

蒋燕,熊好琴,鲁绍伟,等.2015年北京采暖季城市森林内外SO₂浓度的时空变化特征[J].环境科学研究,2017,30(11):1689-1696.
JIANG Yan, XIONG Haoqin, LU Shaowei, et al. Spatial-temporal variation of SO₂ concentration in Beijing's urban forest in heating season 2015 [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(11):1689-1696.

2015年北京采暖季城市森林内外SO₂浓度的时空变化特征

蒋燕^{1,2},熊好琴¹,鲁绍伟^{2*},陈波²,李少宁²

1.西南林业大学环境科学与工程学院,云南昆明 650224

2.北京市农林科学院林业果树研究院,北京燕山森林生态系统定位观测站,北京林果业生态环境功能提升协同创新中心,北京100093

摘要:为探讨采暖季城市森林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 动态变化及差异性,基于西山国家森林公园林内空气质量监测站数据,结合北京市环境保护监测中心植物园监测站的实时数据,分析2015年采暖季城市森林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化和影响因素。结果表明:林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 日变化基本呈双峰双谷型,在09:00—11:00和20:00—22:00左右达到高峰;采样期间 $\rho(\text{SO}_2)$ 月变化呈不显著“V”型,最高值出现在1月,林内外分别为 (25.8 ± 9.2) 和 (31.7 ± 23.4) $\mu\text{g}/\text{m}^3$,最低值出现在11月,林内外分别为 (19.0 ± 5.2) 和 (13.0 ± 11.2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 在1—3月低于林外,11—12月高于林外,林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化较林外平缓;气象条件对采暖季城市森林 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化有重要影响:降水对 $\rho(\text{SO}_2)$ 消减效应明显,大风有驱散SO₂的作用,同时受风向影响; $\rho(\text{SO}_2)$ 和温度关系不显著($P=0.05$, $R<0.40$),但和空气相对湿度线性关系显著($\alpha=0.05$, $\text{Sig}=0.00$)。林内受气象因素影响低于林外。研究显示,城市森林对气态污染物具有一定的缓冲、抵抗和吸收能力,因此应重视发展城市森林生态系统,充分发挥其生态效益,以提高城市大气环境质量。

关键词:采暖季;西山国家森林公园;SO₂;城市森林

中图分类号: X511

文章编号: 1001-6929(2017)11-1689-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.03.08

Spatial-Temporal Variation of SO₂ Concentration in Beijing's Urban Forest in Heating Season, 2015

JIANG Yan^{1,2}, XIONG Haoqin¹, LU Shaowei^{2*}, CHEN Bo², LI Shaoning²

1.Environmental Science and Engineering College, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2.Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-Environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Yanshan Forest Ecosystem Research Station, Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: The dynamics of air SO₂ concentrations both inside and outside forests and their effect factors in Beijing were studied in heating season in 2015, based on real-time monitoring data collected from the monitoring station of the Beijing Botanical Garden and forest air quality station of Beijing Xishan Park. The results showed that the daily variation of SO₂ concentrations both inside and outside the forest showed a 'double peak-valley' pattern, with the two peaks around 09:00-11:00 and 20:00-22:00. Monthly variation of SO₂ concentrations showed a trend of inconspicuous 'V' shape. SO₂ concentrations were the highest in January, being (25.8 ± 9.2) and (31.7 ± 23.4) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inside and outside the forest, respectively, and were the lowest in November, being (19.0 ± 5.2) and (13.0 ± 11.2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Precipitation had an obvious effect to reduce SO₂, because wind dispels SO₂ depending on the wind direction. SO₂ concentrations had a significant relationship with air humidity ($P<0.01$), but not with temperature. SO₂ concentrations were lower inside the forest than outside the forest from January to March, but this was reversed from November to December. SO₂ concentrations

inside the forest showed weaker fluctuations than outside the forest due to being less influenced by meteorological factors. Our findings indicated that urban forest may buffer and absorb gaseous pollutants. Therefore, we should pay more attention to developing urban forest ecosystems and make full use of their ecological benefits to improve urban atmospheric environmental quality.

Keywords: heating season; Beijing Xishan Park; Beijing botanical garden; SO₂; urban forest

收稿日期: 2016-10-27 修订日期: 2017-07-20

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设项目(KJ CX20160301); 林业科技创新平台运行补助项目(2017-LYPJ-DW001); 北京市农林科学院科技创新团队项目(JWKST201609)

作者简介: 蒋燕(1993-),女,安徽巢湖人,2219698595@qq.com.

* 责任作者,鲁绍伟(1969-),男,河北秦皇岛人,研究员,博士,主要从事水土保持、森林生态服务功能研究, hblsw8@163.com

SO₂ 是空气中重要的气态污染物之一,不仅直接影响城市空气质量,危害动植物和人体健康,并且通过反应生成含硫酸根的气溶胶,是北京市首要污染物 PM_{2.5} 的重要成分,其反应性也影响 NO_x 的污染程度,已成为区域性大气复合污染产生的重要因子^[1-2]。ρ(SO₂) 受天气形势、污染源排放、区域传输等因子影响,再加在大气中寿命较短^[3-4],综合造成 SO₂ 污染的复杂性、综合性、区域性,逐渐成为人们关注的环境焦点。目前已有许多学者对 SO₂ 各方面进行研究,如 Kanada 等^[5] 研究了 5 个城市 SO₂ 排放量及控制措施;程念亮等^[6] 指出,北京市 2000—2014 年 ρ(SO₂) 月均值呈 U 形分布,采暖季高于非采暖季,空间分布存在差异;刘洁等^[7] 对城郊 ρ(SO₂) 进行了对比分析,发现 ρ(SO₂) 日变化在城区表现为双峰型,在 09:00 和 22:00 前后形成高值;在郊区表现为单峰型,22:00 前后出现峰值。QUAN 等^[8] 发现污染源相对稳定时,天气形势是污染物浓度的主导因素。

森林植被对控制、降低大气污染和满足居民的休闲游憩发挥着重要的功能^[9],但近几年对城市森林与 SO₂ 污染关系的研究鲜见报道。相关研究主要集中在对 SO₂ 污染现状、重污染过程、被动监测 ρ(SO₂)、不同地点 ρ(SO₂) 对比及 SO₂ 波动的影响因子等方面。虽然聂蕾等^[10] 研究了 2015 年昆明市森林对 SO₂ 的净化作用,胡舒等^[11] 也研究了 2010 年徐州市不同树种对大气 SO₂ 吸收积累能力的差异,但主要是分析南方树种净化 SO₂ 能力及季节差异,缺乏对北方采暖季城市森林与 ρ(SO₂) 的相关研究。为此,该研究基于 2015 年采暖季北京市环境保护监测中心提供的北京植物园空旷地的 SO₂ 实时监测数据,并结合北京西山国家森林公园监测站 SO₂ 数据,研究城市森林内外采暖季 ρ(SO₂) 变化特征和影响因素,重点探寻不同天气下城市森林内外 ρ(SO₂) 变化特征,证实森林对 SO₂ 的调控作用,为了解城市气态污染物在采暖季的变化特征和污染防治措施的实施提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

西山国家森林公园(下称林内)位于北京西郊小西山,以北京西山试验林场为基础,总面积 5 970 hm²,有林地面积 5 196.8 hm²,林木覆盖率 87%,属温带大陆性季风气候类型,地带性植被为暖温带落叶阔叶林。公园内动植物资源丰富,有植物共计 250 多种,分属 73 科。主要树种包括油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus*)、黄杨(*Buxus sinica*)等。林外对照点为

北京市环境监测中心设在北京植物园(下称林外)的监测点,该点位于北京植物园内的空旷地,距西山国家森林公园 2 km,并位于其东北部,周围树木相对较少,开阔平坦,主要树种包括油松(*pinus tabulaeformis*)、银杏(*ginkgo biloba*)、紫叶小檗(*berberis thunbergii*)等。

1.2 数据采集

林内 ρ(SO₂) 的实时监测数据由北京市农林科学院设置在西山国家森林公园的城市森林环境空气质量监测站提供,林外对照点 ρ(SO₂) 实时监测值由北京市环境保护监测中心提供,两个监测站的 SO₂ 监测设备均为美国赛默飞世尔科技公司(Thermo Fisher Scientific, USA)生产的脉冲荧光 SO₂ 分析仪,全自动监测,监测时间一致,频次均为 1 h/次,全天 24 h 不间断采样。林内的气象数据由西山空气质量监测站林内气象站提供,林外对照点的气象数据主要摘自中国天气网(<http://www.weather.com.cn>),主要包括气温、相对湿度、风速、降水量等气象因子。

1.3 数据选取

选取 2015 年 1 月 1 日—3 月 15 日和 2015 年 11 月 15 日—12 月 31 日的森林内外 ρ(SO₂) 数据进行分析,日变化数据选取原则为避免特殊天气条件(如大风天气、降雨以及严重污染天气等)的影响,每月选取连续晴天(3 d)取其平均值研究 ρ(SO₂) 日变化。月变化数据选取原则为每月所有数据用月均值作比较研究 ρ(SO₂) 月变化。选取北京植物园特殊天气条件(包括降雨天、大风天、高湿天和温度相对较高天气)数据研究气象因子对 ρ(SO₂) 影响。采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件对数据进行处理。

2 结果与讨论

2.1 ρ(SO₂) 的日变化特征

从图 1 可知,林内外 ρ(SO₂) 日变化规律基本呈双峰双谷型,在 09:00—11:00 和 20:00—22:00 左右出现高峰,在 02:00—4:00 和 17:00—19:00 左右出现谷值。主要原因:①SO₂ 主要受燃煤量影响^[12],上班早高峰机动车辆排放大量废气,此时居民炊事活动燃煤燃气量大增,此时段工厂和电厂燃煤量升高;②采暖季晚间 SO₂ 排放量因取暖活动加强而增加,又因大气运动较白天弱,白天居民活动所排放的 SO₂ 易累积在近地层。主要因居民在 02:00—4:00 和 17:00—19:00 各项生活和生产活动频率降低,燃煤燃气量随之降低,SO₂ 出现谷值。田伟等^[13] 指出北京秋季非采暖季 ρ(SO₂) 在 12:00—13:00 出现高峰,滞后

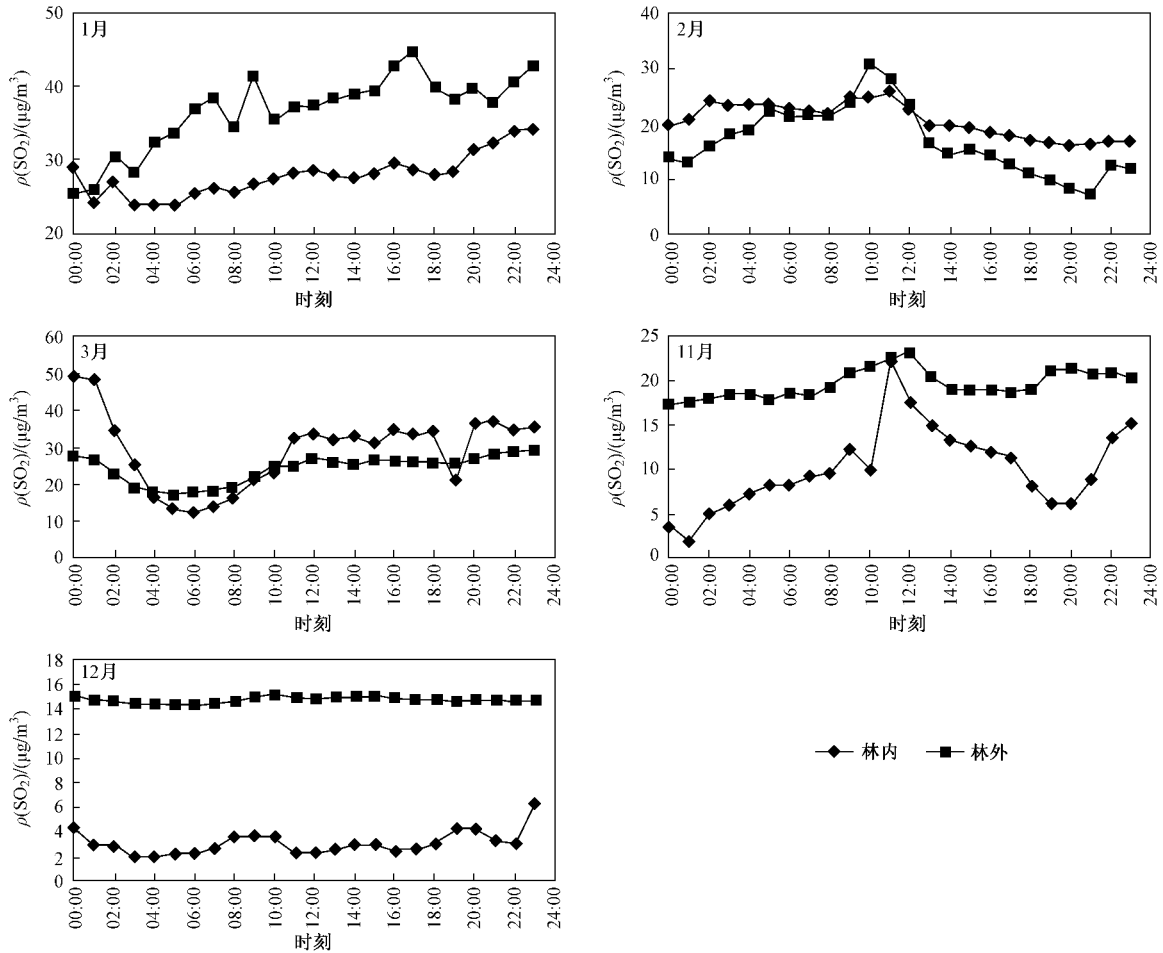


图 1 林内外采暖季不同月份 ρ(SO₂) 日变化特征

Fig. 1 The daily variation of SO₂ concentration during heating season in two study sites

于该研究高峰时段,原因可能是采暖季燃煤量大;但刘洁等^[7]却指出北京城区冬季 ρ(SO₂) 高峰出现在 09:00 和 22:00 前后,提前于该文研究结果,峰值也较高,证实了植被对 ρ(SO₂) 的调节和吸收作用。

2.2 ρ(SO₂) 的月变化特征

采暖季林内外 ρ(SO₂) 月变化趋势完全一致,呈不显著“V”型(见图 2) ρ(SO₂) 表现为 1 月>2 月>3 月>12 月>11 月,这与 ZHANG 等^[14]对北京市 ρ(SO₂) 卫星反演和监测结果一致。1 月 ρ(SO₂) 最高,林内外月均值分别为 (25.8±9.2) 和 (31.7±23.4) μg/m³; 11 月最低,林内外月均值分别为 (19.0±5.2) 和 (13.0±11.2) μg/m³。1 月 ρ(SO₂) 最高主要原因:①1—2 月为采暖季燃煤量高峰期,SO₂ 排放量达最高;②此时是北京最冷月,温度极低,逆温天气频繁发生导致上暖下冷的暖盖结构,大气边界层高度随之下降,不利于 SO₂ 扩散^[15];③1—2 月树叶凋零枯落,对 SO₂ 吸收和转化能力最低。11 月温度相对较高,大气垂直运

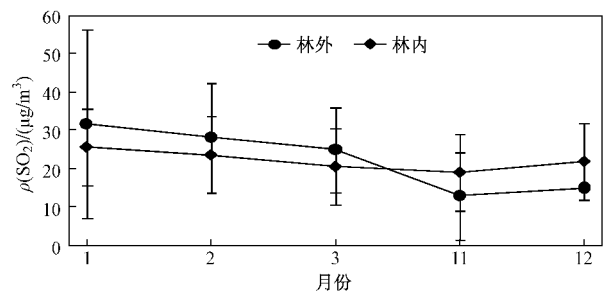


图 2 林内外采暖季不同月份 ρ(SO₂) 月变化特征

Fig. 2 The monthly variation of SO₂ concentration during heating season inside and outside forest

动强烈,有利于污染物的扩散^[16],此时部分植被才开始凋零,对 SO₂ 的净化作用相对最强,再加上该月开始进入采暖季,燃煤量较少,ρ(SO₂) 达采暖季最低。

2.3 林内外 ρ(SO₂) 变化特征对比

2.3.1 ρ(SO₂) 日变化特征对比

由图 1 可知,林内外 ρ(SO₂) 日变化规律基本呈

双峰双谷型. 林内白天 $\rho(\text{SO}_2)$ 峰值早于林外出现,但夜晚峰值却迟于林外出现,除2月外,林内 $\rho(\text{SO}_2)$ ($P=0.05$, $\text{Sig}=0.03$)日波动幅度明显较林外小 ($P=0.05$, $\text{Sig}=0.00$). 在浓度高峰期 $\rho(\text{SO}_2)$ 的环境背景值最高,林内森林对 SO_2 的净化能力有限,又因林内外距离近,使得林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 在高峰时刻差异较小. 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 日均值在1月达最高,分别为(28.1 ± 8.4)和(36.7 ± 19.8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$;12月最低,林内外分别为(14.7 ± 7.6)和(3.15 ± 12.1) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 12月正值采暖季燃煤量稳定期,天气形势静稳,使得林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 日变化最为平缓;林内地带性植被为温带夏绿阔叶林,仅夏季生理活动旺盛,而林外植物种类则繁多复杂,植被季节性吸收和转化 SO_2 能力在12月强于林内,又因风对 SO_2 的去除作用强于林内,这可能是12月林内外 SO_2 日变化差异最大的主要原因.

2.3.2 $\rho(\text{SO}_2)$ 的月变化特征对比

由图1和图2可知,采暖季林内外 SO_2 月变化趋势完全一致,呈不显著“V”型;1—3月林外实时 $\rho(\text{SO}_2)$ 基本高于林内,但在11—12月低于林内. 森林对污染物有强大的吸收和转化作用,因林内森林覆盖率大于林外,对 SO_2 的净化作用明显高于林外,使得林内1—3月 $\rho(\text{SO}_2)$ 实时监测值及月均值基本低于林外. 但11—12月北京多风天气较多,林内因本身环境封闭,受大风影响弱于林外,导致林内 SO_2 扩散条件比林外差^[17];又由于林内树木在一定程度上将林外空旷地的污染物吸收于自身,减少了林外 $\rho(\text{SO}_2)$,使得林内11—12月 $\rho(\text{SO}_2)$ 高于林外. 林内因郁闭度大,内部环境比林外稳定且封闭,受外部环境影响小,使林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 变幅较小,这与蒋燕等^[18]对林内外 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化研究一致. 对林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 月均值进行独立样本 T 检验(见表1)可知:林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 月均值差异表现为12月>11月>1月>2月>3月,3月差异最小($\text{Sig}=0.02$, $t=-0.24$),相差4.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,12月差异最大($\text{Sig}=0.00$, $t=57.19$),相差6.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,污染源相对一致,林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 月差异不同可能与区域传输和气象因素变化导致的扩散条件差异有关^[13,19].

2.4 气象因素与 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化特征的关系

2.4.1 降水量与 $\rho(\text{SO}_2)$ 的关系

选择采暖期全部降水天研究降水对 $\rho(\text{SO}_2)$ 的消减能力(见表2),林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 在降雨后基本明显低于降雨前:11月16日和12月14日林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 消减率分别为18.6%和17.8%,林外分别为80.2%和

表1 林内外不同月份 $\rho(\text{SO}_2)$ 独立样本 T 检验

Table 1 The T -test of SO_2 concentration during heating season inside and outside forest

| 月份 | 方差齐性检验 | | T 检验 | |
|----|--------|------|--------|------|
| | F | Sig | t | Sig |
| 1 | 6.17 | 0.02 | -7.07 | 0.00 |
| 2 | 10.17 | 0.00 | -2.50 | 0.01 |
| 3 | 18.37 | 0.00 | -2.40 | 0.02 |
| 11 | 13.76 | 0.00 | 9.37 | 0.00 |
| 12 | 15.21 | 0.00 | 57.19 | 0.00 |

注:显著性水平 $\alpha=0.05$

78.7%,两降水日之前长时间无降水,所以降水对 SO_2 消减作用表现突出,呈现出降水时长越长、降水量越大,消减率越高的规律. 主要原因是:降落的水汽凝结体可将空气中的 SO_2 污染物带到地面,使其在大气中消失,再加 SO_2 易溶于水^[20],在高湿环境下易发生气粒转化,因此降水对 SO_2 清除作用强,使得大气中 $\rho(\text{SO}_2)$ 下降. 2月20日林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 消减率分别为10.7%和48.2%,虽降水时长和降水量高于11月和12月,但消减率却低于11月和12月降水日,可能和2月 $\rho(\text{SO}_2)$ 的高环境背景值有关. 11月16日—11月22日为连续降水日,降水对 $\rho(\text{SO}_2)$ 的消减效应复杂,甚至表现出负的消减率;可能是因为连续降水日 $\rho(\text{SO}_2)$ 在降水的持续消减作用下达最低,之后降水的清除作用相对不突显. 程念亮等^[6]也指出6—8月降水多、大气运动强烈,导致 SO_2 有良好的扩散条件,是北京夏季 $\rho(\text{SO}_2)$ 最低的主要原因之一. 降水对 $\rho(\text{SO}_2)$ 的消减效应在林外比林内显著.

2.4.2 风与 $\rho(\text{SO}_2)$ 的关系

2015年2月21—23日风速明显高于采暖季其他时间,高风速主要在1.1~2.2 m/s间,杨孝文等^[21]提出,北京城区1月非污染日平均风速为2.28 m/s,高于植被区,与植被的防风能力有关. 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 随风速增大而降低,随着风速的减小而升高(见图3). 风速在22日23:00达最高值(2.2 m/s)时,林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 分别为13.8和3.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,相对22:00 $\rho(\text{SO}_2)$ 分别下降了25.3%和54.6%;Khan等^[22]研究表明,树木吸滞污染物效应随风速增大而增强,和该文研究结果一致. 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 最低值分别为12.8和2.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,出现时间滞后于风速最高时刻,和陈波等^[23]对北京植物园 $\text{PM}_{2.5}$ 研究结果不同,说明林内植被对污染物有一定的抵抗能力, SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 差异性也是主要原因之一. 风速在23日20:00达到最低值(0.2 m/s)时,林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 达最高峰,分别为

表 2 不同日期降水对林内外 ρ(SO₂) 消减效应

Table 2 Eliminating effect of precipitation on SO₂ concentration during heating season inside and outside forest

| 日期 | 降水时长/ h | 降水量/ mm | 降雨强度/ (mm/h) | ρ(SO ₂)/(μg/m ³) | | | | | |
|------------|------------|------------|-----------------|--|------|-------|------|------|-------|
| | | | | 林外 | | | 林内 | | |
| | | | | 降水前 | 降水后 | 消减率/% | 降水前 | 降水后 | 消减率/% |
| 2015-02-20 | 7 | 7 | 1 | 10.4 | 5.40 | 48.2 | 18.5 | 16.5 | 10.7 |
| 2015-11-16 | 3 | 3 | 1 | 15.2 | 3.01 | 80.2 | 18.1 | 14.7 | 18.6 |
| 2015-11-19 | 5 | 8 | 1.6 | 2.25 | 2.60 | -15.7 | 14.0 | 14.7 | -4.95 |
| 2015-11-20 | 1 | 1 | 1 | 5.41 | 2.20 | 59.3 | 16.0 | 14.8 | 7.76 |
| 2015-11-21 | 5 | 5 | 1 | 6.20 | 4.01 | 35.4 | 16.9 | 16.4 | 2.99 |
| 2015-11-22 | 9 | 9 | 1 | 3.41 | 5.81 | -70.6 | 15.9 | 15.8 | 0.53 |
| 2015-12-14 | 2 | 2 | 1 | 33.8 | 7.20 | 78.7 | 29.1 | 24.0 | 17.8 |

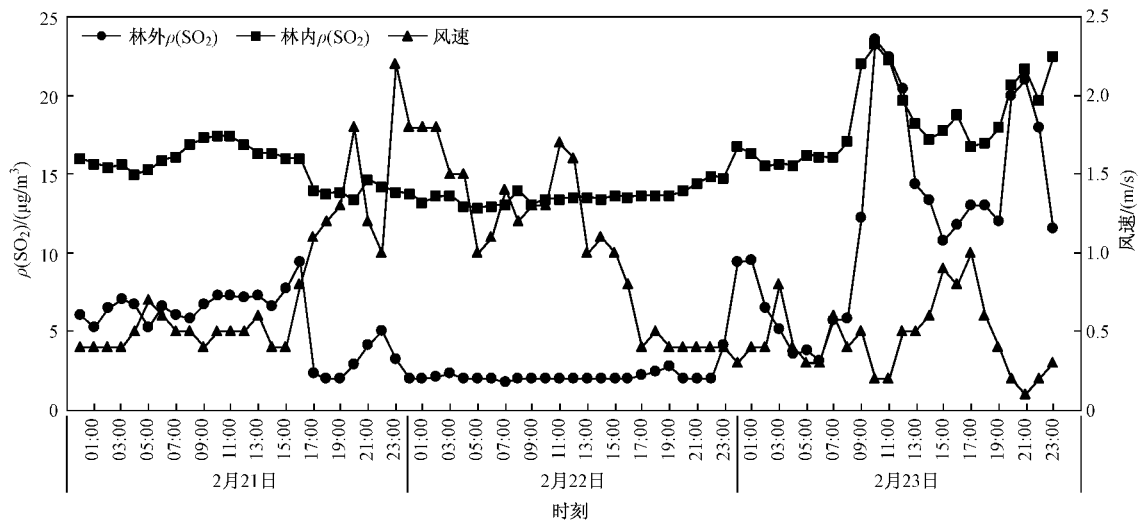


图 3 林内外大风天气下 ρ(SO₂) 变化

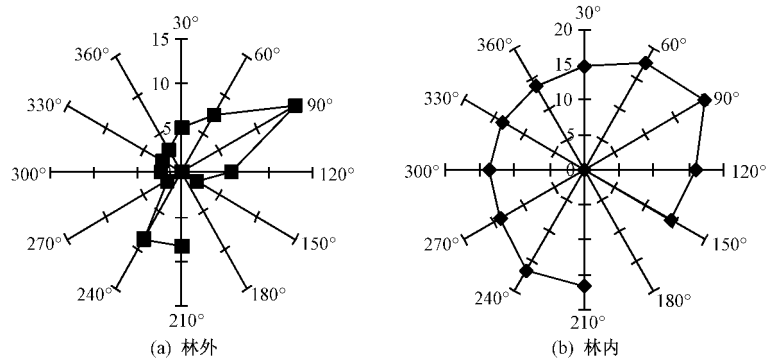
Fig. 3 The dynamics of air SO₂ concentration inside and outside forest with wind speed

23.6 和 23.2 μg/m³ 林内 ρ(SO₂) 最低值相对峰值降低了 45.8% 林外则降低了 91.4%。

对林内外的 ρ(SO₂) 与风速做相关性分析也可知, 风速与 ρ(SO₂) 呈显著负相关 (P=0.01 林内 R=-0.69 林外 R=-0.77), 说明风速对 SO₂ 的驱散作用显著, 林外受风速影响更大. 在大风天气下, 林内 ρ(SO₂) 平均值为 15.5 μg/m³, 是林外 ρ(SO₂) 平均值 (5.90 μg/m³) 的 2.63 倍 (见图 3), 也证实了林外 SO₂ 受风速影响高于林内; 风速越大, 大气的水平运动越活跃, SO₂ 扩散条件良好, ρ(SO₂) 下降. 反之风速减小, 大气水平运动受阻, 还易导致逆温形成, 逆温层不利于天气尺度扰动的进行, SO₂ 不易扩散致使其浓度上升^[21-23]. 孙扬等^[24]指出, 风速越大, 混合层高度就越高, 大气环境容量加大, 越有利于 SO₂ 发生扩散和转化, ρ(SO₂) 降低; 风速越小, ρ(SO₂) 随之升高.

除风速外, 风向也是影响 SO₂ 在大气中扩散的重要因素^[24]. 结合 2 月 21—23 日 ρ(SO₂) 和风向数据得风向玫瑰图 (见图 4), 由图 4 可知 2 月 21—23 日

林内外 ρ(SO₂) 主要集中在 60°~90° (东北风) 和 210°~270° (西南风) 之间, 120°~180° (东南风) 和 300°~360° (西北风) 间 ρ(SO₂) 相对较小, 林内 ρ(SO₂) 在不同风向下的差异更为明显. 林内平均 ρ(SO₂) 在东北风和西南风下为 17.0 μg/m³, 在东南风和西北风下为 11.9 μg/m³; 林外则分别为 8.30 和 2.63 μg/m³, 说明在东北风和西南风的影响下 ρ(SO₂) 较高, 东南风和西北风下较低, 这和陈波等^[23]对 PM_{2.5} 的研究结果一致. 主要原因是北京工业、老城区多集中于西南部, 燃煤量大, 且南部临近众多重工业城市, 区域传输明显, 大量 SO₂ 在西南风向下被输送到北京; 因北京三面环山, 东北气团对北京控制较弱, 不利于 SO₂ 扩散, ρ(SO₂) 在东北和西南风向上较高. 西北部清洁气团进入北京, SO₂ 易于扩散, 再加北部沙尘被输送到北京, 其所含碱性颗粒物有利于 SO₂ 的吸收, 使得 ρ(SO₂) 在西北风向下较低^[21]; 东南风所带的暖湿气流促进 SO₂ 发生转化可能是东南风向下 SO₂ 较低的主要原因.



注:数据点代表在该方向上的 $\rho(\text{SO}_2)$; 数值 5、10、15 和 20 代表 $\rho(\text{SO}_2)$, 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

图 4 大风天气下林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化和风向玫瑰图

Fig. 4 The variation of SO_2 concentration and wind rose under typical windy conditions inside and outside forest

2.4.3 温度与 $\rho(\text{SO}_2)$ 的关系

林内外 1 月 17—19 日降水量为 0 mm, 空气相对湿度为 0%~50%, 86% 时段风速为 0~1.50 m/s, 温度为 -6~6 °C, 温差相对较大, 因此选这 3 d 研究林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 和温度的关系. 由图 5 可以看出, 温度和 $\rho(\text{SO}_2)$ 基本呈负相关, 但不显著 ($P = 0.05, R < 0.40$). 1 月 17 日 02:00—05:00 为最低温时段, 温度在 -3~ -6 °C 间, 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 平均值分别为 19.8 和 24.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 在 1 月 18 日 14:00—18:00 第一次达最高温时段, 均温为 4.8 °C, 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 分别为 14.5 和 4.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 相对温度最低时段分别降低了 1.36 倍和 4.84 倍, 说明 $\rho(\text{SO}_2)$ 随温

度的升高而降低. 林外浓度受温度影响更明显; 林外 $\rho(\text{SO}_2)$ 低于林内, 主要是由于林内植被蒸腾作用降低了温度, 使得 SO_2 扩散较慢^[25]. 但第二次高温时段为 1 月 19 日 12:00—17:00, $\rho(\text{SO}_2)$ 却随温度的升高而升高, 可能是由于温度短期内变化幅度有限^[26]. 温度高, 相对湿度相对较小, 大气层不稳定, 大气对流和湍流强烈, 有利于 SO_2 扩散^[13], 但程兵芬等^[27]提出, 正变温促进了边界层结构的稳定, 抑制了气态污染物的扩散, 使得 $\rho(\text{SO}_2)$ 升高; 孙扬等也指出, 正变温会使得地面辐合运动较强, 不易于 SO_2 扩散^[24], 而且温度在短期内变动有限, 因此温度对 $\rho(\text{SO}_2)$ 影响复杂, 待进一步研究.

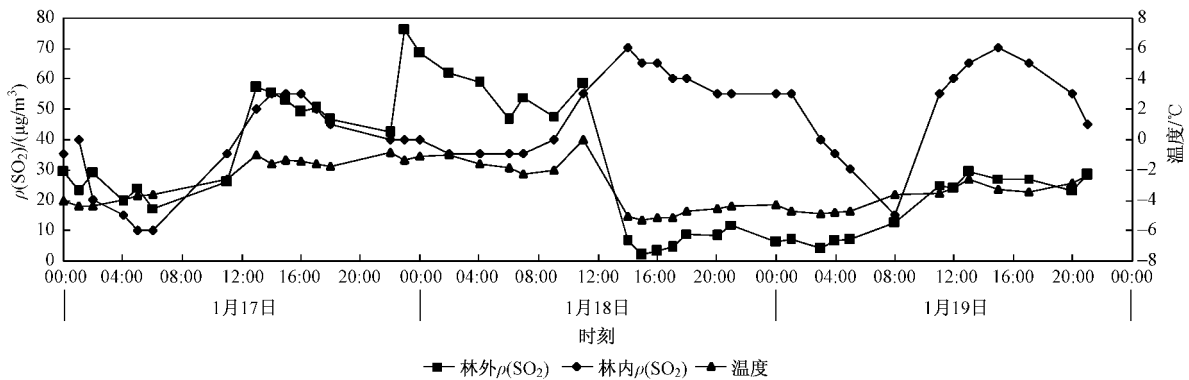


图 5 1 月 17—19 日林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 和温度变化特征

Fig. 5 The daily dynamics of SO_2 concentration and temperature from January 17th to 19th inside and outside forest

2.4.4 相对湿度与 $\rho(\text{SO}_2)$ 的关系

选取 2015 年 2 月 20 日、11 月 15 日和 12 月 9 日分析采暖季高湿天气的相对湿度与 $\rho(\text{SO}_2)$ 的关系, 3 d 平均相对湿度在 85% 以上, 平均风速在 0.30~

1.00 m/s 之间. 对林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 和相对湿度作线性回归分析(见表 4)可知, 林内回归方程为 $y = 62.67 - 0.42x$ (y 代表 $\rho(\text{SO}_2)$, x 代表相对湿度), 该线性关系显著 ($\alpha = 0.05, F = 21.85, \text{Sig} = 0.00$); 林外回归方程

表 4 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化和相对湿度回归分析Table 4 Regression analysis of SO₂ concentration and air humidity in two study sites

| 项目 | 林外 | | | | | 林内 | | | | |
|----|----------------|----|-------|------|--------|----------------|----|-------|------|--------|
| | R ² | df | F | Sig | 非标准化系数 | R ² | df | F | Sig | 非标准化系数 |
| 回归 | 8 105.76 | 1 | 72.69 | 0.00 | | 701.77 | 1 | 21.85 | 0.00 | |
| 残差 | 6 245.03 | 56 | | | | 1 799.02 | 56 | | | |
| 合计 | 14 350.80 | 57 | | | | 2 500.79 | 57 | | | |
| 常量 | | | | | 153.76 | | | | | 62.67 |
| 湿度 | | | | | -1.44 | | | | | -0.42 |

注: R²、df、F 和 Sig 均为该回归方程可靠性的验证统计量。

为 $y = 153.76 - 1.44x$, 并且显著性强 ($\alpha = 0.05$, $F = 72.69$ (高于 21.85), $\text{Sig} = 0.00$); 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 与相对湿度的负相关性显著. 林外线性关系显著性高于林内, 即林外 SO₂ 受相对湿度影响更明显.

主要是因为: ①在高湿环境中, 空气中的水汽和凝结核增多, 气态 SO₂ 易于和 NH₃ 反应生成水溶性化合物, 促进了气态 SO₂ 向颗粒态转化; ②大气中凝结核增多, SO₂ 常混合于其中, 发生光化学反应致生成二次颗粒物; ③SO₂ 在水中的溶解性极强, 使得 SO₂ 发生明显转化^[28], 并且得到去除. 程兵芬等^[27]提出在高湿空气中, 气态 SO₂ 易于溶解、混合于凝结核中, 并发生反应生成 PM_{2.5}, $\rho(\text{SO}_2)$ 下降; 杨孝文等^[21]也提出潮湿环境会促进气态污染物向颗粒态的转化. 但孙扬等^[24]却得出相对湿度越高, 污染物扩散条件差, 再加高湿有利于逆温天气形成, 更加不利于污染物向高空输送, SO₂ 污染程度随相对湿度的增高而加重; 徐衡等^[29]也指出相对湿度大的天气会形成雾罩, 不利于污染物的扩散, 与该文研究结果不一致. 树木可调节小气候, 如降低林内温度、防风固沙和增加空气湿度等作用, 又因林内环境封闭, 使得林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 受外界影响, 特别是受气象因素的影响低于林外, 证实了森林对 $\rho(\text{SO}_2)$ 的调控和净化能力, 从而降低了大气中 $\rho(\text{SO}_2)$.

3 结论

a) 采暖季 $\rho(\text{SO}_2)$ 日变化和月变化趋势基本一致, 日变化基本呈双峰双谷型, 月变化呈不显著“V”型. 林内 $\rho(\text{SO}_2)$ 在 1—3 月低于林外, 11—12 月高于林外, 并且 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化幅度总体低于林外, 证实了植被对 $\rho(\text{SO}_2)$ 的控制和净化作用.

b) 林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 在 11 月最低, 1 月最高, 因此北京市在采暖高峰期应采取一定措施来优化大气环境.

c) 采暖季林内外 $\rho(\text{SO}_2)$ 变化特征主要受燃煤量、气象因素、区域传输、和树木对 SO₂ 净化能力的综

合影响, 林内受天气影响低于林外, 说明植被对 $\rho(\text{SO}_2)$ 具有缓冲能力.

d) 在采暖季污染源相对稳定, 气象条件成为决定 $\rho(\text{SO}_2)$ 的主导因素, 因此可根据气象条件预测大气中 SO₂ 污染程度, 及时采取相应措施降低污染, 提高城市空气质量.

参考文献 (References):

- [1] 焦坤灵, 袁猛, 张连科, 等. SO₂ 在高岭土表面气-粒转化及影响因素[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5082-5088.
JIAO Kunling, YUAN Meng, ZHANG Lianke, et al. Gas-to-particle transformation and the influence factors of SO₂ on the surface of kaolin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 5082-5088.
- [2] EISINGER M, BURROWS J P. Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2/GOME instrument[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 22: 4177-4180.
- [3] BENJAMIN G, JEAN-CLAUDE R, HELENCE C, et al. Impact of vertical atmospheric structure on Beijing aerosol distribution[J]. Atmospheric Environment, 2006, 20(27): 5167-5180.
- [4] WANG Ying, ZHUANG Guoshun, SUN Yele, et al. The variation characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(34): 6579-6591.
- [5] KANADA M, DONG L, FUJITA T, et al. Regional disparity and cost effective SO₂ pollution control in China: a case study in 5 mega-cities[J]. Energy Policy, 2013, 61: 1322-1331.
- [6] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2000—2014 年北京市 SO₂ 时空分布及一次污染过程分析[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3961-3971.
CHENG Nianliang, ZHANG Dawei, LI Yunting, et al. Analysis about spatial and temporal distribution of SO₂ and an ambient SO₂ pollution process in Beijing during 2000-2014[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 3961-3971.
- [7] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1059-1065.
LIU Jie, ZHANG Xiaoling, XU Xiaofeng, et al. Comparison analysis of variation characteristics of SO₂, NO_x, O₃ and PM_{2.5} between rural and urban areas, Beijing[J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1059-1065.
- [8] QUAN Jiangnong, TIE Xuexi, ZHANG Qiang, et al. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, 88: 83-89.

- [9] 王成, 郭二果, 郝广发. 北京西山典型城市森林内 $PM_{2.5}$ 动态变化规律[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5650-5658.
WANG Cheng, GUO Erguo, QIE Guangfa. Variations of $PM_{2.5}$ in typical recreation forests in the west mountain of Beijing, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5650-5658.
- [10] 聂蕾, 邓志华, 陈奇伯, 等. 昆明城市森林对大气 SO_2 和 NO_x 净化效果[J]. 西部林业科学, 2015, 44(4): 116-120.
NIE Lei, DENG Zhihua, CHEN Qibo, et al. SO_2 and NO_x purification ability of forest in Kunming City[J]. Journal of West China Forestry Science, 2015, 44(4): 116-120.
- [11] 胡舒, 肖昕, 贾含帅. 不同污染条件下绿化树种对大气二氧化硫吸收积累能力的研究[J]. 北方园艺, 2012(11): 69-72.
HU Shu, XIAO Xin, JIA Hanshuai. Research on absorption and accumulation capacity of tree species to SO_2 under different polluted conditions[J]. Northern Horticulture, 2012(11): 69-72.
- [12] WATSON J G, CHOW J C, LURMANN F W, et al. Ammonium nitrate, nitric acid, and ammonia equilibrium in winter time Phoenix, Arizona[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1994, 44(4): 405-412.
- [13] 田伟, 唐贵谦, 王莉莉, 等. 北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 595-606.
TIAN Wei, TANG Guiqian, WANG Lili, et al. Multi-site study of a typical autumn air pollution event in Beijing[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(5): 595-606.
- [14] ZHANG Qiang, GENG Guannan, WANG Siwen, et al. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2857-2864.
- [15] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 573-578.
TANG Guiqian, LI Xin, WANG Xiaoke, et al. Effects of synoptic type on surface ozone pollution in Beijing[J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 573-578.
- [16] 曲晓黎, 付桂琴, 贾俊妹. 2005—2009年石家庄市空气质量分布特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 29-33.
QU Xiaoli, FU Guiqin, JIA Junmei, et al. Distribution characteristics of air quality and its relationship with meteorological factors from 2005 to 2009 in Shijiazhuang, Hebei Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(3): 29-33.
- [17] 郭二果, 王成, 郝光发, 等. 北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1185-1198.
GUO Erguo, WANG Cheng, QIE Guangfa, et al. Influence of typical weather conditions on the airborne particulate matters in urban forests in northern China[J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1185-1198.
- [18] 蒋燕, 陈波, 鲁绍伟, 等. 北京城市森林 $PM_{2.5}$ 质量浓度特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 447-457.
JIANG Yan, CHEN Bo, LU Shaowei, et al. Analysis on characteristics and influential factors of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing's urban forest[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(3): 447-457.
- [19] GIORGI F, MELEUX F. Modelling the regional effects of climate change on air quality[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007, 339: 721-733.
- [20] 张敏, 朱彬, 王东东, 等. 南京北郊冬季大气 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的变化特征[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 695-702.
ZHANG Min, ZHU Bin, WANG Dongdong, et al. Characteristics of SO_2 , NO_2 and O_3 over north suburb of Nanjing in winter[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(5): 695-702.
- [21] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 679-686.
YANG Xiaowen, ZHOU Ying, CHENG Shuiyuan, et al. Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, 36(3): 679-686.
- [22] KHAN M F, SHIRASUNA Y, HIRANO K, et al. Characterization of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and $PM_{>10}$ in ambient air, Yokohama, Japan[J]. Atmospheric Research, 2010, 96(1): 159-172.
- [23] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 $PM_{2.5}$ 浓度动态分析[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1391-1399.
CHEN Bo, LU Shaowei, LI Shaoning. Dynamic analysis of $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing for various weather conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1391-1399.
- [24] 孙扬, 王跃思, 刘广仁, 等. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO_2 的垂直分布分析[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 408-414.
SUN Yang, WANG Yuesi, LIU Guangren, et al. Analysis for vertical profile of atmospheric SO_2 during air seriously polluted days in Beijing[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 408-414.
- [25] 鲁绍伟, 刘晓娜, 刘斌, 等. 北京市 2015 年森林植被区 PM_{10} 质量浓度时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 469-476.
LU Shaowei, LIU Xiaona, LIU Bin, et al. Spatial and temporal variation characteristics of PM_{10} concentration in forest vegetation area of Beijing City in 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(2): 469-476.
- [26] 孙峰, 张大伟, 孙瑞雯, 等. 北京地区冬季典型 $PM_{2.5}$ 重污染案例分析[J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 1-7.
SUN Feng, ZHANG Dawei, SUN Ruiwen, et al. Typical heavy pollution episode analysis on $PM_{2.5}$ in winter of Beijing[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 1-7.
- [27] 程兵芬, 韩丽, 程念亮, 等. 2014 年 10 月太原市一次空气重污染过程分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4071-4080.
CHENG Bingfen, HAN Li, CHENG Nianliang, et al. Characteristics and formation mechanism of a serious pollution event in October 2014 in Taiyuan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 4071-4080.
- [28] CHOW J C, BACHMANN J D, WIERMAN S S G, et al. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(6): 628-713.
- [29] 徐衡, 罗俊玲, 张掌权. 集中供暖区大气 $PM_{2.5}$ 季节动态变化及其影响因素: 以陕西省宝鸡市为例[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2013, 33(4): 40-43.
XU Heng, LUO Jialing, ZHANG Zhaguan. Analysis of the seasonal dynamics and influence factors of $PM_{2.5}$ in the trational regions of centralized heat supply: taking Baoji City in Shanxi Province as example[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Nature Science), 2013, 33(4): 40-43.