

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018111102

邢雅婷, 王帅, 赵玲. 呼和浩特市城区大气污染物浓度变化特征分析[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 1139-1149.

XING Yating, WANG Shuai, ZHAO Ling. Variation characteristics of atmospheric pollutants in the urban area of Hohhot [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(5): 1139-1149.

呼和浩特市城区大气污染物浓度变化特征分析*

邢雅婷 王 帅 赵 玲**

(内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特, 010021)

摘 要 本文利用呼和浩特市 8 个国控监测点中 CO、NO₂、SO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 逐时地面观测数据资料, 采用聚类分析、相关性分析方法, 综合研究呼和浩特市城区大气污染物浓度时空变化特征. 结果表明, 2017 年呼市 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 的污染较为严重, 超标天数分别为 49 d、52 d 和 41 d; CO 和 SO₂ 整体污染较轻. CO、NO₂、SO₂ 以及 PM_{2.5} 浓度表现出冬高夏低变化, O₃ 表现出夏高冬低变化, PM₁₀ 则表现为春冬高而夏秋低. O₃ 和 NO₂ 均呈现单峰型日变化特征, 且变化趋势相反; CO、SO₂ 和 PM_{2.5} 都呈现出相似的双峰型日变化. 小召和工大金川校区监测点污染整体较为严重, 小召监测点主要污染物为 PM_{2.5} 和 PM₁₀, 工大金川校区主要污染物为 SO₂. 相关性分析表明, O₃ 浓度与气温呈显著正相关; PM_{2.5} 与湿度呈显著正相关; CO、NO₂ 和 SO₂ 均与风速呈显著负相关; PM₁₀ 与各气象要素在不同的季节相关性不同.

关键词 大气污染物, 聚类分析, 气象因素, 呼和浩特市.

Variation characteristics of atmospheric pollutants in the urban area of Hohhot

XING Yating WANG Shuai ZHAO Ling**

(School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China)

Abstract: Based on the data of CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5}, the temporal and spatial variation of atmospheric pollutant concentration was studied in the urban area of Hohhot using cluster analysis and correlation analysis. The results showed that the pollution of PM₁₀, PM_{2.5} and O₃ were much more serious in 2017, and the days of exceeding allowable limit were 49 d, 52 d and 41 d, respectively. Carbon monoxide and sulphur dioxide pollution were generally light. The concentrations of CO, NO₂, SO₂ and PM_{2.5} showed lower in winter and higher in summer. O₃ concentration showed lower in summer and higher in winter. PM₁₀ showed higher in spring and winter, and lower in summer and autumn. Both O₃ and NO₂ showed the single-peak daily change characteristics, and the trend was opposite. CO, SO₂ and PM_{2.5} all showed similar bipolar daily changes. Correlation analysis showed that O₃ concentration was positively correlated with temperature. PM_{2.5} was significantly positive correlation with humidity. CO, NO₂ and SO₂ all showed significantly negative correlation with wind speed. PM₁₀ had different correlations with various meteorological factors in different seasons.

Keywords: atmospheric pollutants, cluster analysis, meteorological factors, Hohhot.

2018 年 11 月 11 日收稿 (Received: November 11, 2018).

* 内蒙古大学校级大学生创新创业训练计划项目 (201817402), 国家自然科学基金 (21866022, 21567018) 和内蒙古自然科学基金 (2017MS0214) 资助.

Supported by the Inner Mongolia University Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates (201817402), National Natural Science Foundation of China (21866022, 21567018) and Inner Mongolia Natural Science Foundation (2017MS0214).

** 通讯联系人, Tel: 0471-4991436, E-mail: nmzhl@hotmail.com

Corresponding author, Tel: 0471-4991436, E-mail: nmzhl@hotmail.com

随着工业、交通和城市化的快速发展,能源消耗和大气污染物排放不断攀升,以大气氧化剂和细粒子为主的大气复合型污染问题越来越突出^[1].O₃浓度持续升高已成为当前研究的热点^[2-4].O₃的生成机制较为复杂,其浓度水平与其前体物 NO_x 和 VOCs 呈非线性响应关系,有较多研究表明,中国大部分地区高浓度 O₃主要受 VOCs 控制^[3-5].在平流层中 O₃可以吸收紫外线,对地球生物有保护作用,但在对流层中 O₃的寿命较长,能够进行区域之间的长距离传输,同时 O₃在大气中与其他污染物发生复杂的光化学反应,是影响空气质量的重要污染物^[5].另外,O₃作为强氧化剂对农业生产和人体健康均有不利影响^[6].PM₁₀和 PM_{2.5}作为主要的大气颗粒物,其粒径小、比表面积大,能够吸附有毒有害物质,长时间暴露在高浓度 PM_{2.5}环境下,易导致易感人群产生呼吸系统和心血管疾病^[7-8],大气颗粒物成分复杂,细粒子的消光作用是影响大气能见度的重要因素^[9];水溶性离子影响大气酸碱度,并对成核和云雾形成起到重要作用^[10];多环芳烃作为重要的有机组分具有致畸、致癌、致突变的特性,严重影响人体健康^[11].

大气污染问题已经受到广泛的关注,国内许多城市的大气污染物浓度变化特征已有较多研究^[12-14],而对呼和浩特市大气污染关注相对较少,其大气的污染研究多集中在颗粒物方面,对污染物与气象因素关系研究较多^[15-17],对 O₃的研究相对较少.同时,对呼和浩特市不同的大气污染物时空变化规律研究较为缺乏,了解不够深入.呼和浩特市作为我国典型的干旱半干旱地区城市,对其大气污染物变化规律研究具有一定的代表意义.

本文对 2017-01—2018-02 呼和浩特市 8 个国控空气质量监测点数据以及相关气象数据进行分析,探讨了呼和浩特市城区大气污染物(CO、NO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀和 SO₂)质量浓度的不同时间尺度的变化规律;通过聚类分析讨论了呼和浩特市城区大气污染物的空间变化规律,相关性分析探究了污染物与几种气象因素的关系.本研究可为呼和浩特市大气污染防治提供科学依据,同时环境管理和规划部门科学决策提供一定的参考.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

呼和浩特市属中温带干旱半干旱大陆性季风气候,年平均气温 3.5—8 ℃,年平均降水量 337—418 mm,冬冷夏热,四季分明,主导风向为偏北风,次主导风向为偏南风;能源以煤炭和石油为主;平均海拔 1050 m,土质疏松,生态脆弱;呼和浩特市背面紧靠大青山,南临黄河,地势平坦,整体上由东北向西南逐渐降低.

1.2 数据来源与处理

本研究采用呼和浩特市化肥厂生活区(HFCQ)、如意水处理厂(RYSC)、兴松小区(XSXQ)、内蒙古工业大学金川校区(GDJC)、小召(XZ)、糖厂(TC)、呼和浩特市一监(HSYJ)、二十九中(ESJZ)等 8 个环境空气自动监测站的 CO、NO₂、O₃、SO₂、PM₁₀和 PM_{2.5}等 6 种污染物 2017-01—2018-02 的小时浓度数据,污染物浓度资料来源于国家环境监测中心(<http://106.37.208.233:20035/>),地面气象资料为呼和浩特市白塔机场(BAITA)的小时监测数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html>).

根据国家标准(GB3095—2012),对数据进行了有效性检验,污染物日均浓度计算至少包括 20 h 平均浓度(O₃的 8 h 平均值至少包括 6 h 平均浓度),月均浓度至少包括 27 d 有效日均浓度(2 月份至少有 25 d 日均浓度),年均浓度至少包括 324 d 有效日均浓度,对不满足国家标准的数据进行剔除.各污染物时间变化分析所用的数据均为 8 个监测点的有效浓度的平均值,污染物日均浓度和年浓度以国家二级浓度限值为标准.聚类分析和相关性分析采用各污染物和的气象因子小时均值数据.根据国家标准将呼和浩特市四季分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月—次年 2 月).

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 污染物年变化特征

图 2 所示为 2017-01-01—2017-12-31 呼和浩特市城区 CO、NO₂、O_{3-8h max}、PM₁₀、PM_{2.5}和 SO₂等 6 种污

染物浓度的变化趋势($O_{3-8h\ max}$ 指日 8 h 滑动平均最大值),图 3 为气态污染物和颗粒物月均浓度变化,表 1 所示为 2017-03—2018-02 月各大气污染物季节浓度均值.

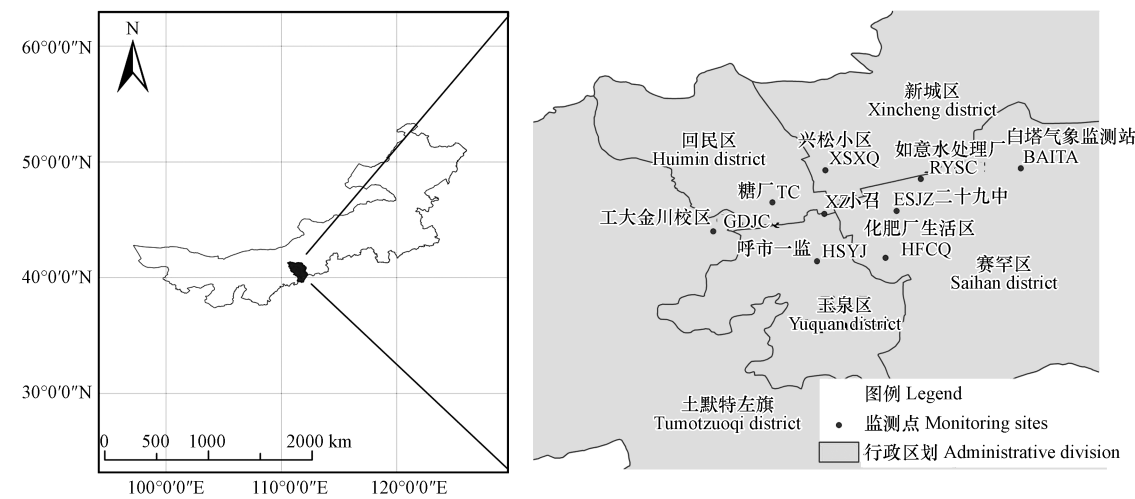


图 1 监测点位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of location of monitoring sites

表 1 2017 年各大气污染物浓度及部分气象要素,平均值±标准差 (Mean±SD)

Table 1 Seasonal concentrations of atmospheric pollutants and some meteorological parameters in 2017				
项目 Item	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
CO/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.0±0.3	0.8±0.1	1.2±0.4	1.3±0.4
NO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	42.0±14.8	37.0±8.6	49.1±16.8	42.7±14.0
O ₃ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	72.5±15.2	94.3±21.9	47.2±13.7	42.8±11.6
PM ₁₀ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	109.5±112.4	77.2±38.0	102.8±50.7	108.6±48.8
PM _{2.5} /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	37.0±33.1	27.2±12.2	48.3±29.2	60.5±33.1
SO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	26.2±10.0	13.5±4.0	23.5±8.1	29.0±8.9
温度 Temperature/°C	9.8±3.8	22.3±2.9	7.1±4.2	-9.6±3.6
相对湿度 RH/%	39.3±14.3	53.6±14.9	51.2±13	44.6±7.2
风速 Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.3±0.9	2.8±0.6	2.9±0.8	2.7±1.0

2017 年中,CO 整体污染较轻,全年日均浓度均在国家二级限值以下,最高为 $4.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,最低为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.CO 浓度呈明显的 U 型分布,冬季高夏季低,冬季供暖期间燃煤排放可能是造成 CO 浓度升高的主要原因^[18],另外,冬季大气层比较稳定,风力较小,容易导致大气污染物的累积,可能是冬季 CO 浓度较高的另一个原因^[19].

NO₂浓度年均值为 $45.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,高于国家二级标准($40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),但 NO₂日均浓度全年仅有 9 d 超过国家二级标准,超标率仅 2.5%.从表 1 可以看出,NO₂四季浓度均值变化不大,但平均污染较严重.NO₂主要来自高温燃烧过程,例如机动车尾气和燃煤排放^[20],冬季供暖期间,燃煤量较大,但表 1 显示,NO₂冬季浓度没有明显上升,因此推断呼和浩特市燃煤供暖对 NO₂浓度影响较小.另外有研究表明,随着城市机动车数量不断增加,机动车排放对 NO₂浓度贡献越来越大^[21].NO₂日均浓度最高为 $90.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低为 $44.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.月均浓度峰值出现在 1 月份,为 $56.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.冬季 NO_x 排放增加,光照条件较弱,通过大气光化学反应消耗的 NO₂减少,同时大气混合层高度降低等不利的气象条件导致 NO₂在 1 月份出现最高值^[22].NO₂季节变化规律与 CO 相似,呈现出明显的冬季高夏季低的趋势,但是总体上污染较 CO 严重.

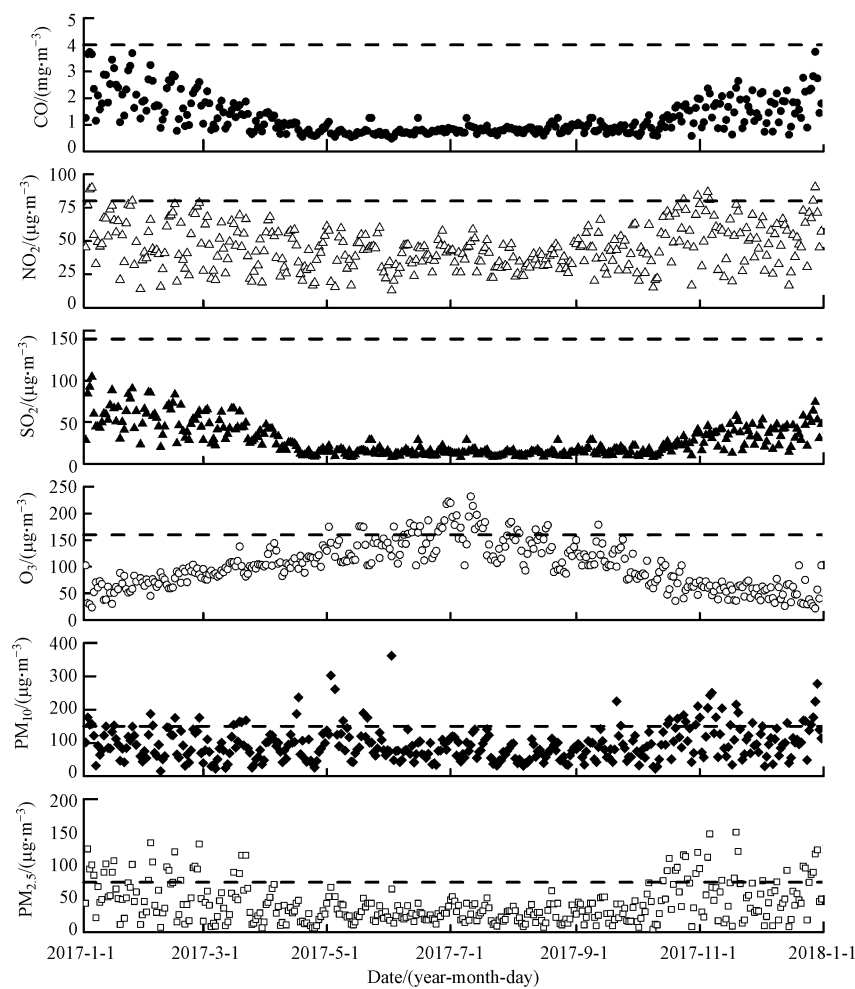


图 2 2017 年 CO、NO₂、SO₂、O₃(O_{3-8h max})、PM₁₀和 PM_{2.5}浓度逐日变化
(图中虚线表示该污染物在国家环境空气质量二级标准中的浓度限值)

Fig.2 Daily variations of CO, NO₂, SO₂, O₃(O_{3-8h max}), PM₁₀ and PM_{2.5} in 2017
(The dotted line show the secondary concentration limit of pollutant in ambient air quality standard)

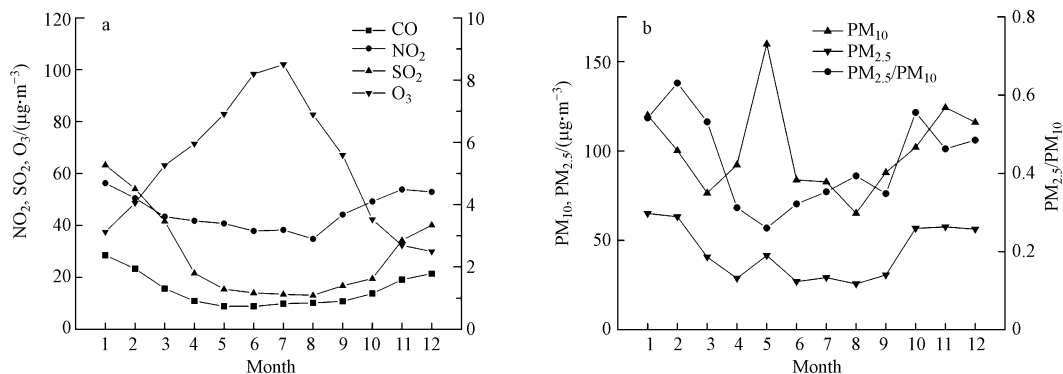


图 3 气态污染物(a)和颗粒物(b)月平均浓度变化

Fig.3 Monthly variation of gaseous pollutants (a) and atmospheric particulates (b)

SO₂年均浓度为 28.8 μg·m⁻³, 低于国家二级标准(60 μg·m⁻³), 日均浓度只有一天超过国家标准, 出现在 2017 年 1 月 28 日春节期间, 因此春节期间烟花爆竹燃放可能会对 SO₂ 浓度有较大影响. 10 月份呼和浩特市开始燃煤供暖, SO₂ 浓度有一个显著地上升, 可以看出虽然烟气脱硫技术已经比较成熟且脱硫

除率已经达到一个较高的水平^[23],但燃煤排放仍对大气中 SO₂ 浓度有很大影响.SO₂ 浓度季节变化规律与 CO 和 NO₂ 相似,呈现出明显的冬高夏低的趋势。

O₃ 污染较为严重,O_{3-8hmax} 有 41 d 超过国家二级标准,超标率为 11.2%,其中夏季超标天数为 35 d,占总超标天数 85.4%,从表 1 也可以看出,O₃ 夏季浓度均值最高,分别为春、秋、冬季浓度均值的 1.3 倍、2.0 倍和 2.2 倍,因此呼和浩特市夏季 O₃ 污染最为严重,且不同季节浓度变化较大.图 3 可以看出 O₃ 变化趋势与 CO、NO₂ 和 SO₂ 完全相反,呈现出明显夏季高冬季低的趋势,1 月开始浓度不断上升,随着气温升高,光照时间变长,最终在 7 月份达到峰值,之后开始不断下降.研究表明,夏季高温和强太阳辐射等有利于大气光化学反应的气象条件使臭氧消耗速率减慢,导致 O₃ 的高浓度^[24]。

颗粒物整体污染较为严重.PM₁₀ 年均浓度为 100.9 μg·m⁻³,远超国家二级标准(70 μg·m⁻³).PM₁₀ 日均浓度有 49 d 超过国家二级标准,超标率为 13.4%,其中冬季超标天数为 17 d,占总超标天数 34.7%,春季超标天数为 12 d,占 24.5%.粒径更小的 PM_{2.5} 污染同样较为严重,PM_{2.5} 年平均浓度为 43.4 μg·m⁻³,超过国家二级标准(35 μg·m⁻³),日均浓度变化范围较大 4.7—310.3 μg·m⁻³.PM_{2.5} 有 52 d 超过国家二级标准,超标率为 14.2%.从表 1 可以看出,PM₁₀ 冬季和春季浓度较高,污染较严重,秋季和夏季污染较轻.PM₁₀ 月平均浓度在 5 月份有 1 个明显的峰值,受干旱气候影响,呼和浩特市及周边地区植被覆盖率较低,而春季呼和浩特市天气多风(平均风速 3.3 m·s⁻¹),相对湿度较低(39.3%),裸露的地表产生大量的扬尘,甚至出现沙尘暴^[25],以致春季 5 月份 PM₁₀ 浓度出现峰值.PM_{2.5} 在 5 月份同样出现 1 个小的峰值,与 PM₁₀ 类似,可能受到沙尘天气的影响,但是变化幅度较 PM₁₀ 要小得多.表 1 可以看出,PM_{2.5} 浓度冬季最高,夏季最低,呈现冬高夏低趋势,季节变化相对较大.我国 PM_{2.5} 的主要来源为煤炭燃烧、机动车尾气和工业污染源^[26],随着城市化进程加快,呼和浩特市机动车保有量不断增加,汽车尾气排放成为细颗粒物的重要来源^[27].冬季 PM_{2.5} 污染较为严重,主要原因可能是冬季煤炭燃烧等不同源的排放增加,同时冬季大气混合层高度较低,影响污染物扩散,导致 PM_{2.5} 浓度较高^[28].PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比重大体呈现出冬高夏低的变化趋势,2 月份 PM_{2.5} 占比最高,为 63%,5 月份占比最低为 26%,由于 PM_{2.5} 粒径较小,容易通过呼吸系统进入人体肺部,甚至参与血液循环,对人体健康造成较大的危害^[7],因此,在同样的 PM₁₀ 污染水平下,冬季颗粒物 PM_{2.5} 占比重大,对人体健康可能有更大的影响。

2.2 污染物四季日变化分析

为了进一步了解呼和浩特市大气污染物的时间变化规律,统计了四季(2017-03—2018-02)每日不同时刻污染物的浓度变化情况,如图 4 所示.可以看出,CO 在 2017 年四季中均呈现双峰日变化,两个浓度峰值分别出现在上午 8:00—9:00 和凌晨 0:00—1:00,谷值出现在下午 15:00—16:00 之间,上午的峰值受到交通早高峰影响,凌晨的峰值可能与大气混合层高度降低导致 CO 积累有关^[19].春、秋、冬的 3 个季节呈相似变化,且变化幅度较大;夏季 CO 整体污染较轻,变化较为平稳。

NO₂ 整体上呈单峰变化,峰值出现在晚上 20:00—22:00,谷值出现在下午 14:00—16:00,这与对重庆市 NO₂ 浓度变化研究结论有所不同^[10],在凌晨到日出期间 NO₂ 浓度没有明显的下降.夜间太阳辐射消失,NO₂ 光解停止,同时 NO 被 O₃ 氧化产生 NO₂,导致 NO₂ 积累^[29],对比 O₃ 的日变化特征,可以看出在夜间 O₃ 浓度经历一个迅速减小后,凌晨到日出期间 O₃ 浓度仍然在缓慢降低,同时总体上看 O₃ 与 NO₂ 浓度呈显著地负相关(Spearman 相关系数 $\rho = -0.47, P < 0.01$),因此在凌晨到日出期间 O₃ 可能继续参与 NO 的氧化反应生成 NO₂,导致 NO₂ 在此期间浓度几乎没有下降,仍保持较高浓度。

SO₂ 与 CO 相似,呈双峰日变化,峰值分别出现在上午 9:00—10:00 和晚上 20:00—22:00,谷值出现在下午 15:00 左右.夏季 SO₂ 浓度变化较平稳,其他季节变化幅度较大.上午在交通早高峰期间 SO₂ 浓度出现第一个峰值,而后随着机动车流量减少,浓度逐渐降低,在下午达到最低值,而晚上的峰值可能与大气混合层高度降低以及 SO₂ 的湿清除有关^[30]。

O₃ 呈现明显的单峰型变化,浓度峰值出现在下午的 15:00—16:00,谷值出现在早上的 6:00—9:00,夏季各个时刻 O₃ 浓度普遍较高.O₃ 浓度与近地面大气光化学反应密不可分,早上日出后随着光照增强,太阳辐射强度的增大,O₃ 前体物的光化学反应增强,导致 O₃ 浓度持续升高;O₃ 生成存在滞后性,在下午 15:00 左右达到峰值;随后 O₃ 浓度逐渐降低,夜间生成 O₃ 的大气化学反应较弱,最终 O₃ 浓度在次日 6:00 左右出现最低值^[31]。

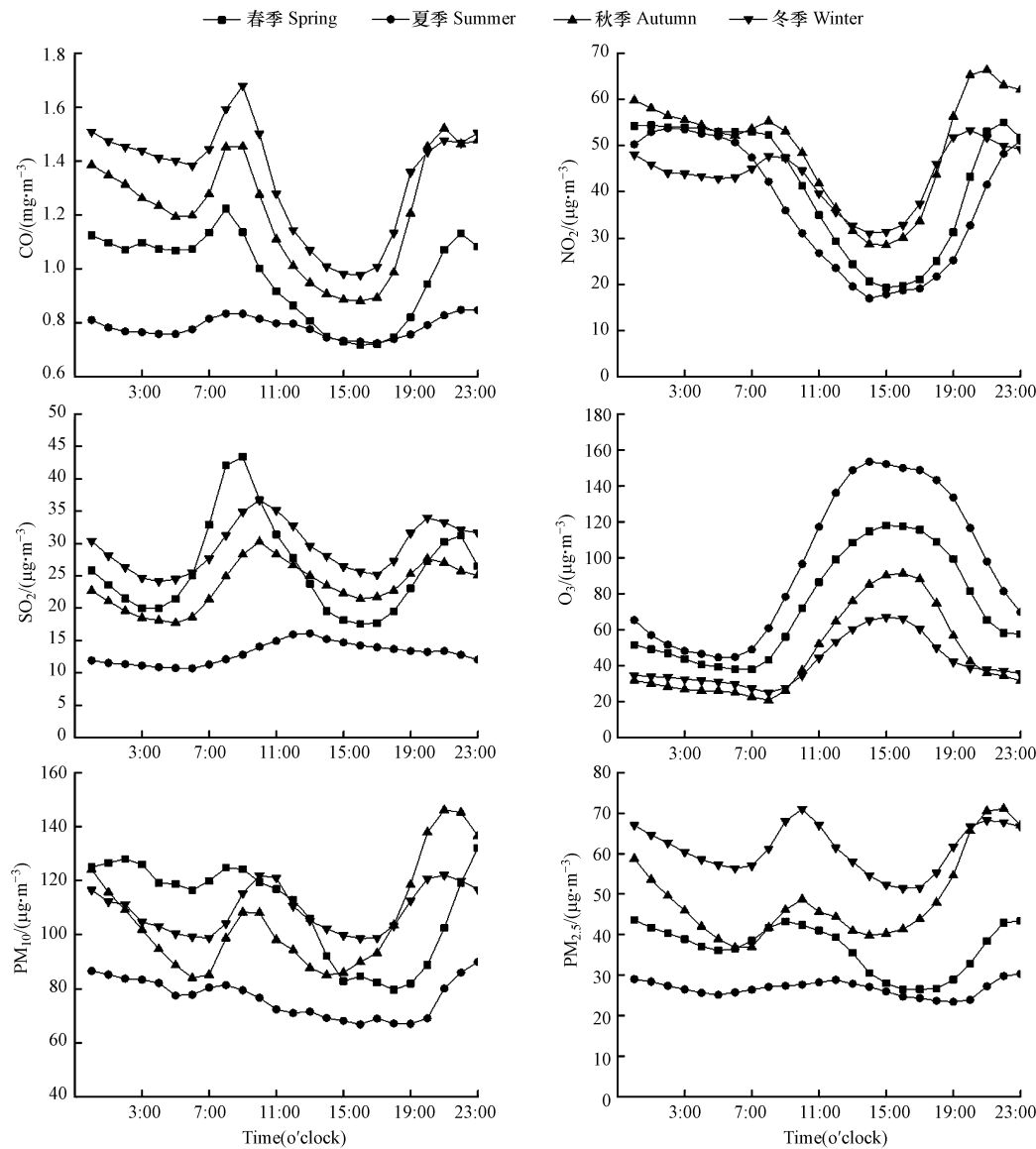


图 4 2017 年春夏秋冬季 CO、NO₂、SO₂、O₃、PM₁₀和 PM_{2.5}浓度日变化趋势

Fig.4 Diurnal variation of CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} during different seasons in 2017

PM₁₀四季表现出不同的日变化特征,秋冬两季呈现出与 CO 和 SO₂相似的双峰变化,夏季变化幅度不大且浓度较低,而春季呈现出较为不同的变化特征,受早高峰影响,在上午 8:00 PM₁₀浓度达到峰值,随后开始逐渐下降,下午 18:00 出现谷值,随后在晚高峰影响下浓度开始上升,夜间 22:00 到次日 8:00 PM₁₀浓度始终处在一个较高水平,这可能与呼和浩特市春季风力较大而相对湿度较低导致的沙尘天气以及开向西南方向的喇叭口地形综合作用有关^[25].

PM_{2.5}同样呈现明显的双峰变化,两个峰值分别出现在上午 9:00—10:00 和晚上 21:00—23:00,早高峰期间机动车排放以及道路扬尘导致细颗粒物浓度出现第一个峰值^[32].午后边界层不稳定,湍流垂直交换能力增强,PM_{2.5}浓度有所下降;而夜间太阳辐射减弱,混合层高度降低,使得 PM_{2.5}浓度再次升高^[33].

2.3 污染物空间变化特征

聚类分析可用于对不同地区污染物的分类,聚为一类的地点通常具有相似的污染情况^[34].本文利用 SPSS 分别就 CO、NO₂、O₃、PM₁₀、PM_{2.5}和 SO₂等 6 种常规大气污染物对呼和浩特市不同监测点各污染物 2017 年小时浓度进行聚类分析,样本之间的距离使用平方欧式距离,各类之间的距离使用 Ward 法^[34],结果如图 5 所示.

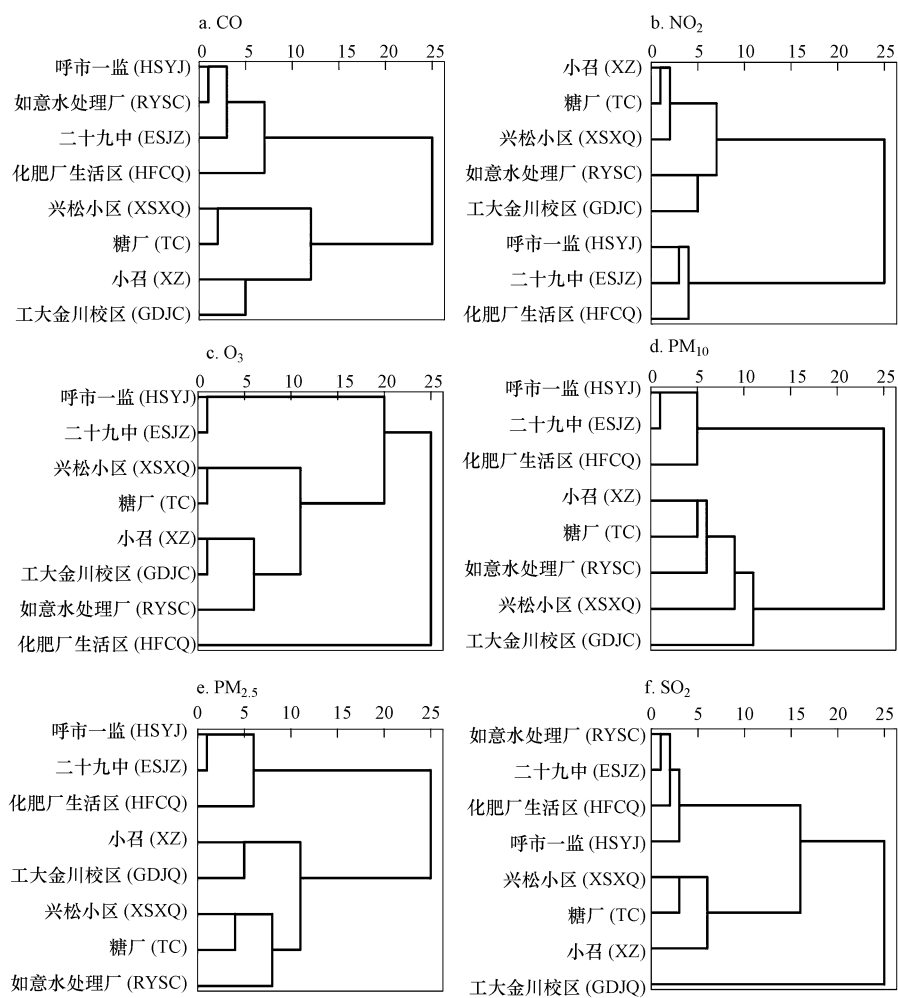


图 5 不同污染物分别对各监测点聚类分析的树状图

Fig.5 Dendrogram of air pollutants at each monitoring site based on the Ward's method of hierarchical clustering

分析结果表明,不同污染物聚类结果有一定差距,呼和浩特市一监和二十九中在 NO_2 、 O_3 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 4 个污染指标的聚类分析中被聚为一类;兴松小区和糖厂在 CO 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的 4 个污染指标的分析中被聚为一类,表明呼和浩特市一监和二十九中、兴松小区和糖厂分别具有相似的污染特征.化肥厂生活区在 O_3 的聚类分析中显示出自己的区域特征,工大金川校区在 SO_2 聚类中也表现出与其他监测点的显著差异.整体上看,一方面,相距较近的监测点多被聚为一类,表明不同区域污染源可能有所不同,污染特征有较大差异;另一方面,不同监测点污染物浓度在西北-东南方向呈层次变化.这可能是风向和地形综合作用所致^[17].

对不同监测点的 6 种污染物的 2017 年平均浓度和 AQI 年均值进行了统计,如图 6 所示.在 8 个站点中,兴松小区子站代表新城区,糖厂子站代表回民区,小召和呼和浩特市一监子站代表玉泉区,二十九中子站和化肥厂生活区子站代表赛罕区,如意水处理厂子站代表如意地区,工大金川校区子站代表金川地区.从不同监测点的 AQI 年均值来看,整体上污染程度由大到小为:小召>工大金川校区>糖厂>兴松小区>如意水处理厂>呼和浩特市一监>二十九中>化肥厂生活区.小召监测点主要的污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,有研究表明颗粒物主要来源于局地排放和远距离传输且浓度受人类活动影响较大,在人类活动强烈的市区、交通路口和商业区附近颗粒物浓度要明显高于人类活动较少的区域^[35],小召监测点虽然在青城公园内,但是位于市里,且靠近公路,受到扬尘和机动车尾气影响明显,导致颗粒物污染较严重.工大金川校区点位的 SO_2 浓度较高,可能是受到附近的企业和工厂影响;糖厂点位的 CO 浓度相对较高,可能是附近大吨位燃煤锅炉排放所致;二十九中点位除 O_3 浓度偏高外,整体污染较轻;虽然化肥厂生活区点位附近有工业生产活动,但是整体污染并不严重,可能是近年来工业污染治理的结果;呼和浩特市一监点位由于远离道路和市中心,受人类活动和工业生产影响相对较少,空气质量较为清洁.

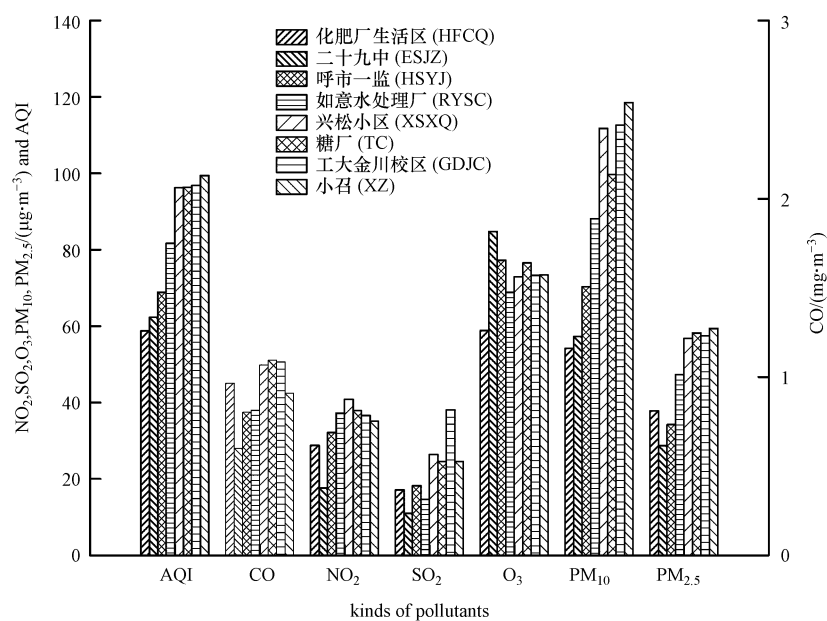


图 6 2017 年各监测点 AQI、CO、NO₂、SO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 年均值对比

Fig.6 Annual mean of AQI, CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} at each monitoring point in 2017

2.4 气象因素与各污染物浓度相关性分析

气象条件是影响大气污染物浓度的重要因素.基于白塔机场气象监测数据,运用 SPSS 对数据进行正态性检验,污染物浓度呈偏态分布,有研究表明非参数分析方法(如 Spearman 秩相关系数)能够描述变量间的线性或非线性关系,可以更客观地反映污染物浓度与气象因素的相关关系^[36],因此采用非参数分析法对不同季节各类污染物浓度小时均值与气象要素小时均值进行了相关性分析,结果如表 2 所示.

表 2 2017 年春夏秋冬季节各污染物浓度小时均值与气象要素小时均值的 Spearman 相关系数统计¹⁾

Table 2 Spearman's correlation coefficients among pollutants and meteorological parameters based on hourly mean data during different seasons in 2017

季节 Season	气象要素 Meteorological elements	CO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	O ₃
春季 Spring	● 风速 Wind speed	-0.478 **	-0.482 **	0.035	-0.270 **	-0.502 **	0.075
	气温 Temperature	-0.467 **	0.148	0.384 **	0.039	-0.604 **	0.796 **
	相对湿度 RH	0.558 **	0.142	0.073	0.419 **	0.594 **	-0.440 **
夏季 Summer	风速 Wind speed	-0.377 **	-0.007	0.089	-0.194	0.034	0.074
	气温 Temperature	0.038	0.248 *	0.422 **	0.205 *	0.297 **	0.604 **
	相对湿度 RH	0.308 **	-0.237 *	-0.306 **	0.033	-0.265 *	0.163
秋季 Autumn	风速 Wind speed	-0.336 **	-0.459 **	-0.210 *	-0.403 **	-0.235 *	0.071
	气温 Temperature	-0.389 **	-0.073	-0.078	-0.128	-0.478 **	0.826 **
	相对湿度 RH	0.294 **	0.204	0.133	0.389 **	0.071	0.001
冬季 Winter	风速 WS	-0.258 *	-0.440 **	-0.16	-0.297 **	-0.415 **	0.248 *
	气温 Temperature	0.218 *	-0.334 **	0.373 **	0.428 **	-0.250 *	0.316 **
	相对湿度 RH	0.084	0.325 **	0.138	0.327 **	0.091	-0.360 **

注: ** 表示在置信度为 0.01 时,相关性显著; * 表示在置信度为 0.05 时,相关性显著.

Note: ** mean the correlation is significant when the confidence is 0.01. * mean the correlation is significant when the confidence is 0.05.

相关性分析表明,不同季节大气污染物浓度受气象因素影响不同.O₃浓度在 4 个季节中均与气温呈显著地正相关,在春季和冬季与相对湿度呈负相关.气温高时,太阳辐射较强,大气光化学反应增强,O₃生成速度加快,而相对湿度增加,对近地面的太阳辐射有削弱作用,使光化学反应减弱,抑制 O₃的生成^[37].与其他气态污染物不同,O₃浓度与风速相关性不强或呈弱正相关,风速的增加对 O₃浓度的影响有

两个方面:一方面影响垂直湍流运动,进而促使对流层顶高浓度 O_3 向地面传输,使 O_3 浓度升高;另一方面可以增强 O_3 的水平扩散,使 O_3 浓度降低^[38],不同风速条件下,对 O_3 的影响不同,使 O_3 浓度与风速相关性不明显. CO 浓度在 4 个季节均与风速呈显著负相关,在春、夏、秋的 3 个季节中与相对湿度呈显著正相关,表明大风天气有利于 CO 扩散,而高湿天气下可能会导致 CO 的积累. NO_2 浓度在春、秋、冬的 3 个季节与风速呈显著负相关,在冬季受相对湿度影响较大. SO_2 在春、秋、冬季与气温呈显著负相关,可能与气温升高时,大气湍流运动加强,污染物扩散加快有关^[39]. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 虽同为颗粒物,但是两者与气象因素相关性有所差异, $PM_{2.5}$ 与风速呈负相关,与相对湿度呈正相关,大雾天气会加重细颗粒物污染,甚至会出现雾霾天气,而 PM_{10} 在不同季节与气象因素关系不同.风向对污染物浓度有较大影响(图 7),对于呼和浩特市来说,当主导风向为东北风和偏北风时,风速较小,污染物在风力和热岛环流的作用下^[25],在市中心和西南部滞留,浓度升高;当主导风向转为西南风时,西南方向的喇叭口地形加强了风力作用,污染物扩散加快,从而浓度较低.另外,太阳辐射(尤其是紫外辐射)对近地面大气污染物也有较大影响.太阳辐射量增大,会加快大气光化学反应速率,臭氧等二次污染物生成速率增加^[40].同时,近地面大气中臭氧和气溶胶等污染物浓度升高,太阳辐射的吸收和散射增强,又对到达地面的太阳辐射具有减弱作用^[41].

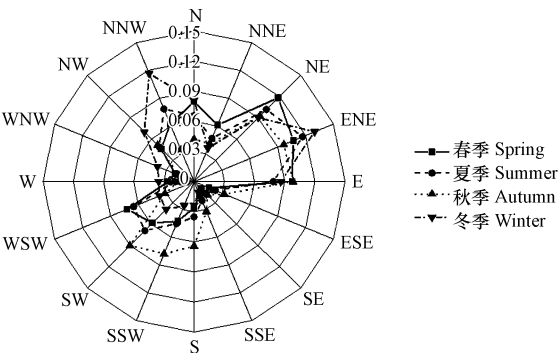


图 7 呼和浩特市春夏秋冬四季风向玫瑰图

Fig.7 Wind rose of Hohhot in spring, summer, autumn and winter

3 结论(Conclusion)

- (1)2017 年,呼和浩特市颗粒物和 O_3 污染最为严重, CO 和 SO_2 污染较轻, CO 、 NO_2 、 SO_2 、 PM_{10} 以及 $PM_{2.5}$ 均表现出冬高夏低的变化,而 O_3 呈相反的夏高冬低变化.
- (2) O_3 呈单峰型日变化,峰值出现在下午 15:00 左右; NO_2 呈较为特殊的单峰型日变化,夜间持续的高浓度可能与 NO 被 O_3 氧化产生 NO_2 并不断积累有关; CO 、 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 均呈双峰型日变化.
- (3)各监测点整体上污染程度由大到小为:小召>工大金川校区>糖厂>兴松小区>如意水处理厂>呼和浩特市一监>二十九中>化肥厂生活区.小召监测点主要的污染物为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ,工大金川校区的 SO_2 浓度较高,糖厂点位的 CO 浓度较高,二十九中、化肥厂生活区和呼和浩特市一监等 3 个监测点空气质量较为清洁.
- (4)气温是影响 O_3 浓度的重要气象因素,高温天气导致 O_3 的高浓度; $PM_{2.5}$ 浓度受相对湿度影响较大; CO 、 NO_2 和 SO_2 均与风速呈显著负相关,大风天气易于几种污染物扩散; PM_{10} 与各气象要素在不同的季节表现出不同的关系.
- (5)呼和浩特市空气污染治理应以颗粒物和臭氧为重点,尤其注重春、冬季颗粒物和夏季臭氧的防治.加强呼和浩特市冬季燃煤供暖过程的管理,加速推进煤改气、改电步伐,调整产业结构,开发风能等可再生能源,加强交通污染源的管理和控制力度,同时治理道路扬尘、工业粉尘和建筑工地扬尘,从而控制颗粒物污染;对呼和浩特市臭氧污染以及形成机理应进一步研究,从而确定 NO_x 和 $VOCs$ 排放的控制力度,以控制夏季 O_3 污染形势的恶化.另外,可以根据已有的国家源排放清单数据,进一步细化和完善呼

和浩特市大气污染物源排放清单,掌握污染源的基本情况,为政府开展大气污染防治工作以及环境决策提供依据.

参考文献 (References)

- [1] SONG C, WU L, XIE Y, et al. Air pollution in China: Status and spatiotemporal variations[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227(1): 334-347.
- [2] TAN Z F, LU K D, JIANG M Q, et al. Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: A case study from radical chemistry to O₃-VOC-NO_x sensitivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636(15): 775-786.
- [3] 严茹莎, 李莉, 安静宇, 等. 上海市夏季臭氧生成与其前体物控制模拟研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(1): 30-35.
YAN R S, LI L, AN J Y, et al. Simulation study of ozone generation and its precursors control in Shanghai during summer time[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(1): 30-35 (in Chinese).
- [4] SUN L, XUE L, WANG T, et al. Significant increase of summertime ozone at Mount Tai in Central Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(16): 10637-10650.
- [5] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(1): 14-21.
CHENG L J, WANG S, GONG Z Y, et al. Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(1): 14-21 (in Chinese).
- [6] TAO W, LI K X, BRIMBLECOMBE P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575(1): 1582-1596.
- [7] XING Y F, XU Y H, SHI M H, et al. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system[J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2016, 8(1): 69-74.
- [8] BROOK R D, RAJAGOPALAN S, POPE C A. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease an update to the scientific statement from the american heart association[J]. *Circulation*, 2010, 121(21): 2331-2378.
- [9] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(4): 468-471.
SONG Y, TANG X Y, FANG C, et al. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(4): 468-471 (in Chinese).
- [10] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM_{2.5}/PM₁₀ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, 34(1): 60-69.
DAO X, ZHANG L L, WANG C, et al. Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1): 60-69 (in Chinese).
- [11] 赵阳, 林晓辉, 胡恭任, 等. 南昌市秋季 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征、风险评价及来源分析[J]. *环境化学*, 2016, 35(3): 500-507.
ZHAO Y, LIN X H, HU G R, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} collected in autumn in Nanchang City[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(3): 500-507 (in Chinese).
- [12] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 820-829.
Xu P, Hao Q J, Ji D S, et al. Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei District, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 820-829 (in Chinese).
- [13] 耿红, 宣莹莹, 蔡夏童, 等. 太原市 2014 年春节期间常规大气污染物浓度变化及聚类分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 965-974.
GENG H, XUAN Y Y, CAI X T, et al. Mass concentration variation and cluster analysis of urban air pollutants in Taiyuan, Shanxi Province during Chinese New Year of 2014[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 965-974 (in Chinese).
- [14] 谢雨竹, 潘月鹏, 倪长健, 等. 成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 975-983.
XIE Y Z, PAN Y P, NI C J, et al. Temporal and spatial variations of atmospheric pollutants in urban Chengdu during summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 975-983 (in Chinese).
- [15] 智颖, 李婧. 呼和浩特市空气颗粒物影响因素研究[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(3): 26-30.
ZHI Y, LI J. The influence factors research of Hohhot air particulate matter[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(3): 26-30 (in Chinese).
- [16] 周海军, 杜远江, 都达古拉, 等. 呼和浩特市冬季 PM₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2016, 35(8): 1707-1714.
ZHOU H J, DU Y J, DU D G L, et al. Characterization and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons bound to PM₁₀ during winter in Hohhot[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1707-1714 (in Chinese).
- [17] 张存厚, 李福胜, 朝鲁门, 等. 呼和浩特市空气质量状况及与气象因子相关性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 87-93.
ZHANG C H, LI F S, ZHAO L M, et al. Correlations between air quality status and meteorological factors in Hohhot City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(2): 87-93 (in Chinese).
- [18] 薛敏, 王跃思, 孙扬, 等. 北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析[J]. *环境科学*, 2006, 27(2): 200-206.
XUE M, WANG S Y, SUN Y, et al. Measurement on the atmospheric CO Concentration in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 200-206 (in Chinese).
- [19] 凌宏, 王迎红, 胡波, 等. 2007 年夏季北京大气 CO 检测分析[J]. *环境化学*, 2009, 28(4): 567-570.
LING H, WANG Y H, HU B, et al. Observation and research on carbon monoxide in the atmosphere of Beijing during the summer time of 2007[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(4): 567-570 (in Chinese).
- [20] 周春艳, 王桥, 厉青, 等. 近 10 年长江三角洲对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 1921-1930.

- ZHOU C Y, WANG Q, LI Q, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric NO_2 column density of Yangtze River Delta in the decade[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 1921-1930 (in Chinese).
- [21] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 乌鲁木齐市大气污染物浓度的变化特征[J]. *环境化学*, 2015, 34(11): 2118-2126.
- ZHAO H, ZHENG Y F, XU J Q, et al. Variation characteristics of air pollutant concentrations in Urumqi[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(11): 2118-2126 (in Chinese).
- [22] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO_2 污染特征研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 1938-1945.
- ZHENG X X, LI L J, ZHAO W J, et al. Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO_2 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(12): 1938-1945 (in Chinese).
- [23] 贺鹏, 张先明. 中国燃煤发电厂烟气脱硫技术及应用[J]. *电力科技与环保*, 2014, 30(1): 8-11.
- Flue gas desulphurization technology and its application in coal-fired power generation of China[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2014, 30(1): 8-11 (in Chinese).
- [24] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(12): 3001-3008.
- WANG Z S, LI X T, CHEN T, et al. Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(12): 3001-3008 (in Chinese).
- [25] 司瑶冰, 宫春宁, 郑有飞. 呼和浩特市大气污染与天气气候的关系[J]. *气象科技*, 2005, 33(2): 173-177.
- SI Y B, GONG C N, ZHENG Y F. Correlation between air pollution density and climate in Hohhot[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(2): 173-177 (in Chinese).
- [26] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. $\text{PM}_{2.5}$ in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. *Particuology*, 2014, 13(2): 1-26.
- [27] 姜新华, 薛河儒, 张存厚, 等. 基于主成分分析的呼和浩特市空气质量影响因素研究[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(1): 75-79.
- JIANG X H, XUE H R, ZHANG C H, et al. Research on the influencing factors of air quality in Hohhot City based on principal component analysis[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(1): 75-79 (in Chinese).
- [28] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.
- ZHAO C X, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Temporal and spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during Winter and Spring in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418-427 (in Chinese).
- [29] ATKINSON R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(12-14): 2063-2101.
- [30] 王莉莉, 王跃思, 吉东生, 等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1077-1086.
- WANG L L, WANG Y S, JI D S, et al. Characteristics of atmospheric pollutants in Tianjin Binhai New Area during autumn and winter[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(7): 1077-1086 (in Chinese).
- [31] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 4706-4711.
- AN J L, WANG Y S, LI X, et al. Analysis of the relationship between NO , NO_2 and O_3 concentrations in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 4706-4711 (in Chinese).
- [32] LOUIE P K K, WATSON J G, CHOW J C, et al. Seasonal characteristics and regional transport of $\text{PM}_{2.5}$ in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(9): 1695-1710.
- [33] LIU Z, HU B, WANG L L, et al. Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(1): 627-642.
- [34] CABALLERO S, ESCLAPEZ R, GALINDO N, et al. Use of a passive sampling network for the determination of urban NO_2 spatiotemporal variations [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 63(1): 148-155.
- [35] GOMISCEK B, HAUCK H, STOPPER S, et al. Spatial and temporal variations of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and particle number concentration during the AUPHEP-project[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(24): 3917-3934.
- [36] 李军, 孙春宝, 刘咸德, 等. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 663-669.
- LI J, SUN C B, LIU X D, et al. Non-parameter statistical analysis of impacts of meteorological conditions on PM concentration in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(6): 663-669 (in Chinese).
- [37] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(3): 32-37.
- WANG C, WANG S, YANG B B, et al. Study of the effect of meteorological conditions on the ambient air ozone concentrations in Shenyang [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(3): 32-37 (in Chinese).
- [38] ZHANG H L, WANG Y G, HU J L, et al. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China[J]. *Environmental Research*, 2015, 140(1): 242-254.
- [39] HE J J, GONG S L, YU Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223(1): 484-496.
- [40] HERMAN J R, BHARTIA P K, TORRES O, et al. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16911-16922.
- [41] DICKERSON R R, KONDRAGUNTA S, STENCHIKOV G, et al. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog[J]. *Science*, 1997, 278(5339): 827-830.