地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol.11 No.1 | Feb. 2020
DOI: 10.7515/JEE192018
研究论文
ARTICLE

2010—2018 年西安市大气污染物变化特征分析

王叶琳，程 燕，严 璐，刘舒婷，严梦园
西安交通大学 人居环境与建筑工程学院，西安 710049

摘 要：日益严重的大气污染问题不仅对西安市的城市形象，还对人们的身体健康造成危害。对西安市 13 个国控环境空气质量自动监测站 6 类污染物的数据进行时空变化特征分析，对各污染物的相关性进行分析，并探讨大气污染原因，结果表明：2010—2018 年 SO_2 浓度显著降低，PM_{10} 和 NO_2 年均浓度总体并未呈现下降趋势，2013—2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势与 PM_{10} 浓度变化趋势相同，二者污染情况均较严重，CO 浓度呈减小趋势，2013—2016 年 O_3 的污染状况有恶化趋势；第二、三产业增加值的大幅上升所反映的工业、旅游业、交通运输、餐饮业的大规模发展，对西安空气质量有较大影响；SO_2 的工业减排对大气 SO_2 浓度水平下降效果明显，但 NO_x 和烟（粉）尘排放量的下降却没有反映在大气 NO_2 和颗粒物浓度下降上。说明大气 NO_2 来源除了工业来源外，还有其他重要来源（如：机动车排放、天然气燃烧产物），同时也反映了大气颗粒物来源的复杂，单纯依靠降低烟（粉）尘排放量无法有效降低颗粒物浓度。高增速的机动车保有量和能源消费结构均对西安市大气污染问题有重要影响。

关键词：大气污染物；时空分布；污染原因分析

Characteristics of variations of atmospheric pollutants over Xi'an during 2010—2018

WANG Yelin, CHENG Yan, YAN Lu, LIU Shuting, YAN Mengyuan
School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: ***Background, aim, and scope*** With the development of economy, the problem of air pollution is becoming more and more acute. Because of its special terrain and more anthropogenic emission activities, Xi'an has become one of the most polluted cities, seriously affecting its tourism development and the image of an international metropolis. In addition, air pollution also causes harm to people's health. The goals of this study are (1) to investigate the variation of atmospheric pollutants; (2) to analyse of the correlation of various pollutants; (3) to identify the causes of air pollution. This work provides reference for air pollution prevention and control in Xi'an. ***Materials and methods*** The concentration of atmospheric pollutants in Xi'an were monitored at 13 monitoring stations, from January 1, 2010 to December 31, 2018. We discussed the temporal and spatial variation of atmospheric pollutants, and made correlation analysis of various pollutants. ***Results*** The annual concentration

收稿日期：2019-02-22；**录用日期：**2019-05-23；**网络出版：**2019-05-28
Received Date: 2019-02-22; **Accepted Date:** 2019-05-23; **Online first:** 2019-05-28
基金项目：国家自然科学基金项目（41877308）
Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41877308)
通信作者：程 燕，E-mail: chengyan@xjtu.edu.cn
Corresponding Author: CHENG Yan, E-mail: chengyan@xjtu.edu.cn
引用格式：王叶琳，程 燕，严 璐，等. 2020. 2010—2018 年西安市大气污染物变化特征分析 [J]. *地球环境学报*, 11(1): 99–111.
Citation: Wang Y L, Cheng Y, Yan L, et al. 2020. Characteristics of variations of atmospheric pollutants over Xi'an during 2010—2018 [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(1): 99–111.

of SO_2 decreased significantly during 2010—2018, but the annual concentration of PM_{10} and NO_2 did not show a downward trend. The change trend of $PM_{2.5}$ annual concentration during 2013—2018 was the same as that of PM_{10}. The pollution situation of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were both serious, the CO annual concentration showed a downward trend, and the pollution situation of O_3 from 2013 to 2016 showed a deteriorating trend. ***Discussion*** The annual change of pollutant concentration is related to a series of "pollution control and haze reduction" work in Xi'an. The reduction of SO_2 concentration is related to the work of "coal-fired boiler disassembly" since 2013. However, the problem of NO_2 pollution has not improved because the promotion of "coal to gas" work effectively reduces SO_2 concentration, while the combustion of natural gas produces more nitrogen oxides. The decrease of CO concentration reflects that the promotion of clean energy for automobiles and public transport in Xi'an has been more effective in recent years. The deterioration of ozone pollution is mainly related to the increase of volatile organic pollutants (VOCs) and nitrogen oxides emissions. The concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} is restricted by many factors. It is necessary to coordinate the treatment of various pollution factors in order to alleviate $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution. ***Conclusions*** The large-scale development of industry, tourism, transportation and catering industry has great influence on air quality in Xi'an. Industrial emission reduction of SO_2 has a significant effect on the reduction of SO_2 concentration in the atmosphere, but the decrease of NO_x and dust emission is not reflected in the decrease of NO_2 and particulate matter concentration in the atmosphere. It shows that besides industrial sources, there are other important sources of atmospheric NO_2 (such as vehicle emissions and natural gas combustion products). What's more, it reflects the complexity of the sources of atmospheric particulate matter. Reducing the emissions of smoke (powder) dust alone cannot effectively reduce the concentration of particulate matter. High increment speed of motor vehicle ownership and energy consumption structure have an important impact on air pollution in Xi'an. ***Recommendations and perspectives*** The results indicate that further reduction of motor vehicle emissions and change of energy consumption structure must have an important impact on alleviating air pollution in Xi'an.

Key words: atmospheric pollutants; spatial and temporal distribution; analysis of pollution causes

随着经济的增长，城镇化和工业化发展的加快，大气污染事件在我国大部分地区都有发生，人类的生产生活质量直接受到影响。化工厂、火电厂、汽车等排放的氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳及其产生的臭氧和细颗粒物是影响人体健康的主要污染物，为了预防和减少空气污染，专家学者对城市大气污染进行了大量研究（张丽华等，2016）。这些研究主要集中在空气污染物的化学成分（Cheng et al，2012；Cheng et al，2016）、来源解析（Chen et al，2015）以及时空分布格局（Chen et al，2016；Xu et al，2016），包括时空变化或变化趋势的模拟。研究一个城市各监测站点污染物数据的时间和空间分布差异，能有效地反映出具体某区域在环境保护方面存在的问题和取得的成效。Wang et al（2014）通过对我国 31 个城市 2013—2014 年 6 种大气污染物时空变化的研究发现，尽管东南部地区秋季和西部地区春季也经常发生高污染事件，但北部地区的 $PM_{2.5}$、PM_{10}、CO 和 SO_2 浓度高于西部和东南部地区。羊兴等（2017）对喀什市 2015 年 3 个环境监测站的 6 类污染物逐时浓度数据进行了分析，得到了喀什市大气污染物时空分布特征。郭伟等（2014）利用西安市 2010—2012 年大气污染数据进行了时空分布特征分析，并探讨了污染状况与风向风速、降雨、雾霾天气及冬季采暖等因素的关联性。近几年，国家不断推动西部地区发展，在经济腾飞的同时，空气污染问题日益凸显。西安市由于其特殊的地形和较多的人为排放活动，成为空气污染最为严重的城市之一（周慧等，2005），严重影响了其旅游业发展和国际化大都市的形象。

本文通过对西安市 2010—2018 年 13 个站点环境监测数据的 6 类大气污染物的时空分布特征、污染物之间的相关性进行统计分析，并对污染成因进行探讨，以期对西安市大气污染防治工作提供参考。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

西安市地处关中平原中部，渭河流经城市北

DOI: 10.7515/JEE192018

部，南以秦岭为界，东以零河和灞源山地为界，西以太白山地及青化黄土台塬为界。西安市的气候为暖温带半湿润大陆性季风气候，全年四季分明，雨量适中，年平均降水量 537.5—1028 mm，市区年平均降水量约 585 mm。年平均气温 6.4—13.4℃，最冷月份 1 月平均气温 −0.9—5.4℃，最热月份 7 月平均气温 17.6—26.6℃。全年平均风速 1.3—2.6 $m\cdot s^{-1}$，地方风的盛行风向受局部地形变化影响较大，市区为东北风，周至、户县为西风，长安为东南风，蓝田为西北风。西安市的地理位置及气候不利于其春冬两季的大气污染物扩散。

1.2　数据来源

所用的环境监测数据来源于 13 个国控环境空气质量自动监测站，其位于污染较为集中的主城区及部分周边地区，分别是高压开关厂（莲湖区）、兴庆小区（碑林区）、纺织城（灞桥区）、小寨（雁塔区）、市人民体育场（新城区）、高新西区、经开区、长安区、阎良区、临潼区、草滩（未央区）、曲江文化集团（曲江新区）和广运潭（浐灞生态区）。监测指标为 SO_2、NO_2、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10} 24 h 平均值和 O_3 滑动 8 h 平均值（均为 AQI 值），参考公式 (1)（中华人民共和国环境保护部，2012a）将所有污染物 AQI 值转化为以 $\mu g\cdot m^{-3}$ 为单位的浓度数据。监测日期为 2010 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日。

$$AQI_x = \frac{AQI_{x\_up} - AQI_{x\_low}}{C_{x\_up} - C_{x\_low}} \times (C_x - C_{x\_low}) + AQI_{x\_low} \quad (1)$$

式中：C_x 是污染物 x 的日浓度，C_{x_up} 和 C_{x_low} 分别是大气污染物 x 的浓度范围的上限和下限；AQI_{x_up} 和 AQI_{x_low} 是对应于 C_{x_up} 和 C_{x_low} 的 AQI_x 值。

2　西安市大气污染的时空变化特征分析

2.1　时间变化特征分析

2.1.1　大气污染物年均值变化

图 1 为 2010—2018 年西安市六种主要大气污染物（SO_2、NO_2、CO、O_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$）浓度的逐年变化趋势。

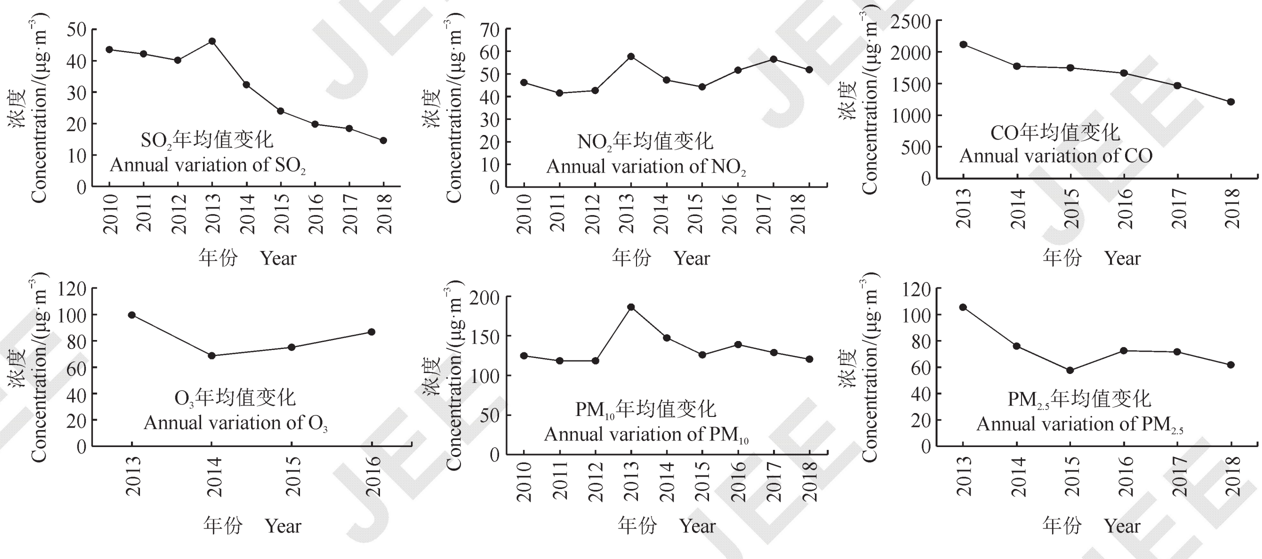

图 1　2010—2018 年西安市大气污染物年均值变化

Fig.1　Annual variation of air pollutants in Xi'an during 2010—2018

由 SO_2 浓度的逐年变化可知，2010—2018 年西安市年均 SO_2 浓度总体呈下降趋势，其中 2010—2012 年下降幅度较小，从 43.49 $\mu g\cdot m^{-3}$ 下降至 40.10 $\mu g\cdot m^{-3}$（年均下降 3.90%）；2013 年是污染严重年，SO_2 年均浓度回升至 46.16 $\mu g\cdot m^{-3}$，自 2013 年起下降趋势明显（2013—2018 年累计下降 68.46%），2018 年 SO_2 浓度下降至 14.56 $\mu g\cdot m^{-3}$，得益于西安市自 2013 年起治污减霾工作中从不间断地狠抓“燃煤锅炉拆改”，2013 年就拆改了 593 台燃煤锅炉。2014 年起，西安市范围内不再新建燃煤锅炉，新安装锅炉（包括集中供热锅炉）全部使用天然气或炼制天然气、煤层气等清洁能源，热力、天然气管网覆盖不到位的区域改用电、柴油等清洁能源。2015 年底，西安市建成区范围内 20 蒸

DOI: 10.7515/JEE192018

吨（指锅炉的供热水平，1 蒸吨 =1 $t\cdot h^{-1}$）以下地方单位燃煤锅炉已经实现“清零”。2013—2016 年 4 年间，西安市累计拆除燃煤锅炉 1482 台，共计 7065.26 蒸吨，2017 年更是提前超额完成了当年的燃煤锅炉拆除任务。

由 NO_2 浓度的逐年变化可知，2010—2018 年西安市 NO_2 年均浓度不降反升，2010 年的年均质量浓度 46.14 $\mu g\cdot m^{-3}$，随后两年 NO_2 年均浓度虽有所下降，但 2013 年 NO_2 年均浓度一度上升至 57.66 $\mu g\cdot m^{-3}$，之后在治污减霾工作的推动中，虽然 NO_2 有所下降，但 2017 年，NO_2 浓度又一次上升到 56.51 $\mu g\cdot m^{-3}$，这与西安市大力开展的压减燃煤政策有关，其中“煤改气”工作的推进在有效降低 SO_2 浓度的同时，天然气的燃烧却产生了更多的氮氧化物。2018 年 NO_2 浓度水平较 2017 年有所下降，可能与 2018 年西安市全面推进的“燃气锅炉低氮改造”工作有关。

由 CO 浓度的逐年变化可知，在统计期间，CO 的年均浓度从 2114.52 $\mu g\cdot m^{-3}$ 下降到 1209.00 $\mu g\cdot m^{-3}$，降低了 42.82%，反映出近年来西安市开展的对汽车及公共交通推广清洁能源工作较有成效。2013—2018 年 CO 超过国家空气质量标准二级限值（4000 $\mu g\cdot m^{-3}$）（中华人民共和国环境保护部，2012b）的天数为 51 天，总超标率为 2.40%，除 2013 年和 2016 年分别超标 32 天和 11 天以外，其余年份年均超标仅为 2 天。总体上看，CO 污染问题已得到遏制并趋于稳定。

由 O_3 浓度的逐年变化可知，从年均浓度变化看，2013—2016 年 O_3 年均浓度总体呈先下降后升高的趋势，2014 年达到最低值（68.59 $\mu g\cdot m^{-3}$），随后 O_3 浓度逐年上升，2016 年年均浓度为 86.68 $\mu g\cdot m^{-3}$。在 2013—2016 年 O_3 日最大 8 小时浓度监测期间，超过二级浓度限值（160 $\mu g\cdot m^{-3}$）的有 118 天，其中 2013 年超过二级浓度限值的天数为 52 天，污染最为严重，2014 年虽然有所缓解（8 天），但 2015 和 2016 年超过二级浓度限值的天数分别为 20 天和 37 天；结合 O_3 年均浓度变化和每年超标天数的变化，说明臭氧污染逐渐加重，臭氧污染主要来源于光化学反应产物，即大气的挥发性有机污染物（VOCs）和氮氧化物，在紫外线照射下，经过光化学反应产生了臭氧（牟敬锋等，2018）。故而近两年西安市在臭氧治理上也开展了挥发性有机物专项整治和机动车污染专项整治等相关工作。

由 PM_{10} 浓度的逐年变化可知，2010—2012 年，PM_{10} 年均浓度水平较为稳定，为 118.26—124.82 $\mu g\cdot m^{-3}$，2013 年 PM_{10} 浓度显著增长，上升至 186.23 $\mu g\cdot m^{-3}$，是年平均二级浓度限值（70 $\mu g\cdot m^{-3}$）的 2.66 倍，日均浓度超标率（日均浓度大于 150 $\mu g\cdot m^{-3}$）高达 49.60%。自 2013 年起，下降趋势明显（2013—2018 累计下降 35.40%），2018 年 PM_{10} 浓度达 120.30 $\mu g\cdot m^{-3}$（是年平均二级浓度限值的 1.72 倍，日均浓度超标率为 24.66%），与 2010 年基本持平，故总体上看，与其他污染物一样，2013 年 PM_{10} 污染相当严重，之后随着西安市治污减霾行动的开展，PM_{10} 污染有所缓解，但仍然较为严重。

由 $PM_{2.5}$ 浓度的逐年变化可知，2013—2018 年，$PM_{2.5}$ 年均浓度总体呈现先下降，于 2015 年达到最低值，随后污染情况有一定程度恶化，$PM_{2.5}$ 浓度有所上升。2013 年污染最为严重，$PM_{2.5}$ 年均浓度为 105.33 $\mu g\cdot m^{-3}$，日均浓度超标率（日均浓度二级限值为 75 $\mu g\cdot m^{-3}$）为 51.78%，随后 $PM_{2.5}$ 质量浓度开始降低，于 2015 年达到最低值（年均质量浓度为 57.53 $\mu g\cdot m^{-3}$，日均浓度超标率为 17.78%），2015—2018 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度有一定波动，截至 2018 年，$PM_{2.5}$ 年均浓度为 61.62 $\mu g\cdot m^{-3}$，日均浓度超标率为 25.75%，均比 2015 年有所上升。$PM_{2.5}$ 的浓度逐年变化趋势与 PM_{10} 的逐年变化趋势较为一致。

综上，2010—2018 年 SO_2 浓度显著降低，PM_{10} 和 NO_2 年均浓度总体并未呈现下降趋势，其他污染物（$PM_{2.5}$、CO、O_3）由于缺少 2010—2012 年的数据，只能说明 2013 年是一个污染情况严重的特殊年份。2013—2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势与 PM_{10} 浓度变化趋势相同，CO 浓度呈减小趋势，2013—2016 年 O_3 的污染状况有恶化趋势，需要引起有关部门的重视。

2.1.2 大气污染物月变化

图 2 为 2010—2018 年西安市大气污染物月均值变化。从 SO_2 浓度的逐月变化可知，西安市 SO_2 的月均浓度整体呈开口向上的抛物线，其中 12 月、1 月、2 月的浓度最高，9 年均值浓度分别为 56.59 $\mu g\cdot m^{-3}$、73.30 $\mu g\cdot m^{-3}$、52.02 $\mu g\cdot m^{-3}$，主要受采暖季燃煤的影响，冬季燃煤量较大，逆温较强，不利气象条件导致 SO_2 容易积累；6 月、

DOI: 10.7515/JEE192018

7 月、8 月的浓度最低，9 年均值浓度分别为 15.61 μg·m^{-3}、12.27 μg·m^{-3}、13.92 μg·m^{-3}，主要由于这些月份排放量较低，加之大气垂直运动活跃，扩散条件较好。分季节来看，2010—2018 年春季（3—5 月）、夏季（6—8 月）、秋季（9—11 月）、冬季（12 月、1 月、2 月）平均浓度分别为 25.54 μg·m^{-3}、13.93 μg·m^{-3}、24.12 μg·m^{-3}、61.64 μg·m^{-3}，整体呈现出冬季＞春季＞秋季＞夏季（冬季较高，春秋季相当，夏季较低）的特征。

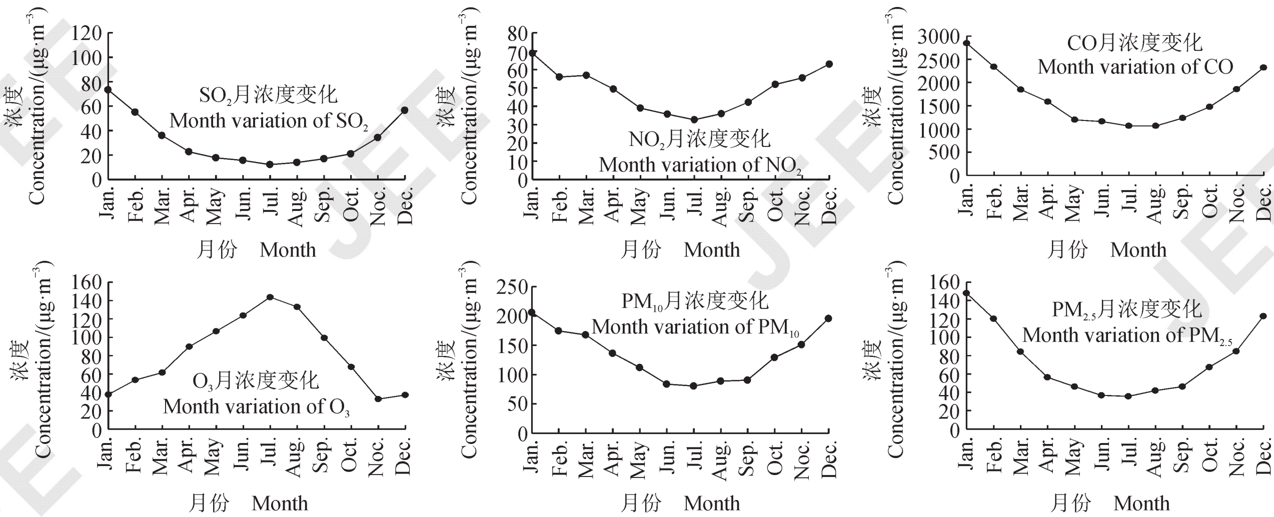

图 2　西安市大气污染物月均值变化

Fig.2　Month variation of air pollutants in Xi’an

从 NO_2 浓度的逐月变化可知，西安市 NO_2 的月均浓度整体呈开口向上的抛物线，但月均浓度差异没有 SO_2 差异显著，相较于 SO_2 的大幅增长（最低浓度月到最高浓度月增长 497.39%），NO_2 最低浓度月到最高浓度月增长仅为 111.64%。分季节来看，春季、夏季、秋季、冬季平均浓度分别为 48.40 μg·m^{-3}、34.72 μg·m^{-3}、49.80 μg·m^{-3}、62.55 μg·m^{-3}，整体呈现出冬季＞秋季＞春季＞夏季（冬季较高，春秋季相当，夏季较低）的特征，与 SO_2 季节分布特征相似。

从 CO 浓度的逐月变化可知，西安市 CO 的月均浓度整体呈开口向上的抛物线，其中 12 月、1 月、2 月的浓度显著升高，6 年均值浓度分别为 2321.21 μg·m^{-3}、2846.20 μg·m^{-3}、2337.31 μg·m^{-3}，主要受采暖季燃煤的影响，CO 作为煤不完全燃烧的产物，加之冬季较为稳定的大气状态，导致 CO 浓度显著高于其他季节（冬季 CO 浓度与春季、夏季、秋季相比分别增长了 62.24%、128.31%、64.62%）。分季节来看，2013—2018 年春季、夏季、秋季、冬季平均浓度分别为 1541.87 μg·m^{-3}、1095.68 μg·m^{-3}、1519.61 μg·m^{-3}、2501.57 μg·m^{-3}，整体呈现出冬季＞春季＞秋季＞夏季的特征。

从 O_3 浓度的逐月变化可知，西安市 O_3 的月均浓度整体呈开口向下的抛物线，其中 5 月、6 月、7 月、8 月的浓度最高，4 年均值浓度分别为 106.44 μg·m^{-3}、123.69 μg·m^{-3}、143.55 μg·m^{-3}、132.94 μg·m^{-3}，而 11 月、12 月、1 月的浓度明显低于其他月份，4 年均值浓度分别为 32.60 μg·m^{-3}、37.05 μg·m^{-3}、37.64 μg·m^{-3}。继 2013 年 O_3 污染严重后，2014 年 O_3 污染情况较 2013 年有明显缓解，但 2015 年与 2014 年相比，O_3 污染高峰持续月份增加，由原本的 6—8 月，增加到 5—8 月，2016 年 O_3 污染情况进一步恶化，4—9 月 O_3 月平均浓度均高于 100 μg·m^{-3}。分季节来看，2013—2016 年春季、夏季、秋季、冬季平均浓度分别为 85.95 μg·m^{-3}、133.39 μg·m^{-3}、66.55 μg·m^{-3}、42.73 μg·m^{-3}，整体呈现出夏季＞春季＞秋季＞冬季的特征，其中夏季的 O_3 浓度水平远远高于其他季节。

从 PM_{10} 浓度的逐月变化可知，西安市 PM_{10} 的月均浓度除 6—9 月低于 100 μg·m^{-3}（平均浓度为 85.77 μg·m^{-3}），其他月份 PM_{10} 的月均浓度均高于 110 μg·m^{-3}，尤其是 12 月、1 月、2 月、3 月，平均浓度高达 185.78 μg·m^{-3}。分季节来看，2010—2018 年春季、夏季、秋季、冬季平均浓度分

DOI: 10.7515/JEE192018

别为 138.45 μg·m^{-3}、84.27 μg·m^{-3}、123.31 μg·m^{-3}、191.89 μg·m^{-3}，整体呈现出冬季＞春季＞秋季＞夏季的特征。

从 $PM_{2.5}$ 浓度的逐月变化可知，西安市 $PM_{2.5}$ 的 12 月、1 月、2 月的浓度明显高于其他月份，6 年均值浓度分别为 123.10 μg·m^{-3}、147.99 μg·m^{-3}、120.27 μg·m^{-3}；6 月、7 月、8 月的浓度最低，6 年均值浓度分别为 36.76 μg·m^{-3}、35.60 μg·m^{-3}、41.38 μg·m^{-3}；其中，2 月到 4 月，$PM_{2.5}$ 质量浓度显著下降，累计降幅达 53.13%；11 月到 12 月，$PM_{2.5}$ 质量浓度显著上升，升幅达到 45.30%；较大的浮动主要是由于换季气象条件的改变和采暖季的影响。分季节来看，2013—2018 年春季、夏季、秋季、冬季平均浓度分别为 62.25 μg·m^{-3}、38.08 μg·m^{-3}、66.21 μg·m^{-3}、130.46 μg·m^{-3}，整体呈现出冬季＞秋季＞春季＞夏季（冬季显著较高，春秋季相当，夏季较低）的特征。

从各污染物月平均浓度变化趋势看，各污染物（除 O_3 外）每年的变化趋势都比较一致，均呈开口向上的抛物线，严重污染大部分是发生在 12 月、1 月、2 月，在 6 月、7 月、8 月达到最低值；O_3 月浓度变化趋势正好相反，呈现开口向下的抛物线，在 7 月或 8 月达到峰值。季节变化差异方面，除 O_3 浓度水平夏季显著高于其他季节，其他污染物均为冬季浓度水平最高。

2.2 空间变化特征分析

由于 2010—2012 年并不是每个站点都有数据。2013 年又是较为特殊的严重污染年，且较近的年份对于了解当前污染物分布更具有时效性。故关于西安市大气污染物空间分布特征的讨论主要利用近五年（2014—2018 年）大气污染物的数据。图 3a 为 2014—2018 年 13 个监测站点 SO_2 浓度逐年的变化趋势。总体上看，各个站点在监测数据统计年间，SO_2 浓度水平总体上均呈现下降趋势，其中高压开关厂、阎良区 SO_2 浓度相对高于其他站点，曲江文化产业集团浓度处于较低水平（2014—2018 年平均年均浓度为 17.10 μg·m^{-3}，2018 年年均浓度仅为 8.66 μg·m^{-3}）由于 SO_2 治理效果显著，各站点降幅在 38.45%—70.86%，其中降幅最大的是曲江文化产业集团（70.86%），其次是长安区（68.22%）、高压开关厂（61.45%）、临潼区（59.10%），13 个站点中有 9 个站点降幅在 50% 以上。

图 3b 为 2014—2018 年 13 个监测站点 NO_2 浓度逐年的变化趋势。总体上看，NO_2 污染情况最严重的区域出现在高新西区，其次为小寨、纺织城、兴庆小区，草滩的 NO_2 浓度水平低于其他地区。各个站点在监测数据统计年间，NO_2 的浓度水平波动较大，长安区、高新西区、阎良区、经开区、兴庆小区、曲江文化产业集团在 NO_2 浓度水平不降反增，其中长安区 NO_2 浓度由 2010 年的 34.27 μg·m^{-3} 上升到 2015 年的 53.14 μg·m^{-3}，年均增幅达 11%。在 13 个监测站点中，NO_2 浓度降幅最大的是市人民体育场，由 2010 年的 62.10 μg·m^{-3}，下降到 2015 年的 42.51 μg·m^{-3}，降幅达 11%。除阎良区、临潼区、长安区、曲江文化产业集团的 NO_2 浓度略有降低外，其他各监测站点 NO_2 浓度均升高，其中涨幅最大的甚至达到 58.32%（广运潭）。

图 3c 为 2014—2018 年 13 个监测站点 CO 浓度逐年的变化趋势。总体上看，草滩 CO 浓度水平显著高于其他地区，其次为曲江文化产业集团、经开区、广运潭，高压开关厂、临潼区、纺织城的 CO 浓度水平明显低于其他地区。2014—2018 年，各站点变化趋势大体与西安市整体变化趋势一致，均呈现下降趋势，各站点下降幅度在 10.55%—44.44%，其中曲江文化产业集团降幅最大，纺织城降幅最小。

图 3d 为 2014—2016 年 13 个监测站点 O_3 浓度逐年的变化趋势。总体上看，各站点 O_3 浓度变化趋势与西安市整体变化趋势一致，其中 2014—2016 年阎良区、兴庆小区、高压开关厂、经开区的增幅均在 40% 以上；西安 O_3 浓度不存在明显的空间分布差异，2016 年各监测站点 O_3 浓度水平在 79.24—95.99 μg·m^{-3}。

图 3e 为 2014—2018 年 13 个监测站点 PM_{10} 浓度逐年的变化趋势。总体上看，2014—2018 年，除广运潭 PM_{10} 浓度略有升高外，其他各站点均呈下降趋势（草滩降幅最大，为 32.21%），但各个站点 PM_{10} 污染水平仍然较高（各站点在统计期间年均值均超过 PM_{10} 年均二级浓度限值），污染范围较广，13 个站点 5 年平均值在 125.88—145.27 μg·m^{-3}。

图 3f 为 2014—2018 年 13 个监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度逐年的变化趋势。总体上看，2015 年是各个站

DOI: 10.7515/JEE192018

点 $PM_{2.5}$ 污染情况较好的一年，2015 年各站点 $PM_{2.5}$ 年均浓度水平相比 2014 年均有所下降（降幅在 16.74%—43.84%），但 2016 年各站点 $PM_{2.5}$ 浓度均有所上升（升幅在 5.63%—60.35%），2016—2018 年各站点浓度均有一定程度波动，总体呈下降趋势。$PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 污染情况相似，也具有污染水平较高、污染范围较广的特点，2014—2018 年各站点的平均值在 63.50—73.57 μg·m^{-3}。

从各污染物的角度来看，西安市各区域 SO_2 浓度均呈下降趋势，已不再是整个西安地区的主要大气污染物，说明西安的“燃煤锅炉改造”工作取得了不错的成效；NO_2 浓度水平波动较大，且污染情况呈加重趋势；西安市各区域 CO 的年均浓度均呈下降趋势，这体现出了西安市对汽车和公共交通推广清洁能源的成效。O_3 的浓度水平不存在明显的空间差异，各站点的浓度水平数据反映了 O_3 污染日趋严重的问题。PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 作为西安地区主要污染物的地位毋庸置疑，呈现污染范围广、浓度水平高的特点，二者的变化受到多种因素的共同影响，虽然总体上二者的污染程度呈现减小的趋势，但二者的年均浓度值均远高于各自的年均二级浓度限值，仍需要有关部门加大治理力度。

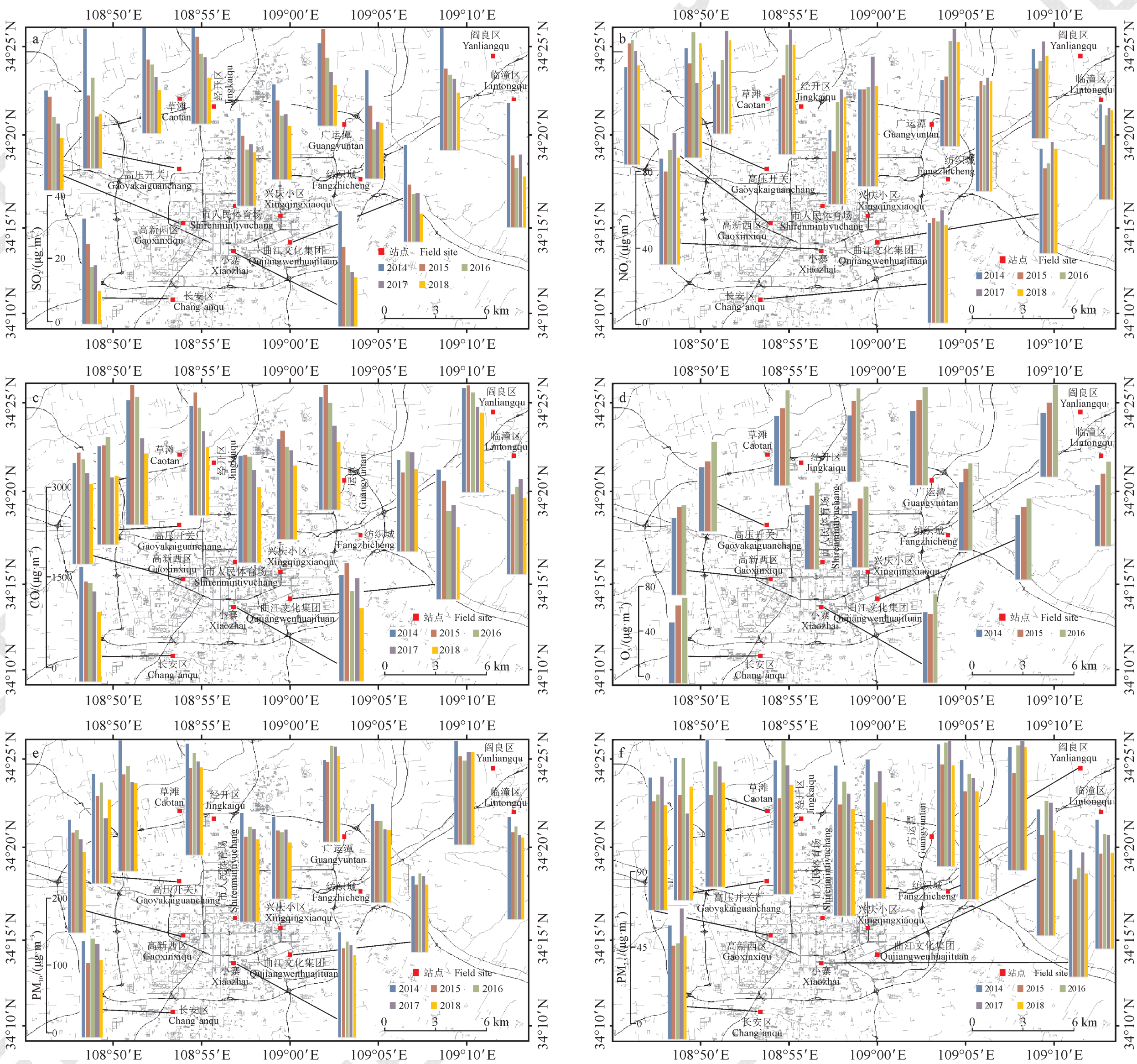

图 3　2014—2018 年 13 个监测站点大气污染物浓度年际变化趋势
（a：SO_2，b：NO_2，c：CO，d：O_3，e：PM_{10}，f：$PM_{2.5}$）

Fig.3　Annual variation trend of atmospheric pollutants concentration at 13 monitoring stations during 2014—2018
(a: SO_2, b: NO_2, c: CO, d: O_3, e: PM_{10}, f: $PM_{2.5}$)

DOI: 10.7515/JEE192018

3 大气污染物相关性分析

利用 SPSS 19.0 对不同季度污染物浓度间进行皮尔逊（Person）相关性分析（表 1），在 4 个季节（3—5 月为春季，6—8 月为夏季，9—11 月为秋季，12—2 月为冬季）中，PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的相关系数分别为 0.934、0.924、0.974、0.946，显著性水平 α=0.01 时，p 值均小于 0.01，说明 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 呈显著正相关。$PM_{2.5}$、PM_{10} 与气态污染物 SO_2、CO、NO_2 均存在着不同程度的正相关，说明了 $PM_{2.5}$、PM_{10} 与这 3 种气态污染物具有高度同源性。夏季 $PM_{2.5}$、PM_{10} 与 NO_2 的相关性不够显著，但与 O_3 相关性较为显著。气态污染物之间，SO_2 与 CO 呈显著正相关，是由于二者均受化石燃料燃烧及机动车尾气因素的影响；NO_2 与 CO、SO_2 相关性不显著，说明 NO_2 除了与上述两种因素有关以外，还受到其他因素的影响，如参与 O_3 的形成。

表 1 西安市大气污染物相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of air pollutants in Xi’an

季节 Season	污染物 Pollutants	污染物 Pollutants					
		SO_2	NO_2	PM_{10}	CO	O_3	$PM_{2.5}$
春季 Spring	SO_2	1					
	NO_2	0.515	1				
	PM_{10}	0.869	0.648	1			
	CO	0.822	0.405	0.712	1		
	O_3	−0.478	−0.113	−0.461	−0.621	1	
	$PM_{2.5}$	0.855	0.735	0.934	0.750	−0.475	1
夏季 Summer	SO_2	1					
	NO_2	0.371	1				
	PM_{10}	0.755	0.513	1			
	CO	0.535	0.090	0.558	1		
	O_3	0.404	−0.008	0.654	0.340	1	
	$PM_{2.5}$	0.868	0.403	0.924	0.626	0.600	1
秋季 Autumn	SO_2	1					
	NO_2	0.309	1				
	PM_{10}	0.630	0.775	1			
	CO	0.759	0.478	0.808	1		
	O_3	0.263	−0.100	0.144	0.111	1	
	$PM_{2.5}$	0.599	0.795	0.974	0.801	0.168	1
冬季 Winter	SO_2	1					
	NO_2	0.328	1				
	PM_{10}	0.718	0.671	1			
	CO	0.794	0.242	0.758	1		
	O_3	0.607	−0.272	0.289	0.616	1	
	$PM_{2.5}$	0.594	0.657	0.946	0.661	0.198	1

**：在 0.01 水平（双侧）上显著相关；*：在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

**: significant correlation at 0.01 level (bilateral); *: significant correlation at 0.05 level (bilateral).

4 污染原因分析

每个地区的地理位置是固定的，且从较长的时间尺度来研究某地的大气污染问题，可以认为该地区的气象条件变化不大。故就西安地区而言，近年来日益严重的污染情况与污染物的排放情况密不可分。

4.1 产业结构

2010—2017 年西安市经济高速发展，生产总值从 2010 年的 3242.86 亿元上升到 2015 年的 7471.89 亿元，累计增长 130.41%。西安市的产业结构总体上呈“三、二、一”的趋势分布。在 2010—2017 年，三大产业生产总值均有所增加，就各产业增加值占比情况看，第三产业增加值占比持续增长，由 2010 年的 53.82% 增加到 2017 年的 61.49%，这得益于交通运输、邮政业和旅游业的兴起，但同时也会对环境造成一定的破坏。第

DOI: 10.7515/JEE192018

二产业主要为工业和建筑业，其增加值所占比重虽有所下降（累计下降 7.11%），但由于生产总值增加值的绝对量大，2017 年第二产业增加值相较 2010 年增长了 163.24%，故第二产业的大力发展，对环境问题，特别是空气污染问题有不可忽视的影响。第一产业的变化趋势最稳定，截至 2017 年，在西安市生产总值增加值中仅占 3.76%。因此，分析西安市空气污染问题的成因，主要集中在讨论第二产业和第三产业对空气污染问题的影响。

第二产业主要是工业和建筑业，由此造成的主要是颗粒物的污染。从表 2 中可以看出，8 年年均第二产业增加值由大到小依次为：未央区＞雁塔区＞长安区＞莲湖区＞新城区＞灞桥区＞碑林区＞临潼区＞阎良区。其中，在这 8 年中，累计增幅较大的区域有长安区（195.33%）、阎良区（133.62%）、碑林区（110.64%）；尤其是长安区，2014 年以来第二产业的高速发展是导致长安区颗粒物污染更为严重的重要原因（2015—2016 年 PM_{10} 浓度增加了 32.94%，2016—2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度增加了 35.86%）。

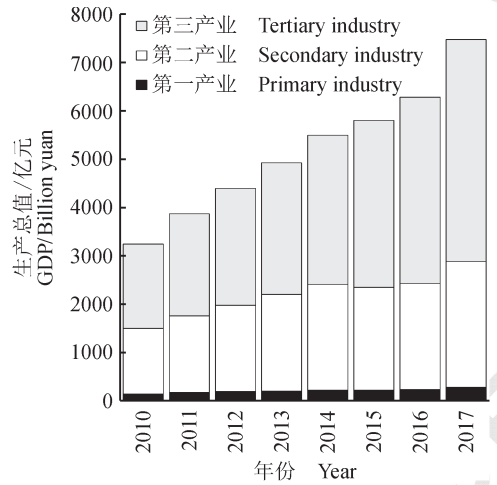

图 4　2010—2017 年西安市不同产业结构生产总值变化（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Fig.4　Gross Domestic Product (GDP) change of different industrial structures in Xi'an during 2010—2017 (Xi'an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi'an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

表 2　2010—2017 年西安市主要行政区第二产业增加值（亿元）（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Tab.2　Value added of the secondary industry in main administrative regions of Xi'an during 2010—2017 (Billion Yuan) (Xi'an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi'an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

年份 Year	新城区 Xincheng district	碑林区 Beilin district	莲湖区 Lianhu district	灞桥区 Baqiao district	未央区 Weiyang district	雁塔区 Yanta district	阎良区 Yanliang district	临潼区 Lintong district	长安区 Chang'an district
2010	132.45	85.08	174.84	97.54	218.78	211.34	50.33	79.15	136.07
2011	152.99	110.42	199.48	120.53	244.40	255.65	59.79	102.03	160.06
2012	174.54	92.89	212.22	134.69	265.08	311.46	75.16	120.43	160.16
2013	190.16	106.71	224.67	157.45	318.24	354.85	94.95	126.49	168.63
2014	186.67	120.03	193.90	141.61	371.00	389.82	105.61	116.26	217.23
2015	178.21	134.23	183.47	124.24	357.71	365.07	102.71	81.20	261.90
2016	192.05	151.36	194.55	117.98	379.68	338.05	102.39	59.25	332.60
2017	216.83	179.21	239.80	140.22	405.79	331.31	117.58	66.76	401.86

2010—2017 年西安市第三产业的蓬勃发展，如其中的旅游业、餐饮业、交通运输业的兴起，都会对环境产生一定的影响，尤其是空气质量。从表 3 中可以看出，8 年年均第三产业增加值由大到小依次为：雁塔区＞碑林区＞莲湖区＞未央区＞新城区＞长安区＞灞桥区＞临潼区＞阎良区。其中，2010—2015 年累计增幅由大到小依次是灞桥区（174.46%）＞雁塔区（106.74%）＞碑林区（98.49%）＞未央区（97.76%）＞莲湖区（92.99%）＞长安区（91.22%）＞阎良区（78.97%）＞临潼区（77.92%）＞新城区（63.14%），2015—2017 年累计增幅由大到小依次是长安区（64.87%）＞灞桥区（56.75%）＞阎良区（54.60%）＞临潼区（50.43%）＞雁塔区（48.75%）＞莲湖区（30.64%）＞碑林区（27.74%）＞新城区（26.44%）＞未央区（24.33%）。各区的第三产业增加值较高的绝对量和较快的增长速度可能是 O_3 污染逐年加重的原因。

DOI: 10.7515/JEE192018

表 3 2010—2017 年西安市主要行政区第三产业增加值（亿元）（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Tab.3 Value added of the tertiary industry in main administrative regions of Xi'an during 2010—2017 (Billion Yuan) (Xi'an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi'an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

年份 Year	新城区 Xincheng district	碑林区 Beilin district	莲湖区 Lianhu district	灞桥区 Baqiao district	未央区 Weiyang district	雁塔区 Yanta district	阎良区 Yanliang district	临潼区 Lintong district	长安区 Chang'an district
2010	193.57	273.82	202.15	61.90	182.63	386.91	35.56	45.88	112.67
2011	226.90	326.29	237.70	72.13	222.29	468.52	42.37	54.45	135.89
2012	254.38	374.07	267.18	82.53	250.74	525.11	46.63	61.47	150.68
2013	281.59	419.05	302.01	93.26	281.32	581.61	52.00	67.34	166.35
2014	280.41	497.87	345.63	149.98	331.08	723.02	56.43	74.36	194.53
2015	315.79	543.51	390.13	169.89	361.17	799.90	63.64	81.63	215.45
2016	348.61	590.32	427.36	192.07	392.14	897.38	68.99	93.27	236.95
2017	399.27	694.28	509.67	266.31	438.08	1189.84	98.39	122.80	355.22

4.2 工业污染

城市中几乎所有的工业生产都会排放污染大气的有害物质，而电力、冶金、化工、水泥等行业在生产过程中向大气排放工艺尾气和燃料燃烧烟气造成的大气污染特别严重。表 4 为 2010—2017 年西安市工业废气排放情况，统计数据显示，2010—2015 年 SO_2 和 NO_x 的排放量下降了 50% 左右，但烟（粉）尘排放量在统计期间无明显好转；随着西安市治污减霾工作力度的加强，2015—2017 年，SO_2、NO_x 和烟（粉）尘排放量显著下降，分别下降了 88.91%、66.90%、83.23%。SO_2 的工业减排对大气 SO_2 浓度水平下降效果明显，但 NO_x 和烟（粉）尘排放量的下降却没有反映在大气 NO_2 和颗粒物浓度下降上。说明大气 NO_2 来源除了工业来源外，还有其他重要来源（如：机动车排放、天然气燃烧产物），同时也反映了大气颗粒物来源的复杂，单纯依靠降低烟（粉）尘排放量不能降低颗粒物浓度。

表 4 2010—2017 年西安市工业废气排放情况（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Tab.4 Emissions of industrial exhaust gs in Xi'an during 2010—2017 (Xi'an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi'an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

指标 Item	年份 Year 2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
SO_2 排放量 Emissions of SO_2 / t	81505.83	97884.02	83062.90	64664.15	62604.03	38691.36	4913.89	3904.20
NO_x 排放量 Emissions of NO_x / t			41857.70	34921.76	31823.37	22364.26	6168.56	7402.60
烟（粉）尘排放量 Emissions of Smoke and dust / t			17462.58	13658.34	21985.40	16443.53	2853.13	2757.50

4.3 交通污染

随着社会经济的发展，城市交通越来越发达，2010—2017 年西安市机动车保有量高速增长，2010—2017 年西安市机动车保有量年均增幅 12.67%（图 5）。机动车辆等交通运输工具，排放的尾气含有多种大气污染物，这也是加剧西安市大气污染的重要原因之一。尽管近年来西安市开展了机动车污染整治工作，由 CO 排放量的减小，可以看出机动车整治工作有一定成效，但西安市机动车基数的持续增加，使得 O_3 前体物排放量不断增加，由光化学反应形成的二次气溶胶使得西安地区颗粒物污染形势仍然很严峻。因此，机动车限行常态化有助于缓解西安市 O_3 污染问题。

4.4 西安市能源结构及消耗

一直以来，陕西省是能源大省，一直呈现出以

DOI: 10.7515/JEE192018

煤品消费为主导的能源消费结构，故西安市的能源消费结构也以煤品消费为主导。观察表 5 发现，煤炭消费在 2010 年达到峰值，之后每年都有所下降，且在 2016—2017 年有较大降幅（9.08%），煤炭消费量的下降与西安市“燃煤锅炉拆改”工作的大力开展有关，这也使得西安市 SO_2 浓度在开展相关工作以来不断下降。在改善传统能源引发的污染问题时，提倡使用清洁能源以调整能源结构被提上日程。天然气消费量在 2010—2016 年由 0.74 亿立方米上升至 3.23 亿立方米，2016—2017 年煤炭消费量的大幅下降，对应的是天然气消费量的大幅上升（由 3.23 亿立方米上升到 14.5 亿立方米，升幅达 348.92%），由此导致了西安市 NO_2 浓度水平的上升，当前西安市有关部门开展“燃气锅炉低氮改造”，以缓解由大量使用天然气而带来的 NO_2 污染问题。

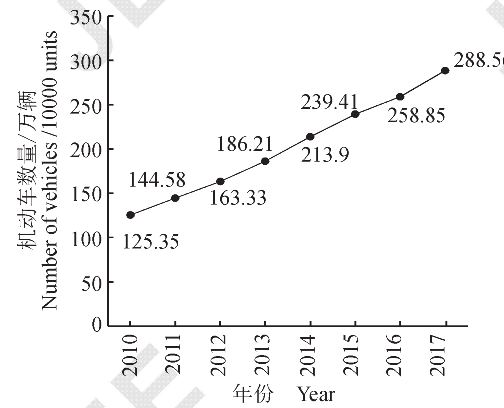

图 5　2010—2017 年西安市机动车数量年际变化图（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Fig.5　Annual variation of vehicle number in Xi’an during 2010—2017 (Xi’an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi’an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

表 5　2010—2017 年西安市能源消费情况（西安市统计局和国家统计局西安调查队，2011，2012，2013，2014，2015，2016，2017，2018）

Tab.5　Energy consumption in Xi’an during 2010—2017 (Xi’an Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Xi’an, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

能源 Energy	年份 Year 2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
煤炭消费量 / 万吨 Coal consumption /10000 tons	789.18	826.91	837.65	802.49	793.70	781.71	740.95	673.70
天然气消费量 / 亿立方米 Natural gas consumption /100 million cubic meters	0.74	1.43	1.60	1.77	2.55	2.56	3.23	14.50

5　结论

（1）从年际变化看，2010—2018 年 SO_2 浓度显著降低，PM_{10} 和 NO_2 年均浓度总体并未呈现下降趋势，由于缺少其他污染物（$PM_{2.5}$、CO、O_3）2010—2012 年的数据，只能说明 2013 年是一个污染情况严重的特殊年份。2013—2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势与 PM_{10} 浓度变化趋势相同，CO 浓度呈减小趋势，2013—2016 年 O_3 的污染状况有恶化趋势，需要引起有关部门的重视。从月平均浓度变化趋势看，各污染物（除 O_3 外）每年的变化趋势都比较一致，均呈开口向上的抛物线，严重污染大部分是发生在 12 月、1 月、2 月，在 6 月、7 月、8 月达到最低值；O_3 月浓度变化趋势正好相反，呈现开口向下的抛物线，在 7 月或 8 月达到峰值。季节变化差异方面，除 O_3 浓度水平夏季显著高于其他季节，其他污染物均为冬季浓度水平最高。

（2）从各污染物的角度来看，西安市各区域 SO_2 浓度均呈下降趋势，已不再是整个西安地区的主要大气污染物；NO_2 浓度水平波动较大，且污染情况呈加重趋势；西安市各区域 CO 的年均浓度均呈下降趋势；O_3 的浓度水平不存在明显的空间差异，各站点的浓度水平数据反映了 O_3 污染日趋严重的问题。PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 作为西安地区主要污染物的地位毋庸置疑，呈现污染范围广、浓度水平高的特点，二者的变化受到多种因素的共同影响，虽然总体上二者的污染程度呈现减小的趋势，但二者的年均浓度值均远高于各自的年均二级浓度限值，仍需要有关部门加大治理力度。

（3）通过各大气污染物的相关性分析，发现：PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 呈显著正相关，且 $PM_{2.5}$、PM_{10} 与气态污染物 SO_2、CO、NO_2 具有高度同源性。

DOI: 10.7515/JEE192018

（4）第二、三产业增加值的大幅上升所反映的工业、旅游业、交通运输、餐饮业的大规模发展，对西安空气质量有较大影响；SO_2 的工业减排对大气 SO_2 浓度水平下降效果明显，但 NO_x 和烟（粉）尘排放量的下降却没有反映在大气 NO_2 和颗粒物浓度下降上。说明大气 NO_2 来源除了工业来源外，还有其他重要来源（如：机动车排放、天然气燃烧产物），同时也反映了大气颗粒物来源的复杂，单纯依靠降低烟（粉）尘排放量无法有效降低颗粒物浓度。高增速的机动车保有量和能源消费结构均对西安市大气污染问题有重要影响。

参考文献

郭　伟, 程　燕, 樊　巍, 等. 2014. 西安市大气污染物浓度特征及影响因素分析 [J]. *地球环境学报*, 5(4): 235–242. [Guo W, Cheng Y, Fan W, et al. 2014. Characteristics and affecting factors of atmospheric pollutants in Xi'an [J]. *Journal of Earth Environment*, 5(4): 235–242.]

牟敬锋, 樊静洁, 严宙宁, 等. 2018. 2016 年深圳市大气 $PM_{2.5}$ 污染状况及其影响因素 [J]. *卫生研究*, 47(3): 406–412. [Mou J F, Fan J J, Yan Z N, et al. 2018. Analysis on the pollution characteristics and influence factors of $PM_{2.5}$ in Shenzhen City in 2016 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 47(3): 406–412.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2011. 西安统计年鉴——2011 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2011. Xi'an statistical yearbook—2011 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2012. 西安统计年鉴——2012 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2012. Xi'an statistical yearbook—2012 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2013. 西安统计年鉴——2013 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2013. Xi'an statistical yearbook—2013 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2014. 西安统计年鉴——2014 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2014. Xi'an statistical yearbook—2014 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2015. 西安统计年鉴——2015 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2015. Xi'an statistical yearbook—2015 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2016. 西安统计年鉴——2016 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2016. Xi'an statistical yearbook—2016 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2017. 西安统计年鉴——2017 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2017. Xi'an statistical yearbook—2017 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 2018. 西安统计年鉴——2018 [M]. 北京: 中国统计出版社. [Xi'an Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Xi'an. 2018. Xi'an statistical yearbook—2018 [M]. Beijing: China Statistics Press.]

羊　兴, 赵克明, 闵　月, 等. 2017. 2015 年喀什市大气颗粒物的时空分布特征 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 11(5): 83–88. [Yang X, Zhao K M, Min Y, et al. 2017. Spatial and temporal distribution of atmospheric particulates over Kashgar City in 2015 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 11(5): 83–88.]

张丽华, 武捷春, 包玉海, 等. 2016. 西安市 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征研究 [J]. *环境工程*, 34(2): 87–90, 107. [Zhang L H, Wu J C, Bao Y H, et al. 2016. Study on the temporal and spatial distribution characteristics of $PM_{2.5}$ in Xi'an City [J]. *Environmental Engineering*, 34(2): 87–90, 107.]

中华人民共和国环境保护部. 2012a. 环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）（HJ 633—2012）[S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2012a. Technical regulation on ambient air quality index (on trial) (HJ 633—2012) [S]. Beijing: China Environmental Science Press.]

中华人民共和国环境保护部. 2012b. 环境空气质量标准（GB 3095—2012）[S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2012b. Ambient air quality standard (GB 3095—2012) [S]. Beijing: China Environmental

Science Press.]

周 慧 , 王自发 , 安俊岭 , 等 . 2005. 城市空气污染持续维持机制研究Ⅰ. 2002 年西安市空气污染持续维持过程分析及其气象成因 [J]. *气候与环境研究* , 10(1): 124–131. [Zhou H, Wang Z F, An J L, et al. 2005. The mechanism of urban air pollution persistence part Ⅰ: the analysis of air pollution persistence and its relate meteorology in Xi'an in 2002 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 10(1): 124–131.]

Chen P L, Wang T J, Hu X, et al. 2015. Chemical mass balance source apportionment of size-fractionated particulate matter in Nanjing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(5): 1855–1867.

Chen T, He J, Lu X W, et al. 2016. Spatial and temporal variations of $PM_{2.5}$ and its relation to meteorological factors in the urban area of Nanjing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9): 921.

Cheng M C, You C F, Cao J J, et al. 2012. Spatial and seasonal variability of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ aerosols in 14 major cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 60: 182–192.

Cheng Z, Luo L N, Wang S X, et al. 2016. Status and characteristics of ambient PM2.5 pollution in global megacities [J]. *Environment International*, 89/90: 212–221.

Wang Y G, Ying Q, Hu J L, et al. 2014. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013—2014 [J]. *Environment International*, 73: 413–422.

Xu G, Jiao L M, Zhao S L, et al. 2016. Spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ concentration in China [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 21(4): 358–368.

（上接 71 页）

Ge J Y, Guo Z T, Zhao D A, et al. 2014. Spatial variations in paleowind direction during the last glacial period in North China reconstructed from variations in the anisotropy of magnetic susceptibility of loess deposits [J]. *Tectonophysics*, 629: 353–361.

Gong H J, Zhang R, Yue L P, et al. 2015. Magnetic fabric from red clay sediments in the Chinese Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 5: 9706.

Jelinek V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks [J]. *Tectonophysics*, 79(3/4): T63–T67.

Lagroix F, Banerjee S K. 2002. Paleowind directions from the magnetic fabric of loess profiles in central Alaska [J]. *Earth and Planetary Science Letters,* 195(1/2): 99–112.

Lagroix F, Banerjee S K. 2004. The regional and temporal significance of primary aeolian magnetic fabrics preserved in Alaskan loess [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 225(3/4): 379–395.

Liu X M, Xu T C, Liu T S. 1988. The Chinese loess in Xifeng, Ⅱ. A study of anisotropy of magnetic susceptibility of loess from Xifeng [J]. *Geophysical Journal International*, 92(2): 349–353.

Liu X M, Xu T C, Liu T S. 1990. Anisotropy of magnetic susceptibility and origin of the Chinese loess and its significance to the quaternary research [J]. *Science in China (Series B)*, 33(2): 235–245.

Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 25(1/2): 33–48.

Wang J L. 1998. The anisotropy of loess magnetic susceptibility in the northeastern fringe of Qinghai-Xizang Plateau as an indicator of palaeowind direction [J]. *Chinese Geographical Science*, 8(1): 85–90.

Xie X J, Xian F, Wu Z K, et al. 2016. Asian monsoon variation over the late Neogene—early Quaternary recorded by anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) from Chinese loess [J]. *Quaternary International*, 399: 183–189.

Zhang R, Kravchinsky V A, Zhu R X, et al. 2010. Paleomonsoon route reconstruction along a W—E transect in the Chinese Loess Plateau using the anisotropy of magnetic susceptibility: Summer monsoon model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(3/4): 436–446.

Zhu R X, Liu Q S, Jackson M J. 2004. Paleoenvironmental significance of the magnetic fabrics in Chinese loess-paleosols since the last interglacial (<130 ka) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1/2/3/4): 55–69.

DOI: 10.7515/JEE192018