

基于多源探测资料对石河子地区一次低能见度天气的研究

王文萧¹ 谢承华² 王进³ 任岗³ 安冬亮³ 明虎¹

1. 山东理工大学, 淄博 255000

2. 成都远望探测技术有限公司, 成都 610000

3. 石河子气象局, 石河子 832000

提 要: 2020年1月1—17日石河子地区发生了一次持续性低能见度天气。利用系留飞艇、微波辐射计、地基大气气溶胶激光雷达等设备对此次持续较长的低能见度天气进行了联合探测试验, 分析了过程期间的气象因子、大气边界层和污染物的日变化及逐日特征。结果表明: 此次由雾-霾引起的低能见度天气具有霾阶段持续时间长、大气边界层高度偏低、逆温层显著、污染物层较厚等特点。大气边界层高度的变化与污染物积累之间存在显著的相互作用, 低边界层高度对应低风速、高湿度和高污染物浓度。观测期间平均能见度低(1040 m)、地表风速小(低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、相对湿度较高(71%~92%), 大气边界层呈上干下湿结构, 大气边界层高度范围主要在 230~500 m, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度峰值为 $320 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雾-霾期间相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到一定阈值后均对能见度呈显著非线性负相关影响, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对能见度的影响更显著。研究结果对雾-霾天气的监测和预报有一定指示意义。

关键词: 雾-霾, 大气边界层, 系留飞艇, 激光雷达, 大气气溶胶

Study on a Low Visibility Weather Event in Shihezi City Based on Multi-Source Observation Data

WANG Wenxiao¹ XIE Chenghua² WANG Jin³ REN Gang³ AN Dongliang³ MING Hu¹

1 Shandong University of Technology, Zibo 255000

2 Chengdu Invant-Future Detection Technology Co., Ltd., Chengdu 610000

3 Shihezi Meteorological Office of Xinjiang, Shihezi 832000

Abstract: Shihezi experienced a persistent low visibility weather event from 1 to 17 January 2020. This study employs tethered airships, microwave radiometers, ground-based lidars, and other equipment to conduct joint experiments to detect this event. The meteorological factors, atmospheric boundary layer characteristics, and the diurnal and daily variations of pollutants during this low visibility weather are analyzed. The results reveal an extended duration of haze phase alongside low atmospheric boundary layer height, significant inversion layer, and high pollutant concentration during this fog-haze event. The relationship between atmospheric boundary layer height variation and pollutant accumulation was significant, and the low atmospheric boundary layer height corresponded to low wind speed, high humidity and high pollutant concentration. During the observation period, the average visibility was low (1040 m), the surface wind speed was small (less than $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), but the relative humidity was relatively high (71% - 92%). The atmospheric boundary layer presented an upper dry and lower wet structure, with the height of the atmospheric boundary layer ranging between 230 and 500 m, and $\text{PM}_{2.5}$ peaked at $320 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Both relative humidity and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations exhibited significantly nonlinear negative correlations with visibility.

*新疆生产建设兵团科技计划项目(2023AB036)、新疆生产建设兵团基础研究类项目(2024DA015)、第八师石河子市重点领域创新团队计划(2024TD04)和山东省自然科学基金项目(ZR2024MD031)共同资助

第一作者: 王文萧, 主要从事天气预报与分析研究工作研究. E-mail: wangwenxiao_email@163.com

通讯作者: 王进, 主要从事天气雷达应用研究. E-mail: apple6405@sohu.com

2024年7月23日收稿; 2025年6月29日收修订稿

after they reached certain specific thresholds, of which $PM_{2.5}$ concentrations demonstrated a more pronounced effect on visibility. These research results have certain indicative significance for the monitoring and forecasting of fog-haze weather.

Key words: fog-haze, atmospheric boundary layer, tethered airship, lidar, atmospheric aerosol

引言

雾-霾长期以来一直是影响人类健康和环境质量的主要气象现象之一,其通过降低能见度直接影响交通安全(Ebenstein et al, 2017; 王晓春等, 2023), 并因其富含有毒有害物质而对人类健康产生不利影响(Yang et al, 2022; Bu et al, 2021; Zhang et al, 2020)。雾-霾不仅是气象动力学的表现, 还是本地排放与区域性空气质量运输综合效应的结果(Huang et al, 2018; Yabo et al, 2024; Li et al, 2022)。 $PM_{2.5}$ 是造成中国空气污染的最主要的污染物之一(盛丹睿等, 2021), 其中包括如黑碳这样的强效吸光气溶胶(张剑飞等, 2020; Wilcox et al, 2016)。黑碳诱导的加热效应会改变湍流强度, 增加垂直热稳定性, 抑制大气边界层的发展, 从而减弱空气污染物的扩散并加剧雾-霾的程度(云龙等, 2024; Ding et al, 2016)。大气边界层是地气相互作用和大气污染形成的核心区域, 强逆温层和低边界层可以压缩污染物垂直分布, 是雾-霾天气加剧和维持的重要原因之一(周述学等, 2020; 孟丽红等, 2022; Tang et al, 2016)。研究表明, 大气边界层的结构对雾-霾的形成与持续具有直接的影响(Jia et al, 2024; Wang et al, 2023; Marley et al, 2021; Li et al, 2020)。在针对天津地区的一次雾-霾过程研究时, 发现雾-霾过程各阶段的转换与大气边界层特征的变化紧密相关(孟丽红等, 2020)。对武汉地区的研究发现, 逆温层在雾-霾期间变得更厚(Yuan et al, 2020)。此外, 大气边界层和自由大气中气溶胶的季节特征及区域输送对雾-霾形成的也有显著影响(唐羽等, 2021)。这些发现进一步证实了大气边界层特征在雾-霾形成和持续中的重要性, 并为雾-霾天气中大气边界层和大气气溶胶相互作用的研究提供了参考。

系留飞艇、GPS 等探空仪可以有效、准确地监测大气垂直结构的气象要素和环境要素, 这些探空数据被广泛应用于分析边界层结构特征和大气污染特征(Li et al, 2017; Chen et al, 2022; Guo et al, 2020)。虽然探空数据比较精确, 但是一次探测成本较大且探测间隔较长。很多研究也利用微波辐射计、激光雷达、风廓线雷达等地基遥感设备对雾-霾天气的边界层和大气污染进行探测研究(Ming et al, 2023; 胡树贞等, 2022)。

石河子市位于新疆天山北麓经济带, 是天山北坡城市群中的典型工业城市(何凯杰等, 2023; 元雪婷和杨静, 2020)。天山北坡城市群的工业集中度高, 承载了全疆 83% 的重工业, 并排放了全疆 33.3% 的大气污染物(Ma et al, 2022; 王晴等, 2020; 李刚等, 2023)。冬季石河子市静风频率大、平均风速较小, 不利于污染物扩散(杨香林和李维军, 2021)。以上因素共同导致了主要以冬季棕色霾事件形式出现的空气污染, 严重影响了能见度和区域空气质量。由于探测资料的匮乏, 至今对该地区雾-霾天气的研究相对较少。为了有效地揭示该地区雾-霾天气的边界层结构特征以及大气污染物演变特征, 本研究联合使用系留飞艇、地基大气气溶胶激光雷达和地面微波辐射计对 2020 年 1 月 1—17 日发生在石河子地区的一场由雾-霾引起的低能见度天气进行探测研究。

1 资料与方法

1.1 探测设备和资料

试验使用的探测设备主要包括系留飞艇、地基大气气溶胶激光雷达、微波辐射计。系留气艇主体由一个 45 m^3 的鱼形充氦气球及锚泊绞车组成, 气球提供浮力, 而锚泊绞车用于气球的固定及升降控制。系留气艇上搭载了气象探空仪、GRIMM-1.109 粒径谱仪和 AE-51 微型黑碳仪等探测设备。其中, Grimm-1.109 粒径光谱仪通过单颗粒散射可测量 $0.25\sim 32\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的大气气溶胶尺度分布, 从而获得 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度, 时间分

辨率为 6 s; AE-51 微型黑碳仪通过光学衰减测量 880 nm 波长的黑碳质量浓度, 时间分辨率为 1 s。系留气艇的探测时间为 2020 年 1 月 1—14 日每天的 06:00—23:00 (北京时, 下同), 实际飞行高度为 1 km。GBQ L-01 型大气气溶胶激光雷达, 通过 532 nm 波长激光的回波信号可反演出大气气溶胶粒子的消光系数, 其时间分辨率为 1 min, 有效探测高度为 15 km。微波辐射计其中的 21 个频率范围 (22~30 GHz 通道) 用于监测垂直相对湿度信息, 14 个频率范围 (51~59 GHz 的通道) 用于监测垂直温度信息, 其探测高度范围为 0~10 km, 时间分辨率为 2 min。

所用资料包括: (1)石河子市(图 1)2020 年 1 月 1—17 日近地面逐小时能见度、温度、相对湿度、风速和风向数据, 微波辐射计测得的 0~10 km 高度范围的温度和相对湿度数据; (2)地基大气气溶胶激光雷达探测到的 0~1.5 km 高度内消光系数数据; (3)利用搭载在系留飞艇上的 Grimm-1.109 粒径谱仪探测到的 0~1 km 高度内的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度数据, AE-51 微型黑碳仪获得的 0~1 km 高度内黑碳质量浓度 (以下简称浓度) 数据, 以及利用气象传感器记录的 0~1 km 高度范围内的温度和相对湿度数据 (用于计算大气边界层高度)。以上探测获得的数据均经过了数据质量控制和订正等处理。

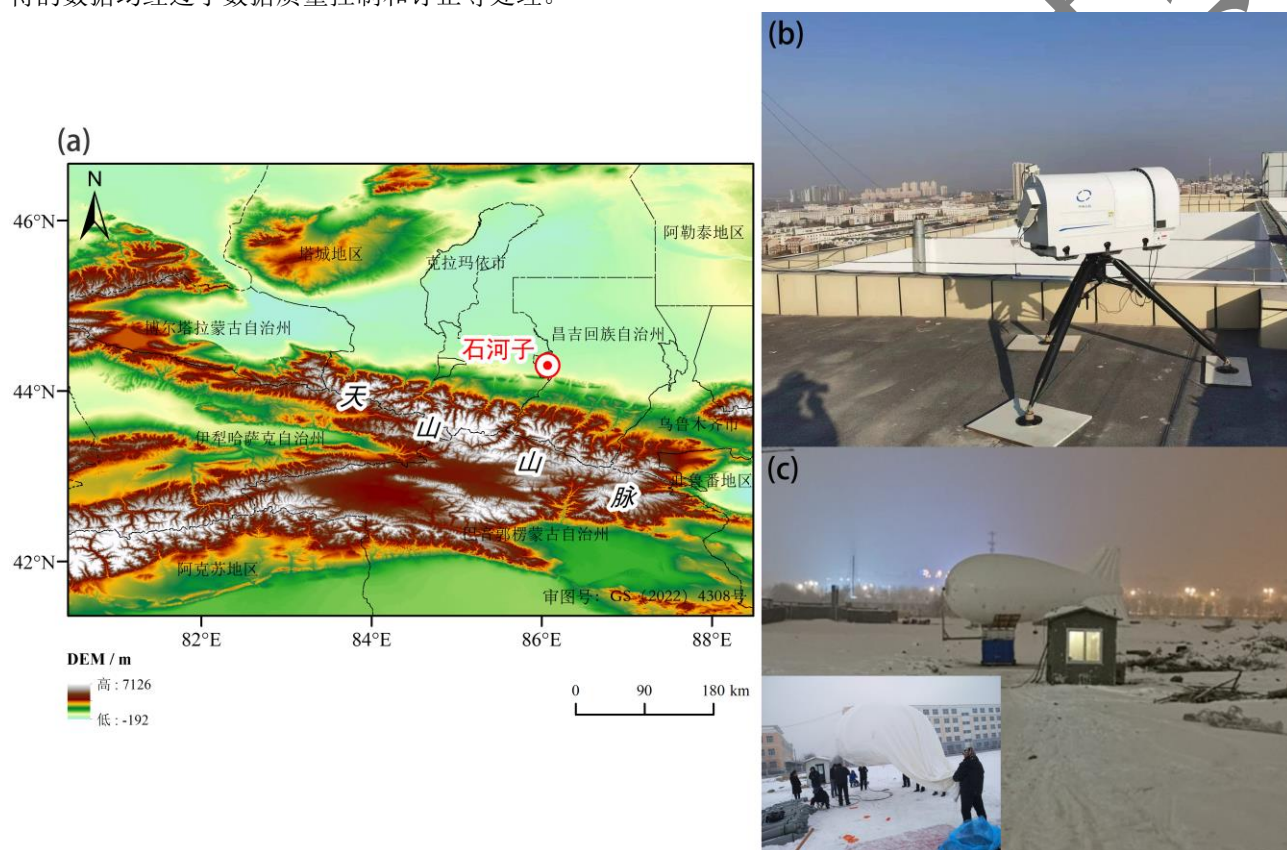


图 1 (a) 石河子市地理位置以及 (b, c) 此次过程主要探测设备: (b) 微波辐射计和 (c) 系留飞艇

Fig. 1 (a) Geographical location of Shihezi City, and the equipment (b) microwave radiometer and (c) tethered airship used in this process

1.2 大气边界层高度计算方法

石河子市昼夜温度变化明显, 地面对大气边界层的加热效应和辐射冷却效应显著, 大气边界层动力过程和热力过程都比较活跃, 理查森数 (Ri) 方法能够较好地应用于白天对流大气边界层的识别 (Sicard et al, 2006; Guo et al, 2016; Lavers et al, 2019)。而夜间受地面辐射冷却的影响大气边界层的稳定性增加, 动力稳定性可

能对 Ri 的计算贡献大于热力稳定性,从而导致 Ri 方法过于简化或不准确。因此在白天(09:00—20:00)采用 Ri 方法确定大气边界层厚度,而夜间(20:01 至次日 08:59)采用位温比湿梯度法。

选取临界 Ri 为 0.25 (Seidel et al, 2012),在 09:00—20:00, Ri 值达到临界数值相应的高度被确定为大气边界层高度。其中, Ri 的计算方法见如下公式:

$$\theta_v = \theta(1 + 0.608q) \quad (1)$$

$$Ri(h) = \frac{\left(\frac{g}{\theta_{vs}}\right)(\theta_{vh} - \theta_{vs})(h - h_s)}{(u_h - u_s)^2 + (v_h - v_s)^2} \quad (2)$$

式中: θ_v 为虚位温, θ 和 q 分别代表位温和比湿。 h_s 代表地面的高度, v_s 、 u_s 分别代表地面风速的两个正交分量(v 、 u 分别指向东向和北向), θ_{vs} 代表地面高度的虚位温, h 代表系留气艇测量的高度, v_h 、 u_h 分别代表系留气艇测量高度的风速正交分量, θ_{vh} 代表系留气艇测量高度的虚位温; g 代表地球重力加速度。

在 20:01 至次日 08:59, 采用位温比湿梯度法计算边界层高度。将最大位温比湿垂直梯度指标 (Δg) 对应的高度确定为大气边界层高度。其中, Δg 的计算如式(3)所示:

$$\Delta g = \left| \frac{\theta_{h2} - \theta_{h1}}{h_2 - h_1} \right| + \left| \frac{q_{h2} - q_{h1}}{h_2 - h_1} \right| \quad h_2 > h_1 \quad (3)$$

式中: h_1 和 h_2 代表相邻检测层高度, θ_h 和 q_h 分别代表不同检测层高度下的位温和比湿。

1.3 广义加法模型的构建

本研究利用广义加法模型 (Generalized Additive Model, GAM), 分析石河子此次雾-霾事件期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度对能见度的影响。广义加法模型是一种非参数回归方法, 能够捕捉解释变量与响应变量之间的非线性关系。本研究将能见度作为响应变量, $PM_{2.5}$ 和相对湿度作为解释变量, 构建的 GAM 模型 (Hastie and Tibshirani, 2017) 如下:

$$V = \alpha + s(PM_{2.5}) + s(RH) + \varepsilon \quad (4)$$

式中: V 代表能见度, α 是模型的截距项, ε 是服从正态分布的随机误差项。函数 $s(PM_{2.5})$ 、 $s(RH)$ 分别代表 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度的非线性平滑拟合效应函数, 通过样条函数的形式来估计, 且不受特定参数化形式的限制。解释变量之间应具有较低的相关性, 避免模型难以区分各变量的独立效应。通过 GAM 模型的拟合结果, 可以量化 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度在雾-霾期间与能见度间的非线性关系。

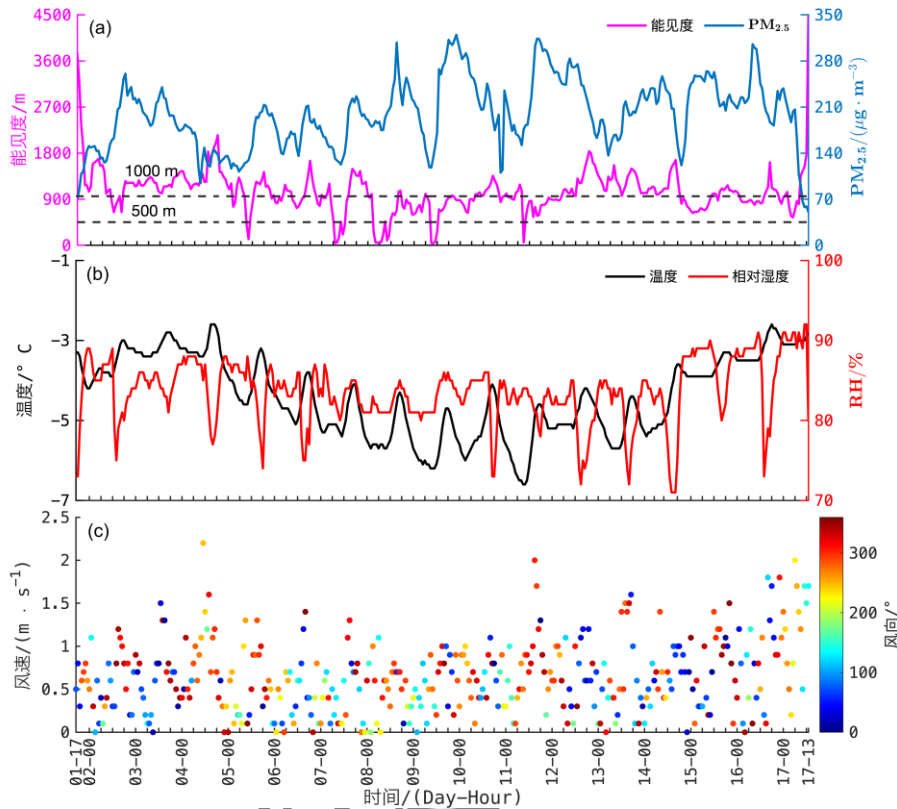
2 近地面气象要素特征

本次雾-霾污染事件发生在 2020 年 1 月 1 日 17:00 至 17 日 13:00, 图 2 显示了石河子市在此期间的能见度、 $PM_{2.5}$ 浓度、近地面温度和相对湿度、风速和风向的逐时变化情况。根据中国气象局 (2010) 中雾和霾的界定标准, 1 日 17:00 至 17 日 09:00 为霾, 17 日 10:00—13:00 为雾。探测过程中, 石河子地区的能见度在 10 000 m 以下, 平均能见度为 1040 m。风速基本低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 整个雾-霾过程持续时间较长, 约为 17 d。如图 2 所示, 1 月 5—17 日平均每日能见度低于 1000 m 持续的时长 ($t_v < 1000 \text{ m}$) 为 14 h; 1 月 5 日、7—9 日和 11 日期间平均每日能见度低于 500 m 持续的时长 ($t_v < 500 \text{ m}$) 为 4.4 h。能见度在 1 月 9 日 10:00 降至最低, 为 39 m。

本次低能见度天气持续时间较长, 以霾过程为主。在此期间地表相对湿度在 71%~92%, $PM_{2.5}$ 浓度呈现出先升高后降低的特点。

石河子市 1 月 1—4 日表现典型霾天气特征, 风速低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对湿度在 70%~90%, 地表 $PM_{2.5}$ 浓度基本在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。尤其在夜晚和清晨时段, 相对湿度达到 85% 以上, 地表风速低于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地表 $PM_{2.5}$ 浓度最高的时间段也出现在夜间, 达到 $320 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。高湿、低风速的地面气象条件有助于污染物的累积,

5—7日霾逐渐发展,能见度开始低于 500 m。8—11日霾较严重。近地面温度较低,在 $-6^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$,冷空气有助于地面附近的大气层趋于稳定,减缓了污染物的垂直扩散。在这段时间内, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,维持在 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,空气质量差。12—16日能见度回升,不再低于 500 m,但 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度依然较高。17日 10—13时进入雾阶段,相对湿度升高到 80%~95%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减小到 $75\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,能见度增大到 1400 m 以上。



注:图 a 中两条黑色虚线分别代表 500 m 和 1000 m 高度。

图 2 2020 年 1 月 1 日 17:00 至 17 日 13:00 石河子市大气边界层内气象条件变化

(a)能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, (b)温度和相对湿度, (c)风速风向

Fig. 2 Characteristics of meteorological condition changes within the atmospheric boundary layer over Shihezi City from 17:00 BT 1 to 13:00 BT 17 January 2020

(a) visibility and $\text{PM}_{2.5}$ concentration, (b) temperature and relative humidity, (c) wind speed and direction

3 气象垂直特征

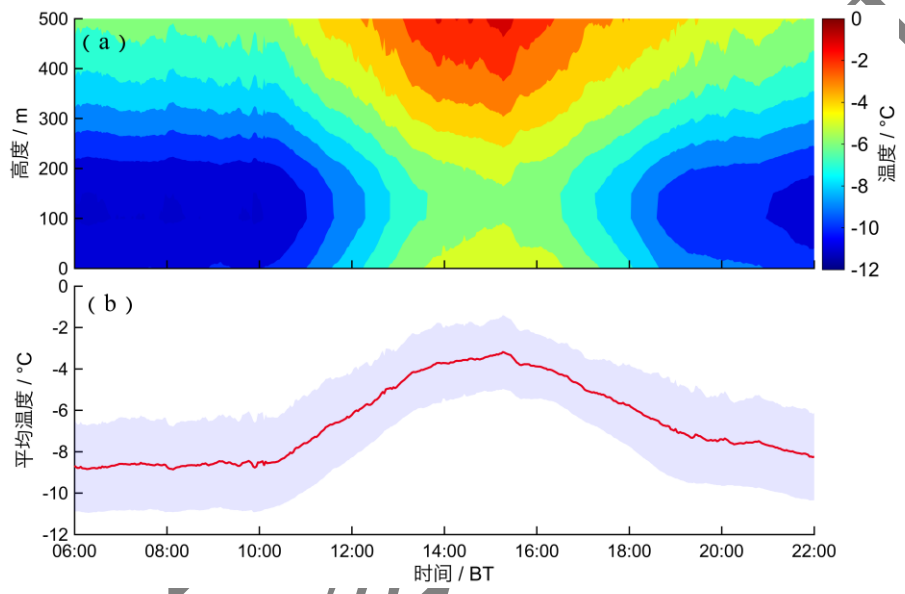
3.1 温度的垂直特征

图 3a 显示了此次雾-霾事件期间温度在大气边界层内不同高度上的日变化,基本在 $-12^{\circ}\text{C}\sim-2^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。06:00—10:00, 100 m 高度处存在的逆温层一定程度上抑制了垂直对流,使得污染物难以扩散到更高层的大气中,在低层大气中积聚,促进了霾过程的形成和发展。10:00 后太阳辐射作用打破了逆温层,垂直混合增强。图 3b 中红线表示 06:00—10:00 每个时间点的平均温度,紫色区域则表示温度的变化区间,反映了时段内温度随高度波动的大小。12:00—16:00 紫色区域较窄,表示温度在 0~500 m 高度内波动相对较小。悬浮的

PM_{2.5}颗粒吸收和散射太阳辐射减少了到达地面的直接太阳光，增加了大气的散射光，导致地面温度升高减缓，减小了地表和大气间的温度梯度。

3.2 相对湿度的垂直特征

图 4a 显示了此次雾-霾事件 06:00—22:00 相对湿度在大气边界层内不同高度上的统计平均。雾-霾事件期间的平均相对湿度在大气边界层内主要保持在40%~70%。相对湿度在一天中呈现出特定的周期性变化。由于夜间地面冷却和相对湿度较高，06:00—08:00 的平均相对湿度仍维持在较高的水平。低温和高湿度使得颗粒物更容易吸附水分，有利于污染物的积聚。随着日出和太阳辐射增强，地表开始升温，低空层相对湿度降低。13:00—17:00，平均相对湿度垂直分布呈现出低层高于高层的情况，可能是由于逆温层被破坏，地面层的水汽向上混合但仍未完全抵达较高层。18:00—22:00，太阳辐射减弱，地面开始冷却，相对湿度升高。如图 4b 所示，随着时间的推移，红色曲线显示平均相对湿度呈现从升高到降低再到升高的过程，与平均相对湿度的时空变化趋势一致。



注：紫色区域表示每个时刻 0~500m 高度温度分布范围，“平均”指每个时间点对应的纵轴数据为 1—17 日期间所有相应时间点数据的 17 d 平均值，下同。

图 3 2020 年 1 月 1—17 日 06:00—22:00 石河子市大气边界层内平均温度(a)时间-高度分布和(b)随时间的变化

Fig. 3 (a) Time-height distribution and (b) time distribution of average temperature within the atmospheric boundary layer over Shihezi City during 06:00-22:00 BT from 1 to 17 January 2020

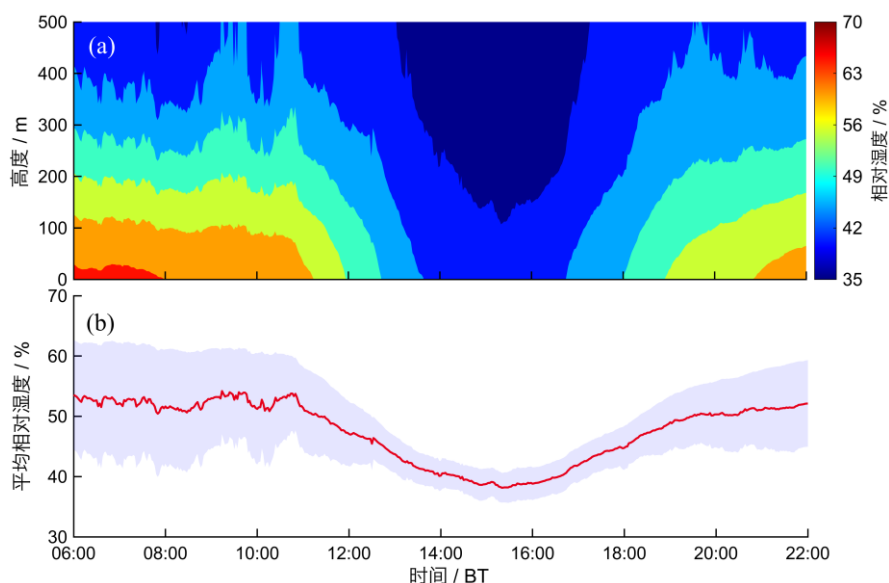
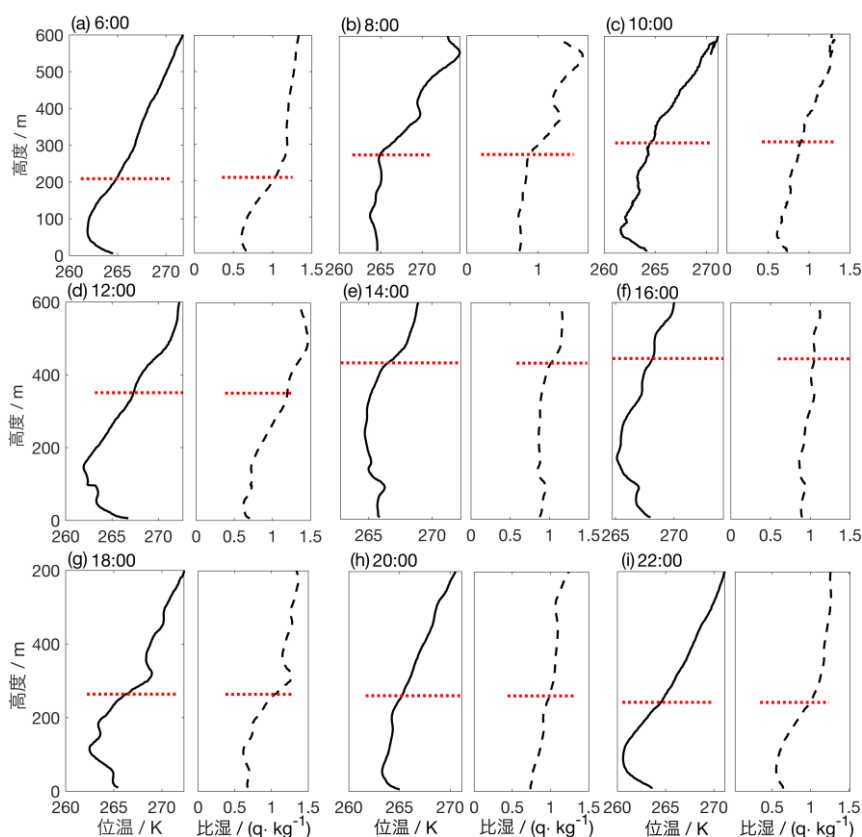


图4 2020年1月1—17日06:00—22:00石河子市大气边界层内平均相对湿度(a)时间-高度分布和(b)随时间的变化

Fig. 4 (a) Time-height distribution and (b) time distribution of average relative humidity within the atmospheric boundary layer over Shihezi City during 06:00-22:00 BT from 1 to 17 January 2020

4 大气边界层高度变化特征

1月8—11日霾污染较严重,能见度显著下降。如图2所示,一日中约20 h能见度低于1000 m,能见度低于500 m的总时长长达14 h,同时平均 $PM_{2.5}$ 浓度达到 $224 \mu g \cdot m^{-3}$ 。在重雾-霾期间,本研究以06:00、08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00和22:00作为时间节点观察了大气边界层高度的日变化特征,9个时间点的平均位温和比湿廓线见图5。由图可见,在重霾期间,大气边界层内位温随高度的增高先小幅度减小后增大,在大气边界层顶呈增大趋势。08:00—16:00随着太阳辐射增强地表位温增加。1月8—11日,大气边界层高度在早上较低,平均高度为209 m,随着太阳辐射的增强和地表加热,大气边界层发展得相对较高,16:00达到445 m,夜间大气边界层稳定在200 m左右。



注：红色虚线为反演得到的平均大气边界层高度。

图 5 2020 年 1 月 8—11 日 06:00—22:00 石河子市典型霾天气的平均位温、平均比湿廓线变化

Fig. 5 Changes in the profiles of average potential temperature and average specific humidity under the typical haze weather in Shihezi City during 06:00-22:00 BT from 8 to 11 January 2020

整个雾-霾事件期间，大气边界层高度的日变化趋势也呈现出先增大后减小的特征。如表 1 所示，14:00—16:00 大气边界层发展到最高，接近 500 m，平均能见度低至 1330 m。06:00—08:00 大气边界层平均高度最低，为 237 m，平均能见度降到 1000 m 以下。此次石河子市大气边界层高度范围在 230~500 m，与呼和浩特（210~550 m）和四川盆地（180~540 m）等地区相比，大气边界层都处于在较低的高度范围（卿清涛等，2021；韩仙桃等，2022）。平均大气边界层高度与能见度呈相同增长趋势（表 1），且平均大气边界层越高，越有利于霾事件的消散。

表 1 2020 年 1 月 1—17 日 06:00—23:00 各个时间段的平均大气边界层高度和平均能见度

Table 1 Average atmospheric boundary layer height and average minimum visibility in different time periods during 06:00-23:00 BT from 1 to 17 January 2020

时间 (BT)	平均大气边界层高度 / m	平均能见度 / m
06:00—08:00	237	950
08:00—10:00	266	860
10:00—12:00	230	830
12:00—14:00	420	1060
14:00—16:00	483	1330
16:00—18:00	399	1320
18:00—20:00	371	1080
20:00—22:00	330	1160
22:00—23:00	284	1030

5 颗粒污染物变化特征

5.1 大气气溶胶消光系数的日变化特征

过程期间 450 m 以上平均气溶胶消光系数较小, 大气气溶胶主要积聚于 450 m 以下 (图 6)。大气边界层内的气溶胶主要积聚在 150~450 m。夜间和清晨 (00:00—10:00) 在 250 m 高度上下气溶胶层较厚; 01:30, 平均消光系数在 225 m 处达到最大值 (11 km^{-1}); 正午以后, 大气气溶胶的主要分布范围升高到 300 m 以上, 且分布较分散且含量相较夜间明显降低; 20:00, 气溶胶层开始回降。由此可见大气气溶胶的逐时分布特征与大气边界层高度的日变化基本一致。

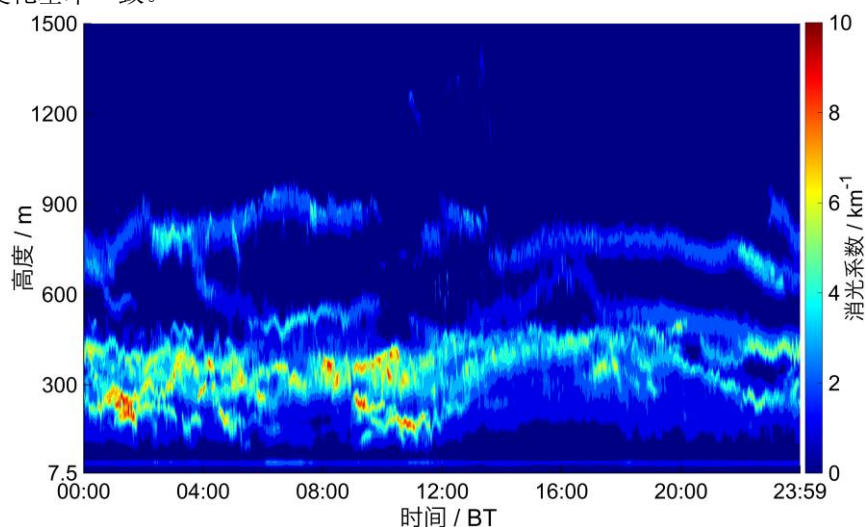


图 6 2020 年 1 月 1—17 日石河子市大气气溶胶消光系数在 0~1500 m 高度的平均日变化

Fig. 6 Average daily variation of atmospheric aerosol extinction coefficient at heights of 0-1,500 m in Shihezi City from 1 to 17

January 2020

5.2 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的特征

由图 7 和图 8 可见, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度在垂直高度上总体变化趋势基本一致, 且主要集中在低空 400 m 以下。在近地面 (边界层高度以下), 1 月 1—5 日大气边界层内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要在 $100\sim 200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 PM_{10} 集中在 $150\sim 250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 且随高度的变化不大。随着雾-霾的持续发展, 污染物进一步积累, 到 11 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 440m 高度处达到 $370 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 此时大气污染最严重; 而高度大于 500 m 时, 随着高度的增大均迅速减小; 当高度增大到 600 m 时, 二者基本降到了 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。

综上所述, 在雾-霾期间, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 主要积聚在大气边界层高度以下, 而在大气边界层以上 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度明显减少。雾-霾期间, 低空出现了逆温层, 风速很小, 减少了污染物的空间扩散能力, 增强了大气边界层结构的稳定性, 进而使污染物聚集在边界层以内; 而当高度大于边界层高度时, 风速增大对流变大, 污染物会迅速扩散, 进而 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速减少。

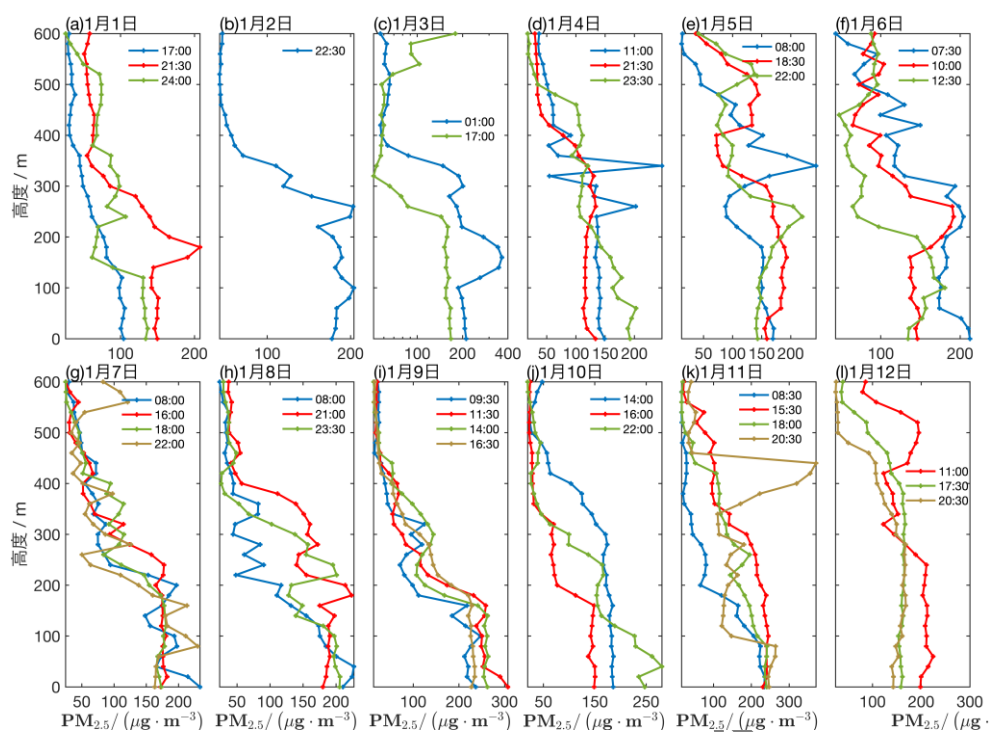


图 7 2020 年 1 月 1—12 日石河子市PM_{2.5}质量浓度廓线

Fig. 7 Profiles of PM_{2.5} mass concentration in Shihezi City from 1 to 12 January 2020

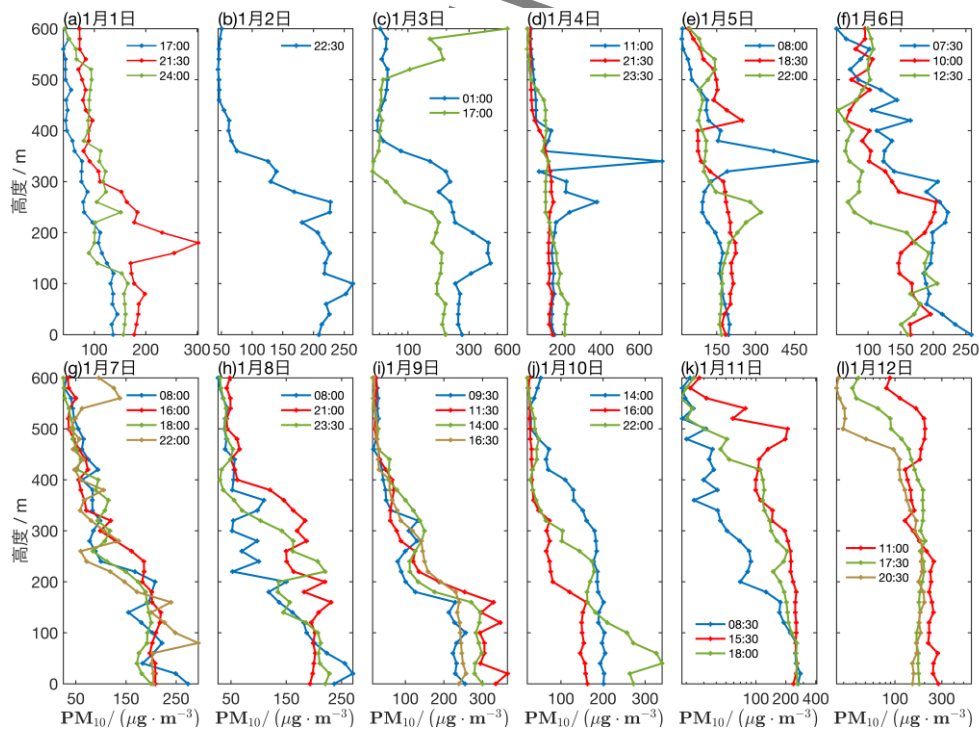


图 8 2020 年 1 月 1—12 日石河子市PM₁₀质量浓度廓线

Fig. 8 Profiles of PM₁₀ mass concentration in Shihezi City from 1 to 12 January 2020.

5.3 黑碳的日变化特征

冬季供暖和工业排放是石河子地区黑碳污染的主要来源。夜间，居民供暖的排放量较高，由于大气边界层高度较低，同时夜间的逆温效应加强了大气稳定性，进一步限制了黑碳的垂直扩散，使其更容易在低层大气聚集。白天，工业生产排放是黑炭污染的主要来源，随着太阳辐射的增强，边界层发展导致部分黑碳被垂直扩散，但地表附近仍保持较高浓度。如图 9 所示，大气边界层高度内黑碳的平均浓度基本在 $4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上，0~160 m 高度范围内基本达到 $7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。近地面的黑碳浓度较高，夜间 0~100 m 高度内最高达到 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。黑碳通过对太阳辐射的吸收，缩减到达地表的短波辐射量，从而减少了驱动大气边界层发展的可感热通量，进而能够抑制大气边界层的发展和加剧地面近处的空气污染。

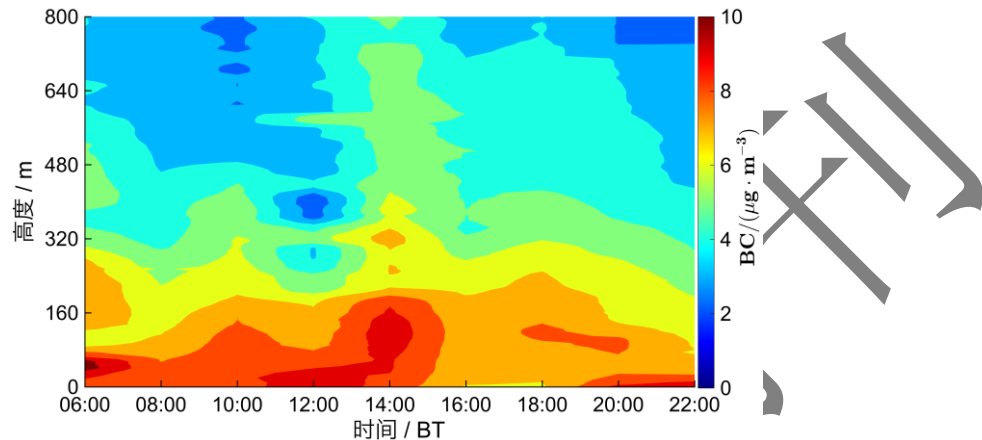
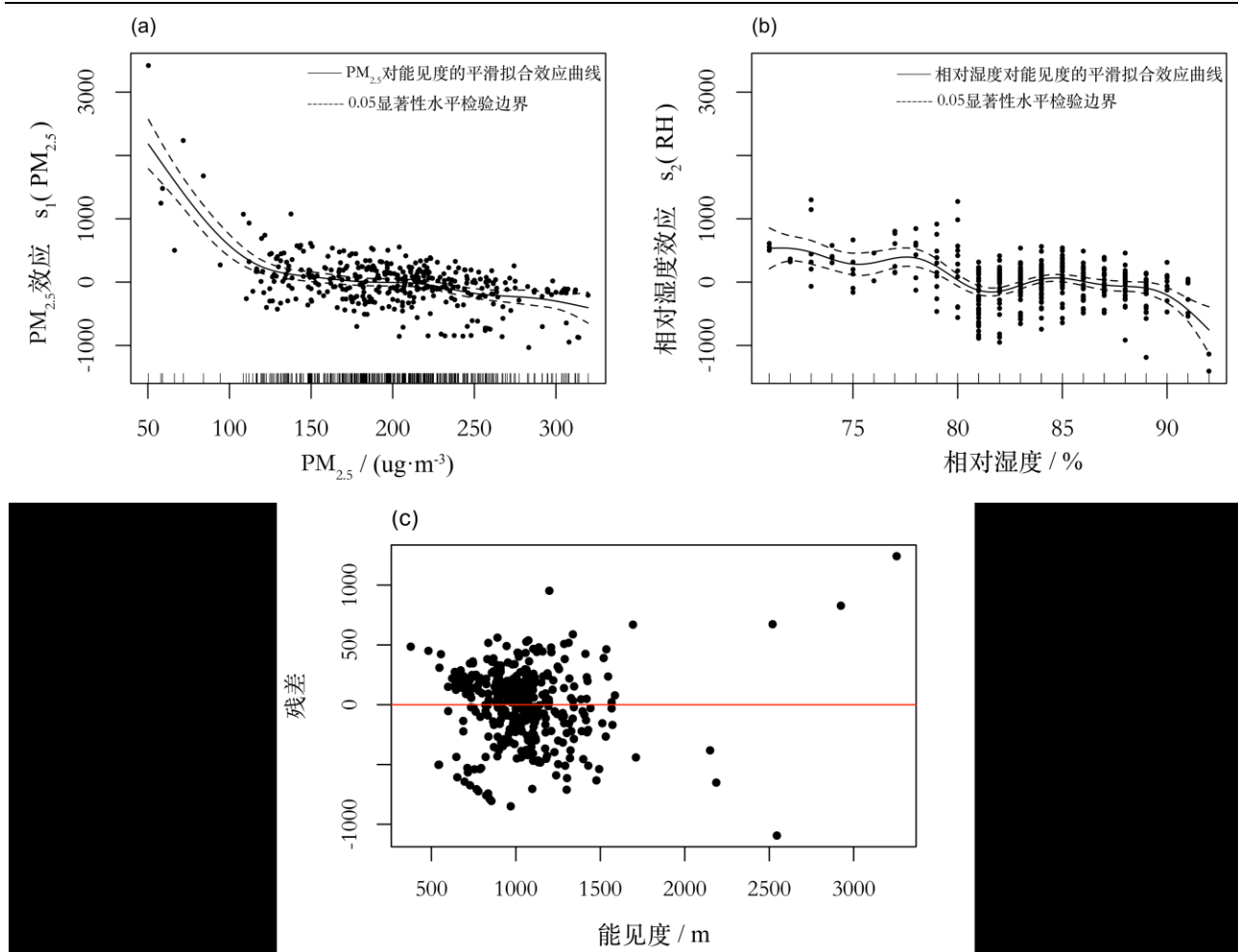


图 9 2020 年 1 月 1—17 日石河子市 0~800 m 黑碳的平均日变化

Fig. 9 Average daily variation of black carbon at heights of 0-800m in Shihezi City from 1 to 17 January 2020

6 $\text{PM}_{2.5}$ 和相对湿度对能见度的影响

依据地表能见度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度数据，利用 GAM 模型分别得到 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度对能见度的平滑拟合效应曲线（图 10）。图 10(a)、(b)中纵坐标 $s_1(\text{PM}_{2.5})$ 、 $s_2(\text{RH})$ 分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 和相对湿度对能见度的平滑拟合效应值，横坐标为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度的实测值。由图可见， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $180 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的阈值后，效应值转为负，且绝对值趋于增大。随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大导致空气质量恶化，能见度受 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的显著抑制。同样地，相对湿度超过 80%的阈值后，效应值转为负，且绝对值整体呈增大趋势，能见度受相对湿度显著抑制。如表 2 和图 10(c)所示， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度平滑效应项的估计自由度分别为 6.529 和 8.058，远大于 1 这一阈值，且 P 值均小于 2×10^{-16} ，GAM 模型的残差围绕水平零线分布均匀。表明 GAM 模型有效捕捉了 $\text{PM}_{2.5}$ 和相对湿度对能见度的非线性负相关影响：此次石河子市雾-霾事件期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度达到一定阈值后，对能见度均存在显著的非线性负相关影响。两个影响因子中， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对能见度影响明显更大（因子偏差解释率为 33.4%）。



注：图 a, b 中纵坐标分别代表 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度对能见度的平滑拟合值，横坐标表示 $PM_{2.5}$ 和相对湿度的实测值。
图 10 2020 年 1 月 1—17 日石河子市冬季雾-霾基于 GAM 模型的能见度对(a) $PM_{2.5}$ 浓度和(b)相对湿度的响应情况以及(c)模型残差分布

Fig. 10 The response of visibility to (a) $PM_{2.5}$ concentration and (b) relative humidity during the winter fog-haze period based on the GAM model, and (c) the distribution of model residuals in Shihezi City from 1 to 17 January 2020

表 2 2020 年 1 月 1—17 日石河子市冬季雾-霾能见度 GAM 模型平滑效应项的显著性与偏差解释率

Table 2 Significance and deviance explained by smooth terms in the Visibility GAM Model for for-haze events in Shihezi City from 1 to 17 January 2020

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	P值	累计偏差解释率 /%	因子偏差解释率 /%
s(RH)	8.058	8.731	< 0.001	16.1	16.1
s($PM_{2.5}$)	6.529	8.017	< 0.001	49.5	33.4

注：P值小于0.001时，报告为<0.001。

7 结论

本研究利用系留飞艇、地基大气气溶胶激光雷达、微波辐射计等设备进行联合探测试验，基于试验数据对天山北坡石河子市 2020 年 1 月 1—17 日造成严重污染的雾-霾天气过程分析后得到：

(1) 此次过程体现出阶段性特征,持续时间较长。以霾天气为主,最后转变为短暂的雾阶段。地表风速基本在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,地表相对湿度在72%~91%。能见度较低,平均能见度为1040 m,能见度最低低至39 m。大气边界层高度内平均温度在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间较容易形成逆温层。

(2) 雾-霾期间,依据大气位温和比湿较为准确地确定了大气边界层高度,主要为250~500 m。边界层大气边界层内的弱垂直运动对雾-霾的发展有重要作用。低大气边界层高度与低风速、高湿度和高污染物浓度对应。

(3) 雾-霾期间大气边界层内有较厚的气溶胶层,主要分布在150~450 m高度。近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度范围主要分别在 $100\sim 300\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $150\sim 350\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值为 $320\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。黑碳气溶胶浓度在低空较高,随高度的增高降低。200 m以下,黑碳浓度主要在 $7\sim 10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,峰值为 $10.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(4) 利用GAM模型分析能见度的影响因子发现,2020年1月石河子雾-霾事件期间的能见度由相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度共同影响。在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度分别达到 $180\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和80%的阈值后,相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均对能见度呈显著的非线性负相关影响,其中能见度受 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响较大。

参考文献

- 韩仙桃,佟彤,姜佳玉,等,2022.2020年1月呼和浩特市雾霾天气的气象成因分析[J].干旱气象,40(2):275-283. Han X T, Tong T, Jiang J Y, et al, 2022. Meteorological cause of haze weather in Hohhot in January 2020[J]. J Arid Meteor, 40(2): 275-283 (in Chinese).
- 何凯杰,李刚,程苗苗,等,2023.天山北坡典型工业城市冬季大气铵盐污染特征及其赋存形式[J].环境科学研究,36(5):887-894. He K J, Li G, Cheng M M, et al, 2023. Pollution characteristics and existence forms of ammonium salt in winter in typical industrial city on north slope of Tianshan Mountains[J]. Res Environ Sci, 36(5): 887-894 (in Chinese).
- 胡树贞,王志成,张雪芬,等,2022.毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J].气象,48(10):1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 48(10): 1270-1280 (in Chinese).
- 李刚,刘艳,李富强,等,2023.2020年冬季石河子市城区和工业区 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机元素污染特征及来源[J].环境化学,42(2):501-510. Li G, Liu Y, Li F Q, et al, 2023. Characteristics and sources of the inorganic elements of $\text{PM}_{2.5}$ in Shihezi urban and industrial areas in winter, 2020[J]. Environ Chem, 42(2): 501-510 (in Chinese).
- 孟丽红,郝天依,李培彦,等,2020.天津市夏季重污染天气过程 $\text{PM}_{2.5}$ 输送特征[J].环境工程技术学报,10(1):39-46. Meng L H, Hao T Y, Li P Y, et al, 2020. Transport characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ of heavy pollution weather in Tianjin in summer[J]. J Environ Eng Technol, 10(1): 39-46 (in Chinese).
- 孟丽红,刘海玲,王伟,等,2022.基于多源资料天津一次雾-霾过程的边界层特征[J].中国环境科学,42(9):4018-4025. Meng L H, Liu H L, Wang W, et al, 2022. Boundary layer characteristics of fog-haze in Tianjin based on multi-source data[J]. China Environ Sci, 42(9): 4018-4025 (in Chinese).
- 卿清涛,刘佳,李小兰,等,2021.四川盆地一次持续性雾霾天气演变特征及其成因[J].干旱气象,39(4):610-619. Qing Q T, Liu J, Li X L, et al, 2021. Analysis of cause and evolution characteristics of a continuous severe fog and haze episode in Sichuan Basin[J]. J Arid Meteor, 39(4): 610-619 (in Chinese).
- 盛丹睿,温小虎,冯起,等,2021.2018年春季西北五省省会城市大气质量与健康风险评估[J].高原气象,40(1):200-208. Sheng D R, Wen X H, Feng Q, et al, 2021. Air quality and health risk assessment of capital cities in five Northwest Provinces of China in the spring of 2018[J]. Plateau Meteor, 40(1): 200-208 (in Chinese).
- 唐羽,覃军,袁正旋,2021.武汉地区夏季和秋冬季大气污染的天气概念模型[J].长江流域资源与环境,30(9):2186-2204. Tang Y, Qin J, Yuan Z X, 2021. Research on weather conceptual model of air pollution during summer, autumn and winter in Wuhan Area[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 30(9): 2186-2204 (in Chinese).

- 王晴, 王宝庆, 蔡宁宁, 等, 2020. 乌昌石区域化石燃料固定燃烧点源大气污染物排放清单及时空分布[J]. 环境污染与防治, 42(6): 712-716. Wang Q, Wang B Q, Cai N N, et al, 2020. Emission inventory of atmospheric pollutants from fossil fuel fixed combustion point source and its temporal and spatial distribution in Wuchangshi Area[J]. Environ Pollut Control, 42(6): 712-716 (in Chinese).
- 王晓春, 吴珂, 郁泰立, 等, 2023. 昆山冬季一次持续性雾霾天气生消过程分析[J]. 环境监控与预警, 15(5): 36-42. Wang X C, Wu K, Yu T L, et al, 2023. A phased study on the process of production and disappearance of a continuous smog in winter in Kunshan[J]. Environ Monit Forewarning, 15(5): 36-42 (in Chinese).
- 杨香林, 李维军, 2021. “十三五”期间石河子市环境空气质量变化趋势及改善对策分析[J]. 山东化工, 50(14): 260-261, 264. Yang X L, Li W J, 2021. Ambient air quality in Shihezi during the 13th five-year plan period change trend and improvement countermeasure analysis[J]. Shandong Chem Ind, 50(14): 260-261, 264 (in Chinese).
- 元雪婷, 杨静, 2020. 乌昌石区域耗煤行业排放特征及对空气质量的影响[J]. 工业安全与环保, 46(9): 60-64. Yuan X T, Yang J, 2020. Emission characteristics of the coal-consumption industries in Wuchangshi Area and its impact on air quality[J]. Ind Saf Environ Prot, 46(9): 60-64 (in Chinese).
- 云龙, 魏静, 彭妍, 等, 2024. 深圳大气中含黑碳气溶胶化学组分特征及其生成机制研究[J]. 环境科学学报, 44(1): 29-36. Yun L, Wei J, Peng Y, et al, 2024. Chemical composition characteristics and formation of black carbon-containing aerosols in the atmosphere in Shenzhen[J]. Acta Sci Circumst, 44(1): 29-36 (in Chinese).
- 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等, 2020. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 41(11): 4813-4824. Zhang J F, Jiang N, Duan S G, et al, 2020. Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. Environ Sci, 41(11): 4813-4824 (in Chinese).
- 中国气象局, 2010. 霾的观测和预报等级: QX/T 113—2010 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2010. Observation and forecasting levels of haze: QX/T113-2010 [S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 周述学, 邓学良, 王传辉, 等, 2020. 华东 2018 年冬季一次典型雾霾过程的气象成因分析[J]. 高原气象, 39(5): 1110-1121. Zhou S X, Deng X L, Wang C H, et al, 2020. Analysis of meteorological conditions for a typical fog and haze event over eastern China in Winter of 2018[J]. Plateau Meteor, 39(5): 1110-1121 (in Chinese).
- Bu X, Xie Z L, Liu J, et al, 2021. Global PM_{2.5}-attributable health burden from 1990 to 2017: estimates from the Global Burden of disease study[J]. Environ Res, 2021, 197: 111123.
- Chen T M, Guo J P, Tong B, et al, 2022. Elucidating the impact of high- and low-pressure systems on temperature inversion from nine years of radiosonde observations in Beijing[J]. Atmos Res, 271: 106115.
- Ding A J, Huang X, Nie W, et al, 2016. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China[J]. Geophys Res Lett, 43(6): 2873-2879.
- Ebenstein A, Fan M Y, Greenstone M, et al, 2017. New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River Policy[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 114(39): 10384-10389.
- Guo J P, Chen X Y, Su T N, et al, 2020. The climatology of lower tropospheric temperature inversions in China from radiosonde measurements: roles of black carbon, local meteorology, and large-scale subsidence[J]. J Climate, 33(21): 9327-9350.
- Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al, 2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmos Chem Phys, 16(20): 13309-13319.
- Hastie T, Tibshirani R, 2017. Generalized additive models[Z/OL]//Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118445112.stat03141>.
- Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models[J]. Statistical science, 1986, 1(3): 297-310.

-
- Huang X, Wang Z L, Ding A J, 2018. Impact of aerosol-PBL interaction on haze pollution: multiyear observational evidences in North China[J]. *Geophys Res Lett*, 45(16): 8596-8603.
- Jia X C, Quan J N, Zhao X J, et al, 2024. Regional transport of aerosol above boundary layer and its radiation effect trigger severe haze pollution in Beijing[J]. *Atmos Res*, 298: 107145.
- Lavers D A, Beljaars A, Richardson D S, et al, 2019. A forecast evaluation of planetary boundary layer height over the ocean[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(9): 4975-4984.
- Li Q H, Wu B G, Liu J L, et al, 2020. Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM_{2.5} during haze episodes in winter in the North China Plain[J]. *Atmos Environ*, 223: 117265.
- Li Q H, Zhang H S, Jin X P, et al, 2022. Mechanism of haze pollution in summer and its difference with winter in the North China Plain[J]. *Sci Total Environ*, 806: 150625.
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al, 2017. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality[J]. *Natl Sci Rev*, 4(6): 810-833.
- Ma W, Ding J L, Wang R, et al, 2022. Drivers of PM_{2.5} in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains, China[J]. *Environ Pollut*, 309: 119777.
- Marley H G, Dirks K N, Neverman A J, et al, 2021. The relationship between Brown haze, atmospheric boundary layer structure, and air pollution in an urban area of complex coastal terrain[J]. *Atmos Pollut Res*, 12(5): 101057.
- Ming H, Wang M Z, Gao L H, et al, 2023. Study on the boundary layer of the haze at Xianyang Airport based on multi-source detection data[J]. *Remote Sens*, 15(3): 641.
- Seidel D J, Zhang Y H, Beljaars A, et al, 2012. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe[J]. *J Geophys Res Atmos*, 117(D17): D17106.
- Sicard M, P érez C, Rocadenbosch F, et al, 2006. Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations[J]. *Boundary Layer Meteorol*, 119(1): 135-157.
- Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, et al, 2016. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China[J]. *Atmos Chem Phys*, 16(4): 2459-2475.
- Wang J D, Su H, Wei C, et al, 2023. Black-carbon-induced regime transition of boundary layer development strongly amplifies severe haze[J]. *One Earth*, 6(6): 751-759.
- Wilcox E M, Thomas R M, Praveen P S, et al, 2016. Black carbon solar absorption suppresses turbulence in the atmospheric boundary layer[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113(42): 11794-11799.
- Yabo S D, Lu L, Ma L X, et al, 2024. Probing into the radiative mechanisms and drivers influencing urban heat-cold islands and urban pollution islands during heavy-haze events in a cold megacity of Northeast China[J]. *Atmos Res*, 301: 107259.
- Yang Z, Ma N, Wang Q Q, et al, 2022. Characteristics and source apportionment of black carbon aerosol in the North China Plain[J]. *Atmos Res*, 276: 106246.
- Yuan Z X, Qin J, Zheng X, et al, 2020. The relationship between atmospheric circulation, boundary layer and near-surface turbulence in severe fog-haze pollution periods[J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 200: 105216.
- Zhang F, Wang Y, Peng J F, et al, 2020. An unexpected catalyst dominates formation and radiative forcing of regional haze[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117(8): 3960-3966.