

引用格式: XIONG Xing-long, LI Yong-dong, FENG Shuai, *et al.* Lidar Inversion of PM_{2.5} Mass Concentration Vertical Distribution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0401001

熊兴隆,李永东,冯帅,等.PM_{2.5}质量浓度廓线的激光雷达反演研究[J].光子学报,2020,**49**(4):0401001

PM_{2.5} 质量浓度廓线的激光雷达反演研究

熊兴隆¹,李永东¹,冯帅²,王婕¹,马愈昭¹

(1 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津 300300)

(2 中国民航大学 工程技术训练中心,天津 300300)

摘 要:针对 PM_{2.5} 质量浓度在空间不同高度上的分布测量较难这一问题,采用激光雷达和大气透射仪以及粒径谱仪进行联合探测,反演 PM_{2.5} 质量浓度廓线.考虑相对湿度等因素的影响,通过大气透射仪和粒径谱仪建立地面 PM_{2.5} 质量浓度与大气透过率之间的函数关系.以大气透射仪所测地面大气透过率值为基准,修正激光雷达大气透过率在高空的边界值,结合 Fernald 后向积分法反演出大气透过率的垂直分布.依据建立的函数关系和大气透过率垂直分布,得到 PM_{2.5} 质量浓度廓线,并采用 HYSPLIT 后向轨迹分析不同高度层气溶胶的输送和动态变化.通过激光雷达、大气透射仪和粒径谱仪的联合探测实验,结果表明:经大气透射仪修正后,大气透过率垂直分布精度得到了提高,PM_{2.5} 质量浓度廓线很好的反映了气溶胶垂直分布的微物理变化特征.

关键词:激光雷达;质量浓度;大气透过率;大气气溶胶;相对湿度

中图分类号:TN958.98

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0401001

Lidar Inversion of PM_{2.5} Mass Concentration Vertical Distribution

XIONG Xing-long¹, LI Yong-dong¹, FENG Shuai², WANG Jie¹, MA Yu-zhao¹

(1 Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2 Engineering Technical Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: PM_{2.5} concentration distribution measurement in space at different heights is difficult, this paper uses lidar and atmospheric transmission meter and particle spectrometer for joint detection, through three kinds of instrument data with the vertical distribution of PM_{2.5} concentration inversion. The function relationship between mass concentration of ground PM_{2.5} and atmospheric transmissivity is established by data of atmospheric transmittance and particle size spectrometer. Based on the ground atmospheric transmittance measured by the atmospheric transmission meter, the boundary value of the lidar atmospheric transmittance at high altitude is determined through an iterative algorithm, and the vertical distribution of the atmospheric transmittance is retrieved in combination with Fernald integral method. The vertical distribution of PM_{2.5} mass concentration is obtained by the atmospheric transmittance height profile detected by lidar. The results showed that the accuracy of the vertical distribution of atmospheric transmittance has been improved by the revised atmospheric transmittance. The profile of PM_{2.5} mass concentration well reflects the microphysical variation of the vertical distribution of aerosols.

Key words: Lidar; Mass density; Atmospheric transmission; Atmospheric aerosols; Relative humidity

OCIS Codes: 010.1290; 010.1320; 010.3640; 010.7295

基金项目:国家自然科学基金(No. U1833111),中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(No. 3122018D001)

第一作者:熊兴隆(1962-),男,教授,硕士,主要研究方向为信号与信息处理、激光雷达气象探测等.Email:xx_long@126.com

收稿日期:2019-12-10;录用日期:2020-01-13

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

大气气溶胶是指悬浮于大气中的固体和液体颗粒物共同组成的多相体系,是大气的重要组成部分^[1]. PM2.5是指粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,也称为细颗粒物^[2].近几年来,我国华北地区雾霾天气频繁出现,导致能见度下降,严重影响民航航班正常运行和飞机起降安全,同时空气质量劣化也对人类身体健康有极大危害.大气中PM2.5质量浓度是影响雾霾天气能见度的主要因素,研究雾霾天气条件下PM2.5质量浓度的垂直分布特征对于研究大气气溶胶粒子质量浓度对能见度的影响机制具有重要意义^[3].

近年来,对于PM2.5质量浓度的垂直分布特性研究越来越受到国内外学者的广泛关注,他们从不同的角度采用不同的方法进行了深入探析.HUA Y等^[4]研究了北京APEC峰会期间气溶胶的区域运输以及对PM2.5质量浓度形成的影响,分析了不同高度层气溶胶的来源和扩散对空气质量的影响机制.WU Hong等^[5]基于天津气象铁塔采用颗粒物质量探测仪测量了近地面220 m高度之下不同高度上的PM2.5质量浓度,分析了冬季日间和夜间、晴天和污染天的PM2.5质量浓度分布特征.但该方法为定点定高的测量,不具有高空的探测功能.PENG Zhong-ren等^[6]基于无人机对杭州地区PM2.5质量浓度的垂直分布进行了观测,能实现1 km高度上的测量.但该方法不能长期监测PM2.5质量浓度,并且探测高度依然受到限制.CHEW B N等^[7]基于卫星数据反演了气溶胶光学厚度,将其与PM2.5质量浓度建立关系,分析地面PM2.5质量浓度的变化规律.但气溶胶光学厚度是消光系数在高度上积分的结果,没有垂直分布的细节特征.张辉等^[8]基于激光雷达系统和PM2.5质量探测仪,探测同一时间同一地点的气溶胶后向散射系数、PM2.5质量浓度和大气相对湿度,并对数据进行拟合,得出吸湿因子的表达式,这为高精度反演PM2.5质量浓度廓线奠定了基础.陶宗明等^[2]基于后向和侧向散射激光雷达,结合PM2.5质量浓度探测仪,对合肥地区消光系数垂直分布进行了探测,并反演了PM2.5质量浓度廓线.但激光雷达在高空中边界值的选取存在较大的不确定性,导致侧向激光雷达的边界值标定受到潜在影响,会间接影响PM2.5质量浓度廓线精度.

中国民航大学研制了一台直接探测测风激光雷达,用作风切变预警研究.除了径向风速外,激光雷达还提供反射功率数据,可反演大气透过率.针对PM2.5质量浓度在空间不同高度上的分布测量较难这一问题,本文采用激光雷达和大气透射仪以及粒径谱仪进行联合探测,通过三种仪器数据结合反演PM2.5质量浓度廓线,拓展了测风激光雷达和大气透射仪的新功能.

反演方法分为三个部分:第一步,通过大气透射仪和粒径谱仪测得的数据建立地面PM2.5质量浓度与大气透过率之间的函数关系.第二步,以大气透射仪所测得的地面大气透过率为基准,通过迭代算法确定激光雷达大气透过率在高空的边界值,结合Fernald后向积分法^[9]反演大气透过率的垂直分布.第三步,依据建立的函数关系,结合激光雷达探测的大气透过率垂直分布,最终得到PM2.5质量浓度廓线.同时,通过同步HYSPLIT后向轨迹,分析气溶胶来源和输送模式以及其对气溶胶垂直分布特性的影响.

1 探测系统及原理

探测系统由激光雷达、大气透射仪和粒径谱仪组成,系统结构如图1所示.激光雷达位于中国民航大学

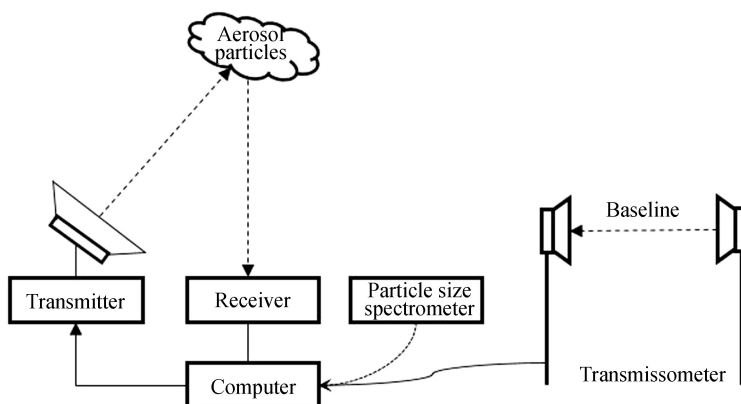


图1 探测系统结构图

Fig.1 Structure of detecting system

停机坪,靠近天津机场跑道一端.激光雷达的工作波长为 1 064 nm^[10],最大探测距离为 5 km,最小垂直分辨距离为 15 m,具体技术参数如表 1.大气透射仪采用安装在天津机场的 VAISALA 公司 LT31 大气透射仪,采样频率为 30 min.大气透射仪通过探测光束经过基线长度气柱内颗粒物散射和吸收衰减之后的光强,计算发射端和接收端之间的大气透过率.粒径谱仪使用德国 GRIMM 公司生产的 #1.109 型号的便携式气溶胶粒径谱仪,该粒径谱仪共有 31 个通道,既可测量 0.25~32 μm 粒径之间的颗粒物粒径分布,又可输出 PM2.5 和 PM10 质量浓度,同时可以探测相对湿度.粒径谱仪放置于激光雷达附近,对地面 PM2.5 质量浓度进行测量.通过建立地面 PM2.5 质量浓度与大气透过率的关系,结合激光雷达反演的大气透过率高度廓线,实现 PM2.5 质量浓度垂直分布的反演.

表 1 激光雷达主要参数表
Table 1 Key parameters of lidar

Parameter	Value
Wavelength	1 064 nm
Pulse energy	550 mJ
Pulse repetition rate	50 Hz
Scanning range	360°×90°
Telescope diameter	300 mm
Etalon bandwidth	170 MHz
Detector quantum coefficient	18%
Resolving distance	15 m
Maximum detection range	5 km

2 反演方法

联合大气透射仪与粒径谱仪,建立地面 PM2.5 质量浓度与大气透过率的关系,以此作为垂直空间上大气透过率与 PM2.5 质量浓度的函数关系.联合大气透射仪与激光雷达,以大气透射仪探测的地面大气透过率为基准,修正激光雷达探测的大气透过率垂直分布.这种方法相对于直接用粒径谱仪和激光雷达反演 PM2.5 质量浓度廓线,提高了中间量大气透过率垂直分布的准确度,间接优化了 PM2.5 质量浓度廓线的反演.

2.1 PM2.5 质量浓度与大气透过率的关系

根据颗粒物质量浓度的定义,大气中所有颗粒物的浓度^[8]可表示为

$$C_{PM_{\infty}} = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi \rho r^3 n(r)_{dry} dr \quad (1)$$

式中, r 为粒子半径, ρ 为干气溶胶密度, $n(r)_{dry}$ 为干气溶胶的尺度谱分布函数.则 PM2.5 的质量浓度^[8]可以表示为

$$C_{PM_{2.5}} = \int_0^{2.5} \frac{4}{3} \pi \rho r^3 n(r)_{dry} dr \quad (2)$$

根据 Mie 散射理论^[11],大气中干气溶胶的消光系数定义为

$$\sigma_{dry} = \int_0^{\infty} \pi Q_{ext} n(r)_{dry} r^2 dr \quad (3)$$

式中, Q_{ext} 为气溶胶粒子的消光效率因子.

当空气中的相对湿度较大时,颗粒物会吸收水分而导致粒子半径膨胀,进而促使消光系数发生较大的改变.根据干、湿气溶胶的消光特性,吸湿增长因子^[8]定义为

$$f(RH) = \frac{\sigma_{RH}}{\sigma_{dry}} \quad (4)$$

即湿气溶胶的消光系数 σ_{RH} 与其干气溶胶消光系数 σ_{dry} 的比值. $f(RH)$ 体现了水汽对大气消光的影响.

联立式(1)~(4),可以得到大气消光系数与 PM2.5 质量浓度之间的关系为

$$\sigma_{RH} = \frac{3 Q_{exy} f(RH)}{4 r_{eff} \rho k} C_{PM_{2.5}} \quad (5)$$

式中, $r_{\text{eff}} = \int_0^{\infty} r^3 n(r)_{\text{dry}} dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r)_{\text{dry}} dr$ 为有效粒子半径, \bar{Q}_{ext} 为气溶胶粒子的整体消光效率因子, $\bar{\rho}$ 为气溶胶平均密度, $k = C_{\text{PM}_{2.5}} / C_{\text{PM}_{10}}$ 为质量浓度比。

根据 Beer-Lambert 定律^[12], 大气透过率与大气消光系数的关系为

$$T = \exp\left[-\int_a^b \sigma(h) dh\right] \quad (6)$$

即在点 a 到点 b 的光传输路径中, 消光系数对路径的积分。根据式(5)中大气消光系数与颗粒物质量浓度的关系, 联立式(6)得

$$T = \exp\left[-\int_a^b \frac{3 \bar{Q}_{\text{ext}} f(\text{RH})}{4 r_{\text{eff}} \bar{\rho} k} C_{\text{PM}_{2.5}}(h) dh\right] \quad (7)$$

假设在短距离点 a 到点 b 光程中, 气溶胶的种类、粒子尺度谱和各组分不发生变化, 则可以推算得到 $\text{PM}_{2.5}$ 物质质量浓度与大气透过率的关系为

$$C_{\text{PM}_{2.5}} = -K \cdot \ln T / f(\text{RH}) \quad (8)$$

式中, 比例系数 K 可表示为 $K = 4 r_{\text{eff}} \bar{\rho} k / 3(b-a) \bar{Q}_{\text{ext}}$, $b-a$ 为激光雷达最小分辨距离。当相对湿度较高时, 粒子迅速吸湿膨胀, 影响比例系数 K 的准确性, 进而影响探测到的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 因此, 对于相对湿度 $> 40\%$ 的情况, 需要对计算得到的比例系数 K 修正。采用文献[8]研究得到的经验公式, 当相对湿度在 40% 以下时, 吸湿增长因子 $f(\text{RH}) = 1$; 当相对湿度在 40% 以上时, 吸湿增长因子 $f(\text{RH}) = 1 / (1 - \text{RH} + 40\%)$ 。

根据文献[2]研究表明, 在低层大气中由于湍流的混合作用, 大气气溶胶达到稳定状态后, 可认为该区域的气溶胶粒子谱分布和折射率是相同的。但是, 若忽略垂直高度上相对湿度的变化, 以地面探测的相对湿度为基准做估计计算, 则由大气透过率反演得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度廓线在高空会存在误差。

2.2 大气透过率垂直分布的修正

高度 z 处的后向散射信号功率可用激光雷达方程表示

$$P(z) = P_0 \frac{\Delta R \cdot A}{z^2} K_m \beta(z) \exp\left[-2 \int_0^z \sigma(z) dz\right] \quad (9)$$

式中, $P(z)$ 为激光雷达回波信号功率, P_0 为激光脉冲发射功率, ΔR 为激光雷达距离分辨率, $\beta(z)$ 为大气后向散射系数, A 为望远镜的面积, K_m 为系统常数, $\sigma(z)$ 为消光系数。

采用 Fernald 后向积分法对激光雷达方程求解消光系数^[13]

$$\sigma(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_2(z) + \frac{X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_2(z) dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_1(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_2(z)} + 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_2(z) dz\right] dz} \quad (10)$$

式中, $X(z) = \ln[P(z)z^2]$ 为激光雷达回波距离校正信号, S_1 为气溶胶后向散射比, S_2 为空气分子后向散射比, Z_c 为边界值高度, $\alpha_1(z_c)$ 为消光系数边界值, $\alpha_2(z)$ 为大气分子消光系数。在激光雷达最小垂直分辨距离内, 可认为大气是均匀分布的。因此, 在每段最小分辨距离内, 根据 Beer-Lambert 定律将消光系数转化为大气透过率, 最终得到大气透过率的垂直分布

$$T(z) = \exp[-\sigma(z) \cdot L] \quad (11)$$

式中, L 为激光雷达最小垂直分辨距离。

为提高激光雷达反演大气透过率的精度, 采用大气透射仪对大气透过率边界值和垂直分布进行修正。具体修正方法为: 首先, 在激光雷达探测最高端点处, 选取一段较为平滑的数据, 根据式(6)和 collis 斜率法^[14] 计算出消光系数边界值以及对应的大气透过率边界值, 并将该高度作为标定点。然后, 以标定点处的大气透过率边界值为中心, 以 10^{-5} 为步长向正负方向分别扩展一定数值, 构成一个临时边界值范围, 得到若干个大气透过率临时边界值与对应的消光系数临时边界值。最后, 将上述得到的每个消光系数临时边界值代入式(10)中进行计算, 得到的消光系数垂直分布再带入式(11)计算, 可得到多个大气透过率垂直分布及对应的大气透过率地面值。以大气透射仪所在地面位置为参照点, 所测大气透过率为参照值。当激光雷达反演的大气透过率地面值与参照值符合式(12)判定时, 完成大气透过率边界值和垂直分布的修正。

$$\frac{|T_A - T_B|}{T_B} = x \quad (12)$$

式中, T_A 为大气透过率参照值, T_B 为激光雷达反演的大气透过率地面值, x 为自适应调整值. 判定方法为: 按照给出的大气透过率步长, 对其所有边界值进行一次遍历, 同时记录下相对应的所有 x 值, 当遍历完成后, 选取 x 最小值对应的 T_B 即为修正值, 相对应的边界值为所需的大气透过率边界值. 这既实现了大气透过率边界值的修正, 也实现了大气透过率的垂直分布修正. 根据式(8)可知, 提高大气透过率垂直分布的精准度, 进而可以得到更准确的 PM2.5 质量浓度廓线. 由于该方法是基于 Fernald 后向积分, 因此不会出现 Fernald 前向积分法中分母为零或者负值而导致反演值为无穷大和负数的情况^[15].

3 探测结果与分析

首先, 通过对地面 PM2.5 质量浓度和大气透过率的大量实际数据分析, 确定不同相对湿度情况下比例系数 K 值的大小. 其次, 联合大气透射仪与激光雷达, 以大气透射仪探测的地面大气透过率为基准, 修正激光雷达探测的大气透过率垂直分布. 最后, 根据修正后的大气透过率垂直分布, 反演出 PM2.5 质量浓度廓线, 并分析不同高度上的气溶胶来源及对气溶胶垂直分布的影响.

3.1 地面 PM2.5 质量浓度与大气透过率的关系

根据推导的大气透过率与气溶胶粒子质量浓度之间的负对数关系, 下面将对相对湿度 RH 以 40% 为界, 分别以相对湿度 $RH < 40\%$ 和 $RH > 40\%$ 时的实测数据对两者之间函数关系进行讨论. 图 2 和图 3 分别给出了两个相对湿度区间的大气透过率、PM2.5 质量浓度和比例系数 K 的统计分析.

图 2 统计时间段为 2017 年 12 月 28 日 00 点到 9 点. 图 2(a) 为大气透过率的变化情况, 图 2(b) 为 PM2.5 质量浓度的变化情况, 图 2(c) 为比例系数 K 的变化情况, 图 2(d) 为相对湿度的变化情况. 在 7 点之前, 大气透过率整体上基本保持稳定, PM2.5 质量浓度也在平均水平上下浮动. 在 7 点之后, 大气透过率开始下降, PM2.5 质量浓度开始上升. 虽然两者都有变化, 但是比例系数 K 却没有发生太大的波动. 图 2(c) 中计算得到

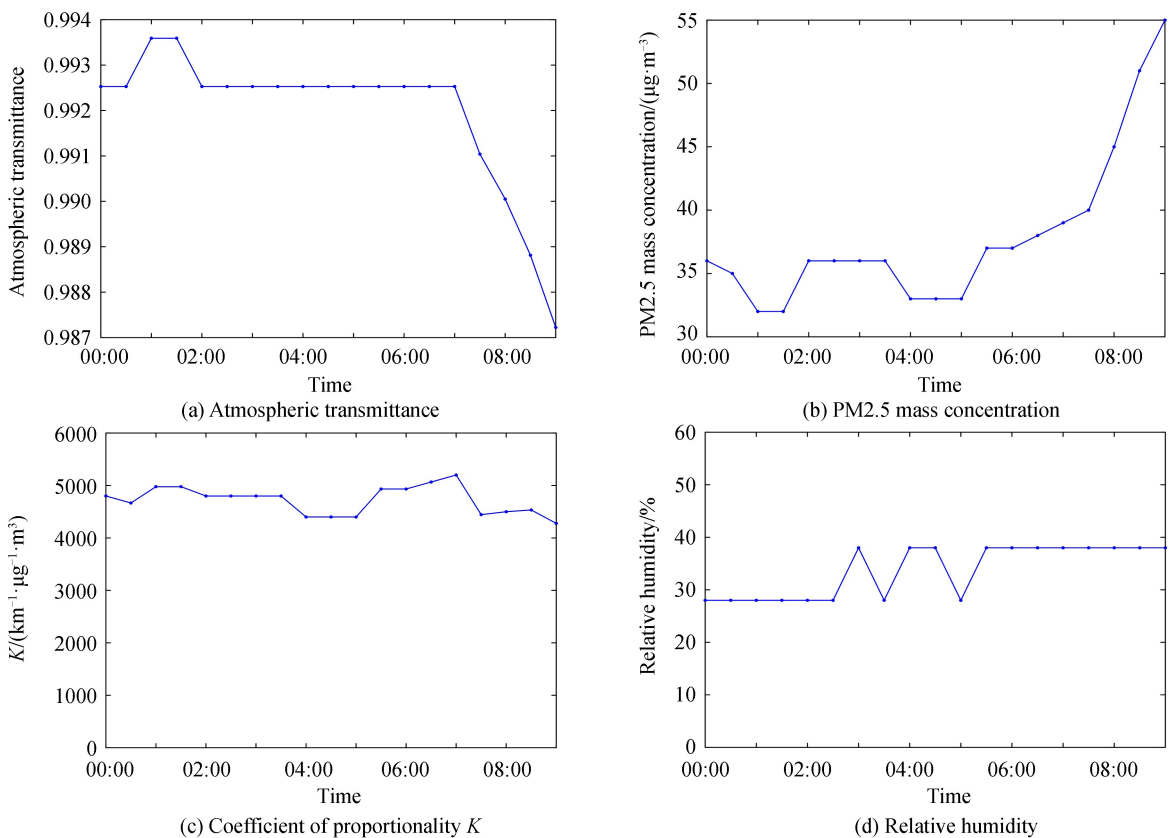


图 2 各参数随时间的变化情况

Fig.2 Changes of parameters with time

的比例系数 K 、大气透过率、相对湿度以及 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系符合式(8)。

图 3 统计分析了相对湿度较高的环境下的各参数变化状态,所统计时间段为 2017 年 12 月 25 日 13 点 30 分到 21 点.图 3(a)为大气透过率的变化情况,图 3(b)为 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化情况,图 3(c)为比例系数 K 的变化情况,图 3(d)为相对湿度的变化情况.在 13 点 30 分到 17 点之间,相对湿度可认为处于稳态,大气透过率在 13 点 30 分到 16 点之间保持不变,但在 16 点之后开始持续下降, $PM_{2.5}$ 质量浓度从 13 点 30 分到 15 点 30 分处于慢增长状态,在 16 点到 18 点之间迅速增加并达到峰值,而后又开始下降.理论上,随着 $PM_{2.5}$ 质量浓度的下降,大气透过率应该上升,但由于相对湿度的作用,使得气溶胶粒子在后期处于极度饱和状态而增强消光.由此可分析,此时大气透过率的下降并不是气溶胶粒子造成的,而是由水汽导致.如果将由于相对湿度导致消光的增强归结于气溶胶粒子的消光,是不合理的。

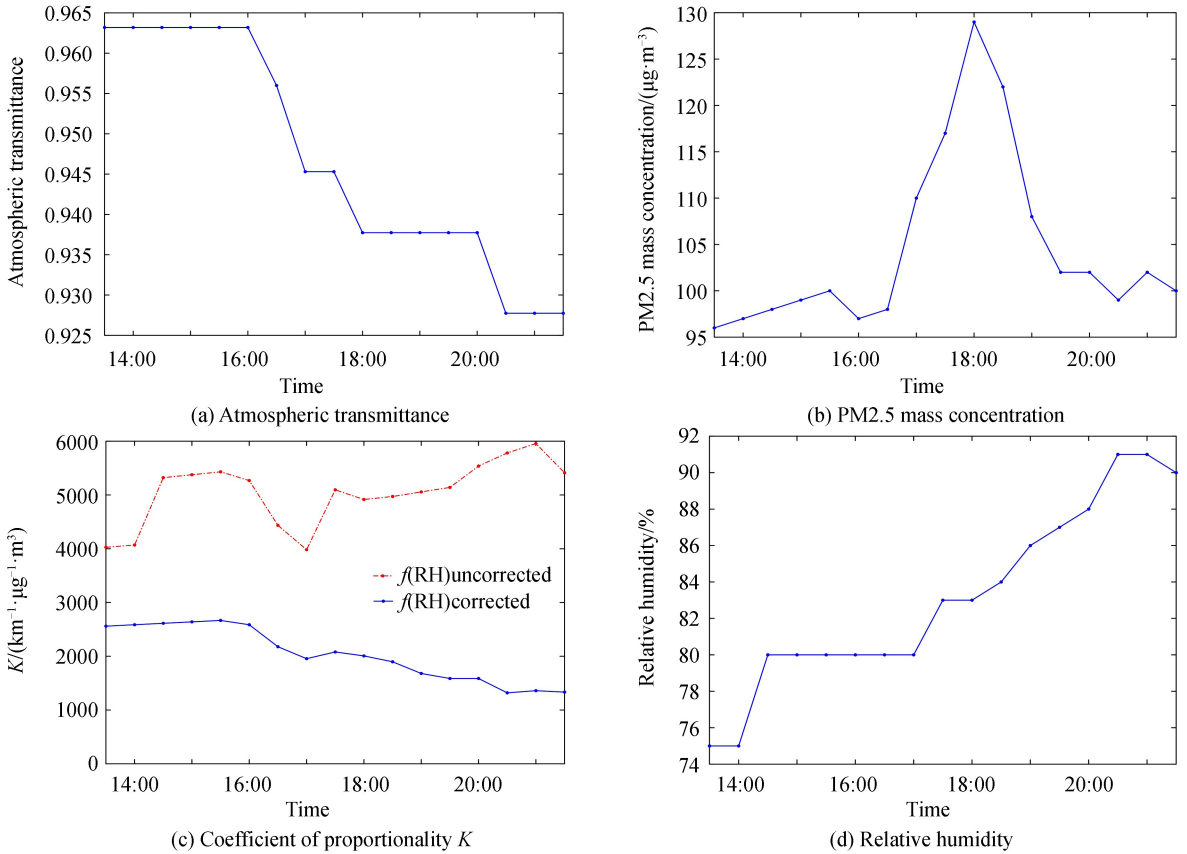


图 3 各参数随时间的变化情况
Fig.3 Changes of parameters with time

因此这里需要对比例系数 K 进行修正,图 3(c)给出了经吸湿增长因子修正前后的比例系数 K 值的变化情况.未修正之前 K 值波动较大且与大气透过率、相对湿度以及 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系不符合式(8),而修正之后的 K 值符合与大气透过率、相对湿度以及 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系符合式(8),相比于未修正的结果, K 值变化状态和取值范围都比较平稳.整体上可以反映出气溶胶粒子和水汽对大气透过率的影响。

通过以上分析,当相对湿度小于 40%时,大气透过率与 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现负相关,比例系数 K 值主要受 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响,比例系数基本处于平衡状态.当相对湿度大于 40%时,水汽对大气透过率和比例系数 K 值的影响不可忽略,尤其是当气溶胶粒子处于高相对湿度阶段时,其过程比较复杂,而当气溶胶粒子吸湿完成达到饱和状态后,则很容易受风速、压强等气象条件的影响,并且当水分到达一定程度后会发生潮解和沉降作用,比例系数 K 值的变化很不稳定.经过吸湿增长因子的修正之后,比例系数 K 整体上趋于平稳,且与大气透过率、相对湿度以及 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系符合式(8)。

3.2 大气透过率垂直分布的修正

图4给出了2018年2月2日12时的大气气溶胶透过率的垂直分布.当天相对湿度为22%,大气透射仪所测地面能见度为5 km,为轻度霾天气.由图可以看出,垂直分辨距离内的大气透过率范围介于0.995~0.9997之间,从底层到高空呈现递增的趋势,并且具有波动性,尤其是在1 km和大于2.5 km的高度层区域,表现最为明显.整体而言,大气透过率的垂直分布既表征了不同高度处气溶胶的光学特性,同时也反映了气溶胶垂直分布的细节特性.

图5给出了2018年2月10日15时的大气透过率垂直分布修正与未修正的对比情况.当天能见度为3.5 km,地面大气透过率为0.9955,初始大气透过率边界值为0.9992.由图可以看出,两者在3 km高度以上差距不大,但在3 km高度以下,随着高度的降低,误差越来越大.在初始大气透过率边界值下激光雷达反演的大气透过率地面值为0.9944,与实际值相比相差较大,导致大气透过率垂直分布误差受到很大影响.经过大气透射仪对地面大气透过率修正之后相对应的边界值为0.99943,与初始边界值相比,得到的大气透过率垂直分布更为精准,从而实现了大气透过率的垂直分布修正.

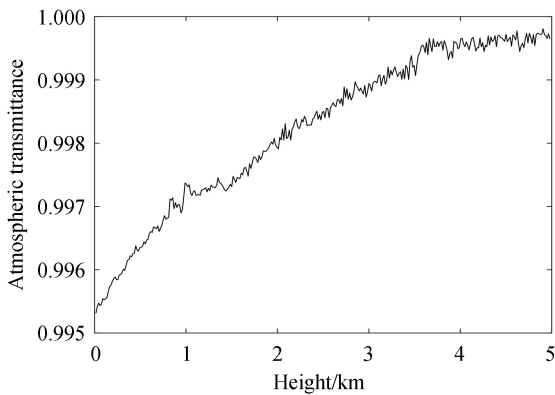


图4 2018年2月2日12点30分大气透过率垂直分布
Fig.4 Vertical distribution of atmospheric transmittance at 12:30 on February 2, 2018

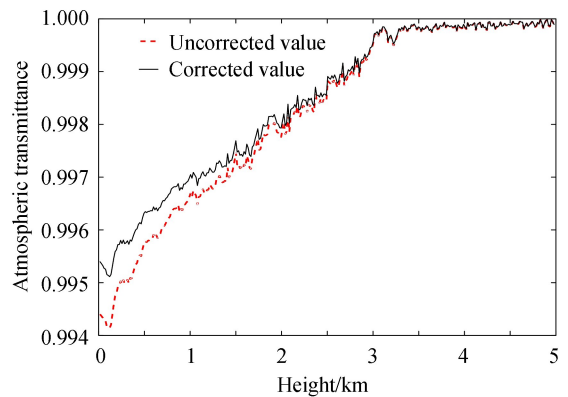


图5 2018年2月10日15时的大气透过率垂直分布对比
Fig.5 Comparison of vertical distribution of atmospheric transmittance at 15 in February 10, 2018

3.3 PM2.5 质量浓度廓线

基于地面处粒径谱仪所测PM2.5质量浓度与大气透射仪所测大气透过率之间的关系,结合激光雷达探测的大气透过率垂直分布,实现PM2.5质量浓度廓线反演.

图6所示为2018年2月10日15时大气透过率修正前后的PM2.5质量浓度空间分布对比.经过大量数据对比系数K的计算及吸湿因子的修正后,探测时的PM2.5质量浓度与大气透过率的关系为

$$C_{PM2.5} = -7110 \ln T \quad (13)$$

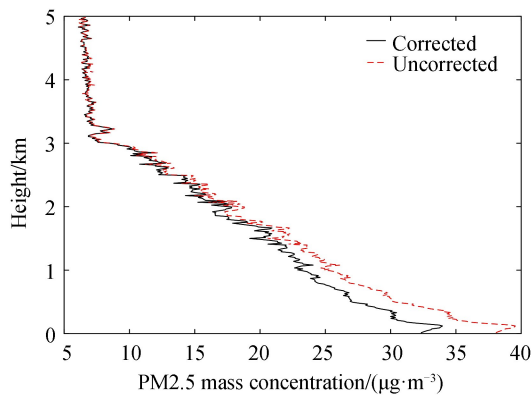


图6 2018年2月10日15时的PM2.5质量浓度廓线对比图
Fig.6 Comparison of vertical distribution of PM2.5 mass concentration at 15 in February 10, 2018

2月10日15时的相对湿度为27%,地面PM2.5质量浓度为32 μg/m³.图6中,未修正的大气透过率垂直分布反演出的PM2.5质量浓度在地面处为38 μg/m³,修正后的大气透过率垂直分布反演出的PM2.5质

量浓度在地面处为 $32.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 经过修正之后, 有效的优化了 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的反演, 尤其是在近地面效果更加明显. 不足之处是, 由于采用地面相对湿度和粒子谱估计垂直高度上的相对湿度与粒子谱, 高空处的探测结果存在误差, 有待进一步研究.

图 7 所示为 2018 年 3 月 27 日 16 时和 4 月 3 日 11 时的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度空间分布情况. 经过大量数据对比比例系数 K 的计算及吸湿因子的修正后, 探测时的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与大气透过率的关系分别为

$$C_{\text{PM}_{2.5_1}} = -4800 \ln T \quad (14)$$

$$C_{\text{PM}_{2.5_2}} = -3109 \ln T \quad (15)$$

3 月 27 日 16 时的相对湿度为 21%, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在 0.15 km 高度内增加至 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 随后至 5 km 高度, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐渐减少. 总体上, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随着高度的升高而呈现减小的趋势. 4 月 3 日 17 时的相对湿度为 48%, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 在 0.15 km 高度内增加至 $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 0.5~2 km 区间内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随着高度增加而逐渐减小, 在 2~2.8 km 高度区间内减小速率最大, 3 km 高度以上基本呈稳定状态. 两次探测时刻的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直分布都具有分层现象, 且气溶胶主要集中在 3 km 高度以下, 各高度层上的细节特征也充分的表达了出来, 体现了大气气溶胶垂直分布的微物理变化特性. 总体而言, 两天的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随着高度的升高而浓度降低, 到一定高度后逐渐趋于稳定, 表明了大气气溶胶典型的垂直分布特征.

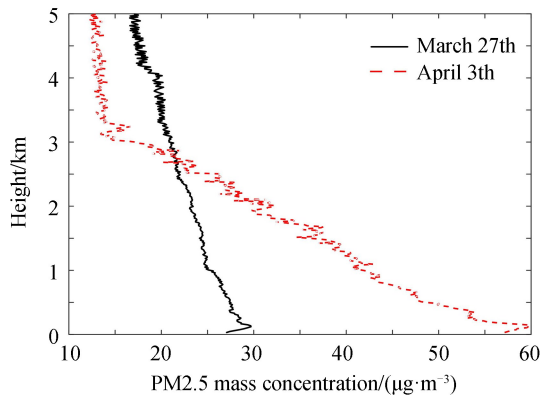


图 7 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直反演廓线

Fig.7 Vertical inversion of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration

3.4 HYSPLIT 后向轨迹分析

HYSPLIT 模型^[16]是由美国国家海洋和大气管理局研发的一种污染物输送、扩散的专业模型. 本文采用其后向轨迹模式对气溶胶气团的输送和扩散轨迹进行分析, 进而研究对气溶胶垂直分布的影响^[17].

图 8 给出了四次探测时刻的 HYSPLIT 后向轨迹图. 由图 8(a)和图 8(b)所示, 2 月 2 日 12 时的 0.5 km 和 1 km 高处的气溶胶是近期在河北省与天津南边界交汇处由于低空气团向高空运动而产生, 3 km 高度气溶胶是由西部陕西省境内平行传输而来. 2 月 10 日 11 时的 0.5 km 和 1 km 高度的气溶胶来自西北方向内蒙古境内 2 km 高度附近, 而 3 km 高度气溶胶来自山西省北部 5 km 高空洁净区, 含有的气溶胶较少, 因而气溶胶质量浓度较小. 图 8(c)中给出了 3 月 27 日 16 时的后向轨迹图, 0.5 km、1 km 高度处的气溶胶分别来自我国西北方向的蒙古境地 2.5 km、3 km 高度, 而 3 km 高度处的气溶胶来自俄罗斯南部 4 km 高度, 穿过蒙古境内而径直到达天津. 三个高度的气溶胶虽有不同的来源, 但都是从高空中的洁净气团吹散到相应高度的. 图 8(d)中给出了 4 月 3 日 11 时的后向轨迹图, 0.5 km 和 1 km 高度处的气溶胶来自我国东北地区 2.5 km 高度, 0.5 km 高度气团轨迹呈“J”形路径, 1 km 气团轨迹呈“S”形路径, 而 3 km 高度的气溶胶来自我国西北地区 3.5 km 高空. 由于两个地区的气溶胶类型不同, 粒子的消光效率也不同, 因而导致了图 6 中相应时刻和高度上的气溶胶质量浓度分布有起伏现象.

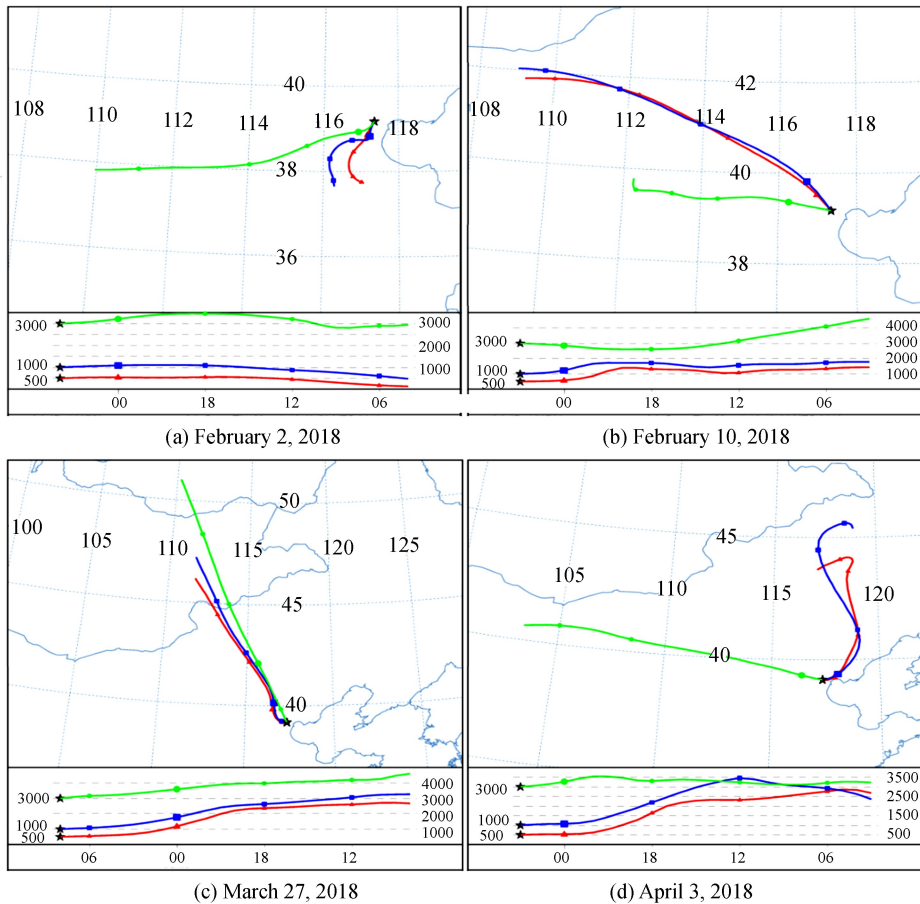


图 8 HYSPLIT 后向轨迹图

Fig.8 HYSPLIT backward trajectory

综上所述,对 HYSPLIT 后向轨迹分析表明,四次探测时刻的天津机场地区以外来气溶胶输入为主,且大多数为大陆性气溶胶,少数呈混合状态.这对分析天津机场地区气溶胶污染物输送和动态变化以及污染治理提供科学依据具有实际指导意义.

4 结论

基于激光雷达、大气透射仪和粒径谱仪的联合探测,反演了 PM_{2.5} 质量浓度廓线.根据大气透射仪和粒径谱仪的探测结果建立地面 PM_{2.5} 质量浓度与大气透过率的关系,同时以大气透射仪对大气透过率边界值和垂直分布进行了修正,通过提高大气透过率垂直分布的精确度,间接优化了 PM_{2.5} 质量浓度廓线反演.但是,由于采用地面的相对湿度及粒子谱估计整个垂直高度上的相对湿度与粒子谱,高空中的探测数据存在误差,有待进一步研究.通过 HYSPLIT 后向轨迹分析发现,在探测期间,天津机场地区的气溶胶以外来输入为主.综合研究表明:联合激光雷达和大气透射仪实现大气透过率垂直分布的反演,并且转化到 PM_{2.5} 质量浓度廓线的方法是可行的.这对研究大气气溶胶的微物理性质、尺度特征、气溶胶的输送和扩散以及为机场周围环境污染治理决策提供服务都具有重要意义.

参考文献

- [1] SHEN Ji, CAO Nian-wen, Measurement of tropospheric aerosol extinction coefficient profiles by Mie-Raman lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(6): 304-313.
沈吉, 曹念文. 米-拉曼激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. *中国激光*, 2017, **44**(6): 304-313.
- [2] TAO Zong-ming, MA Xiao-min, LIU Dong, *et al.* Statistical distribution of PM_{2.5} mass concentration profiles at west suburb of Hefei City in 2014[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(6): 9-17.
陶宗明, 麻晓敏, 刘东, 等. 2014 年合肥西郊 PM_{2.5} 质量浓度廓线统计分布[J]. *光学学报*, 2016, **36**(6): 9-17.
- [3] MA Yu-zhao, CUI Ya-feng, XIONG Xing-long, *et al.* Predicting the concentrations of particulates around airports based on the measurement of light-transmittance[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, **28**(9): 992-998.

- 马愈昭,崔雅峰,熊兴隆,等. 基于大气透过率的机场周边颗粒物质量浓度预测模型[J]. 光电子·激光, 2017, **28**(9): 992-998.
- [4] HUA Y, WANG S, WANG J, *et al.* Investigating the impact of regional transport on PM_{2.5} formation using vertical observation during APEC 2014 Summit in Beijing[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, **16**(24): 15451-15460.
- [5] WU Hong, ZHANG Yu-fen, HAN Su-qin, *et al.* Vertical characteristics of PM_{2.5} during the heating season in Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **5**(23): 152-160.
- [6] PENG Zhong-ren, WANG Dong-sheng, WANG Zhan-yong, *et al.* A study of vertical distribution patterns of PM_{2.5} concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: A case in Hangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **12**(3): 357-369.
- [7] CHEW B N, CAMPBELL J R, HYER E J, *et al.* Relationship between aerosol optical depth and particulate matter over singapore: effects of aerosol vertical distributions[J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2016, **16**(11), 2818-2830.
- [8] ZHANG Hui, TAO Zong-ming, MA Xiao-min, *et al.* Fitting of hygroscopic factor between PM_{2.5} mass concentration and aerosol backscattering coefficient in hefei area[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(7): 163-169.
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合[J]. 中国激光, 2018, **45**(7): 163-169.
- [9] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(5): 652.
- [10] YUAN Lin, LIU Bo, WANG Bang-xin, *et al.* Design of mobile 1 064 nm Mie Scattering lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(7): 1721-1725.
袁林, 刘博, 王邦新, 等. 车载式 1064nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1721-1725.
- [11] HULST H C. Light scattering by small particles[M]. TWERSKY V. Dover Publications. 1981:87-94.
- [12] WANG Hong-xia, ZHU You-zhang, TIAN Tao, *et al.* Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(2): 324-333.
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(2): 324-333.
- [13] MA Yu-zhao, LIU Jia-qi, WANG Qiang-qiang, *et al.* Inversion of aerosol lidar ratio and its effect on slant visibility based on fernald-PSO method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(3): 0301001.
马愈昭, 刘嘉琦, 王强强, 等. 基于 Fernald-PSO 法反演气溶胶激光雷达比及其对斜程能见度的影响[J]. 光子学报, 2019, **48**(3): 0301001.
- [14] COLLIS R T H, RUSSELL P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[M]. Springer Berlin Heidelberg: Laser Monitoring of the Atmosphere, 1976:71-151.
- [15] LIU Hou-tong, GE Zhan-qi, WANG Zhen-zhu, *et al.* Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by Fernald Iterative Backward Integration Method(FIBIM)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1837-1843.
刘厚通, 葛占旗, 王珍珠, 等. 利用 Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1837-1843.
- [16] DENG Zu-qin, ZHANG Lei. Vertical distributions of dust aerosols derived from CALIPSO and CloudSat observations in Hexi Corridor[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016: 4090-4092.
- [17] MEI Shi-yu, MA Jin-ji, ZHANG Xin. Analysis on spatiotemporal variation characteristics of NO₂ concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei Region during APEC[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, **11**(4): 281-287.
梅世玉, 麻金继, 张鑫. APEC 期间京津冀地区 NO₂ 浓度的时空变化特征研究[J]. 大气与环境光学学报, 2016, **11**(4): 281-287.