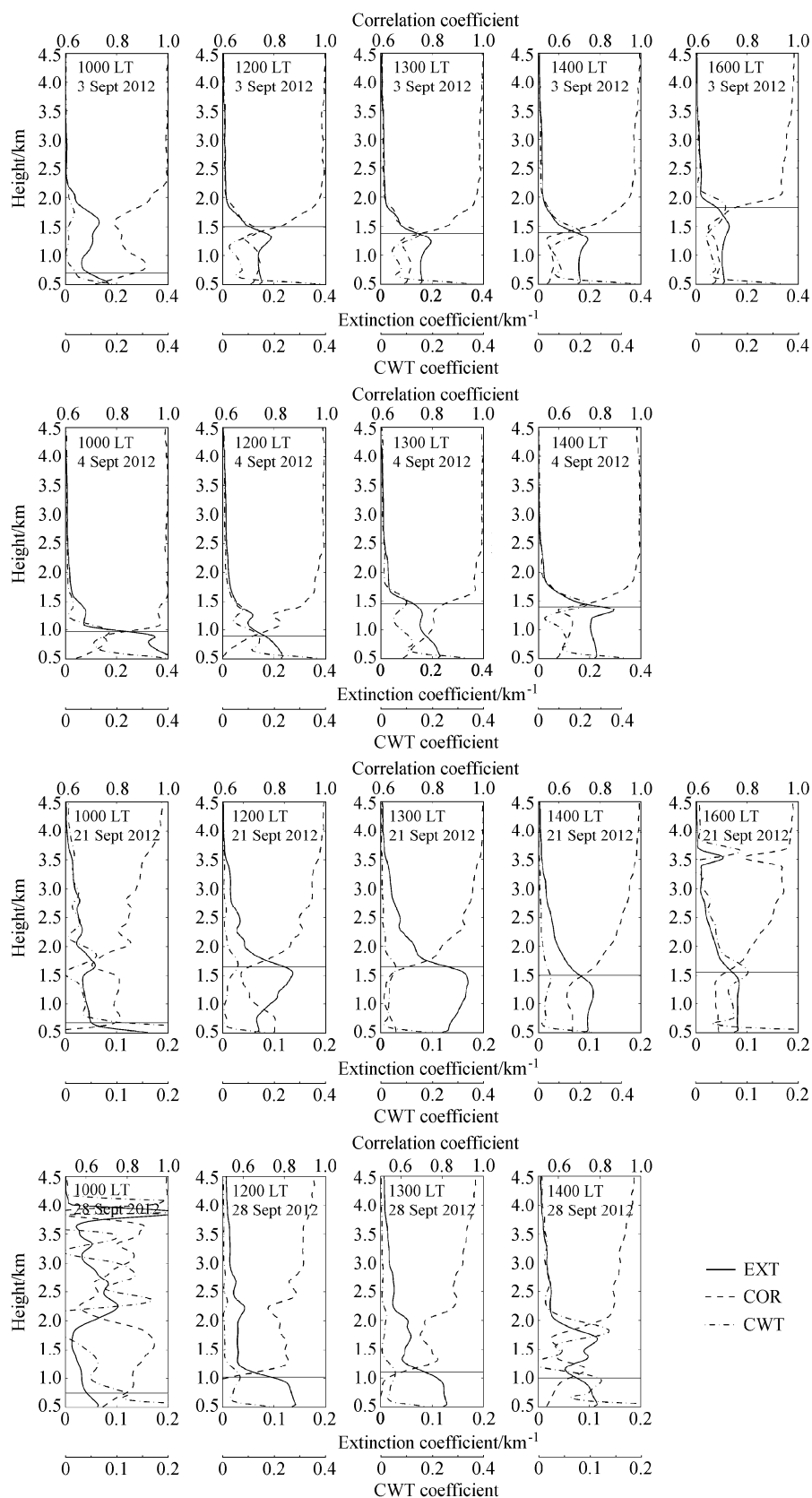


图9 消光系数 (EXT) 廓线、连续小波变换系数 (CWT) 廓线和关联系数 (COR) 廓线随时间演变。水平实线代表边界层高度, LT 表示当地时间
Fig. 9 Temporal evolution of extinction coefficient (EXT) profiles, continuous wavelet transform coefficient (CWT) profiles, and correlation coefficient (COR) profiles. The horizontal solid lines represent the boundary layer height, LT indicates local time

本不含气溶胶层的高度, 前提是背景序列要尽量保证大气干净。9 月 3~4 日、21 日和 28 日的参考高度日均值分别为 7.41 km、8.47 km、7.13 km 和 7.66 km (表 2)。

通过激光雷达后向散射信号发现典型日基本都是从早上 10 时左右出现明显气溶胶层, 因而本文只探讨 10 时至 16 时气溶胶的垂直传输情况, 由于 0.5 km 以下信号误差较大, 本文只分析 0.5 km 以上消光系数。

气溶胶垂直向上输送与边界层的发展密不可分。本文采用小波变换法 (Compton et al., 2013) 反演了研究时期的边界层高度。图 9 中水平实线所标高度即为边界层高度, 可以看出边界层高度的变化与消光系数随高度的变化有很好的一致性。最初气溶胶主要集中在近地面层, 消光系数最大, 对应温度廓线 (图 10) 可以看到 3 日和 21 日上午 7 时至 11 时在 0.6 km 至 1 km 存在逆温层, 厚度可达 0.3 km 左右, 而 4 日逆温层厚度可达到 1 km 左右, 逆温限制了对流的发展, 导致 4 日边界层高度整体比 3 日和 21 日低, 成为影响这几日气溶胶向上传输高度不同的原因之一。地面从上午 10 时左右开始升温, 热力湍流作用逐渐增强, 边界层高度逐渐增加, 气溶胶不断向上输送, 高层气溶胶消光系数逐渐增大。对于高层消光系数, 3 日 13 时在 1.4 km 左右达到最大值, 将近 0.2 km^{-1} , 最大传输高度可达 1.8 km; 4 日 14 时在 1.5 km 左右消光系数达到最大值, 将近 0.3 km^{-1} , 最大传输高度可达 1.5 km; 21 日 13 时在 1.6 km 左右达到消光系数最大值, 将近 0.17 km^{-1} , 最大传输高度可达 1.7 km; 28 日在 12 时 0.9 km 左右达到消光系数最大值, 将近 0.13 km^{-1} , 最大传输高度为 1 km 左右。这几日均出现了气溶胶的分层结构, 并且随着低层气溶胶不断向上传输, 与高层气溶胶混合, 导致高层气溶胶消光系数增大, 具体原因有待进一步分析。其中 28 日消光系数廓线较为复杂, 10 时在 3.75 km 和 2.25 km, 14 时在 1.75 km 附近均出现消光系数大值, 超过了低层的气溶胶消光系数, 同时激光雷达信号强度强于低层气溶胶的信号强度。根据 28 日相对湿度廓线 (图 10) 和液态水含量廓线 (图 11) 发现 28 日整体相对湿度较大, 3.75 km 附近存在相对湿度大值区, 最高可达 90%, 液态水含量在 2 km 附近出现大值, 其中 10 时液态水含量最高, 可达 0.021 g m^{-3} , 由此推断 28 日分析时段高层存在云。

表 2 典型日边界层高度和激光雷达反演所需的参考高度

Table 2 Boundary height and reference height needed by lidar inversion on typical days

时间	参考高度/km				边界层高度/km			
	9 月 3 日	9 月 4 日	9 月 21 日	9 月 28 日	9 月 3 日	9 月 4 日	9 月 21 日	9 月 28 日
10:00	6.75	8.46	6.18	8.79	0.70	0.97	0.68	0.75
11:00	5.37	7.83	8.13	8.43	0.90	0.95	0.75	0.75
12:00	8.85	8.76	5.46	6.78	1.50	0.90	1.65	1.02
13:00	8.91	8.40	8.76	8.85	1.38	1.46	1.65	1.10
14:00	8.97	8.91	8.70	5.46	1.40	1.49	1.50	1.00
15:00	5.19	*	6.30	*	1.55	*	1.50	*
16:00	7.80	*	6.36	*	1.83	*	1.55	*
平均值	7.41	8.47	7.13	7.66	1.32	1.15	1.33	0.92

注: “*”代表缺测时刻。

4.4 气溶胶辐射强迫分析

本文利用辐射传输模式结合 SACOL 太阳光度计资料和激光雷达反演的消光系数模拟了典型日气溶胶瞬时辐射强迫、小时平均辐射强迫及大气的加热率, 模拟波段范围为 $0.25 \sim 4 \mu\text{m}$, 主要为太阳短波辐射, 以下直接描述为辐射强迫。大气层顶 (Top Of Atmosphere, TOA)、地面 (Bottom Of Atmosphere, BOA) 和大气 (ATMosphere, ATM) 的净辐射通量计算方法如下:

$$N_{\text{TOA}} = F_{\text{TOA}}^{\downarrow} - F_{\text{TOA}}^{\uparrow}, \quad (11)$$

$$N_{\text{BOA}} = F_{\text{BOA}}^{\downarrow} - F_{\text{BOA}}^{\uparrow}, \quad (12)$$

$$N_{\text{ATM}} = N_{\text{TOA}} - N_{\text{BOA}}, \quad (13)$$

其中, N 表示净辐射通量, $F^{\uparrow}$ 和 $F^{\downarrow}$ 分别代表向上和向下辐射通量。

气溶胶辐射强迫为有气溶胶和无气溶胶时的净辐射通量之差, 具体公式如下:

$$\Delta F_i = N_i^a - N_i^c, \quad (14)$$

其中, ΔF 代表辐射强迫, N^a 和 N^c 分别代表有气溶胶和无气溶胶时的净辐射通量, i 表示 TOA、BOA 或者 ATM。

大气加热率计算公式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g \cdot \Delta F_{\text{ATM}}}{c_p \cdot \Delta p}, \quad (15)$$

其中, T 是温度, t 是时间, g 是重力加速度, c_p 是空气定压比热容, p 是气压。

4.4.1 气溶胶瞬时辐射强迫分析

SBDART 模式是平面平行模式, 太阳天顶角过低模拟误差较大, 因而本文只选取天顶角余弦大于 0.15 的时刻计算瞬时辐射强迫。采用该标准后, 9

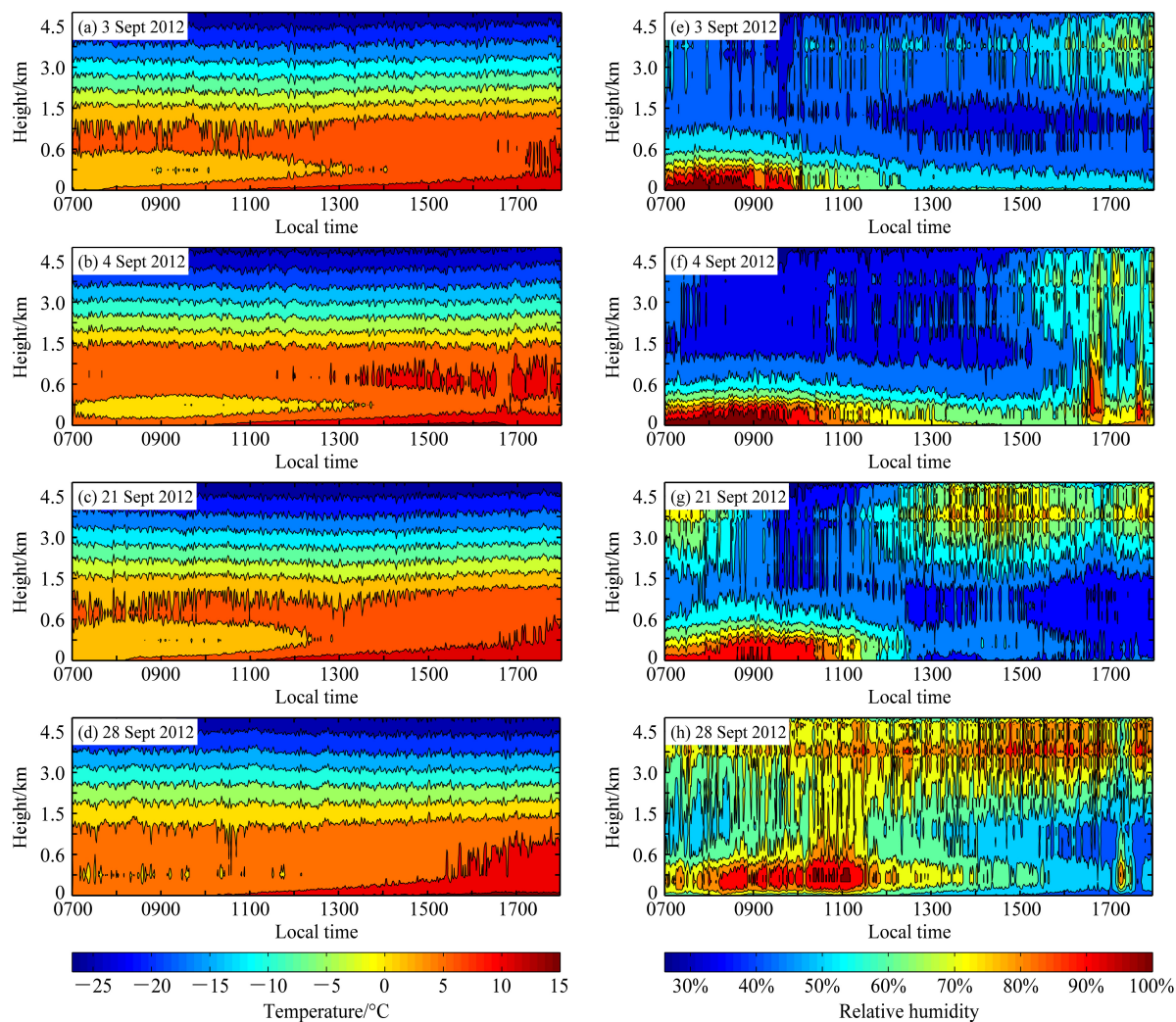


图 10 (a-d) 温度廓线; (e-h) 相对湿度廓线

Fig. 10 (a-d) Temperature profiles; (e-h) relative humidity profiles

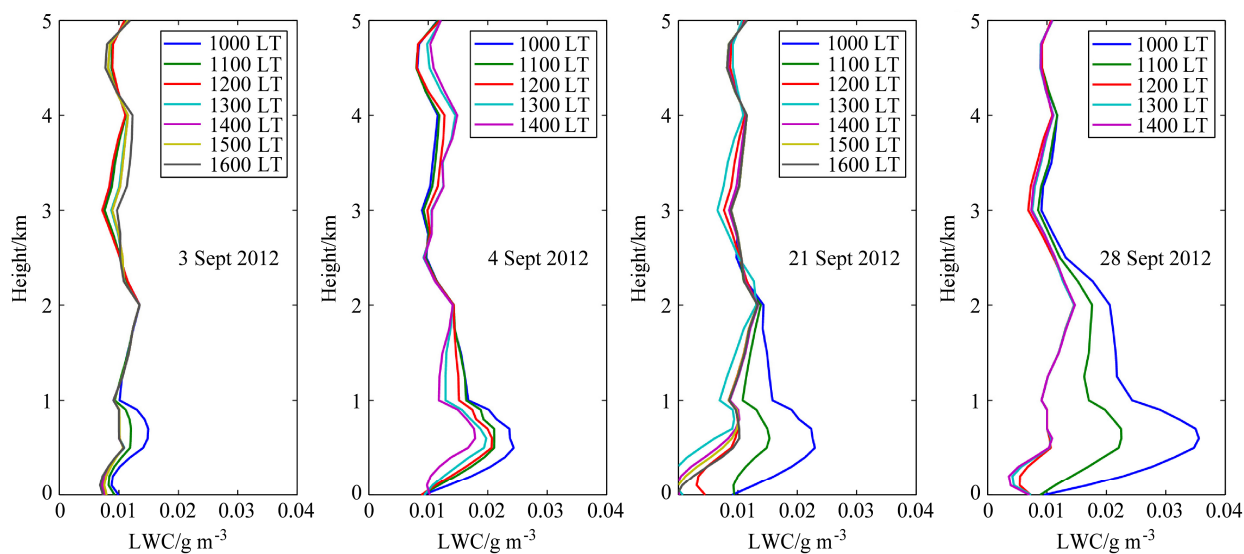


图 11 液态水含量廓线

Fig. 11 Liquid water content (LWC) profiles

月 28 日没有符合条件的时刻，本文分析 9 月 3~4 日和 21 日共计 13 个时刻的瞬时辐射强迫。

这三天地表反照率日均值分别为 0.211、0.206、0.211，差异较小，对辐射强迫的模拟影响不大。

根据公式 (11~14) 计算气溶胶瞬时辐射强迫 (图 12)，3 日气溶胶吸收性对辐射造成的影响远远大于其他两日，BOA 和 ATM 气溶胶瞬时辐射强迫最大，其中 ATM 瞬时辐射强迫明显大于其他两日，导致 TOA 瞬时辐射强迫较小，在第 2、4 和 12 个时刻 (不明显) 甚至出现了正值，结合表 3，可以发现第 2 和第 4 个时刻，吸收光学厚度和复折射指数虚部明显大于其他时刻，单次散射反照率明显小于其他时刻，说明 9 月 3 日气溶胶吸收性最显著。由此可见气溶胶吸收性对辐射强迫影响更大 (夏祥鳌和王明星, 2004)，TOA 气溶胶辐射强迫对气溶胶吸收特性最为敏感，尤其当 SSA 或复折射指数虚部发生微小变化，就可能导致 TOA 瞬时辐射强迫的符号发生改变。

4.4.2 气溶胶辐射强迫日均值及加热率分析

将激光雷达反演的消光系数加入到 SBDART 模式中，结合太阳光度计资料计算典型日每日 07 时至 16 时的小时辐射强迫，平均得到气溶胶辐射强迫日均值 (表 4)。

通过分析可知，TOA 向下辐射相同，当 BOA 地表特性一样，即 BOA 向上辐射一样时，大气中的气溶胶吸收性强会导致 TOA 向上和 BOA 向下的辐射减少，从而使 TOA 的辐射强迫减小甚至由负变正，而 BOA 的辐射强迫增大，而对于大气，气溶胶吸收性越强，则其辐射强迫越大。本文研究时期 TOA 和 BOA 为负辐射强迫，均值分别为 -12.707 W m^{-2} 、 -25.398 W m^{-2} ，ATM 为正辐射强迫，均值为 12.692 W m^{-2} ，说明气溶胶在 TOA 和 BOA 产生冷却效应，在 ATM 产生加热效应，且 BOA 的辐射强迫是 TOA 的 2 倍左右，说明本文研究时期气溶胶吸收性较为明显。根据前文可知，3 日气溶胶光学厚度小于 4 日，而此处模拟结果表现为 3 日 TOA 气溶胶辐射强迫 (绝对值) 最小，BOA 气溶胶辐射强迫 (绝对值) 最大，即 3 日气溶胶在 TOA 的冷却效果最弱，在 BOA 的冷却效果最强，说明 3 日气溶胶吸收性最强，与前文分析一致。以上结果表明气溶胶的吸收性对地气系统的辐射强迫影响更大。

根据模拟的大气加热率 (图 13)，我们发现

气溶胶在垂直方向上的分布不同，造成了大气加热率的不同，整体上表现为地面至 0.2 km 以内加热率小于 0，即在地面气溶胶造成冷却效应，冷却率可达 0.5 K d^{-1} ，随着气溶胶的抬升，在大气中形成气溶胶层，吸收辐射加热大气，由于气溶胶的垂直传输高度不同，加热大气的作用在不同高度明显不同。3 日和 21 日受边界层发展的影响，气溶胶向上传输的高度比 4 日和 28 日高，因而这两日在 1.2 km 至 2 km 加热率明显较强，3 日超过了 0.75 K d^{-1} 。由于典型日气溶胶均主要集中在 1.5 km 内，因而气溶胶加热大气的效果在低层最明显。4 日气溶胶光学厚度最大，其在 0.4 km 至 0.8 km 范围内的大气加热率最大，对应温度廓线 (图 10) 可见该日下午 14 时前后在 0.6 km 处有温度高值区存在，推断气溶胶的加热效应产生一定影响。

本文研究还存在一些问题，由于资料以及时间限制，目前无法给出合理的解释，包括：

(1) 气溶胶的垂直分层结构原因不明，有可能高层在某一时刻有外来输送，但就本文气象条件分析，并没有合适的气象条件表明有强外来污染物，因而有待进一步验证。

(2) 关于中午强对流导致气溶胶的向上输送是这几日共同的特点，由于目前没有垂直风速资料，后续可以结合模式验证。

表 3 根据 SBDART 挑选时刻的气溶胶特性值
Table 3 Aerosol properties at moments selected according to SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiation Transfer)

挑选时刻标号	AOD _{ex} (440 nm)	AOD _{ab} (440 nm)	SSA (440 nm)	REF _I (440 nm)
1	0.405	0.043	0.893	0.013
2	0.355	0.051	0.856	0.023
3	0.320	0.014	0.957	0.005
4	0.423	0.053	0.874	0.019
5	0.372	0.027	0.928	0.006
6	0.308	0.035	0.886	0.013
7	0.353	0.043	0.879	0.013
8	0.393	0.004	0.989	0.001
9	0.382	0.033	0.913	0.012
10	0.394	0.036	0.908	0.013
11	0.338	0.026	0.924	0.009
12	0.270	0.030	0.888	0.015
13	0.296	0.026	0.913	0.010

注：AOD_{ex} 代表消光光学厚度；AOD_{ab} 代表吸收光学厚度；SSA 代表单次散射反照率；REF_I 代表复折射指数虚部。

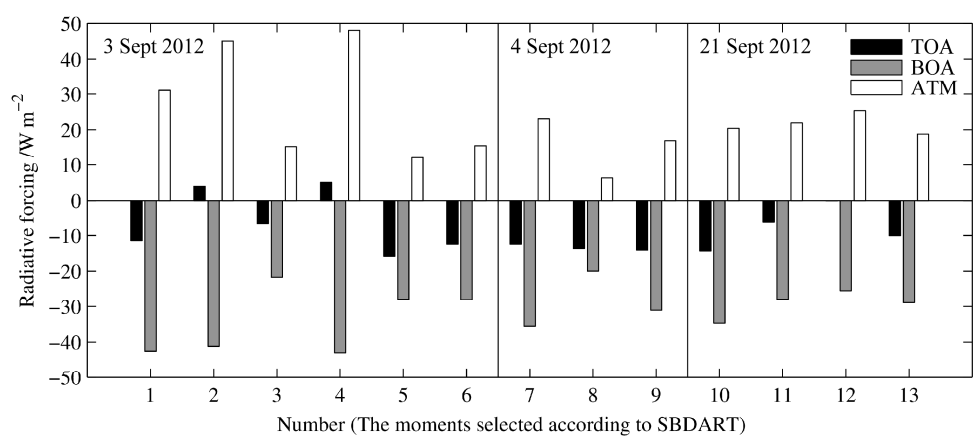


图 12 地面、大气层顶、大气中气溶胶辐射强迫
Fig. 12 Aerosol radiative forcing at surface, at top of the atmosphere, and in the atmosphere

表 4 TOA、BOA 和 ATM 辐射强迫日均值及整个研究时期平均值

Table 4 Daily averages of radiative forcing at TOA (Top Of Atmosphere), BOA (Bottom Of Atmosphere) and ATM (ATMosphere) and the averages over the entire study period

日期	大气层顶辐射 强迫/ W m^{-2}	大气中辐射 强迫/ W m^{-2}	地面辐射 强迫/ W m^{-2}
2012 年 9 月 3 日	-10.202	18.448	-28.650
2012 年 9 月 4 日	-16.069	12.160	-28.229
2012 年 9 月 21 日	-11.629	11.019	-22.649
2012 年 9 月 28 日	-12.926	9.139	-22.065
平均值	-12.707	12.692	-25.398

5 结论

利用兰州大学半干旱气候与环境观测站太阳光度计、激光雷达、微波辐射计综合观测资料，结合辐射传输模式分析了黄土高原半干旱区代表测站 SACOL 秋季典型日 2012 年 9 月 3~4 日、21 日和 28 日气溶胶物理特性、垂直传输特征及其与气象条件的关系，利用辐射传输模式分析了气溶胶的辐射强迫及加热率。主要结论如下：

(1) 本文研究时期 3 日气溶胶吸收性最强，4 日气溶胶光学厚度最大。4 日由于西北风增强，远距离输送气溶胶与本站气溶胶混合，导致该日气溶胶光学厚度增加，粒子尺度增大，11 时至下午 17 时能见度明显降低，其他三日主要以本站局地细粒子吸收性气溶胶为主，吸收性强于纯沙尘，弱于纯生物质燃烧气溶胶，属于二者的混合。

(2) 本文首次尝试利用灰色关联度法确定参考

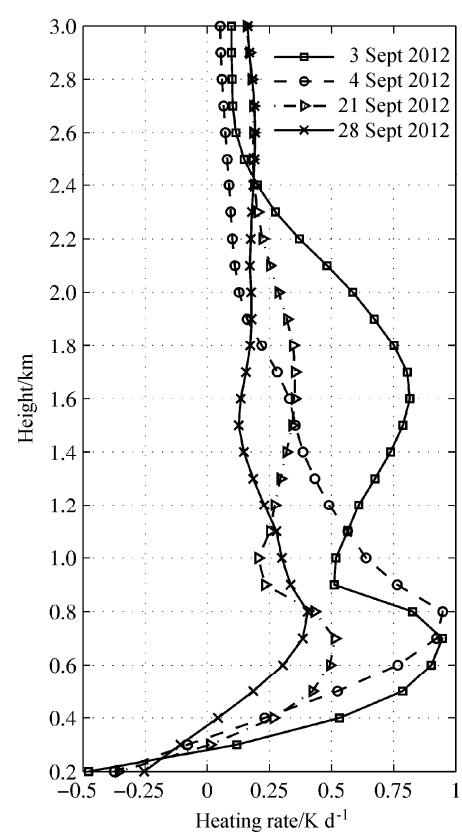


图 13 大气加热率廓线
Fig. 13 Atmosphere heating rate profiles

高度反演消光系数。结果表明该方法可以很好的确定反演的初始高度，光学厚度反演值与太阳光度计观测值相关性可达 0.975，反演结果可靠。

(3) 气溶胶的垂直传输均从上午 10 时左右开始，对应温度场，此时地面开始升温，热力湍流作用逐渐增强，边界层高度逐渐增加，气溶胶向上传输逐渐增强，一般在 12 时至 14 时达到最高。其中

3 日和 21 日, 边界层发展较好, 气溶胶传输高度较高, 可达到 2 km 左右, 而 4 日和 28 日气溶胶传输高度主要在 1.5 km 以下。

(4) 研究时期气溶胶对 TOA 和 BOA 产生冷却效应, 加热 ATM。气溶胶辐射强迫对气溶胶的吸收性更敏感, 其中 TOA 辐射强迫对气溶胶的物理特性最敏感。模拟的大气加热率表明气溶胶的垂直传输结构不同导致大气加热率结构有所不同。气溶胶在地面产生冷却效应, 冷却率可达 0.5 K d^{-1} , 在大气中产生加热效应, 加热效率最大可达 1 K d^{-1} 。

致谢 兰州大学半干旱气候与环境观测站为本文提供了太阳光度计、激光雷达、微波辐射计观测数据, 在此谨致谢忱。感谢在此过程中老师、师兄、师姐和同学给予的指导。

参考文献 (References)

- Bi J R, Huang J P, Fu Q, et al. 2011. Toward characterization of the aerosol optical properties over Loess Plateau of northwestern China [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112 (2): 346–360, doi:10.1016/j.jqsrt.2010.09.006.
- 曹贤洁, 张镭, 周碧, 等. 2009. 利用激光雷达观测兰州沙尘气溶胶辐射特性 [J]. *高原气象*, 28 (5): 1115–1120. Cao Xianjie, Zhang Lei, Zhou Bi, et al. 2009. Lidar measurement of dust aerosol radiative property over Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1115–1120.
- Compton J C, Delgado R, Berkoff T A, et al. 2013. Determination of planetary boundary layer height on short spatial and temporal scales: A demonstration of the covariance wavelet transform in ground-based wind profiler and lidar measurements [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30 (7): 1566–1575, doi:10.1175/JTECH-D-12-00116.1.
- 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, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAP>2.0.CO;2.
- 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 2013. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 477–498. Fan Xuehua, Chen Hongbin, Xia Xiang'ao. 2013. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 477–498, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12316.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. *Appl. Opt.*, 23 (5): 652–653, doi:10.1364/ao.23.000652.
- Fernald F G, Herman B M, Reagan J A. 1972. Determination of aerosol height distributions by lidar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 11 (3): 482–489, doi:10.1175/1520-0450(1972)011<0482:DOAHDB>2.0.CO;2.
- 高中明, 闭建荣, 黄建平. 2013. 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*, 32 (5): 1293–1307. Gao Zhongming, Bi Jianrong, Huang Jianping. 2013. Analysis on aerosol optical property over northern China from AERONET and SKYNET observations [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (5): 1293–1307, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00116.
- Giles D M, Holben B N, Eck T F, et al. 2012. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 117 (D17): D17203, doi:10.1029/2012JD018127.
- 胡蝶, 张镭, 王宏斌. 2013. 黄土高原干旱半干旱地区气溶胶光学厚度遥感分析 [J]. *高原气象*, 32 (3): 654–664. Hu Die, Zhang Lei, Wang Hongbin. 2013. Analyses on aerosol optical depth over arid and semi-arid region of Loess Plateau using remote sensor data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (3): 654–664, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00062.
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008a. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (6): 906–921, doi:10.1007/s00376-008-0906-7.
- Huang J P, Huang Z W, Bi J R, et al. 2008b. Micro-pulse lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 1 (1): 8–11.
- Huang J P, Minnis P, Yan H, et al. 2010a. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 (14): 6863–6872, doi:10.5194/acp-10-6863-2010.
- Huang Z W, Huang J P, Bi J R, et al. 2010b. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China–U.S. joint dust field experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D00K15, doi:10.1029/2009JD013273.
- Kovalev V A. 1993. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios [J]. *Appl. Opt.*, 32 (30): 6053–6065, doi:10.1364/ao.32.006053.
- Marenco F, Santacesaria V, Bais A F, et al. 1997. Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements (photochemical activity and solar ultraviolet radiation campaign) [J]. *Appl. Opt.*, 36 (27): 6875–6886, doi:10.1364/ao.36.006875.
- Noh Y, Müller D, Lee K, et al. 2017. Depolarization ratios retrieved by AERONET sun-sky radiometer data and comparison to depolarization ratios measured with lidar [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17: 6271–6290, doi:10.5194/acp-2016-1181.
- Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. 2006. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (1): L01812, doi:10.1029/2005gl024586.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294 (5549): 2119–2124, doi:10.1126/science.1064034.
- Ramanathan V, Chung C, Kim D, et al. 2005. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102 (15): 5326–5333, doi:10.1073/pnas.0500656102.
- Ricchiazzi P, Yang S R, Gautier C, et al. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (10): 2101–2114, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<2101:sarats>2.0.co;2.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 287 (5459): 1793–1796, doi:10.1126/science.287.5459.1793.
- Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. 2001. Desert dust suppressing

- precipitation: A possible desertification feedback loop [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98 (11): 5975–5980, doi:10.1073/pnas.101122798.
- 宿兴涛, 王汉杰, 宋帅, 等. 2011. 近 10 年东亚沙尘气溶胶辐射强迫与温度响应 [J]. *高原气象*, 30 (5): 1300–1307. Su Xingtao, Wang Hanjie, Song Shuai, et al. 2011. Radiative force and temperature response of dust aerosol over East Asia in recent decade [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (5): 1300–1307.
- Tian P F, Cao X J, Zhang L, et al. 2015. Observation and simulation study of atmospheric aerosol nonsphericity over the Loess Plateau in Northwest China [J]. *Atmos. Environ.*, 117: 212–219, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.07.020.
- Valenzuela A, Olmo F J, Lyamani H, et al. 2012. Aerosol radiative forcing during African desert dust events (2005–2010) over southeastern Spain [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (21): 10331–10351, doi:10.5194/acp-12-10331-2012.
- 王宏斌, 张志薇, 张镭, 等. 2015. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶大小的识别及特征分析 [J]. *中国环境科学*, 35 (4): 995–1003. Wang Hongbin, Zhang Zhiwei, Zhang Lei, et al. 2015. Identify the size of aerosol particles and analyze its characteristic at three AERONET sites in China [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 35 (4): 995–1003.
- Wang X, Huang J P, Zhang R D, et al. 2010. Surface measurements of aerosol properties over Northwest China during ARM China 2008 deployment [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D00K27, doi:10.1029/2009JD013467.
- Wang X, Pu W, Shi J S, et al. 2015. A comparison of the physical and optical properties of anthropogenic air pollutants and mineral dust over Northwest China [J]. *J. Meteor. Res.*, 29 (2): 180–200, doi:10.1007/s13351-015-4092-0.
- 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 B*, 52 (2): 636–651, doi:10.3402/tellusb.v52i2.17124.
- Welton E J, Voss K J, Quinn P K, et al. 2002. Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micropulse lidars [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D19): INX2 18-1–INX2 18-20, doi:10.1029/2000jd000038.
- Wilcox E M, Thomas R M, Praveen P S, et al. 2016. Black carbon solar absorption suppresses turbulence in the atmospheric boundary layer [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113 (42): 11794–11799, doi:10.1073/pnas.1525746113.
- 夏祥鳌, 王明星. 2004. 气溶胶吸收及气候效应研究的新进展 [J]. *地球科学进展*, 19 (4): 630–635. Xia Xiang'ao, Wang Mingxing. 2004. Latest advances in aerosol absorption and its climate effects [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 19 (4): 630–635. doi:10.3321/j. issn:1001-8166.2004.04.021.
- 衣娜娜, 张镭, 刘卫平, 等. 2017. 西北地区气溶胶光学特性及辐射影响 [J]. *大气科学*, 41 (2): 409–420. Yi Nana, Zhang Lei, Liu Weiping, et al. 2017. Optical characteristics and radiative effects of atmospheric aerosol over Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (2): 409–420, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15272.
- 张朝阳, 苏林, 陈良富. 2013. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析 [J]. *中国激光*, 40 (5): 0513002. Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. 2013. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese Journal of Lasers (in Chinese)*, 40 (5): 0513002, doi:10.3788/djl201340.0513002.
- 张华, 马井会, 郑有飞. 2008. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1147–1158. Zhang Hua, Ma Jinghui, Zheng Youfei. 2008. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1147–1158. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.13.
- 张华, 马井会, 郑有飞. 2009. 沙尘气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. *气象学报*, 67 (4): 510–521. Zhang Hua, Ma Jinghui, Zheng Youfei. 2009. A modeling study of global radiative forcing due to dust aerosol [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (4): 510–521. doi:10.11676/qxxb2009.051.
- Zhang L, Cao X, Bao J, et al. 2010. A case study of dust aerosol radiative properties over Lanzhou, China [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 (9): 4283–4293, doi:10.5194/acp-10-4283-2010.
- 张志薇, 王宏斌, 张镭, 等. 2014a. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶微物理特性分析及比较 [J]. *中国环境科学*, 34 (8): 1927–1937. Zhang Zhiwei, Wang Hongbin, Zhang Lei, et al. 2014a. Analysis and comparison of the aerosol microphysical properties at three AERONET sites in China [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 34 (8): 1927–1937.
- 张志薇, 王宏斌, 张镭, 等. 2014b. 中国地区 3 个 AERONET 站点气溶胶直接辐射强迫分析 [J]. *中国科学院大学学报*, 31 (3): 297–305. Zhang Zhiwei, Wang Hongbin, Zhang Lei, et al. 2014b. Aerosol direct radiative forcing at three AERONET sites in China [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 297–305, doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2014.03.002.
- 周碧, 张镭, 蒋德明, 等. 2013. 利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度 [J]. *干旱气象*, 31 (4): 666–671. Zhou Bi, Zhang Lei, Jiang Deming, et al. 2013. Analysis of aerosol optical depth over Lanzhou based on lidar measurement [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 31 (4): 666–671, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0666.
- 周碧, 张镭, 隋兵, 等. 2014. 利用激光雷达探测兰州地区气溶胶的垂直分布 [J]. *高原气象*, 33 (6): 1545–1550. Zhou Bi, Zhang Lei, Sui Bin, et al. 2014. Detection of aerosol vertical distribution using lidar in Lanzhou district [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33 (6): 1545–1550, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00135.