

张琴,姚秀萍,2021. 鲁中地区霾期间气溶胶的垂直分布及其与气象条件的关系[J]. 气象,47(9):1099-1112. Zhang Q, Yao X P, 2021. Vertical distribution of aerosol and its relationship with meteorological conditions during haze in central part of Shandong Province[J]. Meteor Mon, 47(9):1099-1112(in Chinese).

鲁中地区霾期间气溶胶的垂直分布及其与气象条件的关系*

张 琴¹ 姚秀萍²

1 山东省淄博市气象局, 淄博 255048

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 利用 CALIPSO 气溶胶垂直廓线产品和 NCEP 提供的 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析数据, 以清洁日为对比, 统计分析了 2007—2017 年霾和重度霾期间鲁中地区气溶胶的垂直分布规律, 并探讨了两者之间的关系。结果表明: 霾日、重度霾日的气溶胶粒子主要聚集在对流层低层 2.7 km、1.5 km 以下。以 0.9、1.66 和 1.34 km 为临界高度, 清洁日、霾日、重度霾日的消光系数 (EC) 在临界高度以上呈指数递减, 以下呈对数递减。霾日和重度霾日年平均体积退偏比 (PDR) 和色比 (CR) 范围分别为 0.1~0.3 和 0.5~0.9。低层 2 km 以下, 重度霾日以相对规则的细粒子为主; 2~4 km, 不规则度和尺寸都急剧增大。PDR 在 7 km 及以下随高度逐步增加, 7 km 以上逐步减小。与清洁日不同, 霾日 CR 基本随高度逐渐增大, 重度霾日则在 6 km 以下随高度逐渐增大。污染沙尘型气溶胶对重度霾日和霾日近地面的 EC 贡献最大, 分别为 0.58 km^{-1} 和 0.36 km^{-1} , 其次是大陆污染型, 分别为 0.27 km^{-1} 和 0.20 km^{-1} 。重度霾日在 1.5 km 及以下维持了较小的平均风速和较大的相对湿度, 有利于 EC 的增大。霾日在较高的高度上维持了相对较小的平均风速和相对较大的相对湿度, 使得气溶胶高浓度层达 2.7 km。霾时近地面污染物来源为蒙古、内蒙古等地的长距离传输和周边地区的传输。重度霾时蒙古方向和河南方向的污染物传输占比更大, 分别达 25.26% 和 31.58%。重度霾对应的多层逆温比例接近 50%, 贴地+低悬型和贴地+高悬型逆温在其中占比最大。由于这两种逆温型在逆温层以下对应更小的出流量, 大气更稳定, 使得重度霾时气溶胶粒子聚集在低层。

关键词: 霾, 气溶胶, 垂直分布, 气象条件

中图分类号: P402

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.006

Vertical Distribution of Aerosol and Its Relationship with Meteorological Conditions During Haze in Central Part of Shandong Province

ZHANG Qin¹ YAO Xiuping²

1 Zibo Meteorological Office of Shandong Province, Zibo 255048

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Compared with the situation on clear days, the vertical distribution of aerosol and meteorological conditions during haze and heavy haze events in central part of Shandong Province from 2007 to 2017 are analyzed by utilizing the data of CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) and NCEP FNL (Final Operational Global Analysis) $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data. The results show that aerosol particles in haze and heavy haze weather mainly concentrate below 2.7 km and 1.5 km in the

* 国家重点研发计划(2018YFC1507804)、国家自然科学基金项目(42030611, 41775048)和山东省气象局重点课题(2017sdqxz06)共同资助
2021 年 1 月 4 日收稿; 2021 年 7 月 14 日收修定稿

第一作者: 张琴, 主要从事天气动力学研究. E-mail: 403680112@qq.com

lower troposphere. With 0.9, 1.66 and 1.34 km as the critical heights, the extinction coefficient (EC) of clear days, haze days and heavy haze days decreases exponentially above the critical height and logarithmically below the height. The average annual paraticulate depolarization ratio (PDR) and color ratio (CR) range of haze days and severe haze days are 0.1—0.3 and 0.5—0.9, respectively. In heavy haze days, aerosol particles below 2 km are relatively regular and small in size, and their irregularity and size increase sharply within 2—4 km. PDR increases gradually with height in and below 7 km but decreases gradually above 7 km. Different from clear days, CR basically increases with the height on haze days. The contribution of polluted dust aerosol to near-ground EC on heavy haze days and haze days is 0.58 km^{-1} and 0.36 km^{-1} , respectively. The second is the polluted continental type, contributing 0.27 km^{-1} and 0.20 km^{-1} respectively. On the heavy haze days, the low average wind speed and high relative humidity in and below 1.5 km are conducive to the increase of EC. On haze days, low average wind speed and high relative humidity are maintained at a higher height, making the height of aerosol high concentration layer up to 2.7 km. During haze days, the sources of near-surface pollutants are long-distance transmission from Mongolia, Inner Mongolia and the neighboring provinces. In heavy haze days, the transport of pollutants in the direction of Mongolia and Henan accounts for more, reaching to 25.26% and 31.58% respectively. The proportion of multi-layer inversion corresponding to heavy haze is close to 50%, and the proportion of ground+low-suspended type and ground+high-suspended type are the largest. Since these two types of inversion correspond to smaller outflow below the inversion layer, the atmosphere is more stable, and aerosol particles are concentrated in the lower layer when it is heavy haze weather.

Key words: haze, aerosol, vertical distribution, meteorological condition

引 言

霾是大量粒径为几微米以下的大气气溶胶粒子使水平能见度小于 10.0 km、空气普遍浑浊的天气现象(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2018),其本质是细粒子污染(吴兑, 2013)。霾发生时,大量的有害气体和颗粒物使空气质量下降,严重危害人体健康。《大气科学辞典》中提及“霾可看做气溶胶”(《大气科学辞典》编委会, 1994)。近些年来我国大面积的霾天气就与细颗粒气溶胶有关,气溶胶颗粒是霾的主要成分(穆穆和张人禾, 2014)。

气溶胶垂直分布是气溶胶辐射强迫研究(Haywood and Ramaswamy, 1998)和气溶胶光学厚度卫星反演(Rozwadowska, 2007)的重要影响因素。目前,对于气溶胶的垂直分布的研究多集中于京津冀、淮河流域、珠江三角洲地区(Gui et al, 2016; 范伟等, 2020; Cao et al, 2018; 刘琼等, 2012),也有对华北地区和中国大范围地区气溶胶垂直分布的研究(Cao et al, 2018; Liu et al, 2017; 许潇锋等, 2018)。但对于霾时,尤其是重度霾时气溶胶垂直分布的统

计分析不是很多。近年来,关于霾时气溶胶垂直分布与不同的气象条件的相关性也有不少研究。如不同地区温度垂直廓线的日变化所导致的边界层高度发生变化,从而影响近地层污染物浓度;秋、冬季重污染过程频发与边界层的季节变化的关系(Miao et al, 2016; 2018; Xu et al, 2019);在京津冀特殊地形的影响下,局地热力环流的昼夜变化以及地形通过影响边界层来影响污染物的输送(Miao et al, 2020),消光系数演变与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值变化以及天空状况对气溶胶垂直分布影响显著(徐栋夫等, 2020)。由于气溶胶浓度不仅是人为排放所导致的,也与气象条件息息相关,因此不同地域间的气溶胶垂直分布有很大差异。

鲁中地区位于山东中部和南部,是一个孤立的山区,面积为 6.5 万 km^2 。鲁中地区西面 250 km 处是平均海拔高度超过 1000 m 的太行山脉,东部濒临渤海,犹如一座孤岛。鲁中地区有着独特的气候条件,对该地区气溶胶的垂直分布特性及其与气象条件的关系进行统计分析,有助于对鲁中地区霾污染事件更深入地理解,为鲁中地区大气气溶胶垂直分布特征及其成因研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 霾的判别

选取鲁中地区5个国家级地面气象观测站(济南、淄博、莱芜、泰安、潍坊;图1)的气象要素观测资料对霾日进行判别。根据吴兑(2008)文中的方法选取霾日,只要有3个及以上的观测站满足下列条件:排除降水、吹雪、扬沙、沙尘暴和浮尘等影响能见度的天气现象,相对湿度 $<90\%$,能见度(VS) <10 km时,则认为有霾发生。当 $VS < 2.0$ km时为重度霾, $2.0 \text{ km} \leq VS < 3.0$ km时为中度霾, $3.0 \text{ km} \leq VS < 5.0$ km时为轻度霾。另外,本文将相对湿度 $<90\%$,且 $VS \geq 15$ km时定义为清洁日。经统计,鲁中地区2007—2017年间,霾日为1655 d,重度霾日为95 d,中度霾日为283 d,轻度霾日为552 d,清洁日为235 d。

1.2 数据来源

本文使用的卫星数据来自云-气溶胶激光雷达和红外探测者观测卫星(CALIPSO)。CALIPSO首次实现了云和气溶胶的全球观测,可提供云和气溶胶的物理特性及其时空分布,有利于更好地研究云和气溶胶的形成、发展过程及其相互作用,通过提供气溶胶的垂直结构区分其种类(张鹏等,2018)。



图1 鲁中地区地形图

(红色圆点为气象观测站点的位置)

Fig. 1 Topographic map of central part of Shandong Province (Luzhong Area)

(Red dots are the locations of meteorological observation stations)

本文采用了2007—2017年霾时CALIPSO卫星资料中的L2产品途经鲁中地区的气溶胶廓线数据以及垂直特征层VFM(vertical feature mask)产品。CALIPSO卫星于13时和02时(世界时,下同)左右经过鲁中地区上空。CALIPSO的廓线在鲁中地区($36^\circ \sim 37^\circ \text{N}$, $116^\circ \sim 120^\circ \text{E}$)筛选的清洁日、霾日和重度霾日分别为49、367、23 d。本文选取霾期间的夜间数据,有利于降低白天噪音的影响造成的偏差;并对廓线数据进行了严格的质量控制。利用VFM产品中的气溶胶类型数据,对L2中数据进行筛选,剔除气溶胶以外的数据。选取的L2廓线数据包括4个参量:532 nm消光系数(extinction coefficient, EC)、532 nm平行后向散射系数($\beta_{532, //}$)、532 nm垂直后向散射系数($\beta_{532, \perp}$)和1064 nm后向散射系数(β_{1064})。CALIPSO VFM产品将气溶胶分为洁净海洋型、沙尘型、污染大陆型、洁净大陆型、污染沙尘型、烟尘型、海洋沙尘型7种类型。

$$R_{\text{PDR}}(z) = \frac{\beta_{532, \perp}(z)}{\beta_{532, //}(z)}$$

$$R_{\text{CR}}(z) = \frac{\beta_{1064}(z)}{\beta_{532}(z)}$$

式中: z 为高度;532 nm总后向散射系数(β_{532})为垂直($\beta_{532, \perp}$)与平行($\beta_{532, //}$)后向散射系数之和; R_{PDR} 为体积退偏比;色比(R_{CR})为1064 nm总后向散射系数(β_{1064}) β_{532} 的比值。

NCEP FNL再分析数据为2007—2017年 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据,包括1000~500 hPa湿度、风向、风速。为了与CALIPSO卫星数据相匹配,逆温计算过程中温度数据选用L2产品中的温度反演量。

1.3 分析方法

为追踪污染来源,利用NOAA开发的HYSPLIT4.8轨迹模式定性分析了霾天污染物的传输途径。HYSPLIT4.8是一种欧拉和拉格朗日混合型的计算模式,包含多种物理过程,可针对不同类型排放源进行较完整的输送扩散和沉降过程模拟,广泛应用于大气污染物输送研究(Draxler and Hess, 1997)。数据来源于NCEP提供的全球数据同化系统GDAS。设置计算方式为后向轨迹,设置高度为500 m,计算时长为24 h,聚类计算选取霾日和重度霾日18时的轨迹。

2 结果与讨论

2.1 气溶胶垂直分布特征

EC 体现了气溶胶吸收和散射截面随高度的分布,反映了颗粒物的含量(Wang et al, 2014)。图 2 为 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日 532 nm 的 EC 年平均廓线。可以看出,重度霾日、霾日、清洁日的 EC 随高度均呈递减趋势,在地面附近,分别是 1.2、0.75、0.5 km⁻¹。2 km 以下递减迅速。重度霾日 EC 在 0.7 km 以下最强,随后迅速递减,在 1.5 km 以上递减至三种天气中的最小值。在高层,霾日 EC 在 2.7 km 以下大于清洁日,说明霾时气溶胶大值层顶高约为 2.7 km,气溶胶粒子向高层扩散能力强于重度霾日。3 km 以上,EC 很小,廓线也基本重合,大气较为清洁。

有研究表明,随着高度增加,气溶胶浓度一般呈指数关系下降(韩永等,2009)。标高(H_a)是假定大气气溶胶浓度随高度指数衰减到地面浓度的 1/e 时气溶胶层的高度。通过计算,清洁日、霾日、重度霾日气溶胶的 H_a 分别为 2.00、1.58、0.84 km。为了更清楚地表示气溶胶的垂直变化规律,以 z/H_a 为自变量,对气溶胶浓度 $\sigma(z)$ 进行曲线拟合(图 3)。发现指数方程和对数方程的拟合优度 R^2 最大。在每层高度上采用绝对估计偏差(D_E)的方式来判定两种拟合效果的好坏,定义 $D_E = |V_T - V_M|$, V_T 为

观测值, V_M 为拟合值。当 D_E 最小时,其拟合效果最好。指数曲线和对数曲线上的 D_E 相等时,得到 z/H_a 的临界值。可以发现,三种不同天气状态下, z/H_a 分别在大于临界值 0.45、1.05、1.60,即 z 分别为 0.9、1.66、1.34 km 时,指数方程拟合效果较好。低于此临界值,对数方程拟合效果较好。

体积退偏比(particulate depolarization ratio, PDR)可以反映气溶胶粒子的不规则程度,色比(color ratio, CR)反映气溶胶粒子的大小。图 4 是 2007—2017 年清洁日、霾日、重度霾日期间 PDR 和 CR 的垂直分布。可以看出,三条 PDR 廓线范围在 0.1~0.3 浮动。2 km 以下,霾和重度霾日 PDR 值小于清洁日。2~4 km,重度霾日 PDR 急剧增大,霾日最小。4 km 以上,清洁日 PDR 最大,霾日 PDR 较小。三条 CR 廓线范围在 0.5~0.9 浮动。2 km 以下,重度霾日 CR 最小,其次是霾日,清洁日

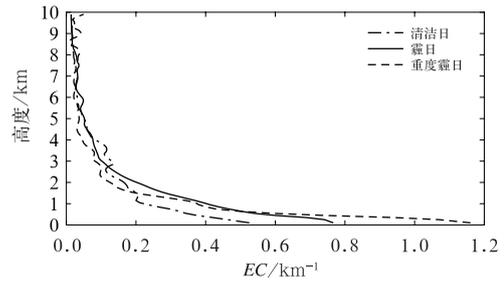


图 2 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日 532 nm 的 EC 年平均廓线
Fig. 2 Annual average profile of 532 nm EC on clear days, haze days and heavy haze days in central part of Shandong Province during 2007—2017

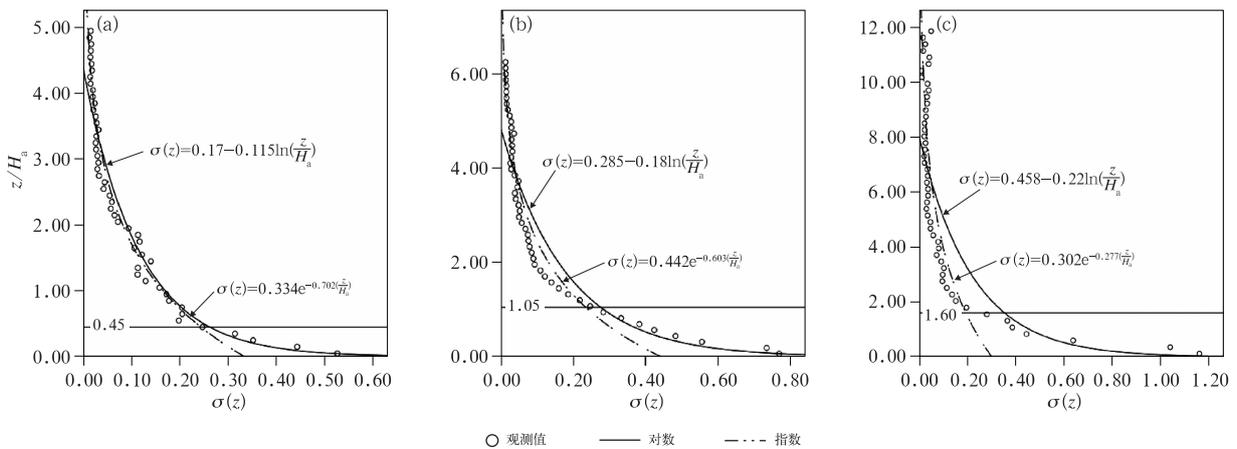


图 3 2007—2017 年鲁中地区清洁日(a)、霾日(b)、重度霾日(c)532 nm 的 EC 垂直廓线拟合
Fig. 3 Fitting of 532 nm EC vertical profile on clear days (a), haze days (b) and heavy haze days (c) in central part of Shandong Province during 2007—2017

最大。2~3 km, 重度霾日 CR 随高度急剧增大至 0.87。3 km 以上, 重度霾期间 CR 随高度变动较大。2~5 km, 清洁日 CR 大于霾日。5 km 以上, 清洁日与霾日 CR 基本一致。由于鲁中地区高层长期受到外来沙尘粒子的影响, 而地面又多以细粒子为主, 造成了 PDR 与 CR 随高度增大的特征。低层

2 km 以下, 重度霾时以大量的相对规则的细粒子为主, 霾时以相对规则的粗粒子为主, 清洁日则以不规则的粗粒子为主。2~4 km, 重度霾不规则度和尺寸都急剧增大, 可能与高空的不规则沙尘粒子有关。如 2016 年 11 月 13 日出现的重度霾天气(图 5), CALIPSO 卫星监测到鲁中地区 2~4 km 分布着沙

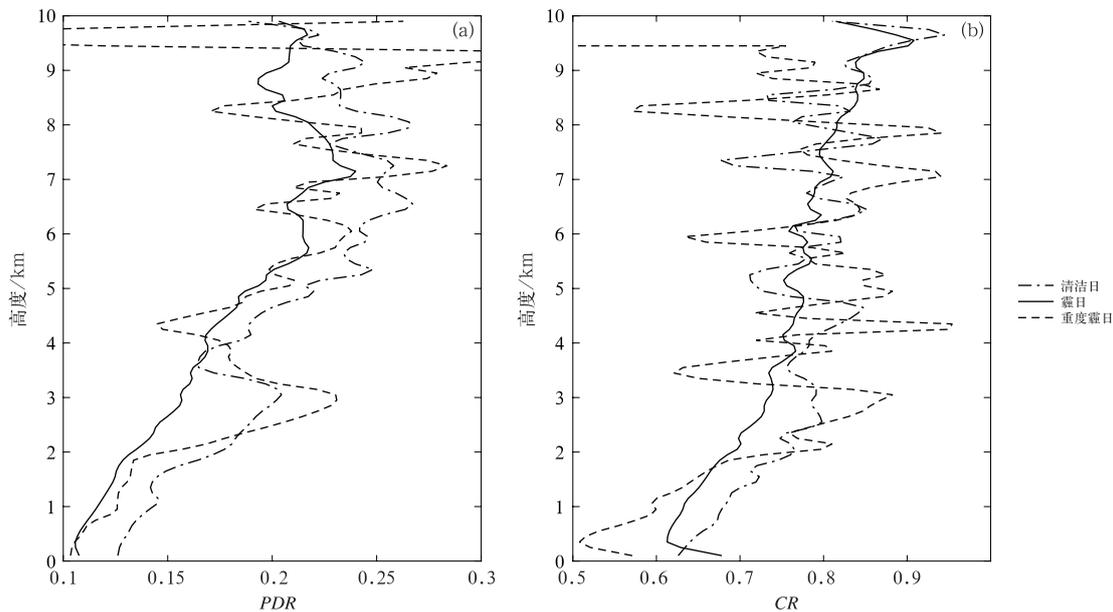


图 4 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日 532 nm PDR(a)和 CR(b)年平均廓线
Fig. 4 Annual average profile of 532 nm PDR (a) and CR (b) on clear days, haze days and heavy haze days in central part of Shandong Province during 2007—2017

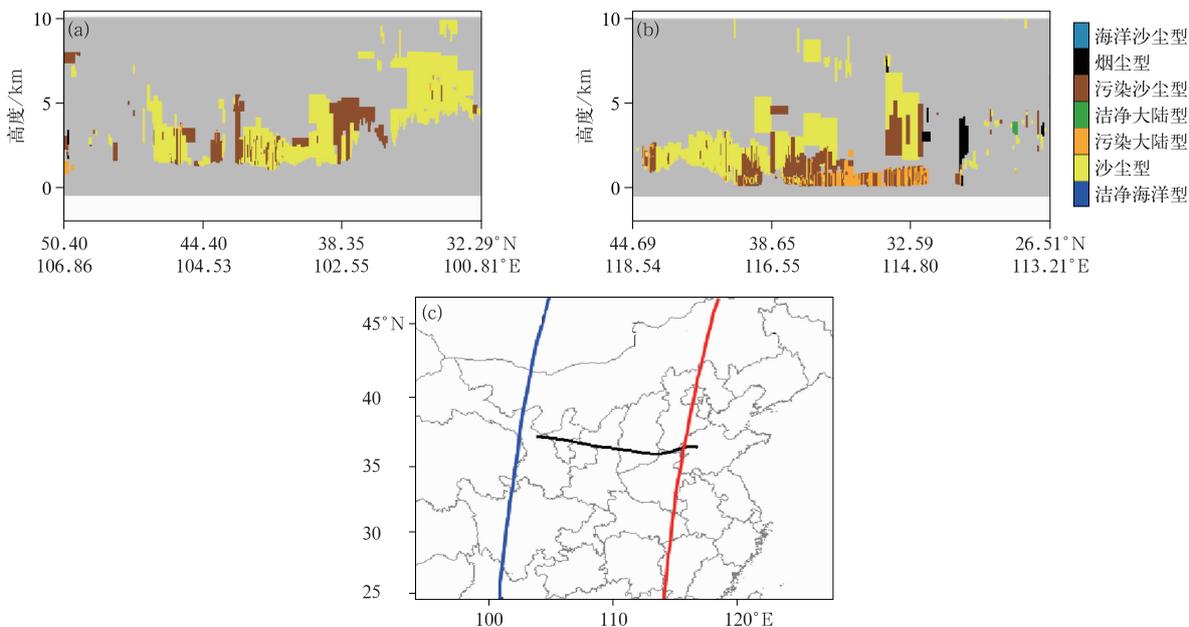


图 5 2016 年 11 月 12 日 19:13(a)和 13 日 18:34(b)气溶胶类型垂直剖面, 13 日 18:34 (c) 鲁中地区气团 24 h HYSPLIT 后向轨迹(黑线)、CALIPSO 卫星轨迹(蓝线、红线)
Fig. 5 Vertical profile of aerosol types at 19:13 UTC 12 (a) and 18:34 UTC 13 (b), 24 h HYSPLIT backward trajectory (black line), CALIPSO satellite track (blue and red solid lines) of air mass in central part of Shandong Province at 18:34 UTC 13 (c) November 2016

尘型气溶胶。利用后向轨迹模式模拟 24 h 的气溶胶输送路径后发现,12 日,来自甘肃腾格里沙漠附近 4~5 km 高度的沙尘型气溶胶,经过黄土高原向东输送至鲁中地区的 3 km 高度附近,造成 13 日鲁中地区 2~4 km 气溶胶粒子尺寸和不规则度的急剧增大。

为了清楚地说明 PDR 和 CR 在垂直方向上的变化趋势,将 PDR 和 CR 与高度进行拟合,最优拟合结果如图 6 所示。三种天气下,PDR 和 CR 的最优拟合方程均为三次方拟合方程。PDR 拟合优度 R^2 分别为 0.868、0.954、0.310。CR 拟合优度 R^2 分别为 0.571、0.922、0.420(表略)。霾日的拟合优度最好,重度霾日最差,可能与重度霾日个例偏少有关。从图 6 中可以看出,地面上三种天气下 PDR 的值分别为 0.131、0.102、0.105。三条 PDR 廓线在 7 km 以下随高度逐步增加;7 km 以上,逐步减小。三种天气下,PDR 最大值分别为 0.25、0.22、0.23。地面上 CR 值在三种天气下分别为 0.602、0.602、0.520。清洁日时,CR 在 3 km 以下随高度增大,3~8 km 保持不变,8 km 以上随高度增大。与清洁日不同,霾时 CR 基本随高度逐渐增大。重度霾则在 6 km 以下随高度逐渐增大,6 km 以上逐渐减小。

2.2 气溶胶类型的垂直分布特征

统计 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日气溶胶类型出现的次数,计算相应占比(图 7)。清洁日、霾日、重度霾日气溶胶类型总体上以沙尘型、污染沙尘型为主,分别占比 30% 和 50% 左右。清洁日沙尘型气溶胶明显偏多,且重度霾日的沙尘型气溶胶多于霾日。在霾日和重度霾日,由于本地污染物的生成和外来污染物的传输,污染大陆型气溶胶多于清洁日。霾时烟尘型气溶胶最多,占比在 10% 左右。由于鲁中地区距离东部沿海较远,清洁日、霾日、重度霾日洁净海洋型与洁净大陆型气溶胶最少。

图 8 是 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日不同高度上的气溶胶成分比例分布。由图可知,清洁日、霾日、重度霾日均以污染沙尘型和沙尘型为主。随着高度的增加,污染沙尘比例逐渐减小,沙尘逐渐增多。在 0~4 km 的低层大气,主要以污染沙尘型为主。4 km 以上,则主要以沙尘型为

主。在高层大气中,由于沙尘粒子更大且不规则,气溶胶粒子的 PDR 和 CR 更大,这与图 4 的分析一致。不同的是,2~4 km,霾日期间污染沙尘气溶胶比例小于清洁日和重度霾日,4 km 以上相反。整层大气中,霾日期间沙尘气溶胶比例均小于清洁日和重度霾日。污染大陆型气溶胶主要分布在低层大气中。0~2 km,霾日、重度霾日、清洁日污染大陆型气溶胶比例依次减少,分别为 0.23、0.20、0.11。烟尘型气溶胶主要分布在 2~6 km 的中层大气中。霾日、清洁日、重度霾日烟尘型气溶胶比例依次减少,最大分别为 0.20、0.10、0.05。海洋沙尘型气溶胶主要分布在低层大气,清洁日偏多。清洁大陆型气溶胶比例较低,主要分布在中层大气中。由于鲁中地区位于山东省内陆,清洁海洋型气溶胶分布很少。

2.3 不同气溶胶类型对消光的贡献

通过前面的分析,清洁日、霾日、重度霾日的 EC 和气溶胶类型在不同高度上分布不同。为了给出各类型气溶胶对 EC 的定量贡献,本文计算了不同高度上各气溶胶类型对应的 EC 年平均值(图 9)。可以看出,与 EC 的高度廓线相对应(图 2),各类型气溶胶对 EC 的贡献逐渐减小。清洁日时,2 km 以下污染沙尘型的贡献最大,其 EC 年平均最大达 0.28 km^{-1} ,其次是沙尘型,再次是污染大陆型。2~4 km 贡献大小依次为沙尘型、污染沙尘型、烟尘型。霾日时,2 km 以下也是污染沙尘型的贡献最大,EC 年平均值为 0.36 km^{-1} ,大于清洁日;污染大陆型的贡献是 0.21 km^{-1} ;沙尘型的贡献约为 0.05 km^{-1} ,小于清洁日。重度霾时,0~2 km,污染沙尘型的贡献最大,其次是污染大陆型,分别达 0.58 km^{-1} 和 0.27 km^{-1} ,远大于霾日和清洁日。由于这两种气溶胶对应的颗粒物在贴近地面处分布多,浓度大,且粒子较小,吸湿性强,导致重度霾日近地面颗粒物 EC 偏大且规则度和尺寸偏小。2~4 km,沙尘型贡献最大,其次是污染沙尘型。不规则的沙尘粒子尺寸大,导致了 PDR 和 CR 的急剧增大。从图 9 中还可以看出,在接近地面的低层大气,污染沙尘型对清洁日、霾日、重度霾日 EC 的贡献最大,其中贡献大小依次为重度霾日、霾日、清洁日。与清洁日不同,霾日和重度霾日期间,污染大陆型对 EC 的贡献仅次于污

染沙尘型。沙尘型在清洁日和重度霾日中对 EC 的贡献大于霾日,尤其是在地面附近区域。霾日时,烟

尘型在 2~4 km 的中层大气对 EC 有一定的贡献,是造成霾日污染物层比重度霾日污染物层高的原因。

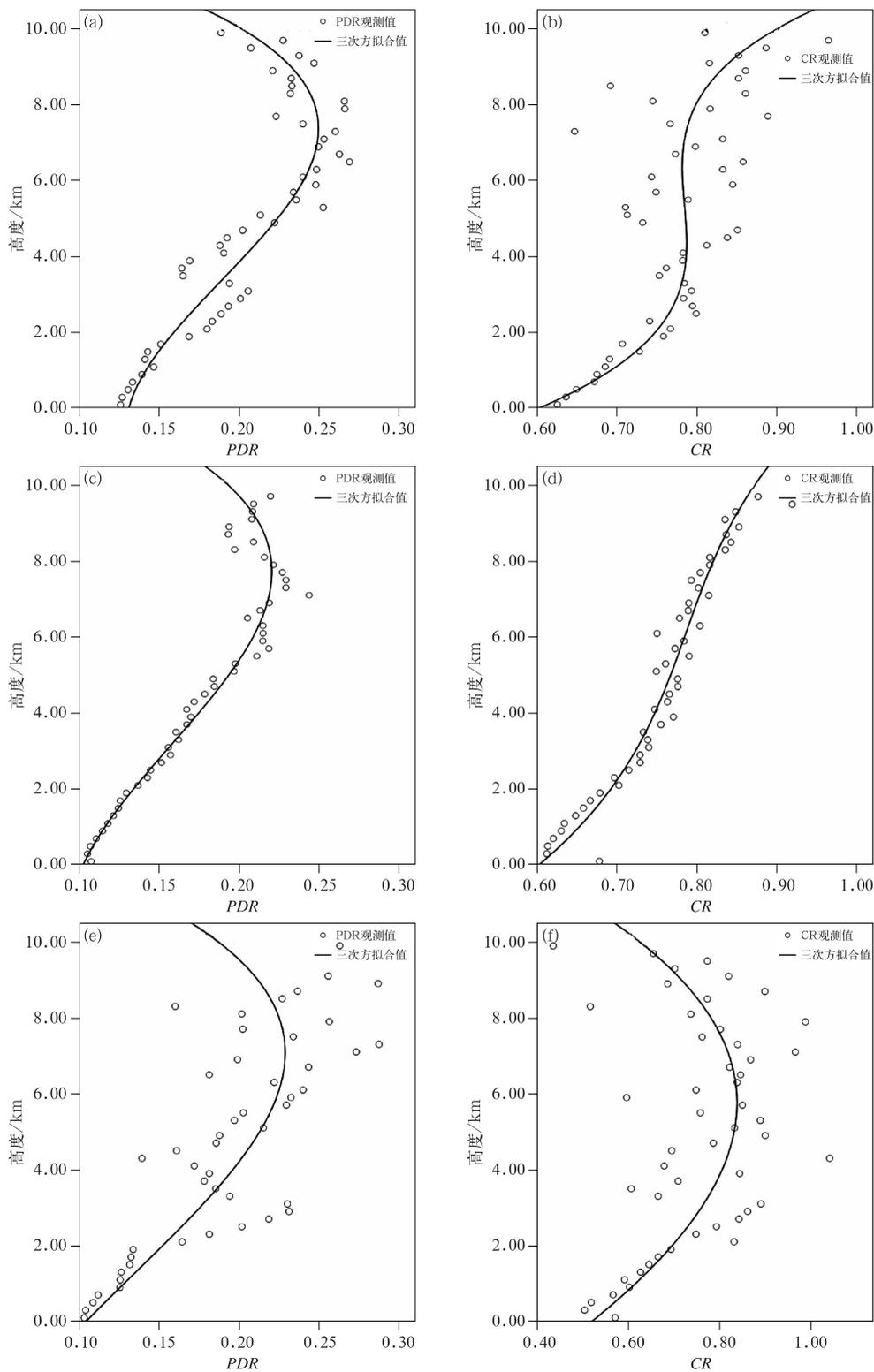


图 6 2007—2017 年鲁中地区清洁日(a,b)、霾日(c,d)、重度霾日(e,f)的 PDR(a,c,e)和 CR(b,d,f)的垂直廓线拟合
Fig. 6 Vertical profile fitting of PDR (a, c, e) and CR (b, d, f) on clear days (a, b), haze days (c, d) and heavy haze days (e, f) in central part of Shandong Province during 2007—2017

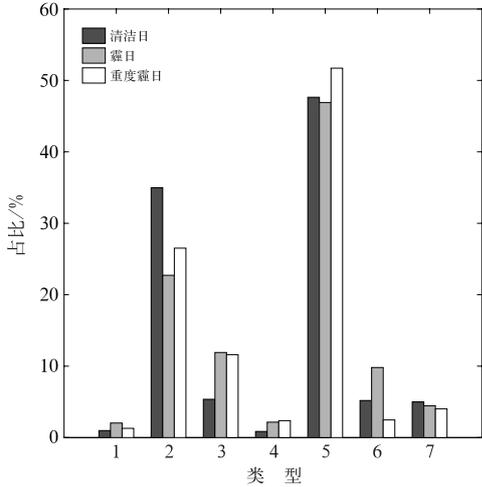


图 7 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日气溶胶的成分占比
(1: 洁净海洋型, 2: 沙尘型, 3: 污染大陆型, 4: 洁净大陆型, 5: 污染沙尘型, 6: 烟尘型, 7: 海洋沙尘型)
Fig. 7 Aerosol composition proportion on clear days, haze days and heavy haze days in central part of Shandong Province during 2007—2017
(1: clear marine, 2: dusty, 3: polluted continental, 4: clear continental, 5: polluted dusty, 6: elevated smoke, 7: dusty marine)

2.4 气象因素对霾时气溶胶垂直分布的影响

2.4.1 风速

图 10 给出了鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日近地面风速分布和 1000~500 hPa 垂直平均风速廓线。从图中可知,与清洁日相比,霾日和重度霾日的地面风速主要集中在 $0\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占比最大。其中,重度霾日地面风速在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间的占比大于霾日。清洁日在地面风速 $2\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占比最大。从垂直廓线可以看出,霾日在垂直方向的平均风速始终小于清洁日。近地面 925 hPa(约 0.8 km) 以下重度霾日平均风速最小,稳定的风场使污染物难以扩散,从而有利于污染物的积聚。925 hPa 以上,霾日的平均风速维持在 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,远小于重度霾日和清洁日,使得霾日污染物层顶高达 2.7 km,高于重度霾日。850 hPa(1.5 km) 以上,重度霾日与清洁日的平均风速重合,使得重度霾在 1.5 km 以上污染物得到有效扩

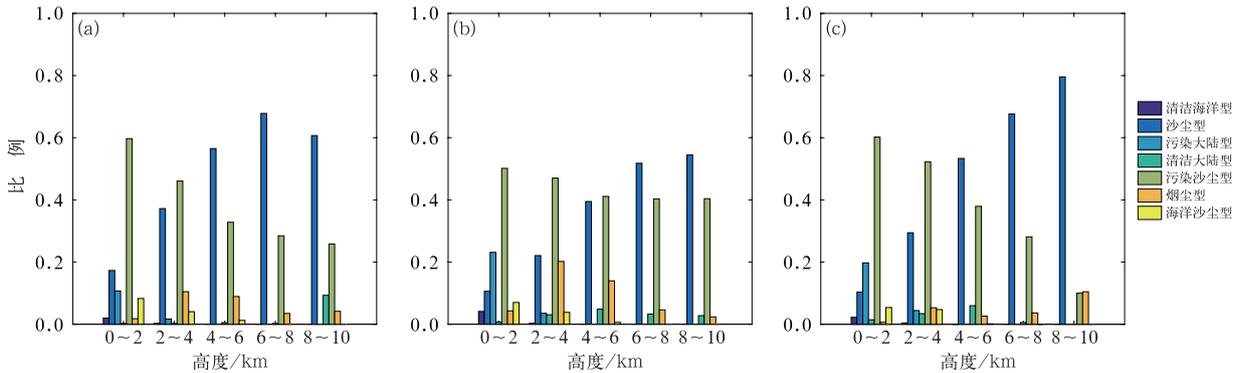


图 8 2007—2017 年鲁中地区清洁日(a)、霾日(b)、重度霾日(c)不同高度上气溶胶成分比例
Fig. 8 Aerosol composition ratio at different heights on clear days (a), haze days (b) and heavy haze days (c) in central part of Shandong Province during 2007—2017

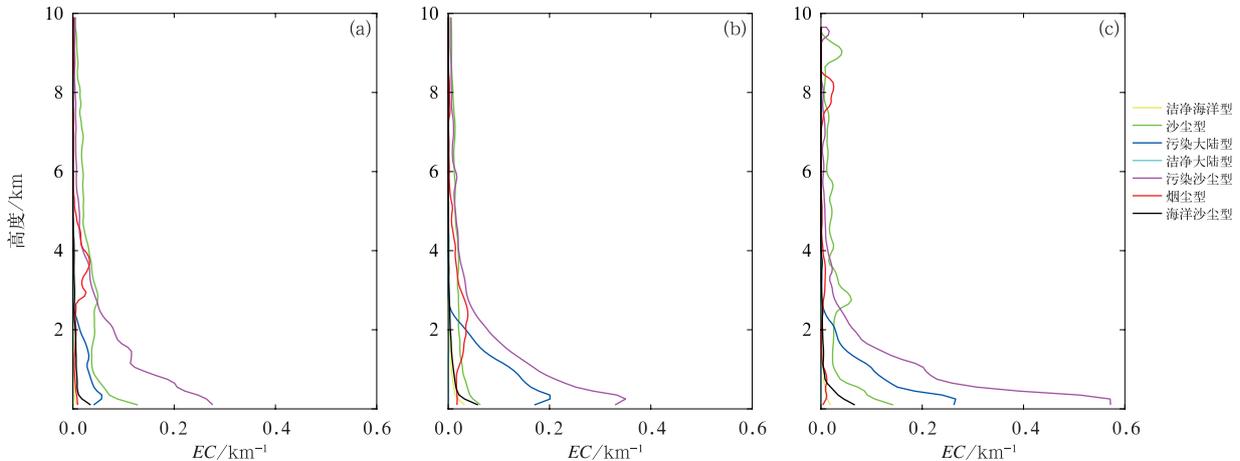


图 9 2007—2017 年鲁中地区清洁日(a)、霾日(b)、重度霾日(c)各类型气溶胶对 EC 贡献的垂直廓线
Fig. 9 Vertical profile of the contribution of various aerosols to EC on clear days (a), haze days (b) and heavy haze days (c) in central part of Shandong Province during 2007—2017

散,污染物层顶维持在 1.5 km 附近。可见,地面风速越小,越有利于霾日颗粒物的聚集。垂直方向上风速的大小与气溶胶层的垂直分布有很好的对应关系。

2.4.2 湿度

许多气溶胶成分具有吸湿性,大小与相对湿度有关(韩永等,2009;Clarke et al,2004;Covert et al,1972)。有研究表明,当相对湿度超过 70%~80%时,EC 可增加 100%以上(Swietlicki et al,2008)。由于清洁日、霾日、重度霾日气溶胶的 EC 在 500 hPa 及其以上很小,本文只讨论 500 hPa 以下的大气相对湿度。

计算鲁中地区近地面相对湿度分布发现(图 11a),清洁日、霾日及重度霾日的平均地面相对湿度分别为 31.38%、45.20%、55.13%。清洁日地

面相对湿度分布较为集中,主要介于 10%~40%,霾日则主要集中在 20%~40%。重度霾日地面相对湿度主要集中在 70%~80%与 30%~40%。研究表明,霾时大气中人为排放的硫酸盐、硝酸盐和碳氢化物等气溶胶粒子有较强的吸湿性,当风速小、扩散条件不利时,气溶胶粒子快速吸湿增长,易形成霾。可以看出,大部分重度霾日对应着地面上较大的相对湿度,但仍有少部分重度霾日对应较小的相对湿度,说明大的地面相对湿度可以导致重度霾的发生,但湿度不是重度霾发生的必要条件。

从垂直方向上来看(图 11b),地面到 5.6 km(约 500 hPa),霾日的相对湿度在 40%~45%,清洁日则集中在 30%~38%。重度霾时,1 km(约 800 hPa)以下的湿度在 50%以上,明显大于霾日,虽然重度霾和霾日均以污染大陆型和污染沙尘型为主,

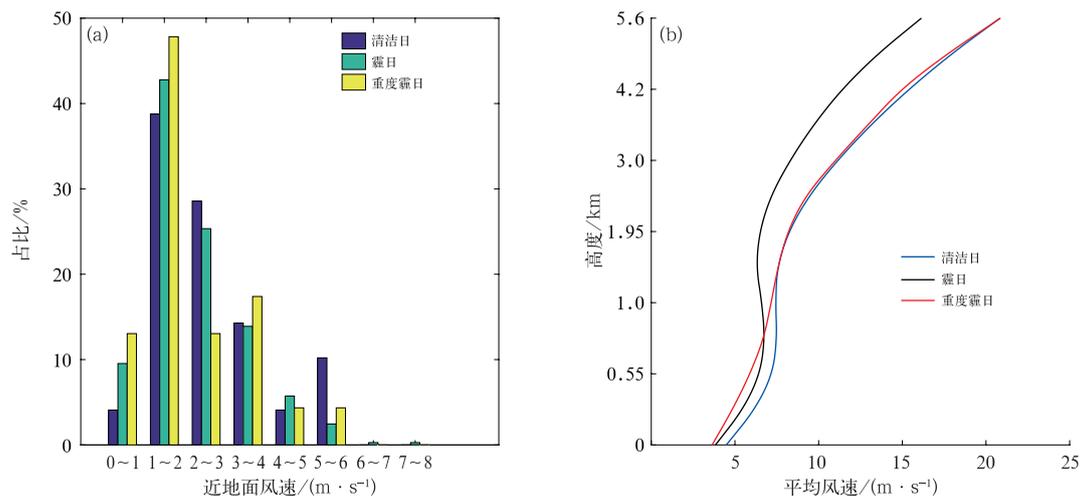


图 10 2007—2017 年鲁中地区清洁日、霾日、重度霾日近地面风速分布(a)和垂直平均风速廓线(b)
Fig. 10 Distribution of near-surface wind speed (a) and vertical mean wind speed profile (b) on clear days, haze days and heavy haze days in central part of Shandong Province during 2007—2017

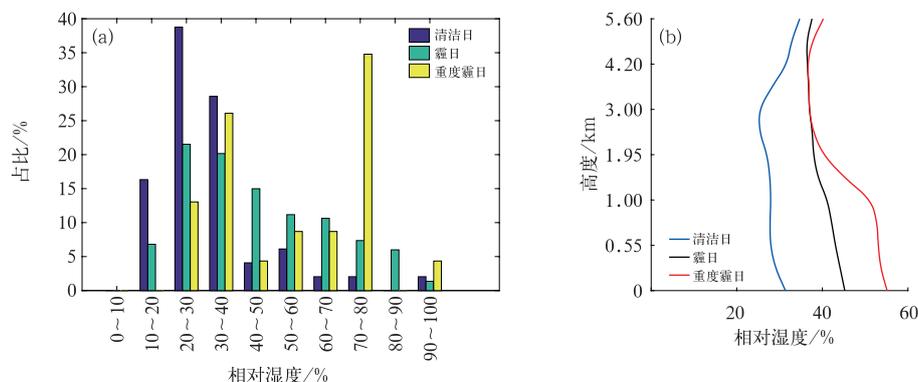


图 11 同图 10,但为近地面相对湿度分布(a)和垂直平均相对湿度廓线(b)
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for distribution of near-surface relative humidity (a) and vertical average relative humidity profile (b)

但重度霾气溶胶粒子更小。大量的细粒子在吸湿增长后,有利于重度霾的维持和加强。1 km 以上,重度霾的相对湿度随高度逐渐减小到与霾日相同。由气溶胶的类型来看,霾日在 1 km 以上对应的烟尘型逐渐增多,较小的气溶胶粒子吸湿后,使得 EC 大于重度霾,且粒子更加规则。对于清洁日,3 km(约 700 hPa)以下,相对湿度远小于霾日,加上整层风速偏大,沙尘型气溶胶较多,其 EC 小于霾日。3 km 以上,相对湿度开始增大,清洁日、霾日、重度霾日相对湿度基本相同,气溶胶的 EC 也基本一致。

2.4.3 风向

为统计清洁日、霾日、重度霾日不同高度层的风

向分布,分别选取了 1000、850、500 hPa 三个气压层进行统计(图 12)。可以看出,清洁日,500 hPa 上,鲁中地区以西偏西北风为主导风向,占 43.00%;850 hPa 以偏西北风为主,西北风占 18.30%,西北偏北风占 17.00%;1 000 hPa 以南风为主,占 20.43%,其次为西偏西南风,占 16.60%。霾时 500 hPa 风向以西风和西北偏西风为主,分别占 31.52%和 27.45%,可见霾时高空气流更为平直。与清洁日不同,霾时 850 hPa 风向以偏西风为主,西南风、西南偏西风及西风分别占 14.13%、11.96%、11.96%。1000 hPa 风向以偏南风为主,南风、西南偏南风分别占比 18.75%与 19.00%。可见,霾时风

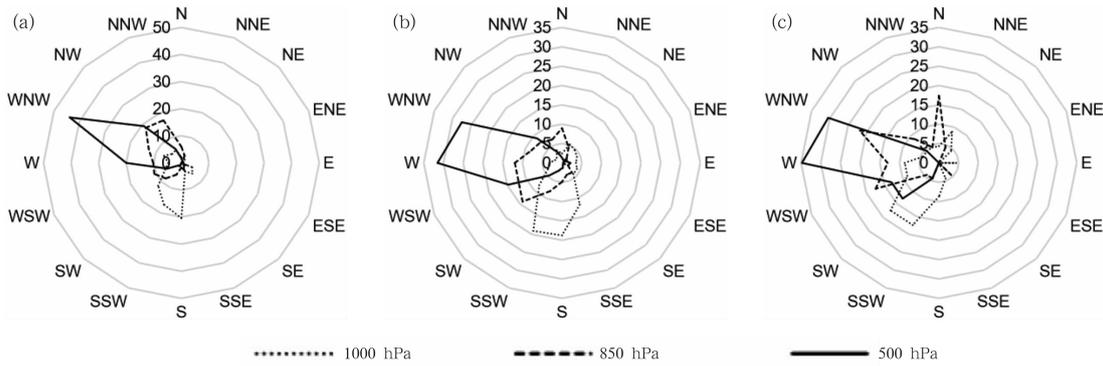


图 12 2007—2017 年鲁中地区清洁日(a)、霾日(b)、重度霾日(c)风向分布
Fig. 12 Distribution of wind direction distribution on clear days (a), haze days (b) and heavy haze days (c) in central part of Shandong Province during 2007—2017

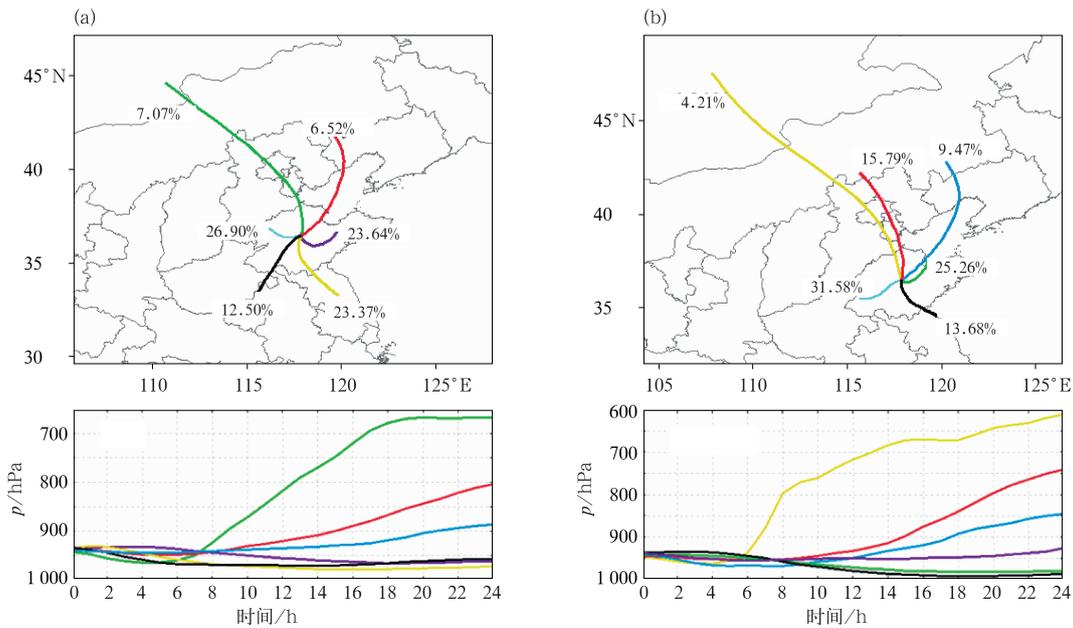


图 13 2007—2017 年鲁中地区霾日(a)、重度霾日(b)后向轨迹聚类分析
Fig. 13 Backward trajectory clustering analysis of haze days (a) and severe haze days (b) in central part of Shandong Province during 2007—2017

向随高度的增加呈顺时针旋转,易出现暖平流。重度霾时,500 hPa 风向与霾时类似,也是以偏西风为主。不同的是,西风出现的比例略大,说明高空气流更加平直,同时西南风出现的比例比霾时更大,达 13.00%,这与重度霾时易出现的高空短波槽脊有关。重度霾时 850 hPa 风向主要为偏西风和偏北风,偏北风出现的比例明显大于霾日,达 17.39%,是重度霾日污染沙尘型气溶胶偏多的原因。1000 hPa 风向以西南风为主,西南风的出现有利于河南、安徽等地污染物向山东传输,从而有利于重度霾的发生。

2.4.4 污染物传输路径

鲁中地区霾和重度霾时污染物后向轨迹聚类分析见图 13。霾日,来自蒙古高原的轨迹占总量的 7.07%,轨迹在高空 700 hPa(3 km)向东南方向传输,越过内蒙古后逐渐下沉,经河北到达鲁中地区;来自内蒙古东北部的轨迹占总量的 6.52%,轨迹自 800 hPa(1.5 km)逐渐下沉至鲁中地区;自东南方向的江苏和西南方向的河南、安徽占比分别为 23.37%和 12.50%;河北方向为 26.90%;本地传输占比为 23.64%。重度霾时,来自蒙古高原的远距离高空传输轨迹占比为 4.21%,少于霾日,传输距离和高度均大于霾日;来自内蒙古东部的轨迹占比合计为 25.26%,垂直方向上自 850~700 hPa(1.5~3 km)向南传输后下沉至鲁中;来自河南和江苏方向的轨迹占比分别为 31.58%和 13.68%;本地传输为 25.26%。

2.4.5 逆温层

大气边界层内逆温抑制近地层污染物的扩散

(Zhang and McMurry, 1992)。根据文中 2.1 节的分析,污染物主要集中在 2000 m 以下,因此本文主要统计底高在 2000 m 以下的逆温。用上层温度减去下层温度,当 $\Delta T_i > 0$ 时,该层判定为逆温层。当两层逆温层之间小于 100 m 时,作为一个逆温层统计。本文将逆温分为三类:底高小于 300 m 的贴地逆温,底高位于 300~1000 m 的低悬逆温,底高在 1000~2000 m 的高悬逆温。

对霾和重度霾进行逆温计算,同时利用中度和轻度霾来进行比较分析,以期更好地揭示逆温在霾和重度霾中的作用。可以发现,霾时逆温出现的比例很高,为 97.80%。其中,逆温出现的比例随霾的加重而增大,重度霾为 100%,中度霾为 98.20%,轻度霾为 97.20%。以出现逆温层的霾日作为统计对象,统计不同强度霾时逆温层数分布(表 1)发现,霾时出现一层逆温的比例达 83.8%,重度、中度及轻度霾比例依次增大。霾时出现二层逆温的比例为 14.3%,与中度、轻度霾相差不大;重度霾比例达 42.9%,明显大于其他强度霾。霾时三层逆温的比例很小,为 2.0%;重度、中度霾比例分别为 4.6%与 5.5%,轻度霾未出现三层逆温。可以看出,大多数霾日出现一层逆温,其次是二层逆温。霾的强度越大,多层逆温出现的比例越高,重度霾对应的多层逆温比例接近 50%。

经过统计,鲁中地区霾时共有七种逆温层类型(表 2)。从逆温类型比例的分布来看,霾日期间,贴地逆温出现的比例最大,达 84.96%。其次是贴地+低悬型和贴地+高悬型,占比分别为 4.42%和 6.19%。随着霾强度的增大,贴地型逆温占比越小,

表 1 2007—2017 年鲁中地区不同强度霾时逆温层数分布(单位:%)
Table 1 Distribution of temperature inversion layers on haze days with different intensities in central part of Shandong Province during 2007—2017 (unit: %)

逆温层数	霾	重度霾	中度霾	轻度霾
1	83.8	52.4	81.8	86.8
2	14.3	42.9	12.7	13.2
3	2.0	4.6	5.5	0

表 2 2007—2017 年鲁中地区不同强度霾时逆温类型分布(单位:%)
Table 2 Distribution of temperature inversion types on haze days with different intensities in central part of Shandong Province during 2007—2017 (unit: %)

逆温类型	霾	重度霾	中度霾	轻度霾
贴地型	84.96	52.63	78.18	90.00
低悬型	1.47	0	0	2.00
高悬型	1.77	10.53	1.82	1.00
低悬+高悬型	0.29	0	0	0
贴地+低悬型	4.42	15.79	10.91	5.00
贴地+高悬型	6.19	15.79	7.27	2.00
贴地+低悬+高悬型	0.88	5.26	1.82	0

而其他类型占比则越大。其中,重度霾在不同强度霾中贴地型比例最小(52.63%),贴地+低悬型、贴地+高悬型、高悬型逆温比例最大(分别为15.79%,15.79%,10.53%)。可见,除了贴地型,贴地+低悬型和贴地+高悬型逆温也对鲁中地区重度霾的发展维持起到了很重要的作用。

2.4.6 不同类型逆温对大气扩散能力的影响

逆温使大气稳定地分层,导致低层扩散能力较差。风速被认为是稳定边界层的一个关键参数(廖晓农等,2014)。弱风有利于逆温的发展和维持;强风则会导致湍流加强,导致地表与高空的冷暖空气混合,从而导致逆温减弱(Guo et al, 2015; Pietroni et al, 2014)。另外,在稳定的条件下,逆温高度以下湍流交换减弱,易造成污染物的积累(van Hooijdonk et al, 2017)。因此通过计算逆温层下空气出

流量(F)来考察不同逆温型时气溶胶的扩散能力。其中:

$$F = WS \times IH$$

$$WS = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}$$

式中 WS 为逆温层以下的平均全风速。

逆温层高度(IH):

$$IH = (\text{顶高} - \text{底高})/2$$

通过计算,贴地+低悬型和贴地+高悬型逆温层高度、平均全风速、出流量相对较低。其次是贴地型、贴地+低悬+高悬型。低悬型和高悬型的逆温层高度、平均全风速、出流量相对较大。可见,当逆温为贴地+低悬型和贴地+高悬型逆温时,逆温层下的大气最稳定,有利于重度霾时污染物的积聚;其次是贴地型和贴地+低悬+高悬型逆温。三种悬浮型逆温时,逆温层下大气稳定性最差。

表 3 2007—2017 年鲁中地区霾时不同类型的逆温层高、逆温层下的平均全风速和大气出流量

Table 3 Height of different types of inversion layers, average total wind speed under the inversion layer and atmospheric outflow flow on haze days in central part of Shandong Province during 2007—2017

逆温类型	逆温层高度/m	平均全风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	出流量/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
贴地型	250.87	2.92	748.60
低悬型	1008.53	2.75	2615.59
高悬型	1548.60	5.74	9896.70
低悬+高悬型	672.77	5.53	830.09
贴地+低悬型	200.46	2.15	438.07
贴地+高悬型	202.91	2.28	453.94
贴地+低悬+高悬型	219.34	3.85	759.02

3 结 论

基于 CALIPSO 卫星数据和 NCEP 提供的 FNL 再分析数据,对 2007—2017 年鲁中地区霾期间的气溶胶垂直分布及其气象条件进行了统计分析,结果表明:

(1)鲁中地区气溶胶 EC 随高度总体上呈递减趋势。霾时气溶胶粒子主要聚集在对流层低层 2.7 km 以下,重度霾时气溶胶粒子多集中在 1.5 km 以下。以 0.9、1.66、1.34 km 为临界高度,清洁日、霾日、重度霾日的 EC 在临界高度以上呈指数递减,以下呈对数递减。年平均 PDR 和 CR 总体上随高度呈递增趋势,范围为 0.1~0.3 和 0.5~0.9。2 km 以下,重度霾日气溶胶以规则的小粒子为主;霾日气溶胶粒子则以规则的大粒子为主。2~4 km,重度霾日气溶胶粒子的规则度和大小均为最大,霾日最小。

(2)霾日、重度霾日气溶胶类型以沙尘型、污染沙尘型为主。清洁日沙尘型气溶胶最多。清洁日、霾日、重度霾日随着高度的增加,污染沙尘型比例逐渐减小,沙尘型逐渐增多。霾日和重度霾日,近地面 2 km 以下存在一部分污染大陆型气溶胶。霾日 2~6 km 烟尘型气溶胶最多。

(3)污染沙尘型对霾日和重度霾日消光的贡献最大,其次是大陆污染型。沙尘型在近地面 1 km 以下对重度霾有一定的贡献。烟尘型在 2~4 km 对霾日的消光有一定的作用。

(4)垂直方向上风速和相对湿度的分布与气溶胶层的垂直分布有很好的对应关系。霾时风向随高度的增加呈顺时针旋转,易出现暖平流。500 hPa 霾日与重度霾日高空以西风为主,重度霾日的高空气流更为平直;850 hPa 霾日以西南风为主,重度霾日的北风分量有利于北方的沙尘输送;1000 hPa 西南风有利于外地污染物的输送,促进重度霾的发生。

(5)后向轨迹聚类分析结果表明,鲁中地区霾时近地面的污染物不仅来源于本地污染排放和河北、江苏等省份的传输,也存在自蒙古、内蒙古等地的长距离传输。重度霾期间,蒙古方向的传输距离长且高度高,来自内蒙古的传输量占比更大,来自河南方向的污染物传输量占比最大。

(6)霾的强度越大,多层逆温出现的比例越高。重度霾对应的多层逆温比例接近一半。当逆温型为贴地+低悬型和贴地+高悬型逆温时,逆温层下的大气最稳定,有利于污染物的聚集。

参考文献

- 《大气科学辞典》编委会,1994. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社. Committee of Atmospheric Science Dictionary,1994. Atmospheric Science Dictionary [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 范伟,邱康俊,凌新锋,等,2020. 基于遥感测量的淮河流域中部气溶胶光学和微物理特性分析[J]. 气象,46(4):528-537. Fan W, Qiu K J, Ling X F, et al,2020. Analysis of aerosol optical and microphysical properties in central part of Huaihe River Basin based on remote sensing measurement[J]. Meteor Mon,46(4):528-537(in Chinese).
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2018. 霾的观测识别:GB/T 36542-2018[S]. 北京:中国标准出版社;7. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2018. Haze identification for meteorological observation; GB/T 36542-2018[S]. Beijing: Standards Press of China;7(in Chinese).
- 韩永,饶瑞中,王英俭,2009. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析[J]. 光谱学与光谱分析,29(1):33-37. Han Y, Rao R Z, Wang Y J,2009. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland[J]. Spectrosc Spect Anal,29(1):33-37(in Chinese).
- 廖晓农,张小玲,王迎春,等,2014. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学,35(6):2031-2044. Liao X N, Zhang X L, Wang Y C, et al,2014. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing[J]. Environ Sci,35(6):2031-2044(in Chinese).
- 刘琼,耿福海,陈勇航,等,2012. 上海不同强度干霾期间气溶胶垂直分布特征[J]. 中国环境科学,32(2):207-213. Liu Q, Geng F H, Chen Y H, et al,2012. Vertical distribution of aerosols during different intense dry haze periods around Shanghai[J]. China Environ Sci,32(2):207-213(in Chinese).
- 穆穆,张人禾,2014. 应对雾霾天气:气象科学与技术大有可为[J]. 中国科学:地球科学,44(1):1-2. Mu M, Zhang R H,2014. Addressing the issue of fog and haze: a promising way of meteorological science and technology[J]. Sci Sin Terrae, 44(1):1-2(in Chinese).
- 吴兑,2008. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. 环境化学,27(3):327-330. Wu D,2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data[J]. Environ Chem,27(3):327-330(in Chinese).
- 吴兑,2013. 探秘 PM_{2.5}[M]. 北京:气象出版社:106. Wu D,2013. Exploring PM_{2.5}[M]. Beijing:China Meteorological Press:106(in Chinese).
- 徐栋夫,曹萍萍,王源程,2020. 成都一次重污染过程的气溶胶光学特性垂直分布[J]. 气象,46(7):948-958. Xu D F, Cao P P, Wang Y C,2020. Study of the vertical distribution of aerosol optical properties during a heavy pollution event in Chengdu[J]. Meteor Mon,46(7):948-958(in Chinese).
- 许潇锋,刘晨璇,唐志伟,等,2018. 基于 CALIPSO 的华北地区气溶胶垂直分布特征[J]. 大气科学学报,41(1):126-134. Xu X F, Liu C X, Tang Z W, et al,2018. Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China[J]. Trans Atmos Sci,41(1):126-134(in Chinese).
- 张鹏,王春姣,陈林,等,2018. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. 气象,44(6):725-736. Zhang P, Wang C J, Chen L, et al,2018. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteor Mon, 44(6):725-736(in Chinese).
- Cao Y Q, Zhang W, Wang W J,2018. Spatial-temporal characteristics of haze and vertical distribution of aerosols over the Yangtze River Delta of China[J]. J Environ Sci,66:12-19.
- Clarke A D, Shinozuka Y, Kapustin V N, et al,2004. Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: physicochemistry and optical properties[J]. Geophys Res Atmos,109(D15):D15S09.
- Covert D S, Charlson R J, Ahlquist N C, et al,1972. A study of the relationship of chemical composition and humidity to light scattering by aerosols[J]. J Appl Meteor Climatol,11(6):968-976.
- Draxler R R, Hess G D,1997. Description of the HYSPLIT-4 modeling system[R]. NOAA Technical Memo ERL ARL-224. Washington D C: NOAA.
- Gui K, Che H Z, Chen Q L, et al,2016. Aerosol optical properties based on ground and satellite retrievals during a serious haze episode in December 2015 over Beijing[J]. Atmosphere,7(5):70.
- Guo X F, Yang T, Sun Y L,2015. Averaging period effects on the turbulent flux and transport efficiency during haze pollution in Beijing, China[J]. Meteor Atmos Phys,127(4):419-433.
- Haywood J M, Ramaswamy V,1998. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols[J]. J Geophys Res Atmos,103(D6):6043-6058.
- Liu Q, Ma X J, Yu Y R, et al,2017. Comparison of aerosol characteristics during haze periods over two urban agglomerations in China using CALIPSO observations[J]. Particology,33:63-72.
- Miao Y C, Che H Z, Zhang X Y, et al,2020. Integrated impacts of synoptic forcing and aerosol radiative effect on boundary layer and pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Atmos Chem Phys,20(10):5899-5909.
- Miao Y C, Liu S H, Guo J P, et al,2018. Impacts of meteorological

- conditions on wintertime PM_{2.5} pollution in Taiyuan, North China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 25(22): 21855-21866.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2016. Modeling the feedback between aerosol and boundary layer processes: a case study in Beijing, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 23(4): 3342-3357.
- Pietroni I, Argentini S, Petenko I, 2014. One year of surface-based temperature inversions at Dome C, Antarctica[J]. *Bound-Layer Meteor*, 150(1): 131-151.
- Rozwadowska A, 2007. Influence of aerosol vertical profile variability on retrievals of aerosol optical thickness from NOAA AVHRR measurements in the Baltic Region[J]. *Oceanologia*, 49(2): 165-184.
- Swietlicki E, Hansson H C, Hämeri K, et al, 2008. Hygroscopic properties of submicrometer atmospheric aerosol particles measured with H-TDMA instruments in various environments — a review [J]. *Tellus B Chem Phys Meteor*, 60(3): 432-469.
- van Hooijdonk L G S, Clercx H J H, Abraham C, et al, 2017. Near-surface temperature inversion growth rate during the onset of the stable boundary layer[J]. *J Atmos Sci*, 74(10): 3433-3449.
- Wang H, Tan S C, Wang Y, et al, 2014. A multisource observation study of the severe prolonged regional haze episode over eastern China in January 2013[J]. *Atmos Environ*, 89: 807-815.
- Xu T T, Yu S, Liu M X, et al, 2019. Temperature inversions in severe polluted days derived from radiosonde data in North China from 2011 to 2016[J]. *Sci Total Environ*, 647: 1011-1020.
- Zhang X Q, McMurry P H, 1992. Evaporative losses of fine particulate nitrates during sampling[J]. *Atmos Environ A Gen Top*, 26(18): 3305-3312.