

# 我国城市臭氧污染防治现状研究综述

杨俊 布多\* 刘君 杜梅

(西藏大学理学院 拉萨 850000)

**【摘要】**中国知网数据库中关于“臭氧污染”文献综述表明,我国城市臭氧污染整体形势较为严峻,且区域化特征明显。以京津冀及周边区域、长三角区域和珠三角区域的城市群为代表的北部、东部地区臭氧污染较为严重。中西部地区城市的臭氧污染状况整体较轻,但是部分地区和城市受地形和气象条件的影响,也出现过严重的臭氧污染。因此,不断完善臭氧监测体系,针对性加强臭氧前体物NO<sub>x</sub>和VOCs的协同控制,建立科学、合理、完善的臭氧治理体系是十分必要的。

**【关键词】**城市臭氧污染; 污染治理; 中国

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 1673-288X(2022)04-0086-05

DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202204086

臭氧在常温下是一种具有特殊臭味的蓝色气体,氧化性较强。大气平流层中臭氧占比超过90%,且平流层中的臭氧可作为地球保护层,吸收太阳光中的紫外线。而近地面臭氧浓度过高,则会对人体健康有严重威胁<sup>[1]</sup>,并造成农作物产量下降<sup>[2]</sup>,损害森林生态功能<sup>[3]</sup>。因此,近年来臭氧污染防治逐步纳入我国大气污染防治工作议事日程。

近年来,我国臭氧污染形势日益严峻。在中国知网数据库总库中,以“臭氧污染”为主题,获得1988—2020年的年度论文发表趋势图(图1)。由图1可见,自1988年以来,关注臭氧污染的研究论文数量不断上升,特别是2014年以来,关于臭氧污染的论文发表数量大幅度地增加。臭氧作为一种典型的二次污染物,其形成机理、时空分布特征以及应对措施是当前研究的热点。从全国整体来看,我国臭氧污染呈现区域化的特点,大型城市群的臭氧污染更为严重。

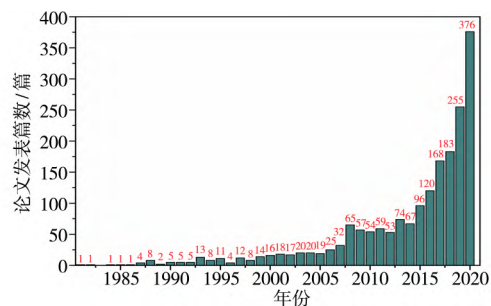


图1 中国知网“臭氧污染”年度论文发表趋势

## 1 臭氧研究进展

国外臭氧污染研究较早,自20世纪40年代美国洛杉矶光化学烟雾事件以来,国外就开展了对臭氧污染的系统性研究。臭氧是光化学烟雾的主要成分之一,可作为光化学烟雾的特征物质。当前臭氧污染在全球范围内的大城市和工业集中区域都已出现过,且日趋严重。我国工业化进程起步相对较晚,20世纪70年代在甘肃省兰州市西固区出现过光化学烟雾现象<sup>[4]</sup>,这是我国最早被确认的存在光化学烟雾

基金项目:西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目(2019-GSP-S039);中央支持地方高校改革发展专项(藏财预指(2022)1号);

重点研发计划项目子课题“低温低压缺氧环境工业固废资源化过程环境风险管控研究”(2019YFC1904103-04)

作者简介:杨俊,在读硕士研究生,主要研究方向为大气环境科学

通讯作者:布多,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为环境化学与环境生态学

现象的地区。李金龙等<sup>[5]</sup>对此研究认为,兰州市西固区的光化学烟雾事件是由当地石油化工厂排放废气造成的,光化学氧化剂浓度最高值出现在10:00到14:00之间。在此之后,我国陆续开展了臭氧污染的相关研究,但一直较为零散,且缺乏系统性。直到2012年《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)发布后,全国339个地级及以上城市相继展开了臭氧监测工作。目前,关于臭氧污染的研究和分析主要基于观测和数值模拟两大类方法<sup>[6]</sup>。

基于观测开展臭氧污染研究较为常见。例如通过仪器监测、卫星遥感、统计学分析方法等途径,分析臭氧浓度时空分布特征及其相关影响因素。空气质量监测能够实时动态掌握监测区域内各种污染物的具体分布情况,精准反应空气污染程度,以及了解影响空气质量的各类因素<sup>[7]</sup>。生态环境部(<http://www.mee.gov.cn/>)的信息显示,目前我国已经建立覆盖全国339个地级及以上城市的空气质量监测体系,这为我国臭氧和其他空气污染物现状分析和治理对策研究提供了重要数据支撑。

空气质量模型是研究大气复合污染形成机制以及区域污染联防联控的有效手段,目前利用数值模拟法针对性地研究大气复合污染已经成为一种趋势。空气质量模型可用于测算源分担率,能够帮助制定有效的削减污染物排放政策。当前国际上典型的空气质量模式主要包括ISC3、AERMOD、ADMS、CALPUFF等法规化中小尺度模型,NAQPMS、CAMX、WRF-CHEM、CMAQ等综合型区域尺度模型和GEOS-CHEM等全球尺度空气质量模型。根据实际条件,选择合适的空气质量模型能够准确分析臭氧等大气污染物的时空演变规律,为有关部门制定大气污染治理提供科学参考。

## 2 我国城市臭氧污染现状

### 2.1 我国城市臭氧污染的整体情况

目前我国城市臭氧污染严重区域主要集中在

在我国东部沿海发达地区<sup>[8]</sup>。图2为全国338个地级及以上城市各项污染物的月均值,数据源于生态环境部网页2016年1月到2020年12月城市空气质量月报(无2016年12月)。

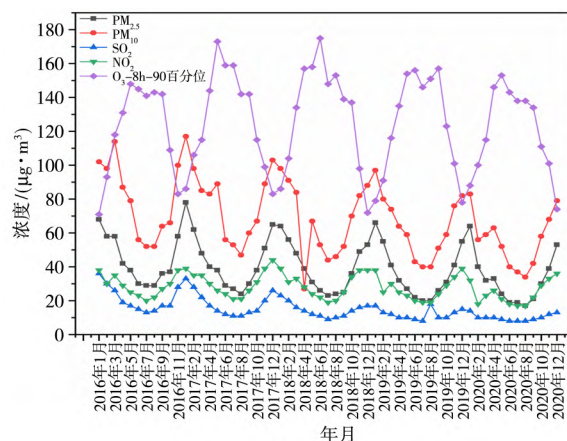


图2 2016年1月至2020年12月各项空气污染物浓度趋势

近十年来,我国空气污染的关注点为颗粒物引致的污染,并采取一系列措施解决颗粒物污染问题。自2013年实施《大气污染防治行动计划》以来,PM<sub>2.5</sub>等污染物的空气污染形势有所减缓。从图2中可以发现颗粒物、SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>等污染物浓度呈现出波动下降趋势。ZHENG等<sup>[9]</sup>研究也证明这一趋势:2013—2017我国排放的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>分别下降了59%、21%、23%、36%和33%。然而与之相比,臭氧污染态势却不容乐观。

图2显示,2016年以来臭氧浓度一直处于较高水平。全国臭氧浓度(第90百分位数)由2016年141.54μg/m<sup>3</sup>上升到2018年153.21μg/m<sup>3</sup>,而且在人口稠密和工业发达的地区臭氧浓度更高,臭氧分布有明显的聚集性和相似性规律<sup>[10]</sup>。从2016年开始,臭氧已经在上海和北京等城市成为首要的污染物,到了2018年,全国共有121个城市臭氧浓度超标,超标率达到35.8%<sup>[11]</sup>。根据2019年中国生态环境公报与2018年相比,全国337个城市的PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>浓度下降,臭氧浓度上升,PM<sub>2.5</sub>和臭氧超标天数比例上升。在168个地级及以上城市中,以臭氧为首要污染物的超标天数占总

超标天数的 46.4%。其中,京津冀及周边区域和长三角区域以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数比例分别为 48.2% 和 49.5%。臭氧污染逐渐成为主要的环境空气质量问题。

王鑫龙等<sup>[12]</sup>对我国 2015—2017 年 338 个城市臭氧浓度监测数据分析表明,臭氧每年月均值变化曲线基本呈“单峰状”,此结论与图 2 显示的臭氧浓度变化趋势一致。臭氧浓度峰值出现在夏季月份,而冬季月份臭氧浓度最低,这与臭氧的形成条件有较大关系。在城市中,臭氧作为一种典型的二次污染物,主要由前体物经过一系列化学反应生成,在温度较高、相对湿度较低时很容易造成臭氧大量积累,而在夏季阳光强烈的午后臭氧浓度往往是最高的。与其他污染物相比,臭氧的污染评价标准有所不同<sup>[13]</sup>,臭氧污染水平的计量通常采用最大 8 小时平均值,以此可准确有效地反映臭氧污染的真实情况。

我国整体的臭氧污染形势严重,同时各地区臭氧污染具体情况又不尽相同。我国幅员辽阔,气候类型较多,地形复杂,各地太阳辐射量差异明显,人口基数大且集中在大城市,再加上工业发展区域不平衡,这就导致我国不同地区的臭氧污染情况存在较大差异。表 1 列出部分城市臭氧污染特征。

表 1 我国部分城市臭氧污染特征

城市	研究年月	指标	最大值	日峰值	月峰值
			或范围/ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	出现时间	出现时间
北京 <sup>[14]</sup>	2013—2017	$\text{O}_3$ -8h	311.9	13:00—18:00	5—8
上海 <sup>[15]</sup>	2014—2018	$\text{O}_3$ -8h	268.0~ 291.0	13:00—14:00 ( $\text{O}_3$ -1h)	5—8
银川 <sup>[16]</sup>	2017	$\text{O}_3$ -8h	160.0 <sup>#</sup>	14:00—18:00	6—7
西安 <sup>[17]</sup>	2014—04— 2017—07	$\text{O}_3$ -8h	148.5	16:00	7
哈尔滨 <sup>[18]</sup>	2015—2018	$\text{O}_3$ -8h	229.0	13:00—15:00	5—7
拉萨 <sup>[19]</sup>	2017 年	$\text{O}_3$ -8h	138.0	17:00—19:00	5

注: #表示数据从文献图中粗略估计获得的。

## 2.2 东部地区臭氧污染情况

改革开放以来,东部地区一直是我国经济社会发展中心。东部地区凭借政策优惠、地理和资源优势以及人口红利实现了快速发展。在此基础上,如长三角区域的大型城市群应运而生,这些城市群以中心城市为核心,向周围辐射,城市之间经济社会紧密联系,产业、交通、社会生活、城市规划和基础设施建设相互促进、相互影响。人口稠密,交通便利,工业发达的同时也带来了诸多隐患。根据 2015—2019 年中国生态环境公报,在京津冀及周边区域、长三角和珠三角等地区,臭氧浓度逐年升高,以臭氧为首要污染物的污染天数占总天数的比例也呈上升趋势,如图 3 和图 4 所示。

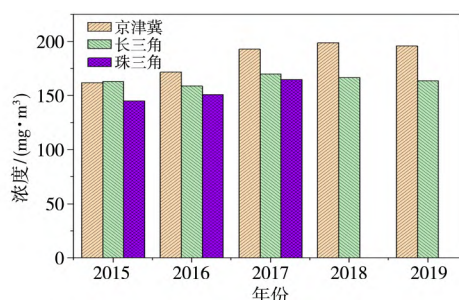


图 3 2015—2019 年三个城市群臭氧浓度趋势图

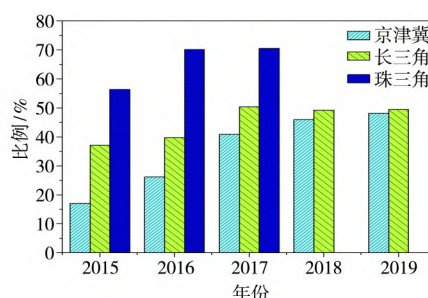


图 4 2015—2019 年三个城市群以臭氧为首要污染物的污染天数占总天数的比例

宋佳颖等<sup>[20]</sup>基于臭氧监测仪卫星反演数据研究发现,东南沿海 5 个省份的大气臭氧浓度自南向北逐渐升高,春夏季浓度高于秋冬季,臭氧浓度与风向、气温呈现显著正相关,与第二产业的相关度也很高。马伟等<sup>[21]</sup>研究发现臭氧生成受到前体物的控制,在威海市的其中一个观测点,臭氧生成受到  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  的共同控制,对活性烃类最为敏感,臭氧本地生成作用

为主;而汕头市国庆期间臭氧污染受到偏东风和东南风的影响,华东沿海和周边区域的臭氧与前体物输送是主要原因<sup>[22]</sup>。臭氧浓度受诸多因素的影响,因此在对臭氧污染进行分析时,需要因地制宜考虑各种因素的综合影响。

### 2.3 中西部地区臭氧污染情况

与东部地区相比,中西部地区经济社会发展整体相对滞后,臭氧污染整体情况要略微好于东部城市群地区,但是在部分地区或者城市中,特殊的地形和气象因素对臭氧污染的形成也具有重要影响。

如拉萨<sup>[23]</sup>为典型高原城市,历年来整体环境空气质量均处于全国前列,但是城市海拔高,紫外辐射强,大气环境中臭氧的本地浓度值反而比内地高。而在贵州省域的城市臭氧浓度与区域性的雷暴闪电存在着关联,高兰兰等<sup>[24]</sup>研究发现,贵州城市臭氧形成污染,强雷暴活动的背景可超过95%。粗略计算表明,一个区域性的强雷暴系统会给予其下风向几十至几百千米的城市带来几十 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的臭氧浓度提升,从而导致该城市的臭氧浓度超标。雷暴闪电活动对臭氧形成有一定贡献,而沙尘暴天气则是有着相应的抑制效果。如在塔克拉玛干沙漠腹地的塔中地区和北缘城市库尔勒<sup>[25]</sup>,可能是沙尘气溶胶粒子吸附了大气中的大量臭氧的原因,当沙尘天气出现后,臭氧浓度明显下降。此外,在重庆市<sup>[26]</sup>冬季,多雾静风的气象条件和特殊的山地地形条件也导致重庆市冬季臭氧浓度更低。成都地处盆地之中,受冬季的季风影响较小且多云雾,成都市冬季臭氧浓度也低。相反,郑州市地处平原,受冬季季风影响较大,冬季雾少多大风,晴朗天气较多,因此臭氧浓度相对较高。

臭氧污染形成受到很多条件和因素的影响,与其他空气污染物相比需要特殊对待,适合防治其他空气污染物的手段并不一定适合防治臭氧污染。明确臭氧这样的典型二次污染物的产生机理,才能为制定污染防治政策提供更全面的科学依据。

## 3 总结

综上所述,我国臭氧污染形势不容乐观,以京津冀及周边区域、长三角区域和珠三角区域的城市群为代表的北部、东部地区臭氧污染更为严重。中西部地区臭氧污染情况整体较轻,但是局部地区受地形和气象条件影响,也出现过严重的臭氧污染情况。我国当前臭氧污染主要特征为污染持续时间长、区域差异显著。由于臭氧浓度受太阳辐射、温度、相对湿度、风向和风速等气象条件影响大,且也会与颗粒物等其他污染物发生相互作用,同时臭氧可以远距离传输,与前体物的关系呈非线性关系,VOCs前体物来源复杂、种类繁多、活性差异大,导致其治理难度比较大。目前国内外已针对防治臭氧污染开展了大量研究,对臭氧污染机理、污染现状、时空分布规律以及应对措施开展了一系列的深入分析。未来防治臭氧污染的研究应该注重不断完善臭氧监测体系,针对性加强臭氧前体物 $\text{NO}_x$ 和VOCs的协同控制,建立科学、合理、完善的臭氧治理体系。

### 参考文献:

- [1] 董继元,刘兴荣,张本忠,等.我国臭氧短期暴露与人群死亡风险的Meta分析[J].环境科学学报,2016,36(04):9.
- [2] YI F J, FENG J A, WANG Y J, et al. Influence of surface ozone on crop yield of maize in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(02): 578-589.
- [3] 冯兆忠.臭氧污染的生态风险和防护对策[J].环境保护,2020,48(15):3.
- [4] 马秉吉.兰州地区臭氧污染的影响因子及典型个例的数值模拟研究[D].兰州:兰州大学,2020.
- [5] 李金龙,唐孝炎,齐立文,等.兰州西固地区夏天大气中光化学氧化剂的浓度分布[J].环境科学研究,1985(05):1-9.
- [6] 张迎春.成都市臭氧污染特征及与气象条件的关系研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [7] 戴锦娇.城市环境监测中空气质量监测途径探索[J].低碳世界,2021,11(03):42-43.
- [8] 郭欣瞳,宋宏权,梁留科,等.2015—2017年中国臭氧浓度时空变化特征[J].气象与环境科学,2020,43(03):41-50.

- [9] ZHENG B ,DAN T ,MENG L ,et al.Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J].Atmospheric Chemistry & Physics Discussions ,2018: 1-27.
- [10] 周明卫 ,康平 ,汪可可 ,等.2016—2018年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律[J].中国环境科学 ,2020 ,40( 05) : 1963-1974.
- [11] 闫慧 ,张维 ,侯墨 ,等.我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分[J].环境科学 ,2020 ,41( 12) : 5215-5224.
- [12] 王鑫龙 ,赵文吉 ,李令军 ,等.中国臭氧时空分布特征及与社会经济因素影响分析[J].地球与环境 ,2020 ,48( 01) : 66-75.
- [13] 董韶妮 ,李博.臭氧污染的来源、特征及开展臭氧监测的意义[J].环境与发展 ,2019 ,31( 02) : 189-191.
- [14] 崔萌 ,安兴琴 ,孙兆彬 ,等.北京臭氧污染特征及污染气象条件分析[J].三峡生态环境监测 ,2019 ,4( 03) : 25-35.
- [15] 吴俊 ,肖彬.上海城区近地面臭氧污染研究[J].广州化工 ,2020 ,48( 09) : 112-116.
- [16] 王建英 ,崔洋 ,杨亚丽 ,等.银川市臭氧污染特征及其气象条件诊断分析[J].环境监测管理与技术 ,2020 ,32( 04) : 24-28.
- [17] 卢娣 ,董自鹏 ,曹慧萍 ,等.西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J].陕西气象 ,2020( 01) : 14-19.
- [18] 李莉莉 ,王隆 ,刘喜平 ,等.哈尔滨市臭氧时空分布特征及气象要素的关系[J].中国环境科学 ,2020 ,40( 05) : 1991-1999.
- [19] 尼霞次仁 ,任培 ,阿琼 ,等.拉萨市臭氧浓度时空分布变化特征分析[J].高原科学研究 ,2019 ,3( 04) : 58-65.
- [20] 宋佳颖 ,刘旻霞 ,孙瑞弟 ,等.基于 OMI 数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究[J].环境科学学报 ,2020 ,40( 02) : 438-449.
- [21] 马伟 ,王章玮 ,郭佳 ,等.一个沿海城市大气臭氧的本地生成过程及其对前体物的敏感性[J].环境科学学报 ,2019 ,39( 11) : 3593-3599.
- [22] 郭婉琪.汕头市 2018 年国庆期间持续性臭氧污染过程分析[J].广州化工 ,2020 ,48( 16) : 111-115.
- [23] 王彩红 ,张惠芳 ,尼霞次仁 ,等.青藏高原典型城市拉萨市近地面臭氧污染特征[J].中国环境监测 ,2017 ,33( 04) : 159-166.
- [24] 高兰兰 ,王德贤 ,张蓝月 ,等.区域性强雷暴和贵州城市高浓度臭氧的关系[J].环保科技 ,2020 ,26( 02) : 27-39.
- [25] 刘新春 ,钟玉婷 ,何清 ,等.塔克拉玛干沙漠腹地与北缘城市近地面臭氧质量浓度分布特征[J].生态环境学报 ,2014 ,23( 07) : 1148-1155.
- [26] 王棚飞.重庆市主城区大气污染物现状评价及影响因素分析[D].重庆:西南大学 ,2018.

## Research review on urban ozone pollution control in China

YANG Jun ,BU Duo\* ,LIU Jun ,DU Mei

( School of Science of Tibet University ,Lhasa 850000 ,China)

**Abstract:** Based on Literature review ,the urban ozone pollution in China is relatively severe ,with obvious regional characteristics. The ozone pollution in northern and eastern regions , represented by Beijing-Tianjin-Hebei region ,Yangtze River Delta region and Pearl River Delta region urban agglomeration ,is more serious.The urban ozone pollution in central and western China ,in general ,is relatively light.But some areas and cities also have serious ozone pollution due to the influence of local terrain and meteorological conditions.In view of the harm of ozone pollution ,it is necessary to continuously improve the ozone monitoring system ,strengthen the coordinated control of ozone precursors ( i.e.NOx and VOCs) ,and establish a scientific and complete ozone control system.

**Keywords:** urban ozone pollution; pollution control; China

( 责任编辑 吴玉萍)