

# 新疆和田市沙尘气溶胶浓度及粒径分布特征研究

马明杰<sup>1,2</sup> 何清<sup>1,2</sup> 杨兴华<sup>1,2</sup> 买买提艾力·买买提依明<sup>1,2</sup> 王顺胜<sup>3</sup> 杨帆<sup>1,2</sup> 霍文<sup>1,2</sup>

(1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2 塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站, 塔中 841000; 3 中国石油塔里木油田分公司, 库尔勒 841000)

**摘要:** 沙尘气溶胶不仅影响天气和气候, 而且对海洋生态及全球物质循环具有重要的作用。塔克拉玛干沙漠作为我国和东亚地区重要的沙尘气溶胶源区, 其西南缘和田市沙尘气溶胶浓度及粒径分布特征尚不明确, 将不利于该区域沙尘气溶胶远距离输送和沉降的机理研究。因此, 本文利用粒子分级采样仪, 通过对和田市不同天气(晴天、浮尘、扬沙天气)下沙尘气溶胶浓度及粒径分布特征的研究, 得到以下结论: 1) 晴天, 0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm的沙尘气溶胶浓度平均为2612、1059.3、126 μg/m<sup>3</sup>, 分别占68.8%、27.9%、3.3%; 浮尘天气, 0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm的沙尘气溶胶浓度平均为6273、1403、139 μg/m<sup>3</sup>, 分别占79.6%、17.8%、2.5%; 扬沙天气, 0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm的沙尘气溶胶浓度平均为7135、2108、315 μg/m<sup>3</sup>, 分别占74.6%、22%、3.3%。2) 晴天、浮尘、扬沙天气0.1~2.5 μm、2.5~10 μm的沙尘气溶胶浓度夜间均高于白天; 10~20 μm的沙尘气溶胶浓度仅在晴天时夜间高于白天, 浮尘和扬沙天气则是白天高于夜间。

**关键词:** 和田市, 沙尘气溶胶, 分布特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.00.001

## Study on Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Dust Aerosol in Hetian, Xinjiang

Ma Mingjie<sup>1,2</sup>, He Qing<sup>1,2</sup>, Yang Xinghua<sup>1,2</sup>, Ali Mamtimin<sup>1,2</sup>, Wang Shunsheng<sup>3</sup>, Yang Fan<sup>1,2</sup>, Huo Wen<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorology Administration, Urumqi 830002 2 Taklamakan Desert National Station of Observation and Research for Desert Meteorology Tazhong 841000 3 Petrochina Tarim Oilfield Company, Korla 841000)

**Abstract:** Dust aerosols not only affect weather and climate, but also play an important role in marine ecology and global material circulation. The Taklimakan Desert is an important source of dust aerosols in my country and East Asia. The concentration and particle size distribution characteristics of dust aerosols in the southwestern margin of Hotan City are still unclear, which is not conducive to the study of the mechanism of dust aerosol transport and deposition in this region. Therefore, this paper uses the particle classification sampler to study the characteristics of the dust aerosol concentration and particle size distribution under different weather (sunny, floating dust, blowing sand) in Hotan City, and the following conclusions are obtained: (1) On sunny days, the average dust aerosol concentrations of 0.1–2.5 μm, 2.5–10 μm, and 10–20 μm are 2612, 1059.3, and 126 μg/m<sup>3</sup>, accounting for 68.8%, 27.9%, and 3.3% respectively; floating dust, the average dust aerosol concentrations of 0.1–2.5 μm, 2.5–10 μm, and 10–20 μm are 6273, 1403, and 139 μg/m<sup>3</sup>, accounting for 79.6%, 17.8%, and 2.5% respectively; blowing sand, the average dust aerosol concentrations of 0.1–2.5 μm, 2.5–10 μm, and 10–20 μm are 7135, 2108, and 315 μg/m<sup>3</sup>, accounting for 74.6%, 22%, and 3.3% respectively. (2) In Sunny days, floating dust and blowing sand weather, the concentrations of dust aerosol of 0.1–2.5 μm and 2.5–10 μm at night were higher than those in the daytime. The concentration of dust aerosol of 10–20 μm was higher than that of daytime only in sunny days, while that of floating dust and sand-blowing was higher than that of nighttime.

**Keywords:** Hotan City, dust aerosol, distribution characteristic

## 0 引言

沙尘气溶胶是全球气溶胶中最重要的组成部分, 占比最大, 全球每年释放的沙尘气溶胶约为

1000~4000 Tg<sup>[1-5]</sup>, 其对大气环流模式和地球系统有着重大影响<sup>[6-7]</sup>。沙尘气溶胶通过许多物理、化学和生物过程来影响地球系统<sup>[8]</sup>, 例如, 能够削弱到达地面的太阳辐射, 导致地表降温<sup>[9-10]</sup>; 还可作为云凝结核(CCN)和冰核(IN), 改变云的微物理过程和云的辐射特征<sup>[11-12]</sup>。同时, 沙尘气溶胶能够改变雪和冰的地表反照率, 其远距离输送是全球生物地球化学循环的重要途径, 沙尘粒子被卷入大气中, 并随着高空气流

收稿日期: 2021年3月17日; 修回日期: 2021年6月25日

作者信息: 马明杰(1994—), Email: mmj315@126.com

通信作者: 杨兴华(1982—), Email: yangxh@idm.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41875019)

向下游陆地及海洋地区远距离输送,为海洋地区带去了大量营养元素和微量元素,影响大气和海洋的碳交换<sup>[13-15]</sup>。此外,沙尘气溶胶会导致能见度降低,对人类的健康造成危害并且会造成严重的财产损失<sup>[16-19]</sup>。

沙尘气溶胶浓度及粒径尺度影响大气中的散射和吸收辐射以及物理、化学和生物相互作用,并且是决定沙尘气溶胶在大气的停留时间和远距离输送的重要影响因子<sup>[20-25]</sup>。相关学者研究了粉尘颗粒大小、化学和形态的不确定性对光学和辐射特性的影响,这些研究包括颗粒非球形、粒径和折射率变异性等对粉尘垂直分布和运输机制的影响<sup>[26-29]</sup>。然而,释放的沙尘气溶胶的浓度及粒径分布特征尚不明确并且很难得到持续连贯的观测,因此,沙尘气溶胶对于大气的影响仍不明确<sup>[30]</sup>。被释放到大气中的沙尘气溶胶,尤其是直径小于20 μm的沙尘气溶胶,由于其在大气中悬浮时间较长,可以实现远距离的输送,因而现在的研究更多的集中在对于PM<sub>20</sub>的研究。

塔克拉玛干沙漠作为我国和东亚地区重要的沙尘气溶胶源区<sup>[31-34]</sup>,但该区域沙尘气溶胶浓度及粒径分布特征尚不清楚,将不利于该区域沙尘气溶胶远距离输送和沉降的机理研究,因此,本文以塔里木盆地南缘和田市城区作为研究区,利用2019年夏季对和田市空气中沙尘气溶胶浓度和粒径的连续观测资料,在不考虑周围气象要素的条件下,分析其不同天气条件下(晴天、浮尘、扬沙天气)沙尘气溶胶浓度及粒径分布特征,为科学评估区域沙尘起沙能力,完善沙尘暴预报模式以及治理全球环境空气质量、全球沙源分布等奠定基础。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区概况

新疆属于典型的温带大陆性干旱气候,生态环境比较恶劣,风沙天气灾害严重,是我国沙尘暴灾害严重区域之一。由于受塔克拉玛干沙漠的影响,塔里木盆地南缘是沙尘天气高发区域<sup>[35-37]</sup>,许多地区的年沙尘天气日数在100 d以上,和田市位于塔克拉玛干沙漠西南缘,南邻昆仑山,西抵喀拉昆仑山和帕米尔高原,东北为浩瀚的塔克拉玛干沙漠,是我国五大沙尘暴多发区之一(图1)。该区域属于干旱荒漠性气候,气候干旱,降水稀少,年均降水量为35 mm,年均蒸发量高达2480 mm。大风天气较多,沙尘暴发生频繁,每年浮尘天气 220 d以上,其中沙尘暴天气在60 d左右,严重影响了当地居民的身体健康和经济发展。

### 1.2 观测方法

本文采用的粒子分级采样仪为美国加利福尼亚仪

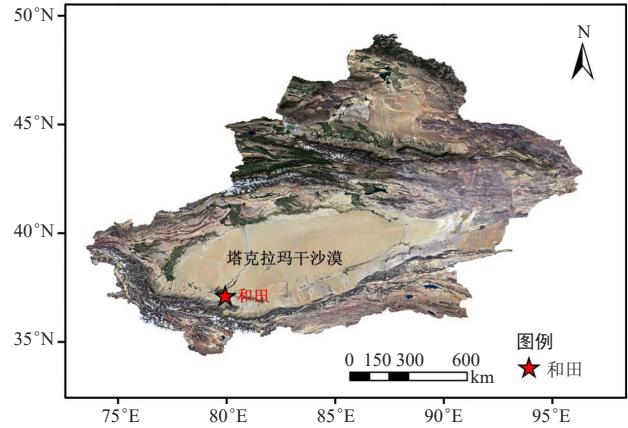


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the study area

器公司(California Ins. Co.)生产的PC-2HX,该仪器是利用惯性冲击原理和低压撞击技术按照粒径大小分级采集颗粒物样品,然后根据石英晶体微天平(QCM)电子传感器实时测量空气中的颗粒物的浓度。采样过程中,将气泵连接处抽气管的另一端安放在10米楼楼顶位置,气泵通过抽气管将外界的空气抽进仪器内,首先经过干燥处理,按照图2将空气内的沙尘粒子按照粒径大小分十级(0.10~0.16 μm、0.16~0.30 μm、0.30~0.45 μm、0.45~0.70 μm、0.70~1.4 μm、1.4~2.5 μm、2.5~4.0 μm、4.0~7.0 μm、7.0~10.0 μm和10.0~20.0 μm)过滤,沉降在每一级的石英晶片上,使晶片原有的振动频率发生改变,改变的振动频率大小与晶片负载的沙尘质量有关,当任意一级晶片的振动频率改变达到阈值dF时,该次采样过程结束,通过与电脑连接可以将数据自动输出。由于仪器采样频率阈值dF设置的不同以及环境中沙尘质量浓度不同的影响,每一次采样的时长均不同,如果采样时长过短(低于100 s)说明dF偏低,此组数据被剔除,降低dF的取值重新采样;如果采样时长(超过1000 s)过长说明dF偏高或者环境中的PM<sub>10</sub>浓度过高,此组数据被剔除,提高dF的取值重新采样。

从环境质量角度,本文将粒子分级采样仪采集的十级粒径区间按粒径大小划分为3个区间段,分别为0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm,且0.1~2.5 μm的沙尘气溶胶代表空气中相对细小的颗粒,2.5~10 μm代表中等颗粒,10~20 μm代表相对较粗的颗粒。

根据《地面气象观测规范》,晴天是指天空中无云或云很少,总云量不到3成;浮尘的尘粒细小,多属于空气动力学直径≤10 μm的颗粒物,浮尘发生时尘土和细沙均匀地浮游在空中,空气浑浊,风速不是很高,空气水平能见度<10 km;扬沙一般是由于风的

作用将地面裸露的尘土吹起,使空气相当浑浊,且水平能见度在1~10 km内的天气现象。本文观测日期为2019年7月24日—8月4日,通过和田市气象局对天气现象的记录,我们选取7月24日、25日,8月2日、4日为晴天;7月29、30、31日为浮尘天气;7月26、27、28日为扬沙天气;8月1日、3日因观测仪器供电出现故障,缺失数据较多,故将其数据剔除。

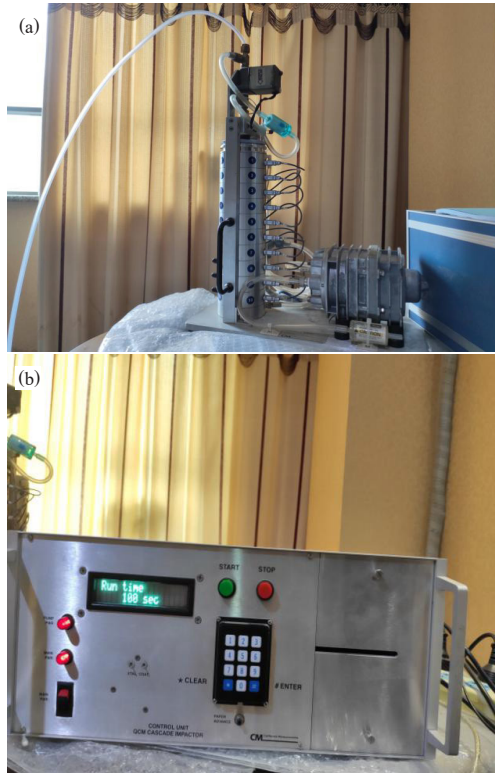


图2 粒子分级采样仪的分级采样和泵(a)及粒子分级采样仪(b)  
Fig. 2 Classification sampling and pump of particle classification sampler (a) and particle classification sampler (b)

## 2 结果

图3是晴天天气下0.1~2.5  $\mu\text{m}$ 、2.5~10  $\mu\text{m}$ 、10~20  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布,由图可知,空气中粒径在0.1~2.5  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高,总计 $5146 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $2612 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占68.8%,峰值出现在7月25日11:50,为 $4970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值出现在7月24日18:25,为 $990 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值与最小值相差约5倍;粒径在2.5~10  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之,总计 $2087 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $1059.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占27.9%,峰值出现在8月4日02:54,为 $5500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值出现在7月25日11:24,为 $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值与最小值相差约26.2倍;粒径在10~20  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少,总计 $2491.2 \times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,仅占3.3%。这说明晴天天气下,空气中粒径在0.1~2.5  $\mu\text{m}$ 的沙尘

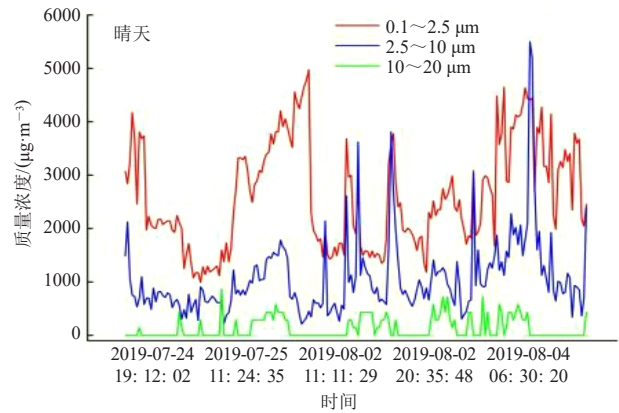


图3 晴天天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 3 Concentration distribution of dust aerosol with different particle sizes under sunny weather

气溶胶浓度最高,分别较2.5~10  $\mu\text{m}$ 、10~20  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度多59.4%、95.2%。这较李汉林等<sup>[38]</sup>在帕米尔高原东部得出的 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值大,这可能与帕米尔高原海拔高,沙尘气溶胶难以攀升,且夏季大气环境容量较大有关。

图4浮尘天气下0.1~2.5  $\mu\text{m}$ 、2.5~10  $\mu\text{m}$ 、10~20  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布,由图可知,空气中粒径在0.1~2.5  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高,总计 $1926 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $6273 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占79.6%,峰值出现在7月29日02:07,为 $1619 \times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值出现在7月29日20:02,为 $1418 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值与最小值相差约11.4倍;粒径在2.5~10  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之,总计 $4307 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $1403 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占17.8%,峰值出现在7月30日23:27,为 $6464 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值出现在7月30日15:50,为 $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值与最小值相差约38.5倍;粒径在10~20  $\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶粒子浓度最少,总计 $6134 \times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为 $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,仅占2.5%,峰值出现在7月31日01:14,

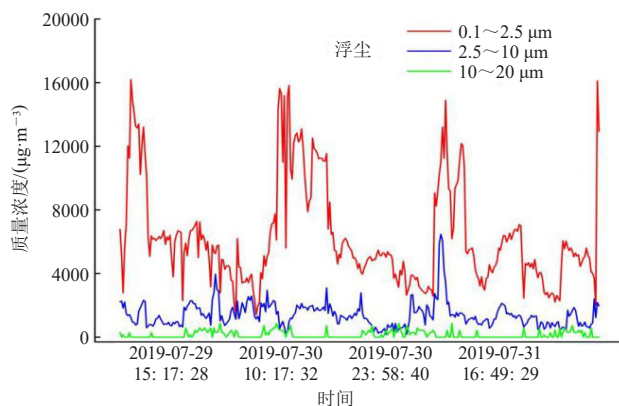


图4 浮尘天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 4 Concentration distribution of dust aerosols with different particle sizes in floating dust weather

为 $864 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；这说明浮尘天气下，粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，分别较 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度多77.6%、96.8%。

图5是扬沙天气下 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布，由图可知，空气中粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，总计 $2012\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $7135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占74.6%，峰值出现在7月26日19:05，为 $2018\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最小值出现在7月28日20:30，为 $2388 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，两者相差约8.5倍；粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之，总计 $5946\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $2108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占22.0%，峰值出现在7月27日23:30，为 $9002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最小值出现在7月27日14:09，为 $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，两者相差约45.5倍；粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少，总计 $8875\times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $315 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，仅占3.3%，峰值出现在7月26日20:34，为 $910 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；这说明扬沙天气下，粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，比较 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度多70.4%、95.6%，这较德州市<sup>[39]</sup>、西安市<sup>[40]</sup>、北京市<sup>[41]</sup>空气中大气污染物浓度高，这主要是因为和田市位于塔克拉玛干沙漠边缘，遇到沙尘天气：可以将沙漠里的沙尘粒子输送到和田市城区，因此浓度较高。

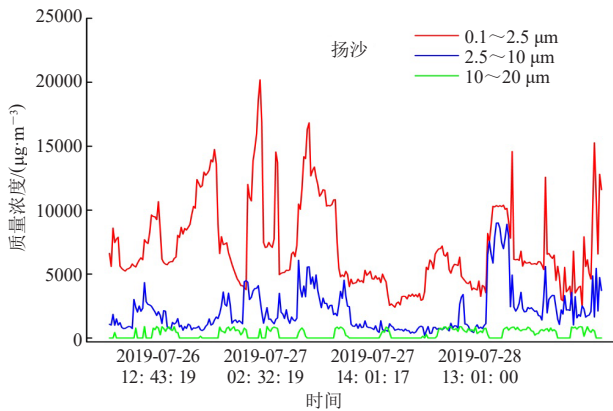


图5 扬沙天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 5 Concentration distribution of dust aerosol with different particle sizes in sand-blowing weather

由此可知，无论晴天、浮尘、扬沙天气， $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度均最高，即：空气中细小颗粒居多，这可能是由于和田位于塔克拉玛干沙漠西南缘，当冷空气自西向东或自西北向东南移动经过天山山脉时，受天山山脉的阻挡，冷空气在天山北侧堆积，并沿天山北侧东移，从地势低洼的吐哈盆地移进塔克拉玛干沙漠东部，造成塔克拉玛干沙漠东部偏东风或发生沙尘暴天气，即东灌天气<sup>[42]</sup>，当大风携带的沙尘粒子从东向西输送过程中，大多数粗沙粒已

沉降，到和田时只剩下粒径较小的细沙粒。

图6是晴天、浮尘、扬沙天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布，由图可知，扬沙天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，总计 $2012\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $7135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占45.2%；浮尘天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之，总计 $1926\times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $6273 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占43.3%；晴天天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少，为 $5146\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $2612 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占11.6%；总体上，空气中粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度，其扬沙天气(45.2%)>浮尘天气(43.3%)>晴天(11.6%)。

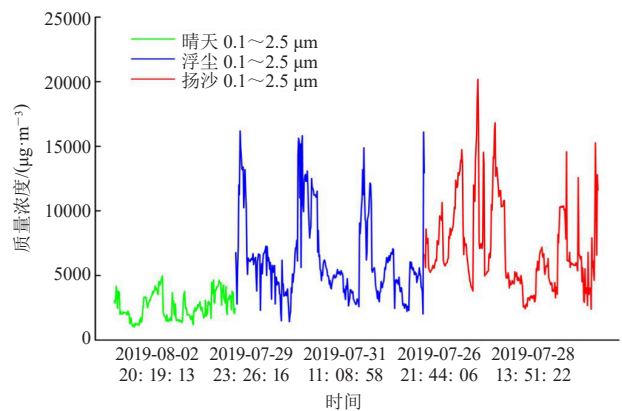


图6 不同天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 6 Concentration distribution of dust aerosol with particle size of  $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$  under different weather conditions

图7是晴天、浮尘、扬沙天气下粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布图，由图可知，扬沙天气下粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，总计 $5946\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $2108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占48.2%；浮尘天气下粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之，总计 $4307\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $1403 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占34.9%；晴天天气下粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少，总计 $2087\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $1059.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占16.9%；总体上，空气中粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度，其扬沙天气(48.2%)>浮尘天气(34.9%)>晴天(16.9%)。

图8是晴天、浮尘、扬沙天气下粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度分布图，由图可知，扬沙天气下粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高，总计 $8875\times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $315 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占50.7%；浮尘天气下粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之，总计 $6134\times 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为 $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占35.1%；晴天天气下粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少，总计

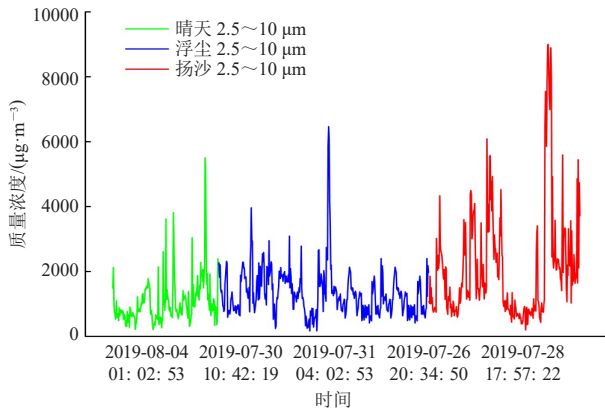


图7 不同天气下粒径在2.5~10 μm的沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 7 Concentration distribution of dust aerosol with particle size of 2.5—10 μm under different weather conditions

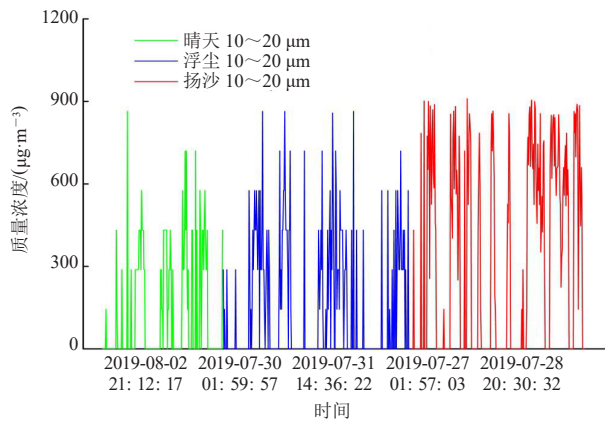


图8 不同天气下粒径在10~20 μm的沙尘气溶胶浓度分布  
Fig. 8 Concentration distribution of dust aerosol with particle size of 10—20 μm under different weather conditions

2491×10 μg/m<sup>3</sup>, 平均为126 μg/m<sup>3</sup>, 占14.2%; 总体上, 空气中粒径在10~20 μm的沙尘气溶胶浓度, 其扬沙天气(50.7%)>浮尘天气(35.1%)>晴天(14.2%), 即: 扬沙天气下, 10~20 μm的沙尘气溶胶浓度有一个小幅度提升, 这可能与扬沙天气下风速较大有关, 大风可以将地面一些相对较粗的沙尘气溶胶粒子带到空气中, 但较上节分析可知, 总体上, 空气中0.1~2.5 μm的细小沙尘颗粒居多。

图9是晴天天气下粒径在0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm的沙尘气溶胶浓度白天、夜间分布, 由图可知, 总体上, 白天和夜间粒径在0.1~2.5 μm的沙尘气溶胶浓度均最高, 平均为2612 μg/m<sup>3</sup>, 其次为粒径在2.5~10 μm的沙尘气溶胶浓度, 平均为1059 μg/m<sup>3</sup>, 粒径在10~20 μm的沙尘气溶胶浓度最小, 平均为126 μg/m<sup>3</sup>, 这说明晴天天气下, 空气中的沙尘气溶胶浓度以0.1~2.5 μm的居多。其次, 粒径在0.1~2.5 μm

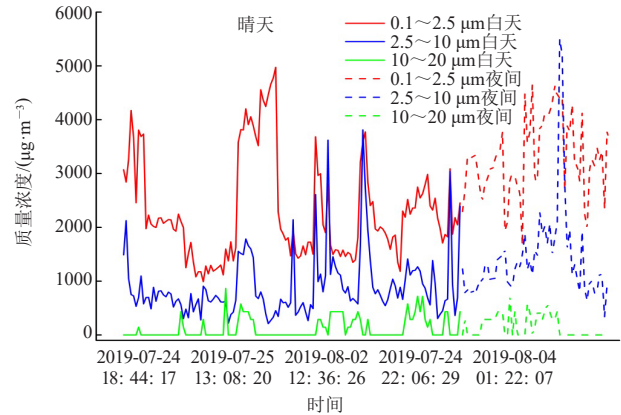


图9 晴天天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度白天和夜间分布  
Fig. 9 Daytime and nighttime distribution of dust aerosol concentrations with different particle sizes under sunny weather

的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为3313 μg/m<sup>3</sup>, 白天平均值为2298 μg/m<sup>3</sup>, 夜间高于白天; 粒径在2.5~10 μm的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为1401 μg/m<sup>3</sup>, 白天平均值为906 μg/m<sup>3</sup>, 夜间高于白天; 粒径在10~20 μm的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为151 μg/m<sup>3</sup>, 白天平均值为115.4 μg/m<sup>3</sup>, 夜间高于白天, 这可能与白天地表接收太阳辐射较强, 近地表空气受热膨胀上升, 上升过程中可携带大量沙尘气溶胶粒子, 夜间, 地表温度下降, 相应沙尘气溶胶粒子开始沉降, 因此沙尘气溶胶浓度夜间高于白天。

图10是浮尘天气下粒径在0.1~2.5 μm、2.5~10 μm、10~20 μm的沙尘气溶胶浓度白天、夜间分布, 由图可知, 总体上, 白天和夜间粒径在0.1~2.5 μm的沙尘气溶胶浓度最高, 平均为6273 μg/m<sup>3</sup>, 其次为粒径在2.5~10 μm的沙尘气溶胶浓度, 平均为1403 μg/m<sup>3</sup>, 粒径在10~20 μm的沙尘气

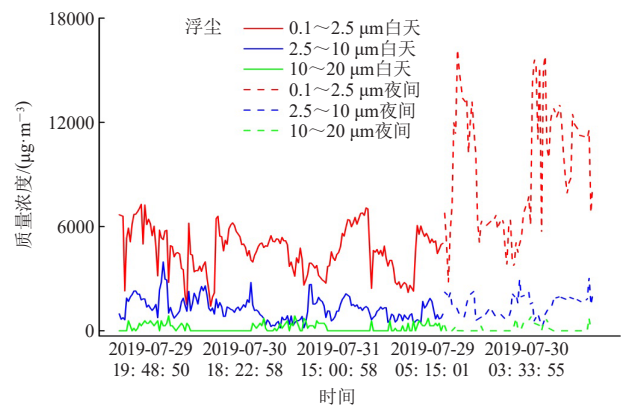


图10 浮尘天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度白天、夜间分布  
Fig. 10 Daytime and nighttime distribution of dust aerosol concentrations with different particle sizes under floating dust weather

溶胶浓度最低, 平均为 $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 这说明浮尘天气下, 空气中的沙尘气溶胶浓度以 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的居多。其次, 粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $9263 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天平均值为 $4667 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 夜间高于白天; 粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $1474 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天平均值为 $1269 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 夜间高于白天; 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $122.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天平均值为 $176.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天高于夜间。

图11是扬沙天气下粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度白天和夜间分布, 由图可知, 总体上, 白天和夜间粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高, 平均为 $7135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其次为粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度, 平均为 $2108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最低, 平均为 $315 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 这说明扬沙天气下, 空气中的沙尘气溶胶浓度以 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的居多。其次, 粒径在 $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $7740 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天平均值为 $6623 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 夜间高于白天; 粒径在 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $2691 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天平均值为 $1637 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 夜间高于白天; 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间平均值为 $249.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天的平均值为 $355.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 白天高于夜间。

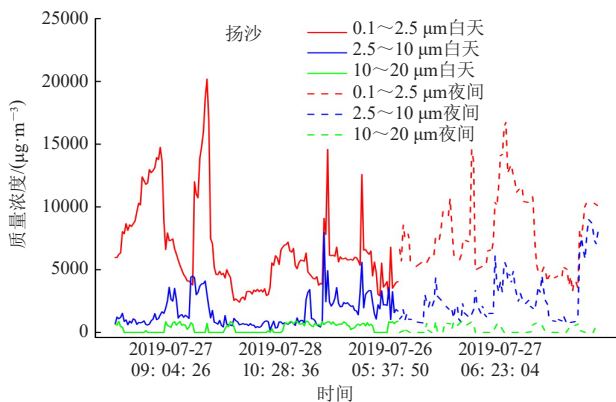


图11 扬沙天气下不同粒径沙尘气溶胶浓度白天、夜间分布  
Fig. 11 Daytime and nighttime distribution of dust aerosol concentrations with different particle sizes under sand-blowing weather

综上所述, 浮尘和扬沙天气, 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度白天高于夜间, 这可能与风速有关, 观测期间浮尘和扬沙多发生在白天, 风速较大, 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶容易被风吹拂到空气当中。相反, 晴天, 粒径在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度夜间高于白天, 这可能与白天地表接收太阳辐射

较强, 近地表空气受热膨胀上升, 上升过程中可携带大量沙尘气溶胶粒子, 夜间地表温度下降, 相应沙尘气溶胶粒子开始沉降, 因此沙尘气溶胶浓度夜间高于白天。

### 3 结论

本文利用粒子分级采样仪, 对和田市不同天气条件下(晴天、浮尘、扬沙)的沙尘气溶胶粒径分布特征进行连续观测, 得到以下结论:

1) 晴天天气下,  $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高, 平均为 $2612 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占68.8%, 且夜间浓度高于白天;  $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之, 平均为 $1059.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占27.9%, 且夜间浓度高于白天;  $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少, 平均为 $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 仅占3.3%, 且夜间浓度高于白天。

2) 扬沙天气下,  $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高, 平均为 $7135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占74.6%, 且夜间浓度高于白天;  $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之, 平均为 $2108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占22.0%, 且夜间浓度高于白天;  $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最少, 平均为 $315 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 仅占3.3%, 且白天浓度高于夜间。

3) 浮尘天气下,  $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度最高, 平均为 $6273 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占79.6%, 且夜间浓度高于白天;  $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度次之, 平均为 $1403 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占17.8%, 且夜间浓度高于白天;  $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶粒子浓度最少, 平均为 $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 仅占2.5%, 且浓度白天高于夜间。

4) 无论晴天、浮尘、扬沙天气,  $0.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶浓度均最高, 即: 空气中细小颗粒居多, 这可能是由于和田位于塔克拉玛干沙漠西南缘, 当冷空气自西向东或自西北向东南移动经过天山山脉时, 受天山山脉的阻挡, 冷空气在天山北侧堆积, 并沿天山北侧东移, 从地势低洼的吐哈盆地移进塔克拉玛干沙漠东部, 造成塔克拉玛干沙漠东部偏东大风或发生沙尘暴天气, 即东灌天气<sup>[42]</sup>, 当大风携带的沙尘粒子从东向西输送过程中, 大多数粗沙粒已沉降, 到和田时只剩下粒径较小的细沙粒。

### 参考文献

- [1] Miller R L, Tegen I, Perlwitz J. Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(109): 361-375.
- [2] Han Y, Dai X, Fang X, et al. Dust aerosols: a possible accelerant for an increasingly arid climate in North China. *Journal of arid environments*, 2008, 72(8): 1476-1489.
- [3] Liu X, Huneeus N, Schulz M, et al. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(15): 77-81.
- [4] Huneeus N, Schulz M, Balkanski Y, et al. Global dust model

- intercomparison in AeroCom phase. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011(11): 7781-7786.
- [5] Jemmett-Smith B C, Marsham J H, Knippertz P, et al. Quantifying global dust devil occurrence from meteorological analyses. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(4): 1275-1282.
- [6] Carslaw K, Boucher O, Spracklen D, et al. A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the earth system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(4): 1-37.
- [7] Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2011: 181-204.
- [8] 鞠婷婷, 张宏昇. 科尔沁沙地跃移起沙和对流起沙的实验与参数化研究. 北京: 北京大学, 2019.
- [9] 成天涛, 沈志宝. 中国西北大气沙尘光学特性的数值试验. *高原气象*, 2001, 20(3): 291-297.
- [10] Satheesh S K, Vinoj V, Moorthy K K. Vertical distribution of aerosols over an urban continental site in India inferred using a micro pulse lidar. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): 1063-1075.
- [11] Vand H S C, Carrió G G, Cotton W R, et al. Impacts of nucleating aerosol on Florida storms, Part I: musicale simulations. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 63(7): 1752-1775.
- [12] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [13] 韩永翔, 奚晓霞, 方小敏, 等. 亚洲大陆沙尘过程与北太平洋地区生物环境效应: 以2001年4月中旬中亚特大沙尘暴为例. *科学通报*, 2005, 50(23): 2649-2655.
- [14] 韩永翔, 宋连春, 赵天良, 等. 北太平洋地区沙尘沉降与海洋生物兴衰的关系. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 157-160.
- [15] Painter T H, Deems J S, Belnap J, et al. Response of Colorado River runoff to dust radiative forcing in snow. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(40): 17125-17130.
- [16] Griffin D W. Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clinical Microbiology Reviews*, 2007, 20(3): 459-477.
- [17] Breikreuz H, Schroedter-Homscheidt M, Holzer-Popp T. A case study to prepare for the utilization of aerosol forecasts in solar energy industries. *Solar Energy*, 2007, 81(11): 1377-1385.
- [18] Degobbi C, Lopes F D, Carvalho-Oliveira R, et al. Correlation of fungi and endotoxin with PM<sub>2.5</sub> and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2277-2283.
- [19] Morman S A, Plumlee G S. The role of airborne mineral dusts in human disease. *Aeolian Research*, 2013, 9: 203-212.
- [20] Mahowald N, Albani S, Kok J F, et al. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Research*, 2014, 15: 53-71.
- [21] Ryder C L, Highwood E J, Rosenberg P D, et al. Optical properties of Saharan dust aerosol and contribution from the coarse mode as measured during the Fenec 2011 aircraft campaign. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2013, 13: 303-325.
- [22] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 19237-19244.
- [23] Brunekreef B, Holgate S T. Air pollution and health. *The Lancet*, 2002, 360: 1233-1242.
- [24] Mahowald N. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate. *Science*, 2011, 334: 794-796.
- [25] Mahowald N, Ward D S, Kloster S, et al. Aerosol impacts on climate and biogeochemistry. *Annual Review of Environment and Resources*, 2011, 36: 45-56.
- [26] Myhre G, Stordal F. Global sensitivity experiments of the radiative forcing due to mineral aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 18193-18204.
- [27] Kalashnikova O V, Sokolik I. Importance of shapes and compositions of wind-blown dust particles for remote sensing at solar wavelengths. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 1398.
- [28] Quijano A L, Sokolik I N. Influence of the aerosol vertical distribution on the retrievals of aerosol optical depth from satellite radiance measurements. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 3457-3460.
- [29] Quijano A L, Sokolik I N, Toon O B. Radiative heating rates and direct radiative forcing by mineral dust in cloudy atmospheric conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D10): 12207-12219.
- [30] Reid J S, Jonsson H H, Maring H B, et al. Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108: D19.
- [31] Meng L, Yang X, Zhao T, et al. Modeling study on three-dimensional distribution of dust aerosols during a dust storm over the Tarim Basin, Northwest China. *Atmospheric Research*, 2019, 218: 285-295.
- [32] Chen S Y, Huang J P, Kang L T, et al. Emission, transport, and radiative effects of mineral dust from the Taklimakan and Gobi Deserts: Comparison of measurements and model results. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(3): 1-43.
- [33] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24), <https://doi.org/10.1029/2003GL018206>.
- [34] Yang X H, Yang F, Liu X H, et al. Comparison of horizontal dust fluxes simulated with two dust emission schemes based on field experiments in Xinjiang, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126: 223-231.
- [35] 李江风. 塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候. 北京: 社科出版社, 2003.
- [36] 李普昌, 董治宝, 王训明, 等. 塔里木盆地沙尘天气的季节变化及成因分析. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 142-148.
- [37] 胡汝黛, 樊自立, 王亚俊, 等. 近50 a新疆气候变化环境影响评估. *干旱区地理*, 2001, 20(1): 25-28.
- [38] 李汉林, 何清, 赵权威, 等. 帕米尔高原东部PM<sub>10</sub>输送路径及潜在源分析. *中国环境科学*, 2020, 40(11): 4660-4668.
- [39] 李凤云, 王玉山. 德州市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度特征分析. *青海气象*, 2017(2): 18-26.
- [40] 金丽娜, 杨晓春. 西安市PM<sub>10</sub>浓度特征及气象因子影响分析. *干旱气象*, 2017(35): 214-320.
- [41] 闵霄. 北京市城市热岛效应与PM<sub>2.5</sub>及PM<sub>10</sub>浓度分布关系研究. 兰州交通大学. 2017.
- [42] 刘惠云. 东灌天气. *新疆气象*, 1994, 17(2): 11-13.