

引用格式: CUI Likai, SONG Xiaoquan, YANG Yawen, et al. Doppler Lidar Retrieval of Particulate Matter Concentration Based on Statistical Regression Method[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1201005

崔立凯, 宋小全, 杨雅雯, 等. 基于统计回归方法的多普勒激光雷达反演颗粒物浓度研究[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1201005

基于统计回归方法的多普勒激光雷达反演 颗粒物浓度研究

崔立凯¹, 宋小全^{1,2}, 杨雅雯¹, 刘佳鑫¹, 李珍妮¹, 云龙³, 张明棣³

(1 中国海洋大学 信息科学与工程学部 海洋技术学院, 山东 青岛 266100)

(2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

(3 深圳市环境监测中心站, 广东 深圳 518049)

摘要: 2019年9月至10月, 利用相干多普勒激光雷达在深圳石岩地区(113.9°E, 22.7°N)与深圳气象梯度塔进行了联合观测实验, 基于激光雷达后向散射强度直接反演PM2.5、PM10颗粒物浓度。反演得到的不同高度颗粒物浓度与梯度塔上颗粒物同步混合监测仪实测结果进行统计回归分析。结果表明: 本次实验中, PM2.5和PM10的反演结果与实测结果的相关性均达到0.8以上, 其中PM2.5的反演结果更好。吸湿因子分析表明, 120 m和220 m处2.5~10 μm的大颗粒物亲水性更强, 70 m处2.5 μm以下细粒子亲水性更强。颗粒物浓度反演与比对结果表明, 多普勒激光雷达可以用来观测颗粒物浓度。

关键词: 多普勒激光雷达; PM2.5浓度; PM10浓度; 回归分析法

中图分类号: X513; TN958.98

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1201005

Doppler Lidar Retrieval of Particulate Matter Concentration Based on Statistical Regression Method

CUI Likai¹, SONG Xiaoquan^{1,2}, YANG Yawen¹, LIU Jiabin¹, LI Zhenni¹,
YUN Long³, ZHANG Mingdi³

(1 College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering,
Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

(2 Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modelling, Pilot National Laboratory for
Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China)

(3 Shenzhen Environmental Monitoring Center, Shenzhen, Guangdong 518049, China)

Abstract: From September to October 2019, the coherent Doppler lidar observed and retrieved PM2.5, PM10 particulate concentrations in a joint observation campaign conducted at Shiyan (113.9°E, 22.7°N) of Shenzhen. Statistical regression analyzed the retrieval with lidar backscattering intensity and synchronized hybrid ambient real-time particulate monitor measurements from different heights of meteorological tower. Correlation coefficients of PM2.5, PM10 particulate concentrations intercomparisons between lidar and monitor reach more than 0.8, and that of PM2.5 is better. Hygroscopic growth factor analysis shows large particles of 2.5 μm~10 μm at 120 m and 220 m heights may have stronger hygroscopicity, while it is opposite for those at 70m height. Particle concentration inversion and intercomparison prove that Doppler lidar can be used to observe particle concentration.

基金项目: 国家重点研发计划(Nos.2018YFC0213101, 2016YFC1400905), 国家自然科学基金(No.61775200)

第一作者: 崔立凯(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气激光测量。Email: cuilikai@stu.ouc.edu.cn

导师(通讯作者): 宋小全(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大气激光测量。Email: songxq@ouc.edu.cn

收稿日期: 2021-06-05; 录用日期: 2021-08-08

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

Key words: Doppler lidar; PM2.5 concentration; PM10 concentration; Regression analysis method
OCIS Codes: 010.1100; 010.1110; 010.1120; 010.3640

0 引言

近年来,颗粒物污染成为一个社会热点话题。由于颗粒物污染造成的能见度降低,对人们出行造成极大影响。同时,人类身体健康也受其危害,呼吸疾病以及心血管疾病高发,甚至影响人类寿命^[1-2]。环境中颗粒物质量浓度的测定方法主要包括 β 射线吸收法、重量法以及微量震荡天平法等^[3],其中重量法的结果最为直接、可靠,其余方法需要使用重量法进行校准。这些测量结果作为颗粒物浓度的准确数值而被广泛应用^[4]。以上直接获取颗粒物浓度的设备通常只能被布置在站房、梯度塔等固定的点位进行测量,目前国内较为普遍的地面监测站点使用的就是此类测量方法。2012年开始,中国开始建立地面监测网,对重污染天气开始进行监测。然而这种方法只能提供点范围的精确测量,无法捕捉颗粒物浓度在空间和高度范围内的变化。

为解决大范围测量问题,卫星遥感获取的大气气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)被广泛应用于估算颗粒物浓度。2003年,CHU D A^[5]使用简单的线性回归模型和AOD作为主要预测因子估计PM2.5浓度。也有研究者利用AOD作为主要预测因子,结合气象参数或者统计参数来对颗粒物浓度进行预测^[6,7]。一些研究者认为AOD与PM2.5之间是更为复杂的非线性关系,从而构建了各种非线性模型^[8-10]。AOD是大气气溶胶消光系数在高度上的积分值,而用于比对或者模型计算的实测颗粒物浓度通常仅为一个空间点或地面值。利用在高度上的积分值估算某一高度的颗粒物浓度,将会带来一定的不确定性和误差。另外,利用AOD预测颗粒物浓度仅能得到一个平面的颗粒物浓度变化,而无法获得颗粒物浓度在垂直方向上的变化。

激光雷达具有时空分辨率高、方向性强、探测精度高以及可快速实时获取数据等优点,越来越广泛的应用于大气探测、环境监测等领域^[11-15]。基于米散射的激光雷达可以反演出气溶胶消光系数的垂直廓线,并且具备较高的精度,故而可以预测颗粒物浓度在垂直方向上的变化。这种特性使得激光雷达数据在反演颗粒物浓度方面有着与卫星遥感和现场仪器所不同的优势。2013年,何涛^[16]利用米散射激光雷达探测的气溶胶消光系数与铁塔上实测的PM2.5浓度进行相关性分析,并通过线性回归模型建立关系式,在不同高度上两者的相关系数超过0.9。2014年,陶宗明^[17]建立了一个集后向、侧向激光雷达以及地面PM2.5质量探测仪为一体的系统,对合肥当地PM2.5浓度与气溶胶消光系数的关系进行了分析。结果表明,气溶胶类型成分保持不变且相对湿度低于70%时,两者成正比例关系;相对湿度高于70%时,两者比例系数随相对湿度增加而增加。2015年,陶宗明^[18]使用CCD激光雷达扫描反演得到了气溶胶消光系数垂直廓线,并反演了PM2.5的浓度廓线,其结果与PM2.5监测仪器的结果一致性较好。2017年,LV L^[19]利用车载移动激光雷达系统测量反演得到气溶胶消光系数,通过线性回归模型反演得到PM2.5浓度。与WRF模型反演得到的PM2.5浓度进行相关性分析发现,在相对湿度小于90%的条件下,两者相关系数均高于0.9;同时提出,在华北地区,当相对湿度小于90%时,不需要考虑相对湿度的影响。多普勒激光雷达可以测量风速风向等风场和风廓线等信息^[20],但机制上仍然是利用了气溶胶作为示踪物获取其米散射信号,因此可以利用多普勒激光雷达后向散射强度来获取颗粒物浓度。本实验中所使用的相干多普勒激光雷达波长为1.5 μm ,较之常用的米散射激光雷达如532 nm等波长更长。系统接收的信号中主要以米散射为主,大气分子瑞利散射贡献很少,因此相干多普勒激光雷达气溶胶测量结果中分子散射干扰更小。

本研究针对2019年9月至10月在深圳石岩地区进行的一次联合观测实验,研究多普勒激光雷达获取颗粒物浓度的方法及其结果与现场监测仪器的比对情况。该次实验将多普勒激光雷达放置在深圳气象梯度塔同址附近,利用多普勒激光雷达测得的后向散射强度来反演颗粒物浓度,并与气象梯度塔上放置的颗粒物监测仪实测结果进行比较。同时,利用梯度塔上安装的气象要素监测设备结果,进一步分析和修正了气象要素对多普勒激光雷达反演颗粒物浓度结果的影响。

1 资料与方法

1.1 观测地点及观测资料

2019年9月9日至10月7日,利用相干多普勒激光雷达系统在深圳石岩综合观测基地(113.9°E,22.7°N)和气象梯度塔进行了联合观测实验,如图1。深圳石岩气象梯度塔高达356 m,塔上分多层高度安装有气象、环境等监测仪器。气象监测要素包括:风速、风向、温度、相对湿度、气压、能见度等;环境方面可以监测PM2.5、PM10等污染物的质量浓度信息。

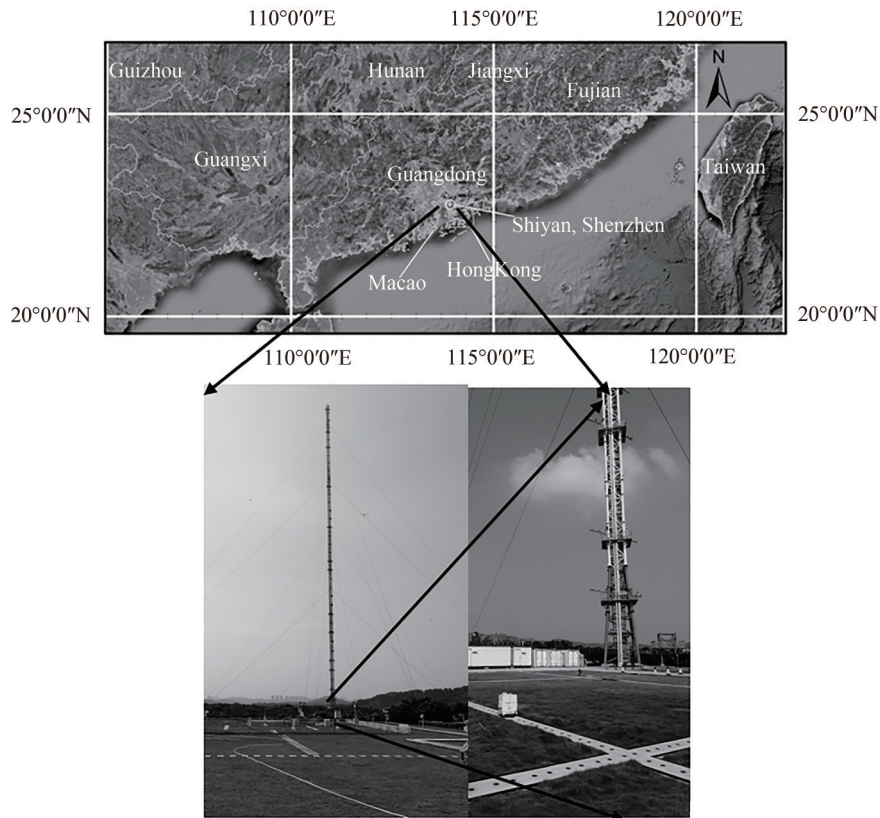


图1 实验位置与照片

Fig. 1 Experiment location map and photos

本次联合观测实验中的相干多普勒激光雷达系统采用中国海洋大学与青岛镭测创芯科技有限公司联合研制的WindMast WP350型相干测风激光雷达^[21],表1为其性能技术指标。该系统用于探测风速、风向、风切变、垂直气流、大气湍流强度以及气溶胶后向散射强度等信息,其较低的观测盲区有利于与梯度塔的观测数据进行比对和分析。

表1 WindMast WP350技术指标

Table 1 Technical specifications of WindMast WP350

Parameters	Value
Laser wavelength	1.5 μm
Probe height range	20 m~350 m
Spatial resolution	1 m
Refresh time	1 s~10 min
Wind speed measurement range	0~75 m·s ⁻¹
Wind speed precision	≤0.1 m·s ⁻¹
Wind direction precision	<3°
Weight	<30 kg

同步比对实验中,当地环境气象数据来自梯度塔上安装的WXT520气象传感器,高度分别为50 m、100 m、200 m;颗粒物浓度数据来自Thermo 5030i颗粒物同步混合监测仪,高度分别为60 m、70 m、110 m、120 m、210 m、220 m。多普勒激光雷达放置在距离梯度塔东南方向约50 m距离处的地面,激光束以固定仰角出射进入大气。将接收和探测到的后向散射强度数据折算到垂直高度上,依次选取高度为60 m、70 m、120 m、200 m的数据结果进行同步比对分析。由此可以看出,选取同一高度的颗粒物浓度数据、环境气象数据、激光雷达后向散射强度数据时,实际高度和真实空间距离略有差异。考虑到参与比对分析的数据为5 min平均结果,在保证各传感器结果尽可能选择相接近高度的情况下,忽略由于高度及距离之间存在的差异和由此带来的误差。数据经过筛选以及时空匹配后,有效数据情况如表2所示。

表2 实验有效比对数据
Table 2 Experimental data for comparison

Data	Measuring instruments	Resolution	Numbers	Height/m
Backward scattering intensity	WP350		37 440	60, 70, 120, 200
Relative humidity	WXT520	5 min	28 038	50, 100, 200
PM2.5 concentration	Thermo5030i		16 761	70, 120, 220
PM10 concentration			16 745	60, 110, 210

1.2 数据反演与修正方法

1.2.1 多普勒激光雷达反演颗粒物浓度方法

根据激光雷达方程,激光雷达系统接收到的不同高度的信号强度表示为

$$E_r(z) = E \frac{CA}{z^2} \beta(z) T^2(z) \quad (1)$$

式中, $E_r(z)$ 是从距离 z 处接收到的瞬时信号功率或强度; E 为激光发射功率或能量; C 表示系统常数; A 为接收望远镜孔径; z 表示距离; $\beta(z)$ 是距离 z 处的某气团后向散射系数; $T^2(z)$ 为双程大气透射率,代表在不同探测距离处,系统到探测距离之间大气的衰减。

大气衰减后向散射系数 $\beta'(z)$ 可表示为

$$\beta'(z) = \beta(z) T^2(z) \quad (2)$$

实际大气环境中空气分子衰减后向散射系数远小于气溶胶衰减后向散射系数,将前者忽略不计。YOSHITAKA Jin等^[22]的研究表明 $\beta'(z)$ 的垂直廓线可以很好的表示气溶胶浓度的垂直廓线。根据实验结果,当气溶胶的浓度增大时,式(2)中 $\beta(z)$ 值增大, $T^2(z)$ 值减小,而两者的乘积 $\beta'(z)$ 在增大。这说明气溶胶浓度变化时,气溶胶后向散射系数 $\beta(z)$ 的相对变化大于 $T^2(z)$ 的相对变化。此外,本系统所使用的1.5 μm 在同等大气条件下通常较可见光穿透性更好,用于比对的各数据高度其距离间隔较小, $T^2(z)$ 变化较小。故本研究忽略相近距离处的 $T^2(z)$ 变化,将 $\beta'(z)$ 与后向散射系数 $\beta(z)$ 之间的关系近似为正比例关系。从2.2部分的结果中也可以看出假设的合理性。

多普勒激光雷达测量获得的后向散射强度 $R_{SN}(z)$,与该距离 z 处大气衰减后向散射系数 $\beta'(z)$ 之间的关系^[23]为

$$\beta'(z) = \frac{8hvBz^2 R_{SN}(z)}{\eta_D(z) E \pi D^2} \quad (3)$$

式中, h 为普朗克常量; v 为激光频率; B 为探测器带宽; D 为发射激光高斯光束直径; $\eta_D(z)$ 为系统效率因子,根据KAMEYAMA S等的研究^[23],将其假定为常数。

由于相干多普勒激光雷达系统采用收发同轴,几何重叠因子中的完全盲区与过渡区相对较小,且从不同高度处接收到的回波信号强弱不同。图2为WP350多普勒激光雷达的几何重叠因子,盲区约为0~10 m,聚焦高度约为130 m,实验对各高度观测结果进行了几何重叠因子校正。本系统回波信号是聚焦式接收,其设置类似于闫宝东在设计脉冲光纤相干测风激光雷达^[24]中提及的情况,由于回波信号的聚焦点与光纤耦合情况不同而导致近场与远场回波信号的几何因子均不为1。经几何因子校正后的后向散射强度用 R'_{SN} 来表示。

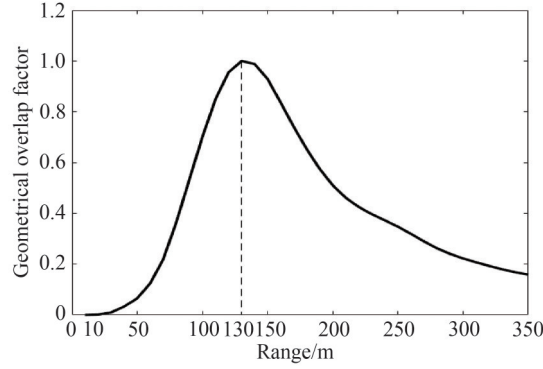


图2 几何重叠因子

Fig. 2 Geometrical overlap factor

在确定激光雷达系统各参数且 R_{SN} 经过几何因子校正后, R'_{SN} 仅与大气条件有关,其变化可用于获取和分析大气颗粒物参数。式(2)与式(3)联立可得

$$\beta(z) = K_c R''_{SN}(z) \quad (4)$$

式中, $R''_{SN}(z) = z^2 R'_{SN}(z)$ 为经距离平方校正后的后向散射强度, $K_c = \frac{8hvB}{\eta_D(z)E\pi D^2 T^2(z)}$ 在有限高度范围内假定为常数。该式说明 $R''_{SN}(z)$ 可用来表征后向散射系数 $\beta(z)$ 的变化。

空气中存在水汽,气溶胶粒子直径会因为吸收水汽而增大,从而导致气溶胶后向散射系数发生变化。故定义吸湿增长因子 $f(RH)$ 为

$$f(RH) = \frac{\beta(z)}{\beta_{dry}(z)} \quad (5)$$

式中, $\beta_{dry}(z)$ 为干气溶胶后向散射系数。张辉等^[25]使用波长为 532 nm 的激光雷达获得气溶胶后向散射系数廓线,用其去反演 PM2.5 浓度廓线。其中 PM2.5 与气溶胶后向散射系数 $\beta(z)$ 之间的关系可表示为

$$C_{PM2.5}(z) = \frac{16\pi r_{eff} \bar{\rho} k_{PM2.5}}{3P(\pi) \bar{Q}_s} \beta(z) \quad (6)$$

式中, r_{eff} 为粒子的有效半径; \bar{Q}_s 为干气溶胶粒子的整体散射效率因子,该项随波长变长而变小,同时气溶胶散射系数 $\beta(z)$ 也越小; $P(\pi)$ 为气溶胶后向散射相函数; $\bar{\rho}$ 为干气溶胶粒子的平均密度; $k_{PM2.5}$ 为大气中 PM2.5 与所有干颗粒物质量浓度的比值。

将式(4)代入式(6)可得 PM2.5 与激光雷达后向散射强度之间的关系为

$$C_{PM2.5} = \frac{K_c 16\pi r_{eff} \bar{\rho} k_{PM2.5}}{3P(\pi) \bar{Q}_s f(RH)} R''_{SN}(z) = K_{PM2.5} R''_{SN}(z) / f(RH) \quad (7)$$

式中,比例系数 $K_{PM2.5} = \frac{16K_c \pi r_{eff} \bar{\rho} k_{PM2.5}}{3P(\pi) \bar{Q}_s}$, 是由气溶胶种类、折射率指数、谱分布等参数决定的常数,可随时间和地点变化且不同于气溶胶消光系数与颗粒物浓度的比例常数。

同理可得 PM10 与后向散射强度之间的关系表示为

$$C_{PM10} = K_{PM10} R''_{SN}(z) / f(RH) \quad (8)$$

式中,比例系数 $K_{PM10} = \frac{16K_c \pi r_{eff} \bar{\rho} k_{PM10}}{3P(\pi) \bar{Q}_s}$ 。激光雷达接收到的信号中包含所有粒径颗粒物的散射,由于 $K_{PM2.5}$ 、

K_{PM10} 中存在多个需要实际观测才可求出的常数值,故无法计算出 $k_{PM2.5}$ 、 k_{PM10} 的具体值,无法准确区分 PM2.5 和 PM10 的贡献。这里引入 PM2.5/PM10 颗粒物浓度与 PM 颗粒物浓度的比值,构建不同的比例系数,从而分别反演 PM2.5/PM10 的颗粒物浓度。尽管气溶胶的类型及分布随季节更替会发生明显的变化,但颗粒物浓度与激光雷达回波信号强度模型仍具有适用性,需重新进行线性回归计算回归系数 K_{PM10} 、 $K_{PM2.5}$ 、 g_0 。

1.2.2 湿度修正模型

陶金花等^[26]总结了目前国际上关于气溶胶散射吸湿增长因子 $f(\text{RH})$ 随相对湿度 RH 的变化关系,研究表明在北京地区三种吸湿增长模型的适用性差别不大。由于其中两种模型均为另一种模型的变体,故本研究选取其中基础的湿度修正模型对观测数据进行修正,如式(9)所示。这一半经验模型最早由KASTEN F^[27]在1969年提出, g 为经验系数,随气溶胶粒径分布以及气溶胶类型不同而变化。美国IMPROVE监测网也采用此模型,对气溶胶和相对湿度的关系进行拟合。

$$f(\text{RH})=(1-\text{RH})^{-g} \quad (9)$$

参考张辉等^[25]的研究结果对该模型进行了调整,相对湿度低于40%时不考虑湿度修正,高于40%时考虑湿度修正,公式为

$$f(\text{RH})=\begin{cases} (1+40\%-\text{RH})^{-g} & \text{RH} \geq 40\% \\ 1 & \text{RH} < 40\% \end{cases} \quad (10)$$

2 结果比对

2.1 线性回归结果

不考虑相对湿度的影响时,对70 m、120 m、220 m梯度塔三个高度上颗粒物浓度测量数据与激光雷达后向散射强度进行线性回归分析。由于激光雷达的测量特点,需对其后向散射强度信号进行距离平方校正后再进行分析。回归结果如图3所示,其中横轴为后向散射强度数据,纵轴为梯度塔上实际测量得到的颗粒物质量浓度。其回归公式分别为

$$C_{\text{PM}_{2.5}}=0.023R_{\text{SN}}'' \quad (11)$$

$$C_{\text{PM}_{10}}=0.025R_{\text{SN}}'' \quad (12)$$

可以看出,不考虑相对湿度影响时,PM_{2.5}颗粒物浓度与激光雷达后向散射强度之间存在较高的一致性,相关系数达到0.76(通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验)。PM₁₀与后向散射强度的回归方程也能通过显著性检验,但相关系数仅为0.25。

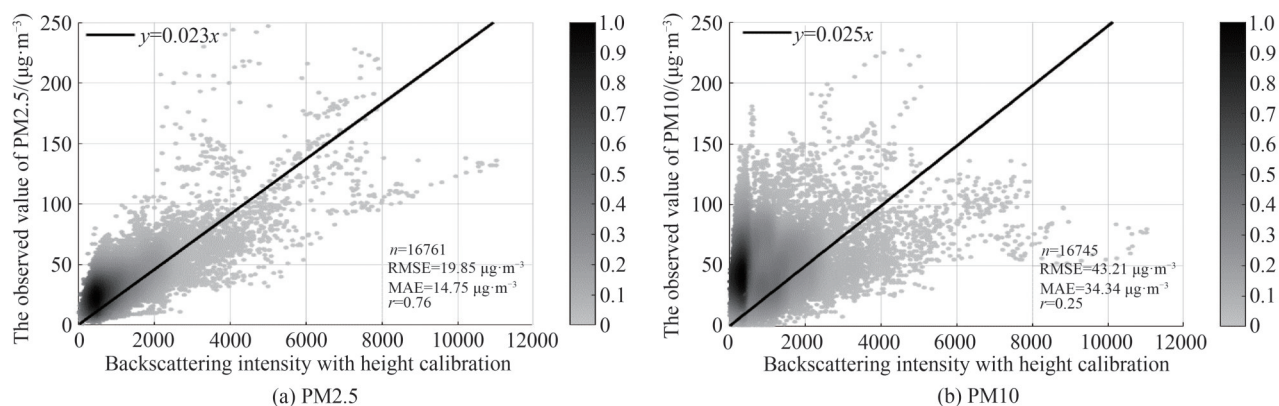


图3 所有高度测量数据共同回归结果

Fig.3 Regression results of measurements from all heights.

表3 各高度颗粒物数据分别进行回归结果

Table 3 Regression results of each height PM

PM	PM _{2.5}			PM ₁₀		
Height/m	70	120	220	70	120	220
RMSE/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	13.01	15.35	16.21	27.54	23.74	31.76
MAE/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	9.68	11.24	10.44	20.84	18.3	24.03
r	0.68	0.85	0.78	0.58	0.58	0.54

为了查看三个高度结果的差异性,进一步将三个高度分别进行回归分析。在不考虑湿度修正的情况下,利用线性回归模型进行反演,回归结果如表3所示。

由表3可以看出,相比于所有高度数据一起回归的结果,分高度进行回归分析PM2.5的结果变化不大,PM10结果的相关系数从0.25提升到0.5以上。另外不同高度的回归结果有所差异,推测可能是因为气溶胶的吸湿增长及气溶胶分布不均引起的。

2.2 湿度修正后回归结果

根据张辉等^[25]的研究显示,在相对湿度 $RH < 40\%$ 时,不需考虑湿度修正,散射吸湿因子 $f(RH) \approx 1$ 。由于实验在深圳地区夏秋季进行,本文重点研究 $RH \geq 40\%$ 时的测量结果。观测期间 $RH < 40\%$ 的数据所占比例小于10%,故这部分的反演结果未列出。

当相对湿度 $RH \geq 40\%$ 时,气溶胶粒子半径通常随相对湿度增加呈现一定规律性增长。将经过距离平方校正的后向散射强度、相对湿度以及颗粒物质量浓度代入经过湿度修正的回归模型进行回归分析,回归模型分别如式(13)、式(14)所示,结果如图4所示。其中图4(a)为经湿度修正后PM2.5的回归结果,图4(b)为经湿度修正后PM10的回归结果。

$$C_{PM2.5} = 0.030R_{SN}''(1.4 - RH)^{0.647} \quad (13)$$

$$C_{PM10} = 0.051R_{SN}''(1.4 - RH)^{1.839} \quad (14)$$

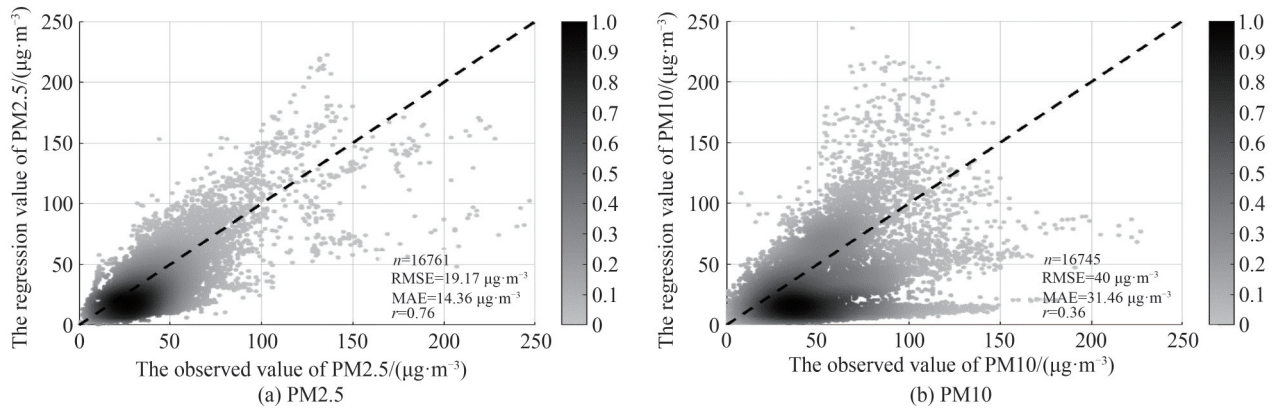
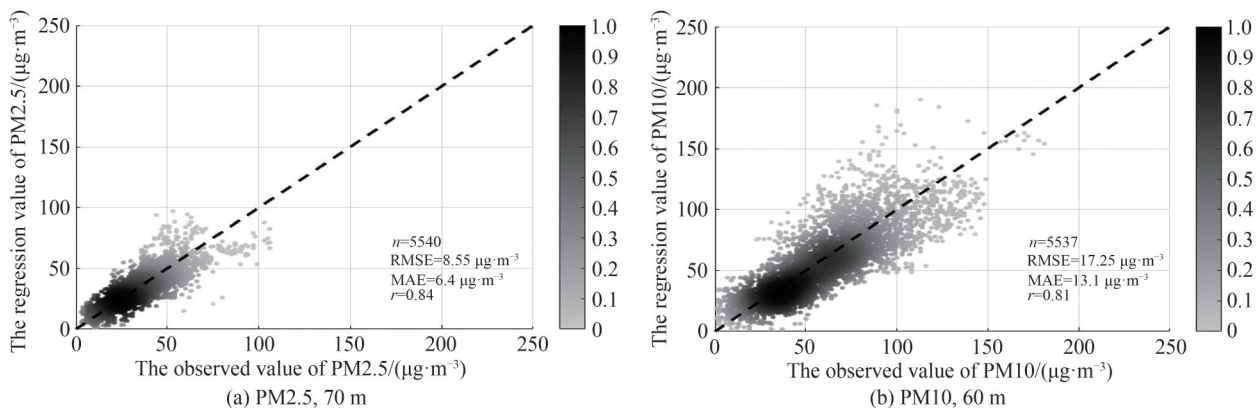


图4 所有高度测量数据相对湿度修正后共同回归结果

Fig.4 Regression results of measurements from all heights after relative humidity correction.

图4和图3对比可以看出,PM2.5回归结果中相关系数均为0.76, RMSE从 $19.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低到 $19.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, MAE从 $14.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低到 $14.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$,相比于湿度修正前的结果并无明显提升。而在PM10的反演中,相关系数在湿度修正后从0.25提升到0.36, RMSE和MAE也有接近 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的降低,结果有了一定程度的提升。

加入湿度修正模型之后,基于历史测量结果与回归模型对各个高度PM2.5和PM10分别进行回归分析,结果如图5所示。图5(a)、(c)、(e)分别为湿度修正后PM2.5的回归结果,可以看到,加入湿度修正后各高度回归结果均有了明显提升。70 m高度的结果提升最明显,相关系数从0.68提升到0.84,其余两个高度相关系数仅提升约0.02左右。图5(b)、(d)、(f)分别为湿度修正后PM10的回归结果,从结果中可以看到,相关系数分别达到0.81、0.83、0.79,通过 $\alpha = 0.001$ 显著性检验。该结果比湿度修正之前均提升了约0.25,提升幅度



高于PM2.5的反演结果,这也从一定程度说明PM10的回归结果受相对湿度的影响更大。对同一波长而言,粒径较小的颗粒物散射将更类似于细粒子、类球形程度更好,粒径较大的颗粒物散射因类球形程度趋差,散射更加复杂和不规则。为了进一步分析提升的原因,接下来对吸湿因子的影响进行讨论。

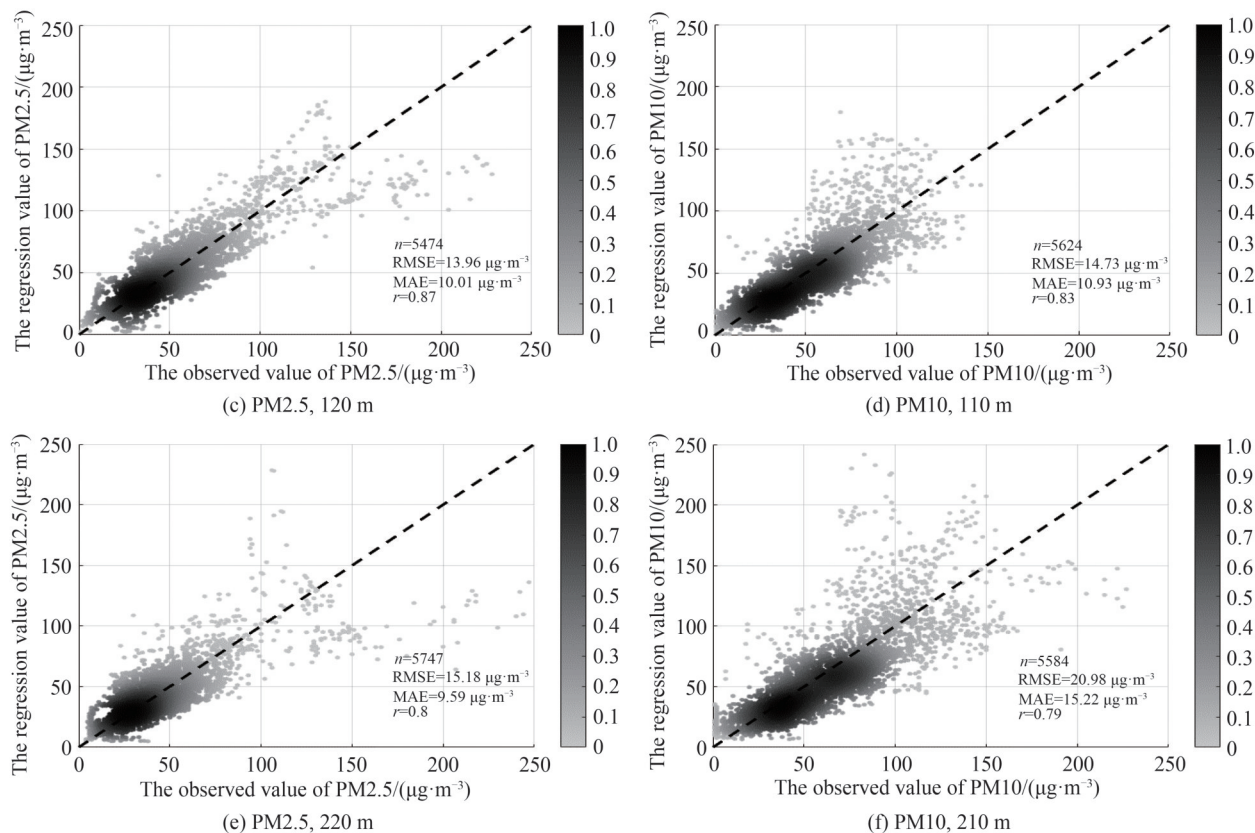


图5 湿度修正后各高度颗粒物回归结果

Fig.5 The regression results of the humidity corrected particulate matter at various heights

2.3 吸湿因子分析

利用三个不同高度的回归结果分别得出各自高度上吸湿因子随相对湿度的变化情况,如图6所示。

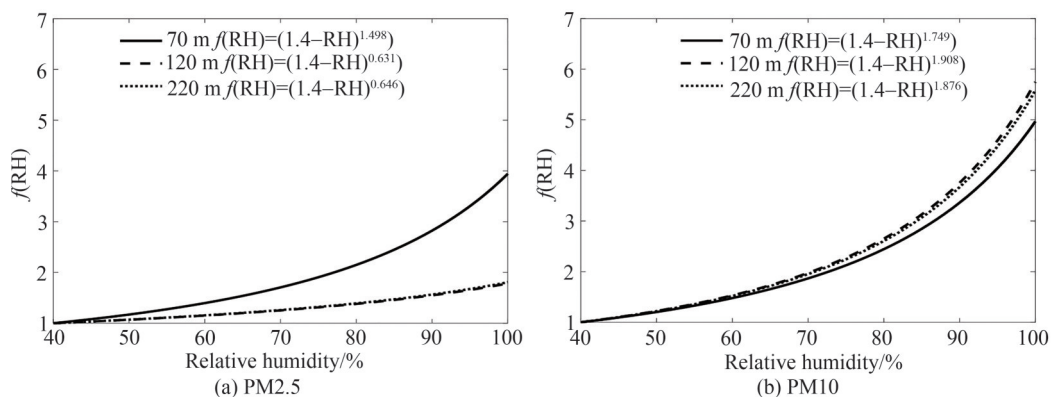


图6 各高度吸湿因子模型

Fig.6 Moisture absorption factor model for each height

图6(a)为反演PM2.5时,湿度修正模型的结果。可以看出,随着相对湿度的增加,70 m高度吸湿因子增长最为剧烈;120 m和220 m高度的变化趋势较为接近且增速低于70 m处。70 m高度的气溶胶类型明显不同于其余两个高度,这在一定程度上表明,同一地点、不同高度的气溶胶类型可能存在差异,70 m高度的

PM_{2.5}气溶胶亲水性比其它两个高度更强。图6(b)为反演PM₁₀时,湿度修正模型的结果。可以看出,各个高度的吸湿因子都是在RH = 75%左右时增速开始加快。3个高度的吸湿因子都较为接近,可以认为在直径10 μm以下的气溶胶颗粒物中,三个高度的亲水性大致相同。从数值上看,120 m和220 m的吸湿因子稍大一些。

PM_{2.5}和PM₁₀的吸湿模型对比可以发现,70 m高度处的吸湿因子变化最小,从3.9增加到5。而120 m和220 m高度处气溶胶的吸湿因子变化很大,从1.7左右增加到5.5左右。简单起见,用PM_{2.5}和PM₁₀的浓度之比的均值作为粒子分布比例,在70 m、120 m、220 m高度上PM_{2.5}占比分别为50%,66%,56%。这表明,在粒子数量比例相差不大的情况下,2.5 μm以下的细粒子中,70 m处亲水性更强;而在2.5~10 μm的粗粒子中,120 m和220 m的亲水性较强。不同高度处的粒子亲水性、种类和分布不同,可能是PM₁₀在分高度回归前后结果有明显变化,无法用所有高度数据一起进行回归分析。

3 结论

多普勒激光雷达可以探测气溶胶的后向散射强度廓线,利用该信息与颗粒物质量浓度在不同气象条件下进行模型回归分析,可以获得颗粒物质量浓度随高度变化的廓线。这种方法避免反演气溶胶后向散射系数,整个过程反演更加直接。直接使用多普勒激光雷达探测的气溶胶后向散射强度反演颗粒物浓度,在考虑湿度修正后的回归分析中,PM_{2.5}的反演结果与实测结果的相关性可达到0.85左右,PM₁₀的结果也可达到0.8左右。激光雷达的后向散射强度与PM_{2.5}的相关性更高,PM_{2.5}的反演结果比PM₁₀的结果更好。对吸湿因子进行分析时发现,在深圳石岩地区2019年9月至10月观测过程中,各层的粒子分布可能存在相同的情况。120 m和220 m处,2.5 μm~10 μm的粗粒子亲水性较强;70 m处,2.5 μm以下的细粒子亲水性较强。

参考文献

- [1] CHEN Y, EBENSTEIN A, GREENSTONE M, et al. Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(32):1300018110.
- [2] BRAUER M, AMANN M, BURNETT R, et al. Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 46: 652-660.
- [3] FU Minning, ZHENG Youfei, XU Xingsheng, et al. Advances of study on monitoring and evaluation of PM_{2.5}[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, (4): 1-6.
傅敏宁, 郑有飞, 徐星生, 等. PM_{2.5}监测及评价研究进展[J]. 气象与减灾研究, 2011, (4): 1-6.
- [4] XU Jing, DING Guoan, YAN Peng, et al. Componential characteristics and sources identification of PM_{2.5} in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5): 645-654.
徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区PM_{2.5}的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 645-654.
- [5] CHU D A, KAUFMAN Y J, ZIBORDI G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2003, 108(D21): 4661.
- [6] ZHENG C, ZHAO C, ZHU Y, et al. Analysis of influential factors for the relationship between PM_{2.5} and AOD in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2017, 17: 1-57.
- [7] SHI Yiqiang, CHEN Jiongfeng, WANG Jian. Spatial and temporal characteristics and correlation of MODIS aerosol optical depth and PM_{2.5} concentration over Xiamen City[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(5): 334-346.
施益强, 陈炯烽, 王坚, 等. 厦门市MODIS气溶胶光学厚度与PM_{2.5}的时空特征及其相关性[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(5): 334-346.
- [8] WU J, YAO F, LI W, et al. VIIRS-based remote sensing estimation of ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing - Tianjin - Hebei: A spatiotemporal statistical model[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 316-328.
- [9] MA Z, LIU Y, ZHAO Q, et al. Satellite-derived high resolution PM_{2.5} concentrations in Yangtze River Delta Region of China using improved linear mixed effects model[J]. Atmospheric Environment, 2016, 133: 156-164.
- [10] KLOOG I, KOUTRAKIS P, COULL B A, et al. Assessing temporally and spatially resolved PM_{2.5} exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(35): 6267-6275.
- [11] HAN D, LIU W, JUN Y, et al. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution based on extinction -

- art. no. 68240Y[C]. SPIE, 2008, 6824.
- [12] ENGELMANN R, WANDINGER U, ANSMANN A, et al. Lidar observations of the vertical aerosol flux in the planetary boundary layer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25: 1296-1306.
- [13] SUN Peiyu, YUAN Kee, YANG Jie, et al. Measurement of extinction coefficient of near-surface aerosol by CCD lidar in the daytime[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0301001.
孙培育,苑克娥,杨杰,等. CCD激光雷达探测白天近地面气溶胶消光系数[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0301001.
- [14] XIONG Xinglong, LI Yongdong, 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.
- [15] GAO Fei, LI Wanwan, NAN Hengshuai, et al. Fine detection of aerosol in the lower troposphere using twin scanning lidars[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0912008.
高飞,李婉婉,南恒帅,等. 双扫描激光雷达精细探测低层大气气溶胶方法[J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 0912008.
- [16] HE Tao, HOU Lujian, LV Bo, et al. Study of accuracy of lidar inversion PM_{2.5} concentration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何涛,侯鲁健,吕波,等. 激光雷达探测反演PM_{2.5}浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- [17] TAO Zongming, MA Xiaomin, 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.
- [18] TAO Z, WANG Z, YANG S, et al. Profiling the PM_{2.5} mass concentration vertical distribution in the boundary layer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2015, 8: 12933-12953.
- [19] LV L, LIU W, CHEN Z, et al. Observations of particle extinction, PM_{2.5} mass concentration profile and flux in north China based on mobile lidar technique[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164(9):360-369.
- [20] YANG Wuhao, ZHANG Pu, YANG Xinfeng, et al. Performance optimization and experimental research of continuous wave coherent wind lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0401004.
杨昊昊,张普,杨新锋,等. 连续模式相干测风激光雷达性能优化分析及实验研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0401004.
- [21] LEICE. Description of vertical profile wind measuring lidar Windmast WP350[EB/OL]. [2021-05-12]. <http://www.leice-lidar.com/product-67-146.html>.
青岛镭测创芯科技有限公司. 垂直廓线型激光测风雷达 WindMast WP350 产品说明[EB/OL]. [2021-05-12]. <http://www.leice-lidar.com/product-67-146.html>.
- [22] YOSHITAKA J, NOBUO S, ATSUSHI S, et al. Evaluation of ceilometer attenuated backscattering coefficients for aerosol profile measurement[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12: 042604.
- [23] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [24] YAN Baodong. Preliminary design of fiber pulsed coherent wind lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
闫宝东. 脉冲光纤相干测风激光雷达初步设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [25] ZHANG Hui, TAO Zongming, MA Xiaomin, 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): 0704006.
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): 0704006.
- [26] TAO Jinhua, WANG Zifeng, XU Qian, et al. Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 12-24.
陶金花,王子峰,徐谦,等. 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究[J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 12-24.
- [27] KASTEN F. Visibility forecast in the phase of pre-condensation[J]. *Tellus*, 1969, 21: 631-635.