

乌鲁木齐市 PM_{2.5} 浓度与气象条件耦合分析*孙蓉花^{1,2} 陈学刚^{1,2} 魏 疆^{3#} 韩文堂^{1,2}

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054;

2.新疆干旱区湖泊与资源重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830054;

3.新疆大学资源与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 为探究气象条件对污染物浓度的影响,于2013年10月至2014年10月在乌鲁木齐市主城区采集PM_{2.5}样品,并选取同期气象站监测的气象数据进行分析。结果表明:(1)乌鲁木齐市采暖期PM_{2.5}日均值平均达到84.70 μg/m³,超出了《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中24 h平均二级限值(75 μg/m³),是非采暖期(20.66 μg/m³)的4倍多。(2)采暖期风速、相对湿度、气温、水汽压与PM_{2.5}日均值极显著相关,非采暖期相对湿度与PM_{2.5}日均值极显著相关。

关键词 乌鲁木齐 PM_{2.5} 气象要素 相关性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.12.014

Coupling analysis of PM_{2.5} concentrations and meteorological conditions in Urumqi SUN Ronghua^{1,2}, CHEN Xue-gang^{1,2}, WEI Jiang³, HAN Wentung^{1,2}. (1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang 830054; 2. Key Laboratory of Arid Region Lake Environment and Resource of Xinjiang, Urumqi Xinjiang 830054; 3. School of Resource & Environment, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046)

Abstract: In order to explore the effect of meteorological conditions on the pollutants concentration, PM_{2.5} samples were collected in Urumqi urban area during October 2013 to October 2014, meteorological data were selected from weather stations monitoring on the same time for investigation. Results showed that: (1) the daily average concentrations of PM_{2.5} reached 84.70 μg/m³ during the heating period in Urumqi, which exceeded the 24-hour average second-level limit (75 μg/m³) of "Environmental air quality standard" (GB 3095-2012), and it was more than four times during the non-heating period (20.66 μg/m³). (2) The wind speed, relative humidity, temperature, vapor pressure and the daily average concentrations of PM_{2.5} existed significant relationship during the heating period, relative humidity and PM_{2.5} concentrations were related significantly in non-heating period.

Keywords: Urumqi; PM_{2.5}; meteorological elements; correlation

乌鲁木齐市位于天山北麓准噶尔盆地南缘的乌鲁木齐河谷中,三面环山,地势呈东南高西北低缓慢坡降之势,属河谷型城市^[1],与平原城市相比污染物容量小,加之冬季采暖和气象条件的制约,造成了严重的大气污染问题^[2-6]。

2011年,世界卫生组织对全球1 100个城市的环境质量进行排名,乌鲁木齐市位于1 052位^[7]。近几年,雾霾天气越来越多。究其原因除了与污染物排放量、地形地势有关外,更多是受到气象条件的制约,在不同的气象条件下,同一污染源排放所造成的地面污染物浓度可相差几十倍乃至几百倍^[8]。研究发现:乌鲁木齐市大气污染物浓度与逆温、风速、温度、气压、相对湿度等气象要素间存在显著相关性^[9-10];乌鲁木齐市冬季逆温多发,平均月发生频率

达到92%^[11],逆温严重抑制了污染物的垂直扩散;乌鲁木齐市采暖期风速较小,静风(≤0.5 m/s)频率高^[12],年平均风速1.84~1.97 m/s,静风和小风(0.5~1.5 m/s)的频率为27.0%~30.6%,这严重制约了污染物水平扩散的能力^[13-14];乌鲁木齐市冬季地面常有稳定的积雪,雪面蒸发及降雪天气增加了水汽,相对湿度增高,促进了大雾天气的形成,冬季采暖期雾天占全年总大雾天数的98%^[15],大雾是采暖期重污染天气形成的重要因素之一^[16-18]。

为进一步了解和揭示造成乌鲁木齐市大气污染的主要颗粒物PM_{2.5}浓度和气象要素间的关系,通过采集获取2013年10月至2014年10月乌鲁木齐市PM_{2.5}的逐时浓度数据及选取同期的逐时气象数据展开研究。

第一作者:孙蓉花,女,1992年生,硕士研究生,研究方向为城市地理与规划。*通讯作者。

*国家自然科学基金资助项目(No.41161074、No.41161029、No.41461033)。

1 样品采集与处理

1.1 样品采集

PM_{2.5} 样品的采集:采用 Thermo Scientific TEOM 1405-DF 系列颗粒物监测仪采集,该仪器有两套滤膜测量动态系统和两套锥形原件微量振荡天平传感器,每 6 min 更新一次 1、24 h 平均值。

气象数据采用了同期的国家基准气象站乌鲁木齐市气象站的逐日地面气象数据(风速、风向、气压、气温、水汽压和相对湿度)。

1.2 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 软件进行了数据统计与分析,PM_{2.5} 日均值通过 24 h PM_{2.5} 算数均值得到;采用 Grapher 8.0 软件做了风速、风频图和 PM_{2.5} 小时浓度变化图。依据乌鲁木齐市的气象特征和供暖时间,划分了采暖期(2013 年 10 月 10 日至 2014 年 4 月 10 日)和非采暖期(2014 年 4 月 11 日至 2014 年 10 月 9 日)。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度变化特征

由图 1(a)可见,乌鲁木齐市采暖期 PM_{2.5} 日均值平均达到 84.70 μg/m³,严重超出了《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中 24 h 平均二级限值(75 μg/m³),超标天数总计达到了 92 d,11 月超标天数最多,达到了 22 d,12 月次之,为 20 d,2、3 月超标天数较少,分别为 8、9 d。PM_{2.5} 日均值最高、次高值出现在 11 月 16 日和 1 月 4 日,分别高达 263.46、244.13 μg/m³,这两天大气层结稳定,日均气温分别

为 -3.3、-12.4 ℃,相对湿度分别为 88.54%、78.88%,平均风速分别为 1.21、1.28 m/s。2 月 1 日、3 月 26 日、11 月 21 日和 11 月 22 日 PM_{2.5} 日均值较低,分别为 14.13、14.13、14.10、16.00 μg/m³,气象资显示这几天均有不同程度的降水,降水量分别为 3.0、13.0、1.0、0.5 mm。

由图 1(b)可见,非采暖期 PM_{2.5} 日均值较低,平均为 20.66 μg/m³,7 月最低,月均值为 19.44 μg/m³,PM_{2.5} 日均值最低出现在 4 月 14 日,为 8.32 μg/m³,气象资料显示当天有降雨,降雨量为 15.0 mm,平均风速约为 3.8 m/s;PM_{2.5} 日均值最高、次高值分别出现在 7 月 20 日和 4 月 25 日,分别是 84.33、64.17 μg/m³,这两天气象条件相对较稳定,平均气温分别为 25.6、7.9 ℃,相对湿度分别约为 25%、40%,平均风速分别约为 2.6、1.3 m/s,夏季持续的高温 and 风速相对较小的天气,PM_{2.5} 反而较高,是由于夏季光化学反应强烈,促进了污染物的二次生成。

2.2 气象要素与 PM_{2.5} 浓度的相关分析

由表 1 可见,采暖期,风速与 PM_{2.5} 日均值的相关系数最高,其次是相对湿度,接下来是气温和水汽压,气压与 PM_{2.5} 日均值的相关性不显著。非采暖期,相对湿度与 PM_{2.5} 日均值呈极显著负相关,其余气象要素与 PM_{2.5} 日均值的相关性不显著。

2.3 风速、风向对 PM_{2.5} 浓度的影响

由图 2 可见,采暖期,风速 < 2.5 m/s 时,随着风速的增强,PM_{2.5} 日均值逐步降低;风速为 2.5~3.0 m/s 时,随着风速的增强,PM_{2.5} 日均值迅速降低;风速 > 3.0 m/s 时,随着风速的增大,PM_{2.5} 日均值缓慢

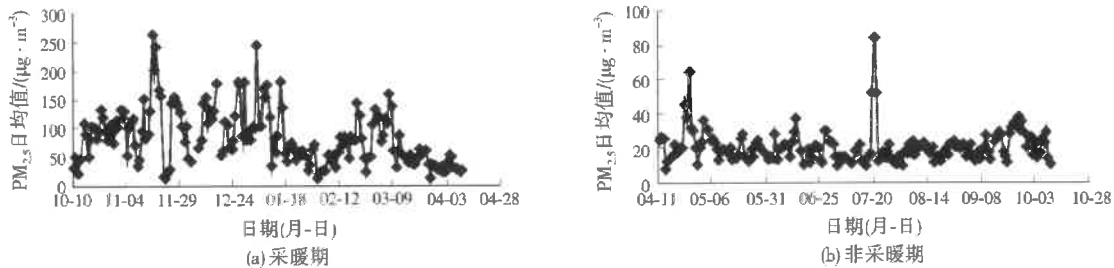


图 1 PM_{2.5} 日均值的时间演变
Fig.1 Temporal evolution of 24 h-average PM_{2.5} concentrations

表 1 PM_{2.5} 日均值与气象要素的相关性¹⁾
Table 1 PM_{2.5} concentration correlate with various meteorological elements

时间	风速	气压	相对湿度	气温	水汽压
采暖期	-0.194 * *	0.970	0.160 * *	-0.139 * *	-0.125 * *
非采暖期	-0.109	0.830	-0.233 * *	-0.505	-0.031

注:¹⁾ * * 表示在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上极显著相关; * 表示在 $p < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

攀升。这符合气流的运动快慢直接影响着污染物的扩散和稀释的自然规律^[19],但是采暖期平均风速小,仅为 1.74 m/s ,且受静风频率(4.3%)的影响,污染物不能被及时地扩散、输送,这是造成采暖期 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高的重要外部条件。非采暖期,风速 $< 4.0 \text{ m/s}$ 时,随着风速的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值呈现先增长后缓慢降低又升高的趋势;风速为 $4.0 \sim 4.5 \text{ m/s}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值随着风速的增加而急速降低;风速 $> 4.5 \text{ m/s}$ 时,随着风速的增强, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值迅速升高。非采暖期风速较大,平均风速是 2.50 m/s ,

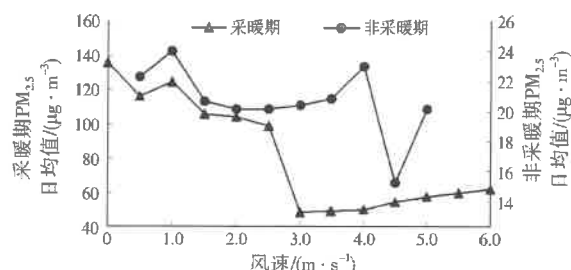


图2 风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的影响

Fig.2 24 h-average $\text{PM}_{2.5}$ concentrations effected by wind

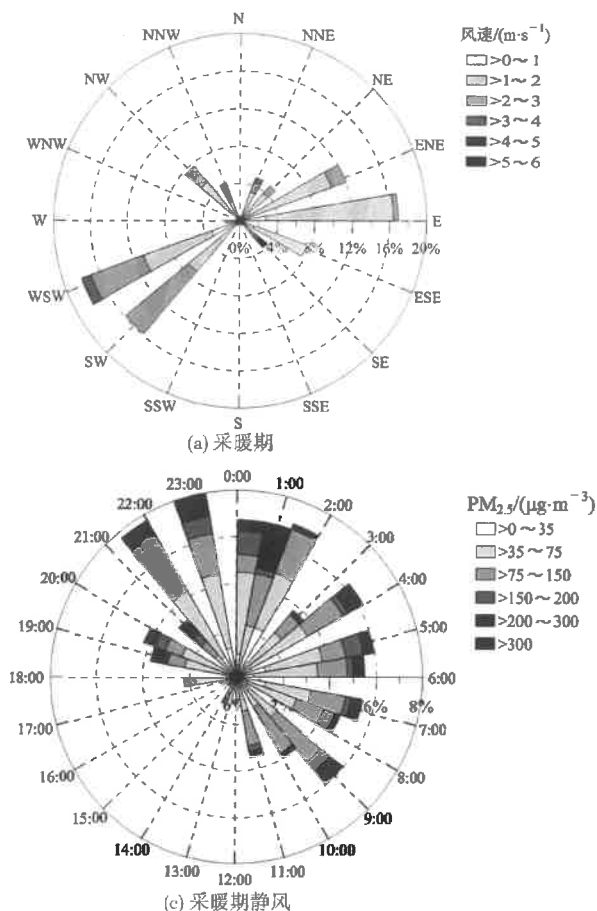


图3 风速、风频及 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度分布

Fig.3 Wind speed, wind frequency diagram and the concentration distribution of hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration

无静风频率,对污染的扩散效果较好。

采暖期主导风向为西南风和偏东风(见图3(a)),然而在乌鲁木齐市西南方向、偏南方向和东南方向,分别坐落着一个水泥厂和两个发电厂,并且西南方向城区外是大片的采石场,由此产生的污染物严重影响市内的空气质量状况^[20]。非采暖期主导风向为西北风(见图3(b)),对污染的扩散效果良好。

由图3(c)可见,采暖期静风状态下,夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度明显高于白天,尤其是 $22:00$ 至次日 $4:00$, $> 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的出现频率达到了 3.0% ; $> 150 \sim 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 出现在全天所有时段,所占比例较大; $> 75 \sim 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 主要出现在 $22:00$ 至次日 $09:00$,达到了 3.0% ; $0 \sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,空气质量为优良级别,虽然全天所有时段各有分布,但所占比例较小,仅为 1.8% 。这主要是在静风状态下,扩散能力差、加之夜间逆温增强所导致^[21]。

由图3(d)可见,采暖期非静风状态下, $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度较静风状态下明显下降, $> 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在全天大多数时间点出现,但所占比例很小,仅为

0.3%; $>75 \sim 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在全天各时间段都有分布, 所占比例较大, 14:00—18:00 出现的几率最大; $0 \sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在全天各时间点都有分布, 且出现几率显著高于静风状态时, 说明非静风状态对 $\text{PM}_{2.5}$ 的输送与扩散有极好的效果。

2.4 气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

由图 4 可见, 日均气温在 0°C 以上的超标天数占总超标天数的 31%, 日均气温在 -5°C 以下的超标天数占总超标天数的 56%。一方面是由于随着气温降低, 逆温层厚度增大、强度增强, 抑制了污染物的垂直扩散, 乌鲁木齐市采暖期逆温出现频率高, 冬季 (11 月至次年 3 月) 逆温出现频率高达 92%^[11,21]。采暖期污染物大量排放, 逆温持续稳定, 风速小, 使近地层的大气污染物难以扩散, 污染物不断积累, 是造成乌鲁木齐市采暖期 $\text{PM}_{2.5}$ 高、超标严重的主要原因。这与我国冬季逆温日数越多, 超标污染日越多, 逆温强度越大, 污染越重的规律相似^[22-24]。另一方面, 气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响, 事实上是由排放量引起的, 因为在冬季随着气温的骤降, 夜晚时间增长, 取暖和供电所需的耗能量增加, 大气污染物排放量增加。而且, 随着气温的降低, 交通对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率增高^[25], 因为在极其寒冷的天气里, 汽车冷启动、空运转、预热和短距离的车辆使用量增加, 进一步研究也表明: 冬季交通对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率高达 30%, 同时当气温从 23°C 降至 -20°C , 车辆的冷启动排放的颗粒物会增加一个数量级^[26]。这与 ELMINIR^[27] 对开罗、埃及和 DAWSON 等^[28] 对美国东部、阿拉斯加州的研究结果一致。

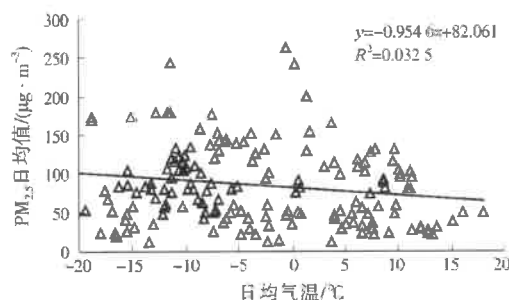


图 4 日均气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的线性关系

Fig.4 Correlation of temperature and 24 h-average $\text{PM}_{2.5}$ concentration with the trend line

2.5 水汽压和相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

水汽压和相对湿度都是表示大气湿度的指标。由图 5 和表 1 可见, 63% 的超标点数发生在水汽压 $\leq 4 \text{ hPa}$ 的条件下, 并且 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值与水汽压呈线性相关。

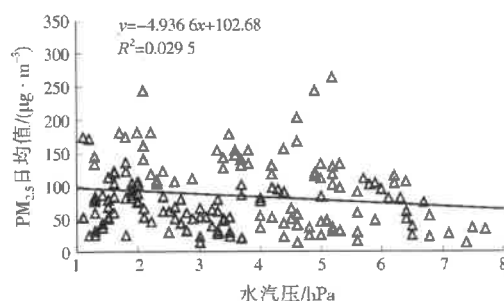
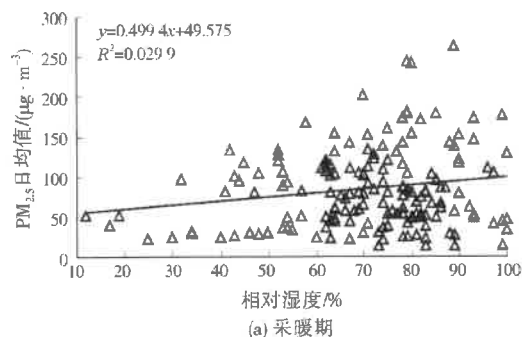


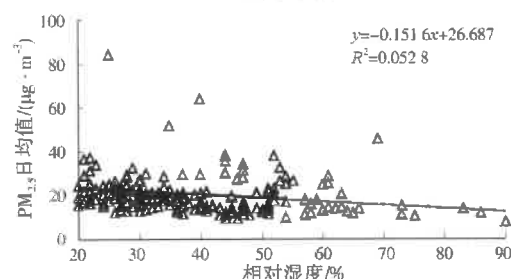
图 5 水汽压与 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的线性关系

Fig.5 Correlation of water-vapor pressure and 24 h-average $\text{PM}_{2.5}$ concentration with the trend line

由图 6 和表 1 可见, 采暖期, $\text{PM}_{2.5}$ 与相对湿度呈极显著正相关性, 且当相对湿度 $\geq 70\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值超标天数占总超标天数的 64%; 非采暖期, 相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈极显著负相关性, 且当相对湿度 $\geq 70\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值达到最低值。



(a) 采暖期



(b) 非采暖期

图 6 相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的线性关系

Fig.6 Correlation of relative humidity with 24 h-average $\text{PM}_{2.5}$ concentration with the trend line

采暖期, 随着相对湿度的增大, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值升高, 相对湿度 $\geq 70\%$ 时的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值超标天数远高于相对湿度 $\leq 70\%$ 时, 是因为空气中的气态水通过分子表面的张力作用吸附污染物质^[29], 相对湿度高, $\text{PM}_{2.5}$ 容易被吸湿, 这一方面促进了颗粒物化学组分的转化, 生成新的细颗粒物悬浮空中, 增加 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 这与空气相对湿度增加有助于大气中 SO_2 转变为 SO_4^{2-} 的论断相一致^[30]; 另一方面, 污染颗粒物通过吸湿、膨胀和碰并作用, 粒径增大, 并在空中滞留 (在不发生沉降时), 加之采暖期稳定的大

气层结抑制了污染物的扩散与稀释,使得 PM_{2.5} 居高不下。非采暖期,相对湿度增大,PM_{2.5} 吸收水蒸气,膨胀、凝结,使其体积和密度增加,沉降速度加快^[31],PM_{2.5} 锐减,这与前人对阿普利亚(意大利城市)的研究结果相符^[32]。

3 结 论

(1) 乌鲁木齐市采暖期 PM_{2.5} 日均值平均达到 84.70 μg/m³,超出了 GB 3095—2012 中 24 h 平均二级限值(75 μg/m³),是非采暖期(20.66 μg/m³)的 4 倍多。

(2) 采暖期风速、相对湿度、气温、水汽压与 PM_{2.5} 日均值极显著相关,非采暖期相对湿度与 PM_{2.5} 日均值极显著相关。

参考文献:

- [1] 宋和平,沈军,骆志勇,等.乌鲁木齐市活断层探测与地震危险性评价[M].北京:地震出版社,2009.
- [2] 如克亚木·牙生.乌鲁木齐市人口经济以及环境污染相互影响研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [3] 陈学刚,魏疆,任泉,等.城市扩展下大气污染物浓度的空间格局变化趋势研究——以乌鲁木齐市为例[J].生态环境学报,2013,22(6):1015-1019.
- [4] WEI B G, JIANG F Q, LI X M, et al. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China[J]. Microchemical Journal, 2009, 93(2):147-152.
- [5] 彭林,游燕,朱坦,等.乌鲁木齐空气颗粒物 PAHs 碳同位素组成及来源解析[J].中国环境科学,2006,26(5):542-545.
- [6] 李新琪,海热提·涂尔逊.乌鲁木齐市大气环境承载力及污染防治对策研究[J].干旱区资源与环境,2001,15(3):17-24.
- [7] 甄翔.世卫首发全球城市空气污染报告[EB/OL].(2011-09-28)[2016-10-01].http://energy.people.com.cn/GB/15773431.html.
- [8] 吴兑,邓雪娇.环境气象学与特种气象预报[M].北京:气象出版社,2001.
- [9] 王涛.乌鲁木齐城市群大气质量及其与气象条件的相关性分析[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [10] 魏疆,王国华,任泉,等.乌鲁木齐市大气污染物浓度计量模型研究[J].干旱区研究,2011,28(5):896-900.
- [11] 郑玉萍,李景林,刘增强,等.乌鲁木齐冬季大雾与低空逆温的关系[J].沙漠与绿洲气象,2007,1(3).
- [12] 赵克明,李霞,杨静.乌鲁木齐最大混合层厚度变化的环境响应[J].干旱区研究,2011,28(3):509-513.
- [13] 李军,吕爱华,李建刚,等.“十一五”时期乌鲁木齐市大气污染特征及影响因素分析[J].中国环境监测,2014,30(2):14-19.
- [14] 刘增强,郑玉萍,李景林,等.乌鲁木齐市低空大气逆温特征分析[J].干旱区地理,2007,30(3):51-56.
- [15] 郑玉萍,李景林.乌鲁木齐近 31 年大雾天气气候特征分析[J].气象,2008,34(8):22-28.
- [16] 黄忠.乌鲁木齐市重污染天气与气象因素变化的影响分析[J].干旱环境监测,2005,19(3):154-157.
- [17] 李霞.乌鲁木齐气象要素对大气气溶胶光学特性的影响[J].干旱区研究,2006,23(3):484-488.
- [18] 李景林,郑玉萍,刘增强.乌鲁木齐市低空温度层结与采暖期大气污染的关系[J].干旱区地理,2007,30(4):519-525.
- [19] 伍荣生.大气动力学[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [20] 吴彦,王健,刘晖,等.乌鲁木齐大气污染物的空间分布及地面风场效应[J].中国沙漠,2008,28(5):986-991.
- [21] 金莉莉.乌鲁木齐市大气边界层特征研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [22] 付桂琴,张杏敏,尤凤春,等.气象条件对石家庄 PM_{2.5} 浓度的影响分析[J].干旱气象,2016,34(2):349-355.
- [23] 程涛.基于小波分析的上海市环境空气质量变化及与气象关系研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [24] 秦泉.冬季乌鲁木齐逆温时空变化特征及其大气环境效应[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [25] 文波.宁波市大气可吸入颗粒物 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的源解析研究[J].环境污染与防治,2011,33(9):66-69.
- [26] TRAN H N Q, MÖLDERS N. Investigations on meteorological conditions for elevated PM_{2.5} in Fairbanks, Alaska[J]. Atmospheric Research, 2011, 99(1):39-49.
- [27] ELMINIR H K. Dependence of urban air pollutants on meteorology[J]. Science of the Total Environment, 2005, 350(1/2/3):225-237.
- [28] DAWSON J P, ADAMS P J, PANDIS S N. Sensitivity of PM_{2.5} to climate in the Eastern U.S.: a modeling case study[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2007, 7(3):4295-4309.
- [29] 李小平,谷新波,司瑞冰.呼和浩特市大气污染物浓度与气象要素的灰色关联分析[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2009,38(1):107-111.
- [30] 魏疆.乌鲁木齐市硫酸盐化速率关键影响因子分析[J].中国环境监测,2012,28(5):16-19.
- [31] DELFINO R J, BRUMMEL S, WU J, et al. The relationship of respiratory and cardiovascular hospital admissions to the southern California wildfires of 2003[J]. Occupational & Environmental Medicine, 2009, 66(3):189-197.
- [32] DONATEO A, CONTINI D, BELOSI F. Real time measurements of PM_{2.5} concentrations and vertical turbulent fluxes using an optical detector[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(7):1346-1360.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2016-11-22)

(上接第 1352 页)

SO₂ 和 NO₂ 在大气中转化成硫酸盐和硝酸盐的反应较为复杂,往往涉及气相反应、液相反应、非均相反应等多个途径,并且存在气粒平衡关系。本研究的计算方法仅考虑气相反应途径,因此对 SO₂ 和 NO₂ 的转化系数是一种近似的估算,适用于短时间(4 h)和小范围(50 km 内)大气中 SO₂ 和 NO₂ 的转化。

参考文献:

- [1] 赵雅丽.我国大气污染防治现状分析[J].中国市场,2016,8(34):225,227.
- [2] 王跃思,姚利,刘子锐,等.京津冀大气霾污染及控制策略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):353-363.
- [3] 唐孝炎,张远航,邵敏,等.大气环境化学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2006.
- [4] 叶兴南,陈建民.大气二次细颗粒物形成机理的前沿研究[J].化学进展,2009,21(增刊1):288-296.
- [5] ZHENG J, HU M, PENG J, et al. Spatial distributions and chemical properties of PM_{2.5} based on 21 field campaigns at 17 sites in China[J]. Chemosphere, 2016, 159:480-487.
- [6] HJ/T 2.2—2008,环境影响评价技术导则 大气环境[S].
- [7] SEINFELD J H, PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [8] ENVIRON. User's guide for the comprehensive air quality model with extensions (CAMx) (Version 6.1)[R]. California: ENVIRON International Corporation, 2009.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2017-08-21)