

朱文清,高文琦,王文彩,等.秋冬季沙尘传输路径特征及其对华北空气质量的影响[J].海洋气象学报,2025,45(2):1-10.
ZHU Wenqing, GAO Wenqi, Wang Wencai, et al. Characteristics of transport path of autumn-winter dust and its impact on air quality in North China[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220408002. (in Chinese)

秋冬季沙尘传输路径特征及其对华北空气质量的影响

朱文清,高文琦,王文彩,周杨

(中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100)

摘要 利用2015—2018年秋冬季气象及空气质量等资料,分析沙尘发生时华北地区PM₁₀和PM_{2.5}及其他污染物的分布特征,并对秋冬季沙尘的传输路径进行分类。结果表明:秋冬季沙尘的传输路径与500和850 hPa高空风密切相关,主要分为东向扩散型、东南传输型和东北传输型3类,分别占统计数量的38.9%、38.9%和22.2%。东向扩散型沙尘强度和影响范围最大,华北地区PM₁₀和PM_{2.5}平均质量浓度为156.4和86.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。华北地区风速大,污染物扩散快,东南传输型沙尘强度小,引起的污染在3类沙尘中最轻。东北传输型沙尘对应的华北地区PM₁₀和PM_{2.5}平均质量浓度分别为171.9和117.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在3类沙尘中最高;华北地区地面较低的风速和下沉气流的影响可能导致污染的累积,另外东北传输型沙尘期间平均相对湿度比另两类沙尘期间高4%~5%,尤其在沿海区域相对湿度超过70%,可能会促进二次颗粒物的非均相生成从而加重污染。

关键词 秋冬季沙尘;传输路径;空气质量;华北地区

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)01-0000-00

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220408002

Characteristics of transport path of autumn-winter dust and its impact on air quality in North China

ZHU Wenqing, GAO Wenqi, WANG Wencai, ZHOU Yang

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract Based on the meteorological and air quality data in the autumn and winter of 2015–2018, PM₁₀, PM_{2.5} and other pollutants during dust events in North China are analyzed, and the transport paths of dust are classified. The results suggest that the transport paths of dust are closely related to the upper-level winds at 500 and 850 hPa. Three types of dust are identified according to the transport paths, namely the Eastward Diffusion type, the Southeast Transport type and the Northeast Transport type, which account for 38.9%, 38.9% and 22.2% of the statistics, respectively. The intensity and influence range of the dust of the Eastward Diffusion type are the largest, and the average mass concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in North China are 156.4 and 86.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The dust of the Southeast Transport type dissipates rapidly with low intensity due to the high wind speed in North China, and the pollution in North China is the lightest among the three types. The average mass concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} are 171.9 and 117.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in North China during the Northeast Transport type, which is the highest pollution among the three types. The lower wind speed and downdraft in North China may lead to the accumulation

收稿日期:2022-04-08;修订日期:2022-06-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41875155,41875174)

第一作者简介:朱文清,女,硕士研究生,主要从事大气气溶胶研究,zhuwenqing_123@163.com。

通信作者简介:周杨,女,博士,副教授,主要从事气溶胶及其气候效应研究,yangzhou@ouc.edu.cn。

of pollutants. Moreover, the average relative humidity during the Northeast Transport type in North China is 4%–5% higher than the other two types, and especially in the coastal areas, the relative humidity is higher than 70%, which may promote the heterogeneous formation of secondary particles and aggravate the pollution.

Keywords autumn-winter dust; transport path; air quality; North China

引言

在地球 40°N 的纬度带附近,如蒙古、中国北部、非洲撒哈拉地区都存在干旱沙漠区。在风应力的作用下沙尘被夹卷到大气中形成沙尘气溶胶,随西风气流输送到全球其他地区^[1]。研究表明,中国西北部沙尘源区每年向大气中输送高达 800 Tg 的沙尘量^[2],大部分沙尘传输至中国华北地区,造成能见度的降低,进而影响人类活动及身体健康^[3]。另外也有大量沙尘传输至中国东海海域或者更远的西太地区^[4],沙尘携带的丰富的痕量营养元素会促进海洋表层浮游植物爆发^[5],影响海洋初级生产力并间接影响全球气候变化。

亚洲沙尘多发于春季^[6-7],在蒙古和中国北部的气旋为沙尘的发展提供了动力条件^[8]。近些年秋冬季也常出现沙尘天气^[9-11]。叶笃正等^[12]认为,在全球变暖且中国北方地表植被状况没有根本好转的情况下,每逢拉尼娜事件等引起的强冬季风年,中国北方就会频繁出现严重的沙尘天气。郭宇宏等^[13]提出由于地表植被覆盖率低、地表下垫面扰动大,加之冬季温度低,土壤含水量少,当地表沙土被大风吹起,便导致冬季沙尘天气的发生。

近些年华北地区秋冬季发生了多次大范围的灰霾-沙尘^[14]或者沙尘-灰霾混合的极端污染事件^[15],引起了人们对秋冬季沙尘的关注。研究^[16-17]表明影响华北地区的沙尘主要来自塔克拉玛干沙漠、河西走廊和河套地区等沙尘源区。每年 11 月之后中国北方城市陆续开始供暖,加剧了大气污染的本底排放,沙尘的入侵对华北地区空气质量造成进一步的恶化^[18-20]。一方面,由于沙尘气溶胶的辐射效应导致边界层上部变暖,近地表变冷,从而使边界层更加稳定,造成地表风速的降低,减弱污染物的扩散,进一步造成处于下风向的中国东部地区的空气质量恶化^[18, 21];另一方面,沙尘中较丰富的颗粒物表面会促进二次颗粒物在表面的生成,或者沙尘中较丰富的过渡金属会催化 SO₂的氧化,或通

过 NO₂在颗粒物界面的反应氧化 SO₂生成硫酸盐,从而导致颗粒物爆发性增长事件的发生^[22-24]。

虽然秋冬季沙尘在强度上不如春季,但每年秋冬沙尘发生次数与同年春季相当^[6]。任霄玉等^[7]研究表明 1979—2002 年秋冬季年均沙尘天气频数在中国西北部可高达 20 d,根据本文研究,2015—2018 年秋冬季年均沙尘天气频数高达 25 d,表明近几年秋冬季沙尘天气愈加频繁。但目前关于秋冬季沙尘对空气质量影响的研究多见于个例分析,缺乏对秋冬季沙尘的总体研究。本文对 2015—2018 年秋冬季期间沙尘进行系统的筛选,通过沙尘和非沙尘时期的空气质量对比,分析了沙尘发生时华北地区 PM₁₀和 PM_{2.5}以及其他污染物的分布特征,并对秋冬季沙尘的传输路径进行了分类,探讨不同沙尘传输路径对华北地区空气质量的影响,研究结果有助于为秋冬季沙尘诱导的高污染防治提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

空气质量数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台 (<https://quotsoft.net/air/>),包括全国 1704 个站点的小时数据,空气质量数据类型包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和 CO。

中国地面气象数据来自隶属于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的美国国家气候数据中心 (National Climatic Data Center, NCDC) 提供的小时站点数据 (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/>),该数据集包含中国 427 个站点的地面气温、气压、露点温度、风向风速、降水量等地面气象要素。相对湿度根据气温 (T) 和露点温度 (T_d) 计算得到^[25]。

$$V_{RH} = \frac{e}{e_s(T)} = \frac{e_s(T_d)}{e_s(T)} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 e 为大气水汽压, $e_s(T)$ 为大气温度下的饱

和水汽压, $e_s(T_d)$ 为露点温度下的饱和水汽压, 可根据 Tetens 经验公式计算:

$$e_s(T) = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693882(T-273.16)}{T-35.86} \right]. \quad (2)$$

使用的站点数据包括污染物质量浓度 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO) 和气象要素 (地面气温、风速风向及相对湿度) 数据, 以上站点数据均使用 Cressman 方法^[26] 插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的规则网格上, 其中影响半径以每一经纬度为单位选取数值 4、2、1, 进行 3 次插值以优化结果^[27-28]。

采用韩国气象局高空 500、850 hPa 以及地面实况天气图 (<http://222.195.136.24/>) 对沙尘发生期间的天气形势进行分析, 并应用欧洲中期天气预报中心开发公布的 ERA5 再分析数据, 分析垂直风速、散度、位势高度、温度以及对应的风场。ERA5 是欧洲中期天气预报中心公开发布的新一代再分析数据, 拥有 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的高空间分辨率和小时的高时间分辨率, 相较于第 4 代的 ERA-Interim 再分析数据, ERA5 再分析数据的时空分辨率得到大幅提升^[29]。

1.2 沙尘个案筛选方法

对 2015—2018 年 9 月—次年 2 月的秋冬季沙尘天气过程进行筛选, 并对采暖期 (11 月—次年 2 月) 的沙尘过程进行单独统计。将全国 PM_{10} 质量浓度大于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 且 $PM_{2.5}/PM_{10} < 0.4$ 的站点大于 100 个作为甄别沙尘事件的首要条件^[6], 并结合 CALIPSO 卫星资料 (https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/exp_index.php?d=2015) 以及日本九州大学和国立环境研究所公布的沙尘轨迹图 (<https://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/newCFORS/DUST-all-img/>), 沙尘气溶胶为东亚地区大气化学预报模式 (Chemical Weather Forecasting System, CFORS) 模拟的从地面到 1 000 m 高度粒径范围为 $0.10 \sim 25.21 \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒的平均质量浓度^[30-31], 配合地面站点 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的质量浓度分布, 筛选出在中国境内发生并且影响华北地区的沙尘事件, 最终根据以上信息综合判断沙尘的传输路径。当沙尘向东、南、东北这 3 个方向都有传输趋势且扩散范围较大时, 将其定义为东向扩散型; 当沙尘仅向东南传输, 且扩散范围较小时, 将该类沙尘定义为东南传输型; 当沙尘向东、东北移动, 且沙尘气溶

胶高值区向东北方向传输时, 将该类沙尘定义为东北传输型。根据日本九州大学和国立环境研究所公布的沙尘轨迹图, 将沙尘气溶胶质量浓度高值中心在中国境内出现的时间定义为沙尘开始时间, 高值中心开始不存在或移出中国的时间定义为沙尘结束时间。

2 结果与讨论

2.1 秋冬季沙尘统计和传输路径分析

对 2015—2018 年 9 月—次年 2 月沙尘天气过程进行筛选和统计, 秋冬季沙尘事件共发生 31 次, 其中秋冬季采暖期 (11 月—次年 2 月) 共发生 24 次 (表 1)。2015—2018 年秋冬季年均沙尘天气频数高达 25 d。

表 1 2015—2018 年秋冬季沙尘个案统计

Table 1 Statistical result of autumn-winter dust cases from 2015 to 2018

统计时段	年份	沙尘次数/次	持续总天数/d
9 月 1 日— 次年 2 月 28 日	2015	5	20
	2016	9	25
	2017	10	27
	2018	7	28
	总计	31	100
11 月 1 日— 次年 2 月 28 日	2015	3	14
	2016	8	24
	2017	7	19
	2018	6	25
	总计	24	82

研究表明, 在西部干旱地区, 温度和降水的变化是该地区沙尘暴发生的重要强迫因素^[32]。同时, 强风、沙源和大气热力不稳定是沙尘暴发生的 3 个基础因子^[33-34]。文中对每个沙尘事件的天气系统 (<http://222.195.136.24/>) 进行分析发现, 秋冬季沙尘多是由蒙古气旋东移或东亚大槽东移驱动其往东或者东南传输, 进而影响华北。根据沙尘强度和传输路径, 筛选出 18 个影响华北地区的典型沙尘个案 (表 2), 根据沙尘的传输路径, 将其分成东向扩散型、东南传输型和东北传输型。

图 1 和图 2 分别为 3 类典型沙尘事件的传输路径示意图和 3 类沙尘的平均天气形势。第一类沙尘为东向扩散型, 该类沙尘主要发生在 11、12 月。在 3 类沙尘中, 该类型的沙尘强度较大, 影响范围较广, 主要起源于新疆东部和内蒙古西部 (图 1a—c)。该类沙尘过程期间内蒙古和新疆以及其他中纬度地

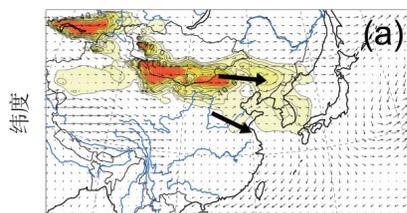
区上空 500 hPa 高度主要受西风气流控制,风速约为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2a)。贝加尔湖上空 850 hPa 高度出现一个横向的高压脊,中纬度地区主要受西北气流

控制(图 2d)。沙尘在 500 hPa 西风气流以及 850 hPa 西北气流的引导下向东输送、并向南扩散,先后影响东北、华北地区。

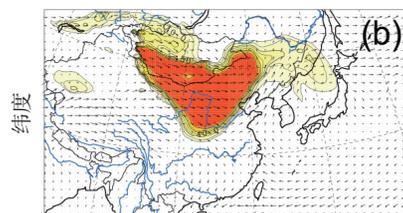
表 2 2015—2018 年影响中国华北地区秋冬季沙尘事件统计

Table 2 Statistical result of autumn-winter dust cases that impact North China from 2015 to 2018

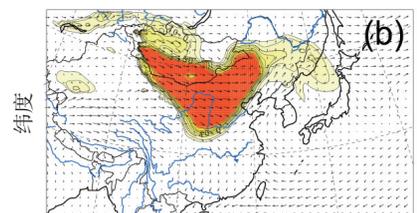
分类	开始时刻	结束时刻	持续时间/h	移动路径	到达华北时刻	离开华北时刻
东向扩散型	2016-11-18 05:00	2016-11-20 08:00	51	向东、向南	2016-11-19 03:00	2016-11-20 00:00
	2016-11-25 00:00	2016-11-28 13:00	85	向东北或向东、向南	2016-11-25 17:00	2016-11-27 19:00
	2017-02-15 17:00	2017-02-17 16:00	47	向东北或向东、向南	2017-02-16 06:00	2017-02-16 23:00
	2017-12-28 06:00	2017-12-31 23:00	89	向东北、向南	2017-12-29 06:00	2017-12-30 22:00
	2018-02-08 15:00	2018-02-17 20:00	221	向东北或向东、向南	2018-02-09 03:00	2018-02-10 21:00
	2018-11-13 17:00	2018-11-16 14:00	69	向东北或向东、向南	2018-11-15 08:00	2018-11-16 14:00
	2018-11-26 00:00	2018-12-05 00:00	216	向东北或向东、向南	2018-11-26 08:00 2018-12-2 17:00	2018-11-30 04:00 2018-12-04 16:00
东南传输型	2016-01-16 20:00	2016-01-17 23:00	27	向东南移动,影响华北	2016-01-16 21:00	2016-01-17 13:00
	2016-02-22 12:00	2016-02-29 09:00	165	向东南移动,影响华北和长江中下游	2016-02-27 20:00	2016-02-28 16:00
	2017-01-18 17:00	2017-01-19 23:00	30	向东南移动,影响华北和长江中下游	2017-01-19 05:00	2017-01-19 19:00
	2017-01-21 03:00	2017-01-27 17:00	158	向东南移动,影响华北和长江中下游	2017-01-26 07:00	2017-01-27 01:00
	2017-02-19 20:00	2017-02-23 06:00	82	向东南移动,影响华北和长江中下游	2017-02-21 23:00	2017-02-22 23:00
	2017-12-23 14:00	2017-12-25 00:00	34	向东南移动,影响华北和长江中下游	2017-12-23 23:00	2017-12-24 16:00
	2019-02-13 18:00	2019-02-15 23:00	53	向东南移动,影响华北和长江中下游	2019-02-14 14:00	2019-02-15 23:00
东北传输型	2018-01-13 09:00	2018-01-18 23:00	134	向东北或向东	2018-01-15 23:00	2018-01-17 01:00
	2018-02-23 17:00	2018-02-24 23:00	30	向东北或向东	2018-02-23 23:00	2018-02-24 23:00
	2019-01-11 03:00	2019-01-15 21:00	114	向东北或向东	2019-01-12 21:00	2019-01-13 03:00
	2019-02-04 23:00	2019-02-07 15:00	64	向东北或向东	2019-02-06 15:00	2019-02-07 15:00



(a)



(b)



(c)

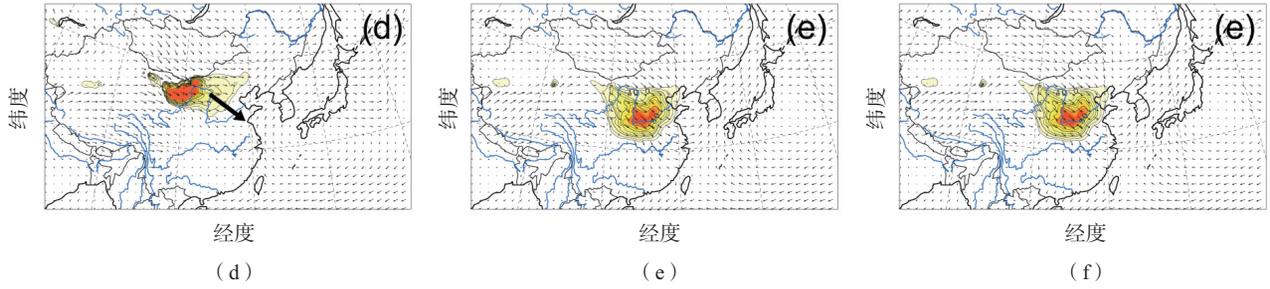


图 1 2015—2018 年秋冬季华北地区 3 类典型沙尘过程的传输路径示意图

Fig.1 Transport paths of three types of typical dust events in North China in autumn and winter from 2015 to 2018

第二类沙尘为东南传输型,该类沙尘的影响范围小,强度较弱,主要起源于内蒙古西部(图 1d—f),主要发生在 1、2 月(表 2)。该类沙尘过程期间,500 hPa 高空中高纬地区呈“两槽一脊”型,高压脊位于贝加尔湖以西至新疆一带,中高纬度地区主要受西北气流控制(图 2b)。850 hPa,内蒙古以及东北三省这一范围内为西北气流(图 2e)。相较于东向扩散型沙尘,该类沙尘在 500 hPa 高空及 850 hPa 均受西北气流控制。受 500 hPa 和 850 hPa 西北气流的共同影响,沙尘向东南方向传输并

影响华北。

第 3 类沙尘为东北传输型,该类沙尘主要发生在 1、2 月,主要起源于蒙古、内蒙古西部。500 hPa,西伯利亚有一个明显的冷中心,但中高纬的等高线无明显槽脊,中国及蒙古主要受平直西风气流控制(图 2c)。相较于前两类沙尘,该类沙尘过程期间 850 hPa 的等高线也较为平直,在内蒙古以及东北三省处完全受西风气流控制(图 2f)。在 500 和 850 hPa 西风气流的影响下,沙尘主要向东、东北传输,PM₁₀ 高值区主要呈带状分布(图 1g—i)。

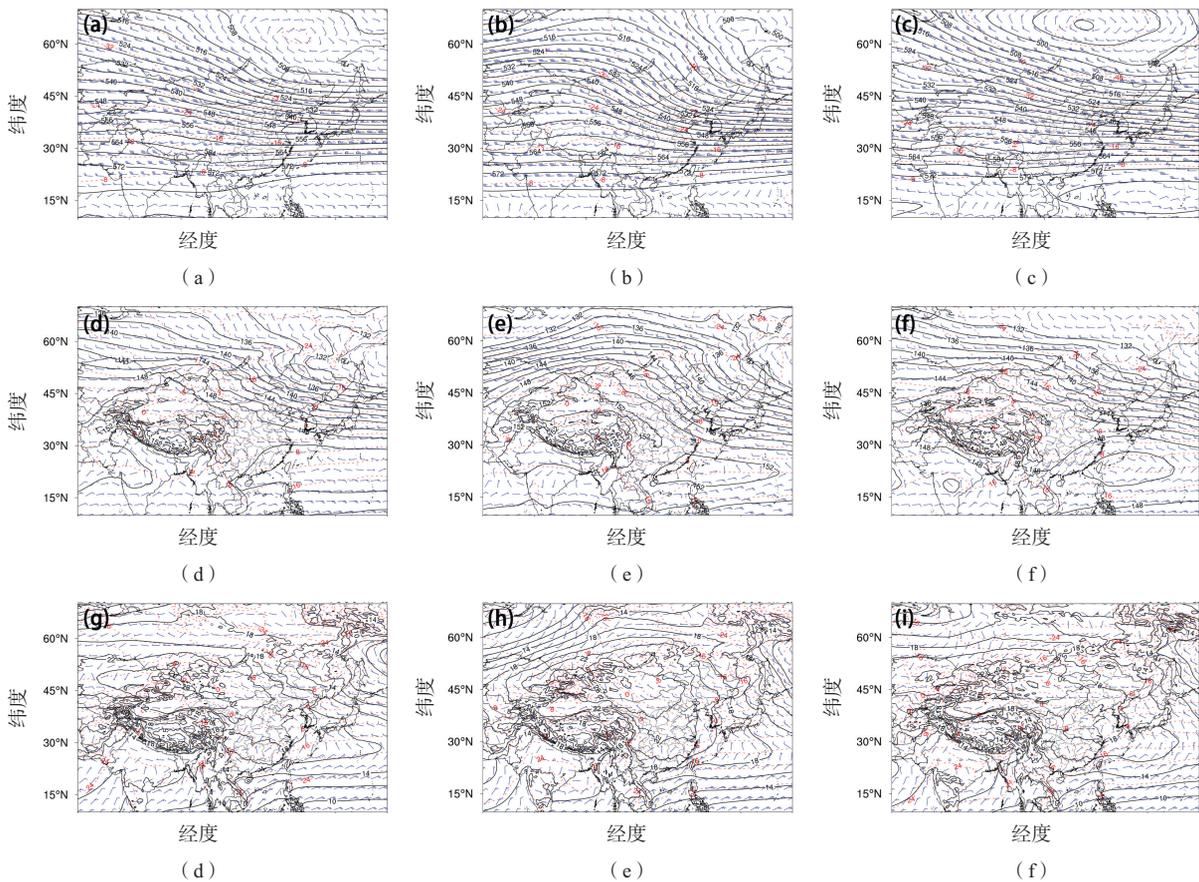


图 2 不同类型沙尘的平均天气形势

Fig.2 Average synoptic situation of three different types of dust

综上所述,沙尘的传输路径与500和850 hPa高空风密切相关。对于东向扩散型沙尘,500 hPa中纬度地区主要受西风气流控制,850 hPa主要受西北气流控制;对于东南传输型,500和850 hPa中高纬度均处于西北气流的控制之下;对于东北传输型,500和850 hPa中高纬度地区主要受西风气流控制。

2.2 秋冬季不同传输类型沙尘对空气质量的影响

为研究不同传输类型的沙尘对华北地区空气质量的影响,图3给出了沙尘过程期间平均 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布及其与非沙尘期间质量浓度差值的分布,图中标注的华北地区的平均数据见表3。 PM_{10} 平均质量浓度高值分布表示沙尘中心主要传输路径。东向扩散型沙尘期间华北地区上游,如甘肃、内蒙古西部等地 PM_{10} 平均质量浓度明显高于另外两类沙尘(图3a—c)。 PM_{10} 质量浓度高值区从内蒙古西部逐渐延展到甘肃中部,同时在山西、河南、河北等

地也出现了 PM_{10} 高值,表明该类沙尘强度大,影响范围广。将该类沙尘 PM_{10} 平均质量浓度与非沙尘期间进行比较,发现沙尘过程期间 PM_{10} 平均质量浓度明显比非沙尘期间高(图3g),且有91%的站点通过了95%置信水平的显著性检验。 PM_{10} 质量浓度受沙尘影响最大的地方主要为甘肃中部,内蒙古、陕西、山西、山东、河北、河南等地也受到了不同程度的影响(图3g)。 $PM_{2.5}$ 高值区主要在华北地区(图3d),尤其是河北中部及南部。该类沙尘期间,华北地区平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度高达 $86.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表3)。与非沙尘期间相比, $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的高值区主要集中在甘肃和山西,同时河北、河南也受到较大影响(图3j),该结果有80%的站点通过了95%置信水平的显著性检验。通过对比可知,该类沙尘的发生使华北地区的 PM_{10} 相较于非沙尘天增加了约50%($41.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $PM_{2.5}$ 升高了 $11.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表3)。

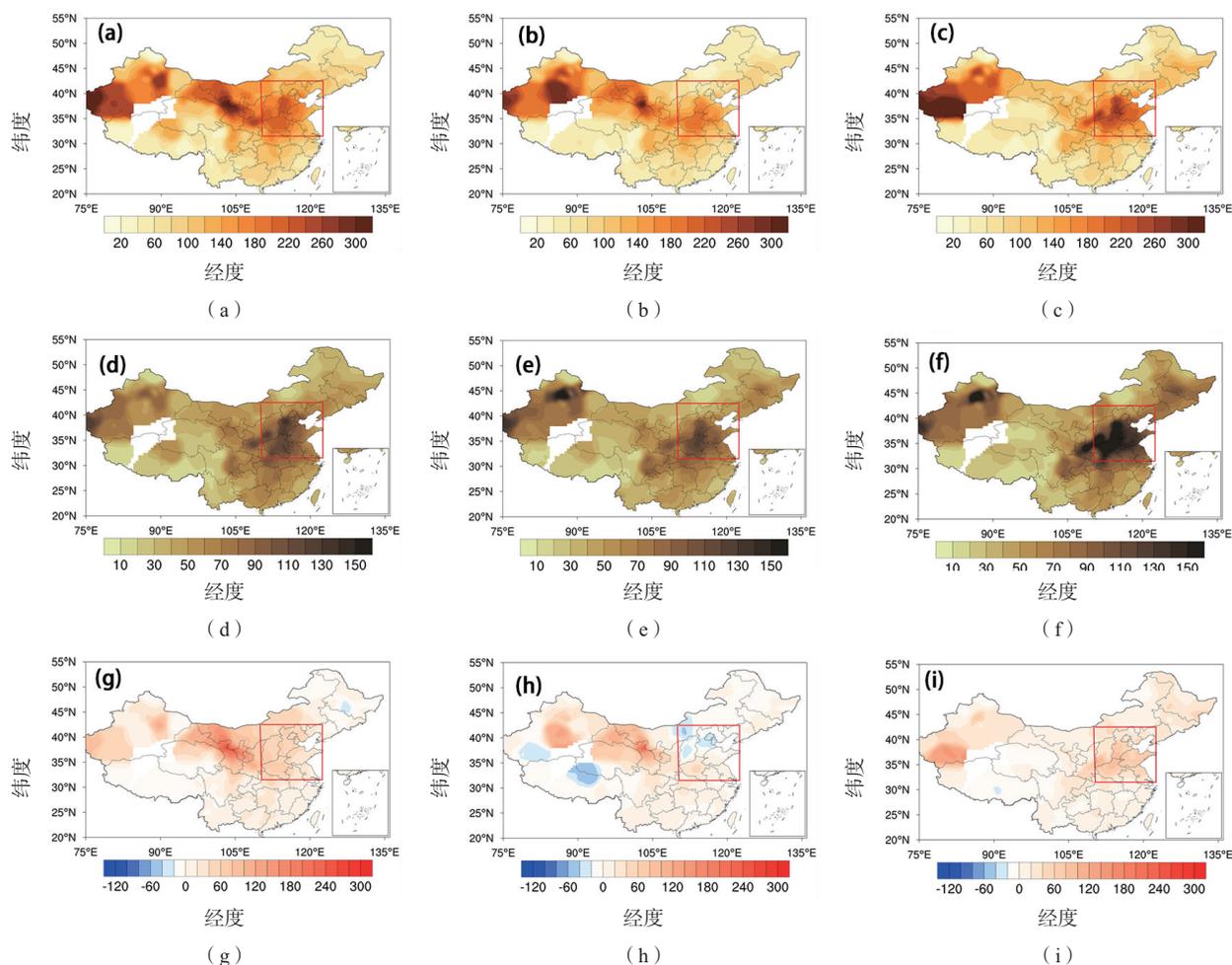


图3 沙尘过程期间近地面颗粒物质量浓度及其与非沙尘期间质量浓度差值分布

Fig.3 Average mass concentration of particulate matter near the ground on dust days and D-value between it and that on non-dust days

表 3 沙尘过程期间华北地区颗粒物、污染气体质量浓度和气象要素及其与非沙尘期间的差值对比
Table 3 Average concentration of particulate matter/pollution gas and meteorological parameters near the ground on dust days and D-value between them and those on non-dust days in North China

沙尘类型	PM ₁₀ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		PM _{2.5} /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		CO/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)		SO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		NO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		RH/%		气温/ $^{\circ}\text{C}$	
	沙尘期	差值	沙尘期	差值	沙尘期	差值	沙尘期	差值	沙尘期	差值	沙尘期	差值	沙尘期	差值
东向扩散型	156.4	41.5	86.1	11.4	1.4	-0.1	28.3	-8.0	45.8	-0.2	56.7	-0.8	2.8	2.9
东南传输型	124.9	0.8	78.7	-1.4	1.4	-0.1	38.1	0.7	40.9	-6.4	55.4	-2.1	-1.1	-1.0
东北传输型	171.9	49.2	117.8	38.5	1.7	0.2	28.3	-8.5	51.6	4.4	59.7	2.2	-1.1	-1.0

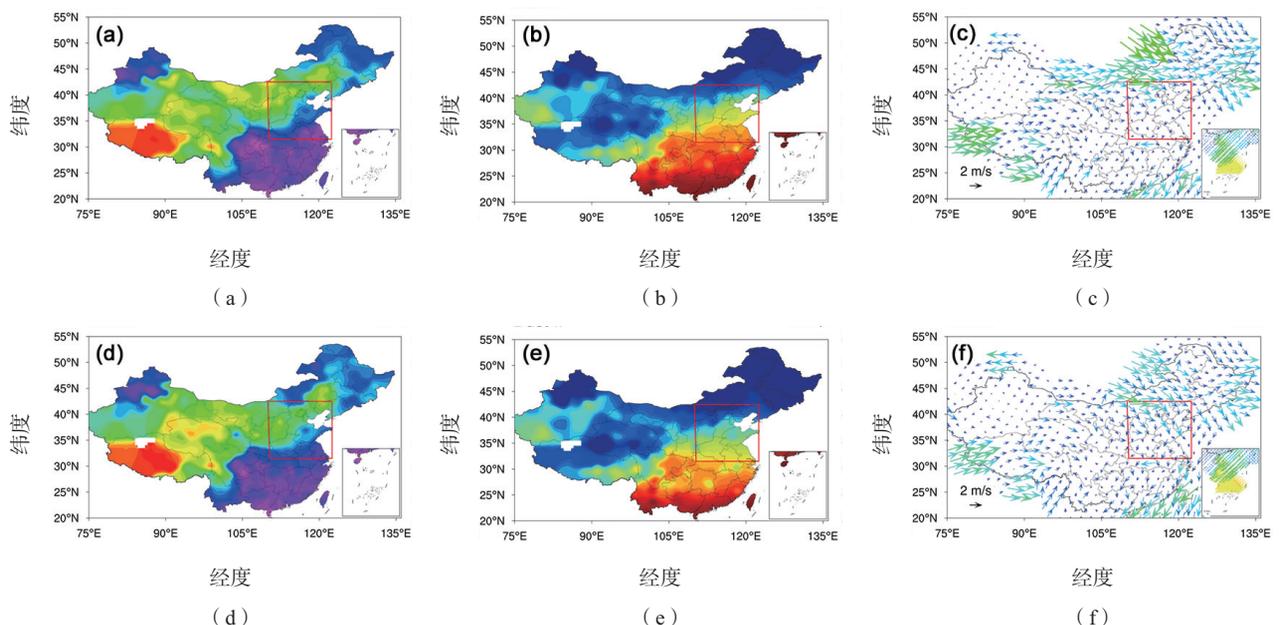
东南传输型沙尘期间,华北地区 PM₁₀ 平均质量浓度是 3 类沙尘中最低的,且该类沙尘的 PM₁₀ 高值分布范围不涉及内蒙古中部、陕西北部 and 山西(图 3b)。由该类沙尘 PM₁₀ 平均质量浓度与非沙尘期间的差值分析,其影响范围主要在甘肃及其周边地区。该类沙尘期间,华北地区 PM₁₀ 平均质量浓度与非沙尘期相近,只有在河南 PM₁₀ 平均质量浓度小幅升高(图 3h)。与 PM₁₀ 高值分布不同的是,该类沙尘期间 PM_{2.5} 质量浓度的高值分布在甘肃不存在高值中心,但在华北地区的 PM_{2.5} 质量浓度较高(图 3e)。该类沙尘期间,河北、山西、京津冀等地 PM_{2.5} 质量浓度低于非沙尘期间(降低约 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),仅在华北南部河南驻马店及其周边有所增加(增加约 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),污染物质量浓度变化不仅与当地污染源排放有关,还与沙尘发生时冷空气南下伴随着的强风有关,强风加速了污染物的扩散^[35]。该类沙尘期间的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 与非沙尘天的差值结果有 63% 和 62% 的站点通过了 95% 置信水平的显著性检验。

东北传输型沙尘的 PM₁₀ 高值区主要分布在华

北地区,与前两类沙尘不同,该类沙尘 PM₁₀ 高值区在京津冀、山东半岛地区集中(图 3c)。由该类沙尘与非沙尘期间的差值可知,这类沙尘对东北三省、华北地区、宁夏等多地影响相对较大(图 3i)。相较于非沙尘天,这类沙尘的出现使华北地区 PM₁₀ 质量浓度平均增加 $49.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、PM_{2.5} 质量浓度平均增加 $38.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 3)。该类沙尘期间的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 与非沙尘天的差值结果均有接近 85% 的站点通过了 95% 置信水平的显著性检验。

2.3 秋冬季沙尘对华北地区空气质量的影响因素分析

气象要素的变化会对沙尘强度和传输范围产生影响^[36-38],对于下风向地区,沙尘的侵入伴随着气象条件的变化,也会对区域的大气气溶胶理化特性的变化产生影响^[39],从而影响区域空气质量。本文从污染气体的角度来诊断一次排放,从气象因素的角度通过环境容量以及二次颗粒物生成的条件来分析二次生成。根据这 3 类沙尘的地面平均温度、相对湿度和风场(图 4),并结合垂直剖面上的散度和风速(图 5)以及大气中污染气体浓度(图 6),综合讨论沙尘对华北地区空气质量的影响。



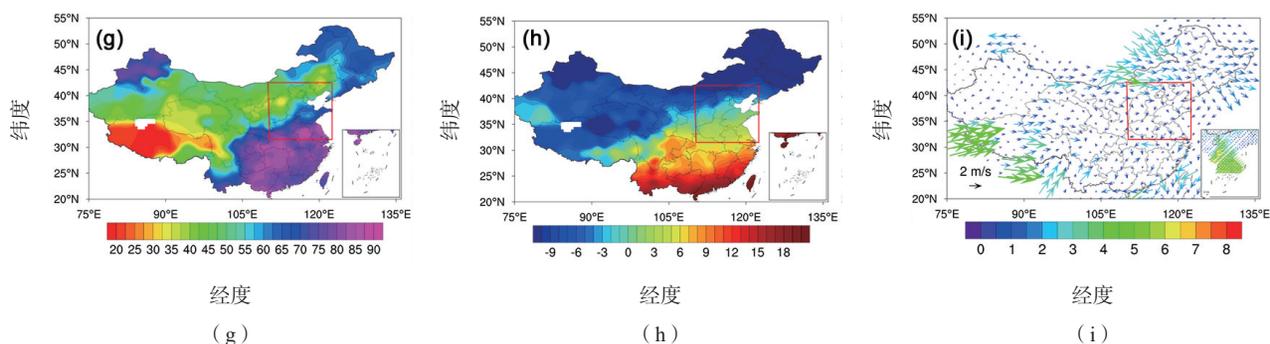


图4 沙尘天气期间地面气象要素分布

Fig.4 Distribution of meteorological parameters near the ground during three types of dust

东向扩散型沙尘期间,华北地区的温度相对另两类较高(图4b),可能与该类沙尘主要发生于11、12月有关。该类沙尘过程期间内蒙古北部地区相对湿度较低(图4a),且风速在3类沙尘最大(图4c),促使内蒙古沙漠、戈壁地区发生了较强的起沙过程,因而这类沙尘的强度大且影响范围广。由风速和散度分布分析,华北地区低空沙尘由于自身的重力结合下沉运动,下沉至地面,影响空气质量,中高空沙尘受西风作用,继续向东输送、扩散(图5a、d)。该类沙尘期

间,CO和SO₂都在山西存在高值中心(图6a—c),但与非沙尘期间相比,华北地区大部分区域CO和SO₂呈现降低趋势,尤其是SO₂,与非沙尘期间相比降低了8.0 μg·m⁻³(表3)。沙尘的到来常常伴随着强风,有利于污染气体浓度扩散降低^[40]。沙尘过境也可能造成区域本底PM_{2.5}质量浓度降低,但PM_{2.5}质量浓度在京津冀有增长的趋势(图3d),而NO₂也在京津冀也存在高值中心,这可能与该区域污染物排放以及较低的地面风速等有关(图4c)。

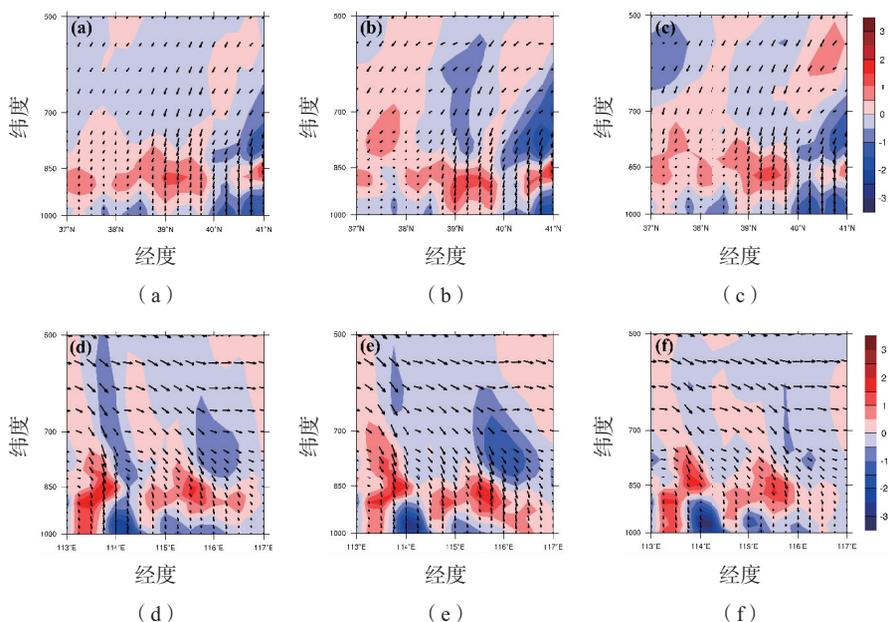


图5 沙尘期间垂直风矢量和散度在37°~41°N、113°~117°E纬向平均后的经向剖面 and 经向平均后的纬向剖面

Fig.5 Meridional/zonal cross section of zonal/meridional average vertical vector and divergence during three types of dust in the area of 37°-41°N, 113°-117°E

东南传输型沙尘过程期间的气温比东向扩散型沙尘的气温低(图4e),而该类沙尘在内蒙古北部相对湿度较高(图4d)。东南传输型沙尘过程中内蒙

古北部的风速是3类沙尘中最小的,沙尘源区风速小导致沙尘强度较弱,PM₁₀质量浓度较低。华北地区如山西、河北、山东等地的风速较大,沙尘气团移

动速度较快,同时污染物传输速度增加,CO 和 SO₂ 质量浓度在较高风速的影响下,在山西的高值中心范围大于另外两类沙尘(图 6d 和 6f)。与东向扩散

型沙尘相比,该类沙尘的 NO₂质量浓度比东南传输型沙尘期间低 4.8 μg·m⁻³(表 3),NO₂质量浓度的降低与前文提到的 PM_{2.5}质量浓度的降低相对应。

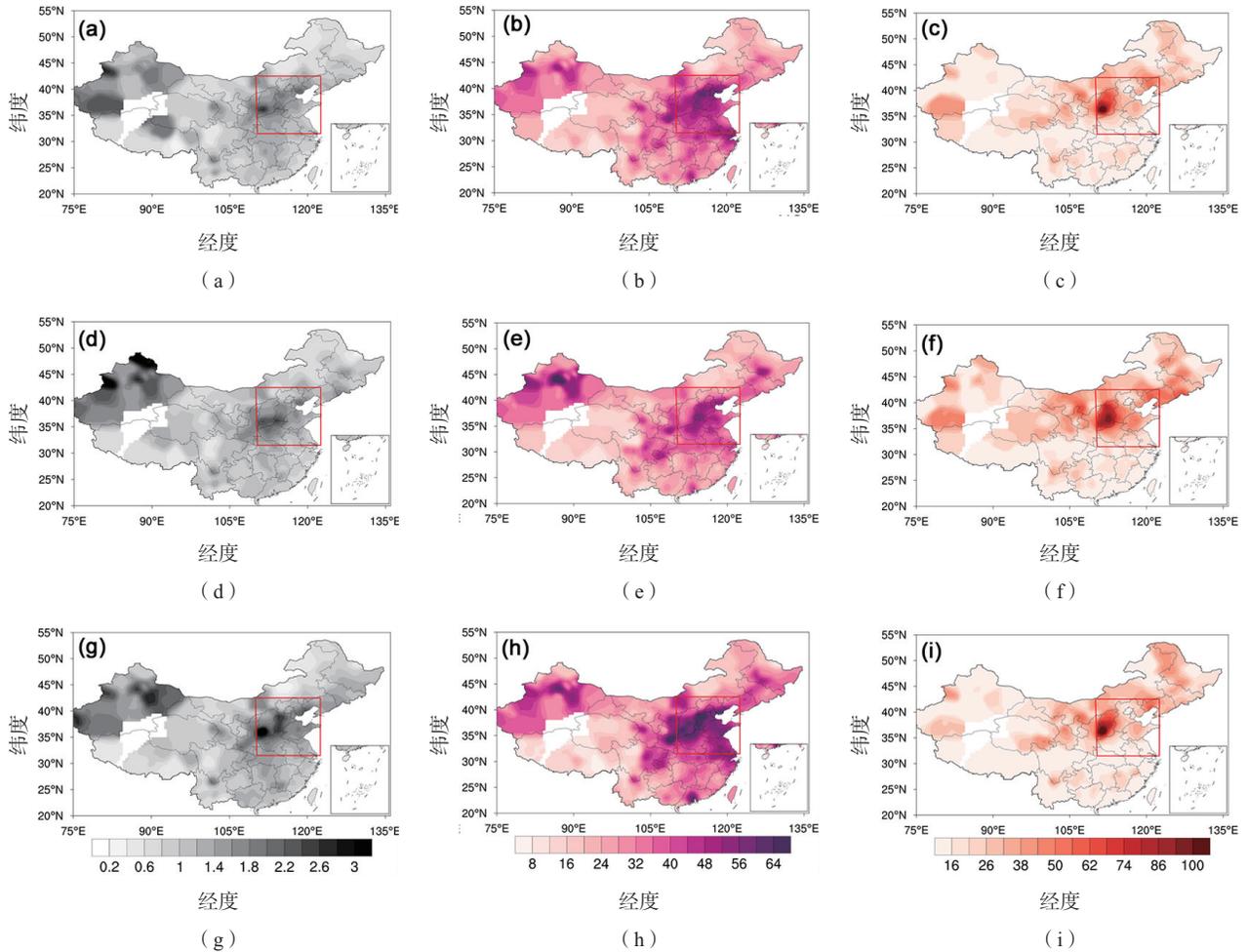


图 6 污染气体在三类沙尘期间的平均质量浓度分布
Fig.6 Average mass concentration of pollutant gas during three types of dust

东北传输型沙尘期间,内蒙古北部地区的相对湿度与东向扩散型沙尘接近。根据沙尘路径分析,这两类沙尘气团都会传输至内蒙古北部地区,受沙尘天气伴随着的干冷空气影响,这两类沙尘期间内蒙古北部出现了较低的相对湿度。对 3 类沙尘期间的华北地区地面站点数据的相对湿度数据进行统计,发现东北传输型沙尘期间,无论是中位数还是平均数,华北地区的平均相对湿度比另外两类沙尘高 4%~5%(图 7a),其值为 59.7%(表 3),尤其在沿海城市,相对湿度高达 70%(图 4g)。通过对 3 类沙尘期间华北地区 PM_{2.5}和相对湿度的日平均数据的线性相关分析,发现东北传输型沙尘期间相对湿度与 PM_{2.5}质量浓度有明显的正相

关(R²=0.58,图 7d),且相关系数明显高于其他两类。高相对湿度促进颗粒物的吸湿,为颗粒物表面的二次生成提供了有利条件^[41],从而促进颗粒物的非均相反应,这可能是造成华北地区 PM_{2.5}质量浓度高的原因之一^[42,43]。该类沙尘期间,SO₂的高值分布和东向扩散型沙尘期间的分布类似,但是华北地区 CO 和 NO₂在此期间污染程度比前两类沙尘事件都严重(图 5g—h),表明较高的污染前体物的环境背景。相对于前两类沙尘,东北传输型沙尘期间华北地区地面水平风速小(图 4i),不利于污染物扩散,且低空为下沉运动(图 5c 和 5f),有利于污染物下沉堆积,共同导致华北地区污染较严重。

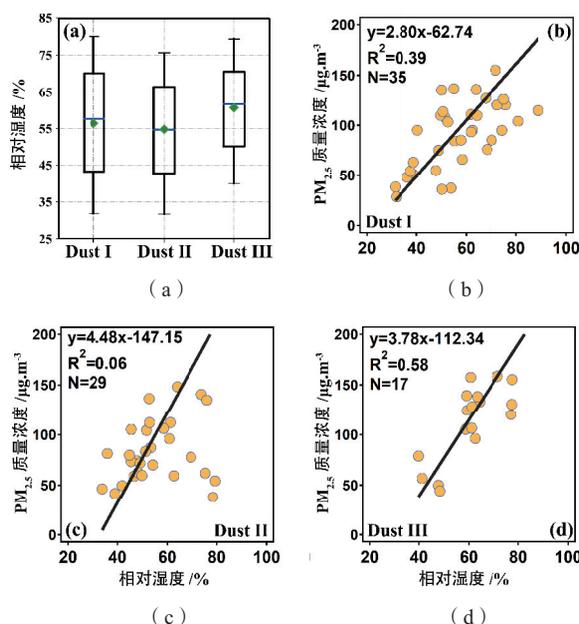


图7 沙尘期间华北地区的相对湿度及其与对应沙尘类型期间华北地区日平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度的散点图

Fig.7 Relative humidity during three types of dust in North China and scatter plot of relationship between relative humidity and mass concentration of daily average $PM_{2.5}$ during corresponding type of dust in North China

3 结论与展望

通过对2015—2018年秋冬季沙尘过程筛选统计得到31个秋冬季沙尘个例,其中有24个发生于采暖期(11月—次年2月),对其中18个影响中国华北地区的典型沙尘个例进行分析,获得以下主要结论:

(1)根据沙尘的传输路径,将其分成东向扩散型、东南传输型和东北传输型3类,分别占统计数量的38.9%、38.9%和22.2%。沙尘的传输路径与500和850 hPa高空风密切相关。对于东向扩散型,500 hPa中纬度地区主要受西风气流控制,850 hPa主要受西北气流控制;对于东南传输型,500和850 hPa中高纬度均处于西北气流的控制之下;对于东北传输型,500和850 hPa中高纬度地区主要受西风气流控制。

(2)东向扩散型促进了华北地区颗粒物质量浓度的升高, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度分别为156.4和 $86.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。而因为东南传输型沙尘过程期间华北地区较大的风速使沙尘气团在传输过程中速度快,华北地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 低于另两类沙尘,平均质量浓度分别为124.9和 $78.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(3)东北传输型沙尘在总体传输路径上对华北

地区影响不大,但受当地污染物的排放以及地面低风速、下沉气流等气象因素影响,该类沙尘期间华北地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度在3类沙尘中最高,达到171.9和 $117.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;相对湿度平均浓度为59.7%,比另两类高4%~5%,可能会促进二次颗粒物的非均相生成从而加重污染。

近年来秋冬季沙尘诱发的重污染事件引起了关注,这些污染气团不仅对人体健康和区域环境产生影响,倘若传输入海更会造成对海洋生态系统的影响从而导致更大尺度的气候效应。通过本次研究系统地筛选和统计了秋冬季沙尘的传输特征,探讨了沙尘不同传输路径对华北地区空气污染的影响。但沙尘的传输在不同的高度可能也有所不同,垂直高度上的相对湿度变化、温度变化等要素都可能对华北地区空气质量造成更复杂的影响,有待进一步分析。本文探讨不同传输路径的沙尘对华北地区空气质量的影响有利于进一步探讨秋冬季沙尘对中国华北及附近海大气环境、生态的影响,并为秋冬季沙尘污染的防治提供一定的理论依据。

致谢:感谢日本九州大学 Itsushi Uno 教授、Atsushi

SHIMIZU 博士,以及日本九州大学国立环境研究所公布的基于东亚地区大气化学预报模式 (Chemical Weather Forecasting System, CFORS) 的沙尘轨迹图 (<https://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/newCFORS/DUST-all-img/>)。感谢中国海洋大学高山红教授和杭州如雷科技有限公司王晓磊先生为气象数据 (<http://222.195.136.24/>) 和空气质量数据 (<https://quotsoft.net/air/>) 的下载提供便利。

参考文献:

- [1] ZHANG X Y, ARIMOTO R, AN Z S. Glacial and interglacial patterns for Asian dust transport [J]. *Quat Sci Rev*, 1999, 18(6): 811-819.
- [2] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 29-40.
- [3] FUZZI S, BALTENSBERGER U, CARSLAW K, et al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs [J]. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(14): 8217-8299.
- [4] ZHANG K, GAO H W. The characteristics of Asian dust storms during 2000 - 2002: from the source to the sea [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41(39): 9136-9145.
- [5] SHI J H, GAO H W, ZHANG J, et al. Examination of causative link between a spring bloom and dry/wet deposition of Asian dust in the Yellow Sea, China [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2012, 117(D17): D17304.
- [6] LI W S, WANG W C, ZHOU Y, et al. Occurrence and reverse transport of severe dust storms associated with synoptic weather in East Asia [J]. *Atmosphere*, 2018, 10(1): 4.
- [7] 任霄玉, 任国玉, 魏明建. 我国北方 TOMS 气溶胶光学厚度与地面沙尘天气频数的比较 [J]. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 874-881.
- [8] TAKEMI T, SEINO N. Dust storms and cyclone tracks over the arid regions in east Asia in spring [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2005, 110(D18): D18S11.
- [9] 赵留元, 李子璇, 吕沛诚, 等. 基于 SPAMS 的兰州市 2018 年冬季沙尘天气过程细颗粒物污染特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 388-400.
- [10] 熊桂洪, 陈思, 蒋昌潭, 等. 重庆市冬季一次沙尘天气过程综合观测 [J]. *资源节约与环保*, 2019, (9): 9-11.
- [11] 杨丽蓉, 尹伟康, 王建英, 等. 银川市冬季一次沙尘污染过程分析 [J]. *环境保护科学*, 2019, 45(2): 74-79.
- [12] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 513-521.
- [13] 郭宇宏, 李新琪, 王永嘉, 等. 2002 年冬季新疆塔城地区沙尘暴成因及对策 [J]. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 261-265.
- [14] ZHAO L Y, WANG W C, HAO T Y, et al. The autumn haze-fog episode enhanced by the transport of dust aerosols in the Tianjin area [J]. *Atmos Environ*, 2020, 237: 117669.
- [15] XUE Y G, HUANG Y, HO S S H, et al. Origin and transformation of ambient volatile organic compounds during a dust-to-haze episode in northwest China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20(9): 5425-5436.
- [16] YANG Y Q, HOU Q, ZHOU C H, et al. Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(1): 25-33.
- [17] 郭俊, 银燕, 王咏薇, 等. 东亚沙尘分布、源汇及输送特征的模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 801-812.
- [18] WANG Z, LIU C, XIE Z Q, et al. Elevated dust layers inhibit dissipation of heavy anthropogenic surface air pollution [J]. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20(23): 14917-14932.
- [19] 吴丽萍, 李丽明, 张向炎, 等. 2018 年冬季淄博市一次沙尘天气颗粒物污染特征研究 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(1): 92-102.
- [20] 马艳, 郭丽娜, 黄容. 青岛一次沙尘污染事件的气象条件特征 [J]. *干旱气象*, 2014, 32(5): 773-780.
- [21] YANG S S, WANG Z L, HUANG X, et al. Meteorological feedback and eco-environmental impact of Asian dust: a simulation study [J]. *Atmos Environ*, 2021, 253: 118350.
- [22] LIU T Y, ABBATT J P D. Oxidation of sulfur dioxide by nitrogen dioxide accelerated at the interface of deliquesced aerosol particles [J]. *Nat Chem*, 2021, 13(12): 1173-1177.
- [23] WANG W G, LIU M Y, WANG T T, et al. Sulfate formation is dominated by manganese-catalyzed oxidation of SO₂ on aerosol surfaces during haze events [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1993.
- [24] LI J, ZHANG Y L, CAO F, et al. Stable sulfur isotopes revealed a major role of transition-metal ion-catalyzed SO₂ oxidation in haze episodes [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(5): 2626-2634.
- [25] MURRAY F W. On the computation of saturation vapor

- pressure[J]. *J Appl Meteor*, 1967, 6(1): 203-204.
- [26] 朱文刚, 李昌义, 车军辉. 基于统一高度 Cressman 方法的地面 2 m 气温客观分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 138-148.
- [27] AN X D, SHENG L F, LIU Q, et al. The combined effect of two westerly jet waveguides on heavy haze in the North China Plain in November and December 2015[J]. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20(8): 4667-4680.
- [28] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. *气候与环境研究*, 2004(2): 261-277.
- [29] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(1): 91-99.
- [30] UNO I, CARMICHAEL G R, STREETS D G, et al. Regional chemical weather forecasting system CFORS: model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2003, 108(D23): 8668.
- [31] UNO I, SATAKE S, CARMICHAEL G R, et al. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2004, 109(D19): D19S24.
- [32] YANG B, BRÄUNING A, ZHANG Z Y, et al. Dust storm frequency and its relation to climate changes in Northern China during the past 1000 years [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41(40): 9288-9299.
- [33] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. *中国沙漠*, 2005(5): 675-681.
- [34] 周成, 王宁, 杨学斌, 等. 德州一次沙尘天气过程成因及气溶胶粒子的输送路径分析[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(3): 127-135.
- [35] 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 2010 年辽宁一次沙尘天气过程的气象因素及污染特征[J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(5): 27-31.
- [36] 云静波, 姜学恭, 孟雪峰, 等. 冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程典型个例对比分析[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1848-1857.
- [37] XU X K, LEVY J K, LIN Z H, et al. An investigation of sand-dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data [J]. *Glob Planet Chang*, 2006, 52(1/2/3/4): 182-196.
- [38] 王金艳, 王式功, 马艳, 等. 我国北方春季沙尘暴与气候因子之关系[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 296-300.
- [39] 李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述 [J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 76-92.
- [40] 王小玲, 翟盘茂. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系 [J]. *气象学报*, 2004, 62(1): 96-103.
- [41] CHENG Y, HE K B, DU Z Y, et al. Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing [J]. *Environ Pollut*, 2015, 197: 68-75.
- [42] NIE W, DING A J, WANG T, et al. Polluted dust promotes new particle formation and growth [J]. *Sci Rep*, 2014, 4(1): 6634.
- [43] TANG M J, CZICZO D J, GRASSIAN V H. Interactions of water with mineral dust aerosol: water adsorption, hygroscopicity, cloud condensation, and ice nucleation [J]. *Chem Rev*, 2016, 116(7): 4205-4259.