

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.004

# 高影响霾天气污染物输送沉降的 激光雷达观测

毛敏娟<sup>1\*</sup>, 刘厚通<sup>2\*</sup>, 邓芳萍<sup>1</sup>, 董一雷<sup>1</sup>

(1 浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310008;

2 安徽工业大学数理学院应用物理系, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:** 污染物区域间输送是大气环境研究的重点和难点。利用2012—2015年间浙江省污染程度较高的霾天气过程激光雷达观测数据, 根据Mie散射理论和Fernald反演方法计算污染物垂直浓度, 开展了高影响霾天气区域间污染物输送沉降特征定量研究。结果表明: (1) 浙江省高影响霾天气多发生于高压前部转高压控制的情况, 高压前部利于外来污染物输入, 而高压控制利于本地污染物累积; (2) 不同过程及同一过程不同时刻外来污染物输送高度、质量浓度、结构组成都不相同, 污染物集中输送高度一般介于4.5~7.5 km之间, 输入最大质量浓度一般介于450~1200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 输入污染物中粗颗粒物居多, 污染物类型主要包括沙尘和城市污染物; (3) 个例分析表明, 输入污染物仅有25%~35%沉降在近地面, 重力和气温下降是影响沉降的重要原因, 其中重力对粗颗粒物沉降作用更大, 而气温下降对细颗粒物作用更大。

**关键词:** 激光雷达; 微波辐射计; Mie散射; 输送; 沉降

中图分类号: P407.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-541-012

## Lidar observation of pollutant transport and deposition in high impact haze weather

MAO Minjuan<sup>1\*</sup>, LIU Houtong<sup>2\*</sup>, DENG Fangping<sup>1</sup>, DONG Yilei<sup>1</sup>

(1 Zhejiang Institute of Meteorology Science, Hangzhou 310008, China;

2 College of Mathematics, Physics and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

**Abstract:** Inter-regional transport of pollutants is an important and difficult problem in atmospheric environment research. Based on lidar observation data of haze weather processes with high pollution levels in Zhejiang Province, China, from 2012 to 2015, aerosol vertical mass concentration in the region during the period were retrieved and the corresponding inter-regional transport of pollutants in high impact haze weather was studied quantitatively using Mie's theory and Fernald inversion method. The results show that: (1) high impact haze weather in Zhejiang during the period mostly occurs when high-pressure front turns to high-pressure control. High-pressure front is conducive to foreign pollutant input, while high-pressure control is conducive to local pollutant accumulation. (2) The transport height, mass concentration and

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41475134), 浙江省公益性社会发展面上项目(LGF22D050002)

作者简介: 毛敏娟(1971-), 浙江衢州人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境气象、大气遥感探测研究。E-mail: mayammj@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-04-13; 修改日期: 2022-09-02

\*通信作者。E-mail: mayammj@mail.ustc.edu.cn; liuhoutong@163.com

composition of foreign pollutants vary in different high impact haze processes and even different moments in the same process. The variations of transport height and mass concentration of foreign pollutants are generally from 4.5 to 7.5 km and 450 to 1200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Meanwhile, the input pollutants are mainly coarse particles, and the types of pollutants are dominated by sand dust and urban pollutants. (3) Case study shows that only 25 to 35 percent of the input pollutants settles to the near-surface layer. Gravity and temperature decline are the important factors affecting deposition. Comparatively, gravity has a greater effect on the deposition of coarse particles, while air temperature decline has a greater effect on that of fine particles.

**Key words:** lidar; microwave radiometer; Mie scattering; transport; deposition

## 0 引言

过去 10 年我国大气污染问题备受大家关注<sup>[1-3]</sup>, 业界开展了很多的相关研究, 主要包括大气污染时空分布<sup>[4]</sup>、成因<sup>[5]</sup>、化学组成<sup>[6-8]</sup>、吸湿增长特性<sup>[9,10]</sup>、热效应<sup>[11]</sup>等理化特性, 近两年对臭氧污染<sup>[12-14]</sup>、健康效应<sup>[15]</sup>等的研究亦逐渐增多。

区域间污染输送特征的定量研究一直是难点, 但其对大气污染综合控制和管理有重要意义。目前开展污染物输送研究的手段主要有卫星观测和数值模拟。如韩国 Lee 等<sup>[16]</sup>利用卫星观测资料, 研究了发生在韩国的两次重霾污染过程, 认为我国东部污染物的输入对过程发生有影响。王世强等<sup>[17]</sup>利用美国国家环境预报中心 (NCEP) 气象要素资料研究了广州地区污染物输送通道垂直特征。Shindell 等<sup>[18]</sup>利用多个模式评估了欧洲、东南亚及北美污染物输送对北极的影响。Bella 等<sup>[19]</sup>利用数值模拟、卫星观测等分析了远距离输入对得克萨斯大气污染的影响。张志刚等<sup>[20]</sup>利用二维欧拉统计模式研究了华北地区城市之间大气污染的相互影响和输送问题。王艳等<sup>[21]</sup>利用区域中尺度大气数值预报模式 MM5 证实了长三角污染过程伴随着东北主频气流的“外源”输入现象。卫星观测受云等影响较大, 其中被动遥感只能获得整层结果, 主动遥感时效性差, 数值模式则将大气边界层做整层处理, 而激光雷达观测不仅可以获得气溶胶垂直分布特征, 且时效性好。

激光雷达是研究大气边界层结构和污染物时空分布的观测手段。Comerón 等<sup>[22]</sup>探讨了激光雷达在大气气溶胶遥感中的应用。Pal 等<sup>[23]</sup>利用激光雷达观测结果研究了大气气溶胶对边界层变化的影响。Voss 等<sup>[24]</sup>将激光雷达用于美国的气溶胶 99 巡航联合观测 (Aerosol99), 以获取大气气溶胶垂直分布等信息。Deng 等<sup>[25]</sup>利用激光雷达和微波辐射计观测资料分析了广州地区重霾天气大气边界层高度变化及气象条件与能见度之间的关系。Liu 等<sup>[26]</sup>利用高光谱激光雷达分析了云和气溶胶的光学特性。此外还有利用激光雷达反演气溶胶类型的方法研究<sup>[27]</sup>, 而将激光雷达用于区域污染物输送特征的研究并不多。虽然马娜等<sup>[28]</sup>利用星载和地基激光雷达观测网定性分析了发生于京津冀的一次污染过程, 获得了污染前期为局地污染物累积、中期为区域输送的特征, 但没有就污染物输送浓度变化开展定量分析。在浙江省开展区域污染物输送特征的相关研究尤其是定量研究很少。

浙江省高影响霾天气一般伴随着明显的污染物区域输送, 便于开展区域污染物输送特征研究。此处的高影响霾天气过程指时间持续 48 h 以上、AQI > 200 至少持续 6 h 以上、至少有 3 个地区同时发生的大气污染

过程。本文将融合近地面大气成分观测资料,利用激光雷达开展污染物质量浓度定量计算、组成结构性分析方法的研究,及高影响霾天气区域间输送、沉降特性的探索。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据观测

浙江省地处长三角南翼,下垫面包括浙北平原、浙东沿海、浙西丘陵等各种地型,北部地区地势相对低而平坦,在冬季盛行偏北风情况下,容易将北方污染物“引入”这些区域,而南部地区因山脉阻挡,加上偏北风在南下过程中不断减弱,受外来输入影响相对较弱,因此浙北平原是研究外来污染物输送的理想区域。

处于浙北地区的杭州馒头山(120.15° E、30.28° N)和临安(119.72° E、30.23° N)分别为国家气象基准站和区域大气本底站,直线距离40 km左右,都安装有激光雷达、微波辐射计、颗粒物在线监测仪等仪器。两个站点安装的激光雷达分别为Sigma Space公司生产的微脉冲激光雷达(MPL)和中国海洋大学研发的拉曼偏振激光雷达。MPL技术参数可参见相关产品技术手册([www.micropulselidar.com](http://www.micropulselidar.com)),除后向散射系数、消光系数等参数外还能获得色比等参数,用于定性判断气溶胶粒子的大小。拉曼偏振激光雷达探测波长皆为532 nm,分拉曼、垂直和水平三个通道,激光发射频率分别为2500 Hz和20 Hz,脉冲能量分别为6~8  $\mu\text{J}$ 和57 mJ,拉曼通道可以获得激光雷达比,垂直和水平通道可以获得退偏振比,用于判断气溶胶粒子形状。结合两个激光雷达的观测参数,可以判断气溶胶粒子类型。

使用地面 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度观测资料检验激光雷达反演大气气溶胶质量浓度的准确性;使用无机水溶性离子浓度等观测资料,建立不同类型大气气溶胶退偏振比和雷达比落区。采用美国THEMRO公司的TEOM 1400a在线监测仪进行 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 观测,监测精度为0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;采用美国URG-9000系列气溶胶离子实时在线监测仪对无机水溶性离子(如 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 离子)的质量浓度进行观测,监测精度可达0.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图1为主要观测仪器,皆由专业仪器公司进行日常维护,并定期进行标校。

同站点还安装了美国Radiometric Corporation公司生产的MP-3000A型微波辐射计,其具有51~59 GHz和22~30 GHz二重波段,共计35个通道,可用于大气温度、相对湿度、水汽和液态水含量的探测。探测高度从地面至10 km高空,廓线0~500 m高度上每50 m输出一组数据,2~10 km每250 m输出一组数据,共58个反演层的温度、相对湿度、水汽密度和液态水含量(绝对湿度)。



图1 微脉冲激光雷达(a)、TEOM 1400a在线监测仪(b)和URG-9000在线监测仪(c)

Fig. 1 MPL (a), TEOM 1400a (b) and URG-9000 (c) on-line monitor meters

## 1.2 数据处理方法

激光雷达探测气溶胶的方程为

$$P = P_0 C R^{-2} (\beta_a + \beta_m) T_a^2 T_m^2, \quad (1)$$

式中  $P$  是激光雷达接收到某一距离处气溶胶粒子和空气分子的后向散射回波信号,  $P_0$  是激光发射功率,  $C$  为激光雷达系统常数,  $\beta_a$  和  $\beta_m$  分别为对应距离处气溶胶粒子和空气分子后向散射系数,  $T_a$  和  $T_m$  分别为气溶胶粒子和空气分子透过率。原始回波信号用几何因子修订后, 利用 Fernald<sup>[29]</sup>、Klett<sup>[30]</sup> 等反演方法<sup>[31]</sup>, 在激光雷达探测范围内选取合适的标定高度, 通过前后向递推可以获得不同高度气溶胶消光系数  $\sigma$  等。根据米散射理论, 气溶胶粒子的消光效率与复折射率、粒子半径、波长有关, 可表示为

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (2)$$

式中  $x = 2\pi r/\lambda$  为粒径参数, 其中  $r$  为粒子半径,  $\lambda$  为波长;  $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 系数, 可以利用递推关系<sup>[32]</sup>, 由 Matlab 设计的计算程序能在多种情况下进行比较精确的计算。对于密度为  $\rho$  的气溶胶其质量消光系数  $\alpha$  和质量浓度  $A$  分别为

$$\alpha = 0.75 \int Q_{\text{ext}} n(r) \frac{dr}{r\rho}, \quad (3)$$

$$A(z) = \frac{\sigma(z)}{\alpha(z)}, \quad (4)$$

式中  $\sigma$  为气溶胶消光系数;  $n(r)$  为粒子谱分布;  $\rho$  为粒子标准密度, 文中取  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。选择粒子半径区间为  $0.01 \sim 10.01 \mu\text{m}$ , 根据后面分析获得的输入气溶胶类型及已有研究成果<sup>[33]</sup>, 取折射率  $m = 1.33 + 0.03i$ 。利用近地面监测的颗粒物  $\text{PM}_{10}$  质量浓度代替气溶胶质量浓度  $A$ , 从单峰或双峰对数正态谱中选择符合要求的一种粒子谱分布。图2为气溶胶质量浓度反演算法流程图。

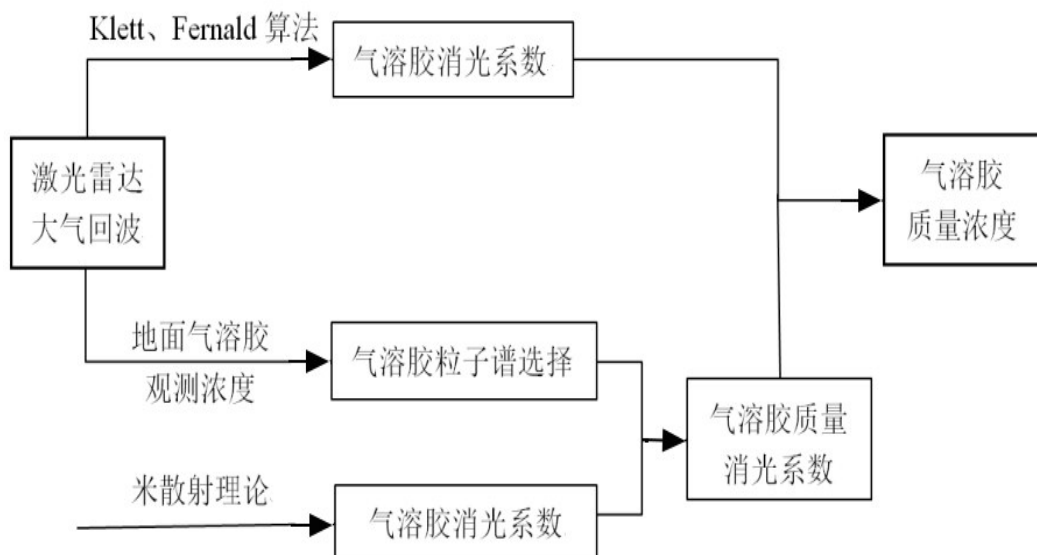


图2 气溶胶质量浓度反演算法流程图

Fig. 2 Calculation steps for inversion of particulate matter mass concentration

图3是用单峰和双峰对数正态谱计算的2013年12月5—10日近地面 $PM_{10}$ 质量浓度,并与实际观测结果进行比较。从图中可以看到,用两种谱分布计算的 $PM_{10}$ 质量浓度与实际观测值相比都偏低,其中双峰谱又较单峰谱低,但双峰谱反演结果的变化趋势与实际观测值吻合度更好,实际上用后向散射原理探测颗粒物质量浓度通常存在观测值偏低的问题。考虑到计算的快捷性,此处选择单峰对数正态谱作为粒子谱分布函数,再根据式(2)、(3)和(4)计算气溶胶(污染物)质量浓度。

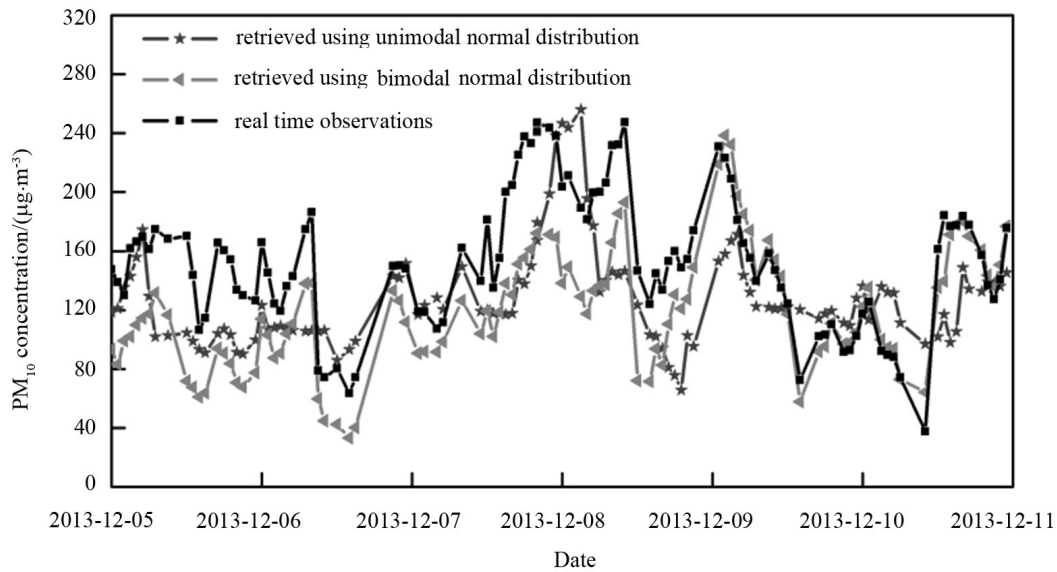


图3 由MPL观测数据计算的近地面 $PM_{10}$ 质量浓度与实际观测结果

Fig. 3 The mass concentrations of  $PM_{10}$  retrieved with MPL data and real time observations

受地理地形和气象条件的影响,除本地污染源,浙江省还易受北方和东南方外来污染物的入侵,不同来源污染物所含气溶胶成分存在较大差异,城市气溶胶中 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等离子浓度较高,沙尘气溶胶 $Ca^{2+}$ 离子浓度较高,海洋气溶胶 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 等离子浓度较高<sup>[7]</sup>,因此折射率亦有差别。为了建立退偏振比、雷达比等激光雷达参数与颗粒物类型之间的关系,首先筛选出2012—2015年间污染程度较高的23个霾天气过程(其中11个过程包含城市气溶胶输入,7个过程包含海洋气溶胶输入、5个过程包含沙尘气溶胶输入),根据近地面无机水溶性离子观测数据,由指示性离子浓度差异确定输入污染物为城市气溶胶、海洋气溶胶和沙尘气溶胶的时刻,再利用激光雷达观测数据,计算获得对应时刻的退偏振比和雷达比,之后统计不同气溶胶类型的退偏振比和雷达比落区,建立不同类型气溶胶退偏振比和雷达比的分布范围,作为复折射率取值依据之一。图4中城市气溶胶数据为240个、海洋气溶胶为140个,沙尘气溶胶为80个。从图中可以看到,海洋气溶胶的退偏振比和雷达比分别介于0%~8%和16~30 sr之间,城市气溶胶分别介于0%~11%和25~65 sr之间,沙尘气溶胶分别介于10%~22%和30~60 sr之间。沙尘气溶胶退偏振比与城市和海洋气溶胶的重叠区很少,且比较离散,主要是城市气溶胶退偏振比变小了。分析可能的原因,近几年城市气溶胶中人为排放气溶胶占比增大,大气相对湿度又有所降低,城市气溶胶偏细,退偏振比由过去的普遍小于20%变成现在的普遍小于10%;沙尘气溶胶退偏振比一般介于20%~30%之间,但实际大小与沙尘含量有很大关系,有时会低至10%或高达40%。这里筛选的沙尘天气过程的高压形势强度、沿途逗留时间等都有差别,从而造成退偏振比较为离散。

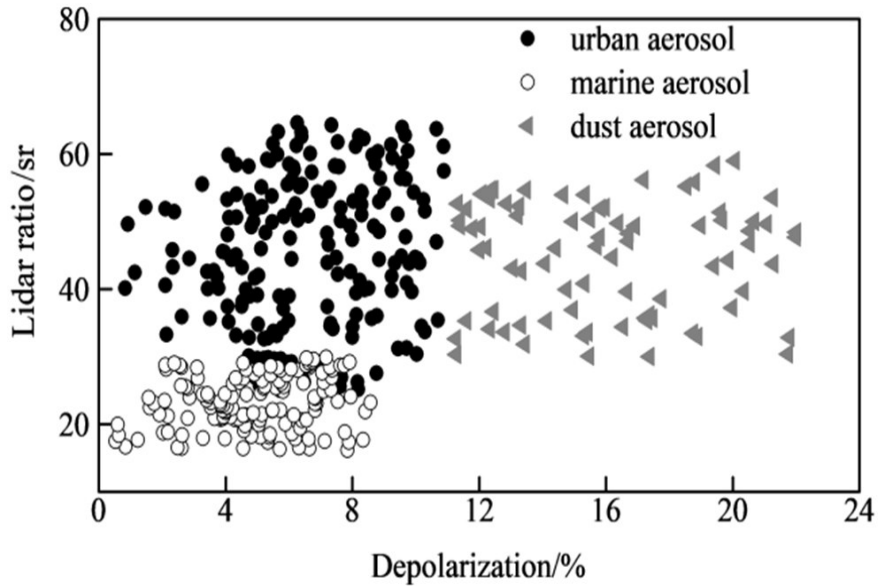


图4 不同类型气溶胶退偏振比和雷达比

Fig. 4 Depolarization ratio and radar ratio for different types of aerosols

## 2 高影响霾天气过程的观测分析

融合各种观测数据,筛选近10年浙江省境内发生的高影响霾天气,发现2013年前后发生的高影响霾天气偏多,其中2013年1月25—30日这次影响范围很大,已被广泛探讨研究。2013年12月5—10日这次的影响范围也很广,尤其是对于浙江省来说,其影响甚至超过2013年1月25—30日这次,伴随着污染物区域输送、本地累积、沉降等现象,非常契合本研究需求,其12月1—3日期间出现在山东、江苏、安徽、上海等地,此后随冷空气进一步往南输送,5日后进入浙江省境内,9日转为高压控制,致使5—9日浙江省出现大范围高影响霾污染天气,中北部地区尤其严重。

图5为MPL激光雷达探测反演获得的2013年12月5—10日大气污染物浓度,从蓝色到红色表示值越来越大。从图中可以看到,2013年12月5日开始在6.5 km高度左右有一层污染物输入,但输入不连续、厚度也不均匀,不同时刻的污染物质量浓度变化很大。第一波高浓度污染物输入开始于5日00:00,厚度约为2 km,持续时间约为4 h,由MPL观测计算获得的最大瞬时质量浓度达 $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右;第二波高浓度污染物输入开始于6日凌晨,持续时间长达24 h,厚度达3 km左右,最大瞬时质量浓度也为 $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右;第三波高浓度污染物输入时间介于7日18:00—8日04:00之间,厚度约为2.5 km,最大瞬时质量浓度高达 $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;与前三波以污染物输入为主不同,第四波输入分为两个时段:9日00:00—11:00以污染物输入为主,污染物厚度约为1.5 km,同时伴随着沉降,最高瞬时质量浓度明显下降,约为 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右;此后随着天气形势转为高压控制,污染物主要以沉降为主,一直持续到10日12:00,叠加在本地累积的污染物上,最大瞬时质量浓度达到 $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右;12:00后污染物一部分沉降到近地面,其余大部分通过水平运动输送至下一个区域,沉降到地面的污染物中细颗粒物又以再悬浮的方式重新回到大气。对本地真正产生影响的是沉降到近地面的污染物。为定量获得外来污染物对本地污染贡献,选取高压不断南移的12月5—7日,本地污染物累积影响小,近地面层(一般为2 km以下高度)污染物浓度增长主要为外来污染物沉降贡献。将

激光雷达大气探测截面分成时间分辨率为15 min、垂直分辨率为30 m的网格,污染物入境前3日平均 $PM_{10}$ 浓度网格积分作为本地基准污染物浓度,污染物过境时实时浓度网格积分为本地基准污染物和外来污染物相叠加结果。通过计算发现,12月5—7日外来污染物对本地污染的贡献分别为317%、208%和264%,而降降到边界层内污染物占当天全部高层输入的35%、27%和25%左右,其他大部分通过水平输送消耗掉。

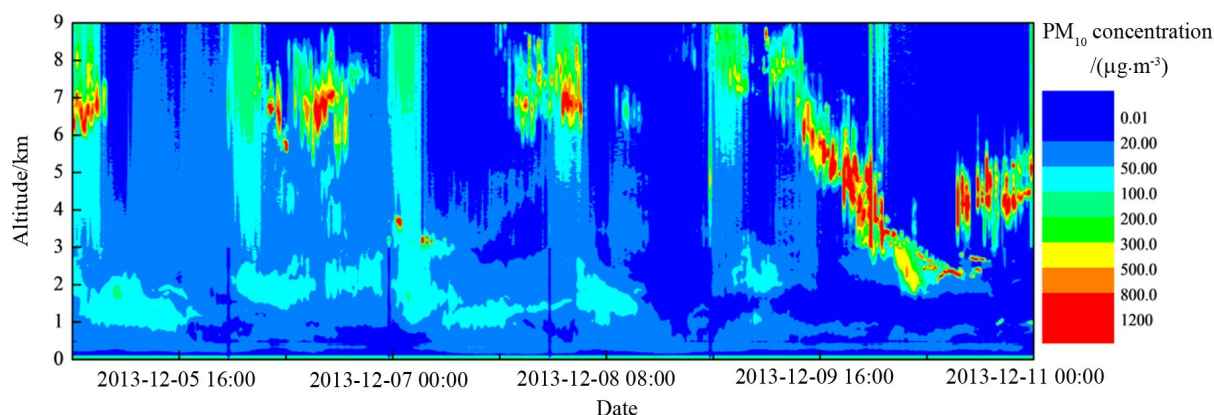


图5 2013年12月5—10日MPL探测的大气污染物浓度垂直分布

Fig. 5 The vertical distribution of aerosol concentration detected by MPL from December 5 to 10, 2013

图6为2013年12月5—10日杭州近地面 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 小时质量浓度及 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值变化曲线。从图中可以看到,与输入层相比,近地面 $PM_{10}$ 浓度虽然较低,但变化趋势与外来输入情况吻合。12月5日随着外来污染物的入侵, $PM_{10}$ 质量浓度开始增大,12月7日20:00和8日10:00分别出现两个峰值,小时平均质量浓度达到 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,此后除9日12:00出现较大的峰值外,总体呈起伏式下降,到12月10日12:00前降到最小,其值仅约 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化相位与 $PM_{10}$ 相似,但整体变化趋势明显不同。首先,12月5—9日 $PM_{2.5}$ 质量浓度总体呈上升趋势,但变化幅度不显著,小时平均质量浓度大约上升了 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,最大值出现于12月9日。从 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化也可以看到 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的差异,12月5日 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 仅为0.33左右,即使污染物质量浓度最大的7—8日 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 也在0.35左右徘徊,这明显低于该区域常规粗细颗粒物浓度比值<sup>[7]</sup>,说明12月5—8日输入污染物中粗颗粒物所占比例较大;9日后随着外来污染物输入转为本地污染物积累, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值明显增大,最大值达0.62,平均值约为0.56,与常规粗细颗粒物浓度比值接近。

图7为2013年12月5—10日MPL激光雷达探测的退偏振比,从蓝色到红色表示退偏振比越来越大。从图中可以发现,污染物退偏振比在1.7 km高度左右分为上下不同的两层,上层退偏振比大于1.5%,最大值为22%左右,下层则基本小于3.7%,上层退偏振比明显大于下层,且从上而下越来越大,相反下层从上而下越来越小,其中最下面退偏振比介于0.8%~1.5%之间。从退偏振比垂直分布也可以看到,上层以输入型为主,污染物包含沙尘气溶胶等粗颗粒物,向南输送过程中不断携带沿路城市气溶胶,同时伴随着沉降现象,而且粗颗粒物较细颗粒物沉降特征更明显;下层以本地污染物为主,主要是城市和海洋气溶胶,粒径相对较小,没有表现出明显的沉降特征。从时间变化来看,上层污染物刚入侵时退偏振比最大,沉降现象也最明显,此后退偏振比总体在变小,沉降也变得离散,沉降下探高度变低。结合图5发现,10日10:00开始在3.0 km左右开始有一起逐渐抬升的污染物,这层污染物的退偏振比明显偏小,有可能是发生再悬浮的细

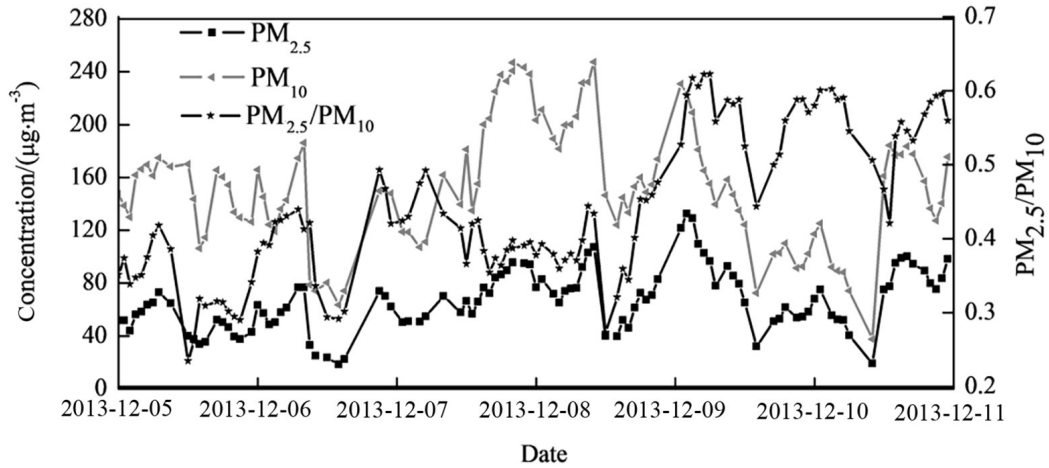


图6 2013年12月5—10日杭州 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 小时质量浓度及 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值

Fig. 6 The hourly mass concentration of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  as well as the ratio of them in Hangzhou from December 5 to 10, 2013

颗粒物。从污染物质量浓度变化可见，上层污染物质量浓度远大于下层，可见输入污染物仅有小部分沉降将近地面，大部分会随着水平输送而移出，这也是区域污染输送定量评估的难点所在。

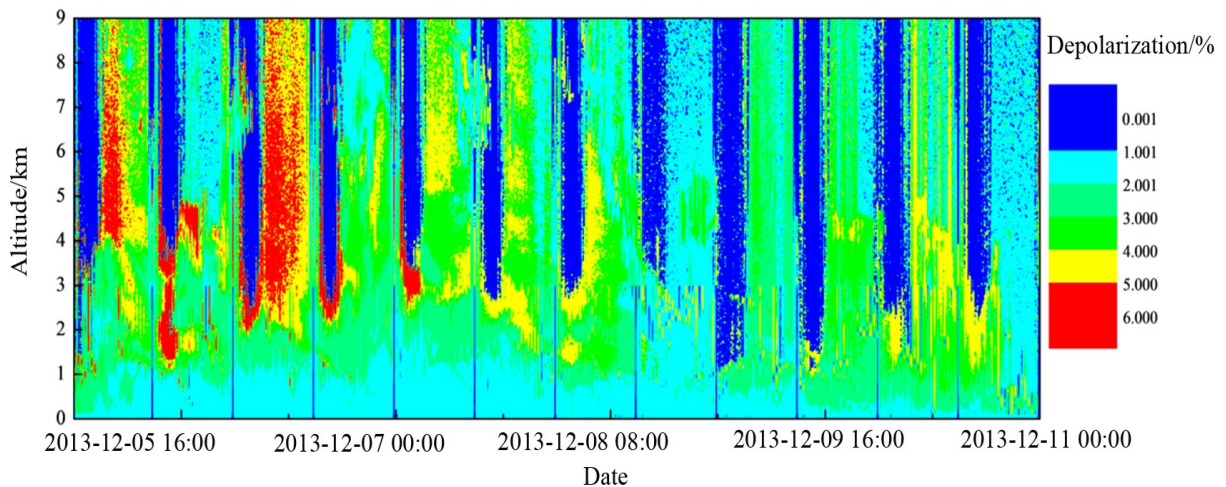


图7 2013年12月5—10日MPL激光雷达探测的退偏振比

Fig. 7 The depolarization ratio detected by MPL from December 5 to 10, 2013

除重力外，气象条件也是影响颗粒物沉降的重要因素。图8为2013年12月5—10日由微波辐射计探测的大气温度和相对湿度垂直分布。从图中可以看到，气温垂直分层明显，上层气温变化平缓，越往下气温变化起伏变大，重要的是这种起伏影响污染物沉降。对照图5和图6看到，图8中圆圈画出的气温明显下降时刻污染物沉降幅度更大，近地面粗、细颗粒物质量浓度出现相应峰值， $PM_{2.5}/PM_{10}$ 也出现峰值，说明这些时刻细颗粒沉降占比更大，气温下降更有利于细颗粒物沉降。由图8中大气相对湿度垂直分布发现，相对湿度垂直变化没有明显规律，与污染物输送或沉降之间也没有明显对应关系，但总体来说输入污染物越多，大气相对湿度越低，可能是北方输入污染物偏干所致。

除上述个例，浙江地区在2012年12月1—10日、2013年1月13—18日、2014年1月25—26日、2015年12



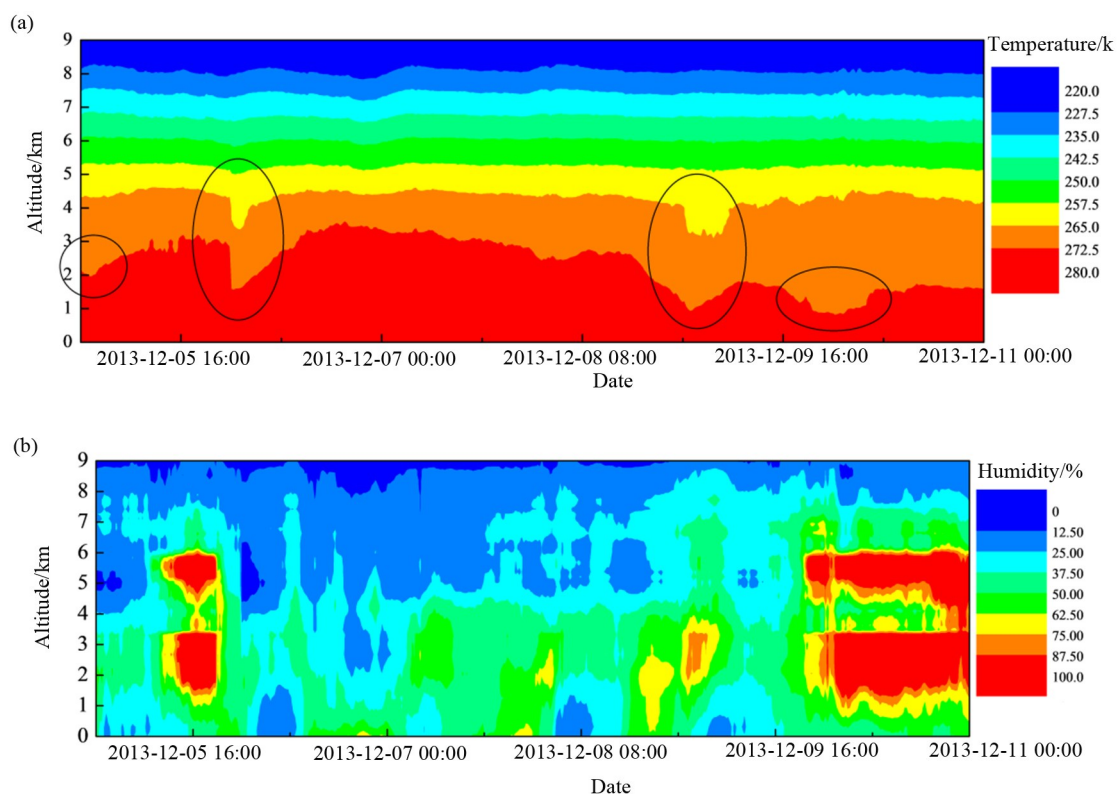


图 8 2013 年 12 月 5—10 日微波辐射计探测的大气温度 (a) 和相对湿度 (b)

Fig. 8 The air temperature (a) and relative humidity (b) detected by microwave radiometer from December 5 to 10, 2013

月 11—15 日等时段也出现高影响霾污染过程, 表 1 为这些过程的发生时段、天气特征、起源地、输送高度及输入的主要颗粒物等特征。从表中看到, 这些高影响霾污染过程皆发生于高压前部转高压控制的情况, 前期以污染物输入为主, 后期以本地污染物积累为主, 输入污染物以粗颗粒物居多, 输送高度和质量浓度因天气系统强度、持续时长等不同有较大差别, 输送高度一般介于 4.5~7.5 km 之间, 输入质量浓度一般介于 450~1200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间, 污染物类型主要以沙尘和城市污染物为主。

表 1 杭州典型重污染过程特征

Table 1 Characteristics of typical heavy pollution processes in Hangzhou

Heavy pollution process	Weather feature	Original area	Transportation height/km	Main input particle
2012-12-01—09	Southward cold high	Inner Mongolia	7.0	Coarse particulates
2013-01-13—18	Southward cold high	Outer Mongolia	7.5	Coarse particulates
2014-01-25—26	Southward cold high	Jinan	4.5	Coarse/Fine particulates
2015-12-11—15	Southward cold high	Hebei	5.5	Coarse particulates

### 3 结 论

以 Mie 散射理论和 Fernald 反演方法为基础, 利用激光雷达、地面大气成分等观测数据, 计算气溶胶垂直浓度, 研究不同类型气溶胶退偏振比、雷达比分布特征, 用于判定大气气溶胶类型, 并用于浙江省高影响

霾天气个例分析。结果表明,浙江省高影响霾天气主要发生于北部高压南下后转为高压控制的情况,前期以外来污染物输入为主,后期以本地污染物累积为主;受气象条件差异影响,外来污染物输入呈不连续、非均匀特点,输入高度介于4.5~7.5 km之间,输入质量浓度一般介于450~1200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,以粗颗粒物居多,污染物类型主要以沙尘和城市污染物为主;文中重点分析的高影响霾天气过程外来污染物仅有25%~35%沉降到近地面,重力和气温下降是影响起污染物沉降的重要因素,其中重力对粗颗粒物作用更大,而气温下降对细颗粒物作用更大。

垂直方向的大气粒子谱分布欠缺、气象条件等因素造成的外来污染物输入不连续、非均匀性以及沉降特征差异增加了区域间污染物输送定量评估的难度。未来需要进一步增强大气污染物、气象条件垂直分布的观测水平,开展更为精细的区域污染物输送定量分析方法研究。

## 参考文献:

- [1] Zhu T, Shang J, Zhao D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze [J]. *Scientia Sinica: Chimica*, 2010, 40(12): 1731-1740.  
朱彤,尚静,赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用 [J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(12): 1731-1740.
- [2] Zhang J Q, Luo D T, Wang H, *et al.* Characteristics and source of carbonaceous species in particulate matter during winter in Langfang City development zones [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11): 1818-1825.  
张敬巧, 罗达通, 王涵, 等. 廊坊市开发区冬季颗粒物碳组分污染特征及来源分析 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1818-1825.
- [3] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of  $\text{PM}_{2.5}$  during the winter of 2013 in Chengdu [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 1056-1065.
- [4] Chen H M, Zhuang B L, Liu J, *et al.* Regional climate responses in east Asia to the black carbon aerosol direct effects from India and China in summer [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(22): 9783-9800.
- [5] Cao K, Zhang W T, Liu S B, *et al.* Pareto law-based regional inequality analysis of  $\text{PM}_{2.5}$  air pollution and economic development in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 252(15): 1-9.
- [6] Wu D, Mao J T, Deng X J, *et al.* Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science China (Series D)*, 2009, 39(11): 1542-1553.  
吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. 中国科学 (D辑), 2009, 39(11): 1542-1553.
- [7] Mao M J, Du R G, Wu J. Influences of the G20 emission reduction on characteristics of water-soluble ions in PM in Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2283-2290.  
毛敏娟, 杜荣光, 吴建. 杭州G20减排措施对大气水溶性离子特征的影响 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2283-2290.
- [8] Qu Y W, Wang T J, Wu H, *et al.* Vertical structure and interaction of ozone and fine particulate matter in spring at Nanjing, China: The role of aerosol's radiation feedback [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 222: 117162.
- [9] Liu P F, Zhao C S, Gödel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(7): 3479-3494.
- [10] Liu C, Wang T J, Rosenfeld D, *et al.* Anthropogenic effects on cloud condensation nuclei distribution and rain initiation in east Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(2): e2019GL086184.

- [11] Yamamoto G, Tanaka M. Increase of global albedo due to air pollution [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29(8): 1405-1412.
- [12] Mao M J, Liu H T, Du R G. Characteristics and control factors of ozone pollution at different time scales in Hangzhou city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11): 1844-1851.  
毛敏娟, 刘厚通, 杜荣光. 不同时间尺度下杭州市O<sub>3</sub>污染特征及控制因素 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1844-1851.
- [13] Da G A, Min X A, Xing C A, et al. Systematic classification of circulation patterns and integrated analysis of their effects on different ozone pollution levels in the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 242: 117760.
- [14] Han H, Liu J, Shu L, et al. Local and synoptic meteorological influences on daily variability in summertime surface ozone in Eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(1): 203-222.
- [15] Zhan C C, Xie M, Huang C W, et al. Ozone affected by a succession of four landfall typhoons in the Yangtze River Delta, China: Major processes and health impacts [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(22): 13781-13799.
- [16] Lee K H, Kim Y J, Min J K. Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(27): 5146-5155.
- [17] Wang S Q, Li W B, Deng X J, et al. Characteristics of air pollutant transport channels in Guangzhou region [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 2883-2890.  
王世强, 黎伟标, 邓雪娇, 等. 广州地区大气污染物输送通道的特征 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2883-2890.
- [18] Shindell D T, Chin M, Dentener F, et al. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(17): 5353-5372.
- [19] Bella D, Culpepper J, Khaimova J, et al. Characterization of pollution transport into Texas using OMI and TES satellite, GIS and in situ data, and HYSPLIT back trajectory analyses: Implications for TCEQ State Implementation Plans [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, 9(5): 569-588.
- [20] Zhang Z G, Gao Q X, Han X Q, et al. The study of pollutant transport between the cities in North China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1): 14-20.  
张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 14-20.
- [21] Wang Y, Chai F H, Liu H F, et al. Analysis on the characteristics of horizontal transport of the atmospheric pollutant over the Yangtze delta [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 22-29.  
王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 22-29.
- [22] Comerón A, Muñoz-Porcar C, Rocadenbosch F, et al. Current research in lidar technology used for the remote sensing of atmospheric aerosols [J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1450.
- [23] Pal S, Lee T R, Phelps S, et al. Impact of atmospheric boundary layer depth variability and wind reversal on the diurnal variability of aerosol concentration at a valley site [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 424-434.
- [24] Voss K J, Welton E J, Quinn P K, et al. Lidar measurements during Aerosols99 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D18): 20821-20831.
- [25] Deng T, Wu D, Deng X J, et al. A vertical sounding of severe haze process in Guangzhou area [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11): 2650-2656.
- [26] Liu D, Zheng Z F, Chen W B, et al. Performance estimation of space-borne high-spectral-resolution lidar for cloud and aerosol optical properties at 532 nm [J]. *Optical Express*, 2019, 27(8): A481-A494.
- [27] Li M Y, Fan M, Tao J H, et al. The space-borne lidar cloud and aerosol classification algorithms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(2): 383-391.  
李明阳, 范萌, 陶金花, 等. 星载激光雷达云和气溶胶分类反演算法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2): 383-391.
- [28] Ma N, Yang S P, Wang J, et al. Joint observation of a haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei region with space borne and ground-based lidar [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(6): 147-156.

- 马娜, 杨思鹏, 王界, 等. 京津冀地区一次污染过程的星载-地基激光雷达联合观测分析 [J]. 中国环境监测, 2019, 35(6): 147-156.
- [29] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [30] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211-220.
- [31] Liu H T, Mao M J. An accurate inversion method of aerosol extinction coefficient about ground-based lidar without needing calibration [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(7): 074205.  
刘厚通, 毛敏娟. 一种无需定标的地基激光雷达气溶胶消光系数精确反演方法 [J]. 物理学报, 2019, 68(7): 074205.
- [32] Yuan Y J, Ren D M, Hu X Y. Computing scattering phase function by recursive formula of Mie theory [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2005, 17(4): 366-371.  
袁易君, 任德明, 胡孝勇. Mie 理论递推公式计算散射相位函数 [J]. 光散射学报, 2005, 17(4): 366-371.
- [33] Li X B, Hu S X, Zhu W Y, et al. Characteristics of aerosol size distribution in Hefei, Yuxi, Xiamen and Beijing [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(2): 154-162.  
李学彬, 胡顺星, 朱文越, 等. 合肥、岳西、厦门和北京气溶胶谱分布特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(2): 154-162.

## 《大气与环境光学学报》已被 ICI Journals Master List 国际数据库收录



2023-11-10, 波兰《哥白尼索引》(Index Copernicus International) 科技期刊评估小组发来官方邮件, 确认《大气与环境光学学报》入选 ICI Journals Master List 2022 (哥白尼索引精选数据库)。

本刊在《哥白尼索引》(ICI) 数据库中的主页:

<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=126904>

以下为 ICI 数据库确认收录本刊的官方邮件内容(部分):

主题: ICI Journals Master List 2022-Publication of ICV assessment

Dear Sir/Madam,

We would like to kindly inform you that the journal "大气与环境光学学报 (ISSN: 1673-6141)" has passed the evaluation process positively and is indexed in the ICI Journals Master List database for 2022.

Based on the verification of information on the functioning of the journal in 2022, the value of its parametric strength (ICV indicator) was calculated.

**ICV 2022 = 48.69**

Best regards,

ICI World of Journals User Support Team

Index Copernicus International

[www.indexcopernicus.com](http://www.indexcopernicus.com)