

内蒙古自治区臭氧污染特征及时空重点管控区段研究^{*}

米敬^{1,2} 程宇飞^{3#}

(1.内蒙古自治区生态环境科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010011;

2.海口经济学院,海南 海口 571132;3.内蒙古自治区环境监测总站,内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要 基于内蒙古自治区12个盟市的近地面臭氧(O_3)浓度及气象等其他相关数据分析了内蒙古自治区的 O_3 污染特征,并提出重点管控区域和管控时段。结果表明,2019—2021年基本反映了内蒙古自治区的 O_3 浓度现状,这3年12个盟市的 O_3 质量浓度均未超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值($160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),空间分布上呈西部和东南部高,中部和东北部低的特点。 O_3 防治典型区乌海及周边地区、河套灌区、“一湖两海”应进行重点管控,重点管控时段应为5—8月。以包头市为例研究发现,产业结构和机动车尾气是 O_3 污染的重要原因,温度大于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 且风速小于 5 m/s 时温度和风速增大易促进 O_3 浓度升高。

关键词 臭氧污染 内蒙古自治区 重点管控时段 重点管控区域

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.04.017

Study on pollution characteristics and temporal-spatial key control segments of Inner Mongolia Autonomous Region MI Jing^{1,2}, CHENG Yufei³. (1. Inner Mongolia Autonomous Region Research Academy of Ecological and Environmental Sciences, Hohhot Inner Mongolia 010011; 2. Haikou University of Economics, Haikou Hainan 571132; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Centre, Hohhot Inner Mongolia 010011)

Abstract: Based on surface ozone (O_3) concentration and other related data like meteorological factors in 12 municipalities of Inner Mongolia Autonomous Region, pollution characteristics of Inner Mongolia Autonomous Region were analyzed, and temporal-spatial key control segments were put forward. Results showed O_3 concentrations in 2019–2021 reflected the status, when O_3 mass concentration of all the 12 municipalities didn't exceed the 2nd grade ($160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) of “Ambient air quality standard” (GB 3095–2012). Spatial distribution showed that O_3 concentration was high in western and southeastern, but low in center and northeastern. O_3 prevention and control typical regions Wuhai and surrounding areas, Hetao irrigation area and “One Lake, Two Seas” should be controlled particularly. Key control time should be in May to August. Taking Baotou as an example, industrial structure and vehicle exhaust were important causes for O_3 pollution. When the temperature was above $25\text{ }^\circ\text{C}$ and the wind velocity was below 5 m/s , O_3 concentration increased as temperature and wind velocity increased.

Keywords: ozone pollution; Inner Mongolia Autonomous Region; key control time; key control area

近地面臭氧(O_3)是造成慢性呼吸道疾病和导致雾霾的主要大气环境污染物^[1-2]。近年,我国许多地区 O_3 已反超细颗粒物成为影响城市环境空气质量的首要污染物^[3-4]。“十三五”以来,随着工业化程度显著提升,内蒙古自治区的 O_3 污染问题也日益突出^[5],但全区 O_3 浓度分布在工业分布、气流等因素影响下,存在显著的空间不均匀性。

乌海及其周边地区是重工业基地,是内蒙古自治区 O_3 浓度高值区^[6-8]。河套灌区是我国最大的引黄灌区,对于国家粮食生产至关重要。 O_3 超标将导致小麦等主要经济作物光合作用受限、叶片受损、产

量下降^[9-10],因此河套灌区也是 O_3 防治典型区。“一湖两海”(包括呼伦湖、乌梁素海和岱海)也正面临着严重的 O_3 污染威胁^[11-13]。

另外, O_3 污染存在显著的时间差异。周海军等^[14]研究发现,包头市 O_3 污染主要出现在6—8月。曹星辉^[15]研究表明, O_3 浓度夏季高、冬季低。江靖等^[16]指出,呼和浩特市 O_3 浓度随温度和日照时长增加而增加。由此可见, O_3 污染会因季节、温度等因素的变化而变化。

因此,本研究以河套灌区、“一湖两海”、乌海及周边地区为 O_3 防治典型区对内蒙古自治区进行 O_3

第一作者:米敬,女,1985年生,硕士,高级工程师,主要从事环境污染防治研究。# 通讯作者。

^{*} 内蒙古自治区科技重大专项“呼包鄂区域大气环境预测预警与污染防治重大关键技术研究”(No.2020ZD0013)。

污染特征研究,提出 O₃ 污染重点管控时段和区域,为因地制宜地治理内蒙古自治区 O₃ 污染提供理论和实践支撑。

1 数据与方法

1.1 O₃ 防治典型区界定

乌海及周边地区、“一湖两海”和河套灌区包含的内蒙古自治区 O₃ 防治典型区主要包括呼伦贝尔市、巴彦淖尔市、乌海市、包头市、乌兰察布市、呼和浩特市、鄂尔多斯市和阿拉善盟。其中,河套灌区包括呼和浩特市、包头市、乌兰察布市、鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌海市和阿拉善盟;“一湖两海”包括呼伦贝尔市、巴彦淖尔市和乌兰察布市;乌海及周边地区包括乌海市、鄂尔多斯市和阿拉善盟。

1.2 数据来源

2015—2021 年内蒙古自治区 O₃ 数据由内蒙古自治区环境监测总站提供,包括全区 12 个盟市 103 个旗(县、区)。2019—2021 年 O₃ 防治典型区的 PM_{2.5} 数据也由内蒙古自治区环境监测总站提供。包头市的气象数据、挥发性有机物(VOCs)排放量、氮氧化物(NO_x)排放量、机动车保有量、污染源等有关数据来自包头市生态环境局。

1.3 评价方法

根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)和

《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633—2012),本研究中 O₃ 日评价以日最大 8 h 平均计,月评价与年评价以日最大 8 h 平均的第 90 百分位数计,为方便起见若无歧义统称为 O₃ 浓度(有特殊说明除外)。O₃ 污染级别根据 HJ 633—2012 评价。

2 结果与讨论

2.1 内蒙古自治区 O₃ 污染特征

2.1.1 2015—2021 年内蒙古自治区 O₃ 浓度年变化特征

内蒙古自治区 O₃ 质量浓度年变化特征如表 1 所示。虽然 O₃ 浓度通常以日最大 8 h 平均的第 90 百分位数计,但为了更加全面地刻画 2015—2021 年内蒙古自治区 O₃ 浓度年变化,分别用第 90、50、10 百分位数作为高、中、低浓度进行分析。由表 1 可见,中、高 O₃ 浓度在 2019 年前总体逐年增加,2019 年达到峰值后,2020、2021 年有所降低。低 O₃ 浓度在 2019 年前增长较慢,但 2020、2021 年增长较快,始终处于增长状态。由此可见,2020、2021 年中、高 O₃ 浓度较 2019 年降低,而低 O₃ 浓度显著升高,说明 2020、2021 年 O₃ 污染程度出现下降趋势,2019—2021 年基本反映了内蒙古自治区 O₃ 污染的现状。

由表 2 可见,2019—2021 年内蒙古自治区 12

表 1 2015—2021 年内蒙古自治区 O₃ 质量浓度

Table 1 O ₃ mass concentrations in Inner Mongolia Autonomous Region from 2015 to 2021							μg/m ³
百分位数	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
第 90	120	123	131	134	137	129	131
第 50	75	81	86	85	89	86	88
第 10	20	22	22	23	24	29	34

表 2 2019—2021 年 12 个盟市 O₃ 质量浓度及超标情况

Table 2 The mass concentrations and exceeding status of O ₃ in 12 municipalities from 2019 to 2021									
地区	质量浓度/(μg/m ³)			日浓度超标天数/d			O ₃ 为首要污染物的超标天数占比/%		
	2019 年	2020 年	2021 年	2019 年	2020 年	2021 年	2019 年	2020 年	2021 年
呼和浩特市	146	141	144	21	13	16	28.8	18.1	31.9
包头市	143	136	142	15	13	16	23.1	18.1	25.8
呼伦贝尔市	108	104	100	0	0	1	0	0	50.0
兴安盟	113	112	106	0	2	1	0	18.2	11.1
通辽市	132	132	120	15	15	8	25	30.3	20.5
赤峰市	127	129	119	9	10	3	39.1	66.7	17.6
锡林郭勒盟	122	112	113	2	0	0	18.2	0	0
乌兰察布市	152	132	140	22	9	8	81.5	37.5	27.6
鄂尔多斯市	155	145	151	25	14	22	57.1	41.2	42.3
巴彦淖尔市	143	134	142	14	4	14	25.9	6.9	22.6
乌海市	153	140	151	28	9	23	40.6	10.8	31.1
阿拉善盟	146	136	150	9	4	17	32.1	21.1	32.7
全区	137	129	131	160	93	129	40.0	22.4	26.1

个盟市的 O₃ 质量浓度均未超过 GB 3095—2012 二级标准限值(160 μg/m³),3 年全区 O₃ 质量浓度分别为 137、129、131 μg/m³;全区日浓度超标天数分别为 160、93、129 d;以 O₃ 为首要污染物的超标天数分别占当年总超标天数的 40.0%、22.4%、26.1%。进一步分析发现,2019—2021 年全区 O₃ 轻度污染天数分别为 159、91、127 d,中度污染分别为 1、2、2 d,未出现重度污染和严重污染。

2.1.2 内蒙古自治区 O₃ 浓度空间分布特征

在 SuperMap iDesktop10.1 软件中选用距离反比法进行空间插值分析内蒙古自治区 2019—2021 年的 O₃ 浓度变化,发现 3 年的 O₃ 浓度空间分布规律相似,总体呈西部和东南部高,中部和东北部低的特点,图 1 给出了 2019 年典型的空间分布图。西部 O₃ 浓度特别高是因为西部煤炭资源丰富,煤化工产业发达,还分布着化工、焦化、建材、火电等众多企业,排放大量 O₃ 前体物 VOCs 和 NO_x^[17-18]。由此可见,内蒙古自治区的 O₃ 污染防治重点区域应在西部和东南部地区,这些区域大多属于内蒙古自治区 O₃ 防治典型区,在后续环境管理中应重点在这些地区实施分区分管控及区域联防联控。

全区每年 O₃ 质量浓度前三的盟市统计结果如表 3 所示,其中呼和浩特市、鄂尔多斯市、通辽市出现次数最多,均出现了 5 次,另外赤峰市出现了 3 次,包头市和乌兰察布市均出现了 2 次,乌海市出现了 1 次,说明呼和浩特市、鄂尔多斯市、通辽市 O₃ 污染比较严重,集中发生的时间在 5—8 月。

2.2 O₃ 防治典型区污染特征

2019—2021 年内蒙古自治区 O₃ 防治典型区的 O₃ 质量浓度月变化见图 2(a),最大值均出现在 7 月,5—8 月 O₃ 浓度较高,最小值均出现在 12 月,1、11—12 月 O₃ 浓度较低,这是因为 NO_x、VOCs 等 O₃ 前体物受光照条件的季节变化影响比较显著^[19-20]。2019—2021 年,乌海及周边地区 O₃ 质量浓度平均值为 127 μg/m³,河套灌区为 121 μg/m³,“一湖两海”为 108 μg/m³。可见,乌海及周边地区的 O₃ 浓度最高,这可能与乌海及周边地区化工园区数量多,排放大量 O₃ 前体物有关^[21]。

比较 3 个 O₃ 防治典型区中 O₃ 和 PM_{2.5} 质量浓度月变化(见图 2)发现,O₃ 呈“凸线”趋势,而 PM_{2.5} 呈“凹线”趋势,分析每月两者间的关系发现 1、10 两月两者呈显著负相关($p<0.01$),这是因为较高浓度的 PM_{2.5} 可降低消光系数和大气辐射强度,不利于 O₃ 生成^[22-23]。

2.3 污染原因初探

包头市属于 O₃ 防治典型区,又位于全区的中间位置,因此以包头市为例初步探究内蒙古自治区的 O₃ 污染原因。

2.3.1 产业结构及机动车尾气方面

包头市是内蒙古自治区最大的工业城市,拥有全区最大的钢铁、铝业、装备制造和稀土加工企业,是国家和内蒙古自治区重要的能源、原材料、稀土、新型煤化工和装备制造基地,形成了东部铝业,西部钢铁、煤化工和稀土产业,南部高新技术产业,北部

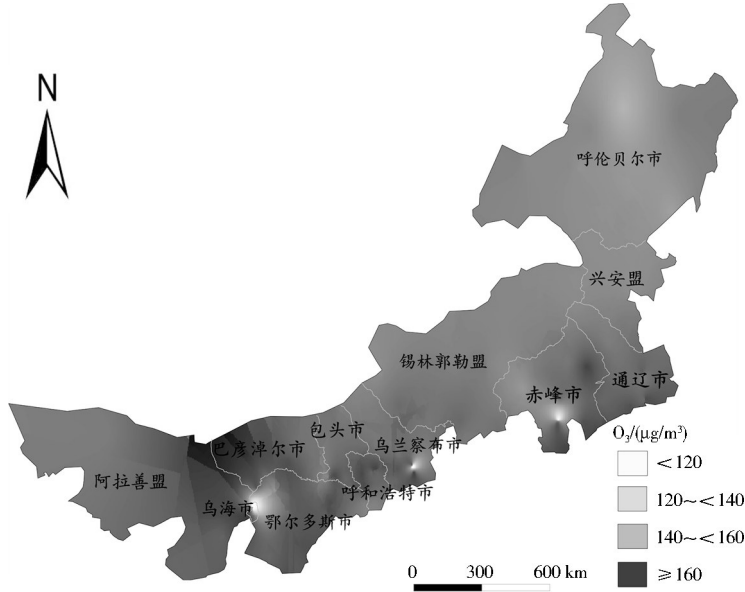


图 1 内蒙古自治区 2019 年 O₃ 质量浓度空间分布
 Fig.1 Spatial distribution of O₃ mass concentration in Inner Mongolia Autonomous Region in 2019

表 3 2015—2021 年全区 O₃ 质量浓度前三的盟市

Table 3 Top three municipalities of O₃ mass concentrations in the region from 2015 to 2021

排名	年份	盟市	日期	质量浓度/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
第一	2015	包头市	7 月 12 日	206
	2016	通辽市	6 月 27 日	217
	2017	呼和浩特市	7 月 12 日	212
	2018	鄂尔多斯市	6 月 1 日	220
	2019	乌海市	8 月 4 日	225
	2020	赤峰市	6 月 8 日	220
	2021	呼和浩特市	7 月 10 日	221
第二	2015	鄂尔多斯市	5 月 26 日	201
	2016	通辽市	6 月 20 日	208
	2017	呼和浩特市	7 月 1 日	204
	2018	鄂尔多斯市	7 月 1 日	213
	2019	乌兰察布市	5 月 31 日	211
	2020	呼和浩特市	6 月 22 日	216
	2021	赤峰市	6 月 6 日	218
第三	2015	包头市	7 月 27 日	200
	2016	通辽市	5 月 19 日	206
	2017	呼和浩特市	7 月 2 日	201
	2018	赤峰市	6 月 29 日	201
	2019	乌兰察布市	6 月 2 日	201
	2020	鄂尔多斯市	6 月 14 日	206
	2021	通辽市	6 月 13 日	214
	2021	通辽市	6 月 13 日	207

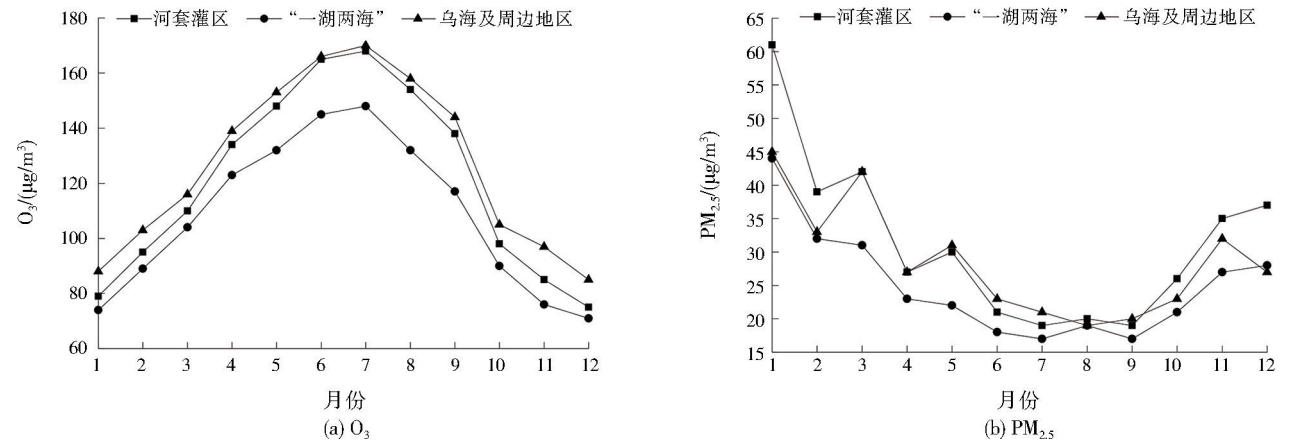


图 2 2019—2021 年 O₃ 防治典型区的 O₃ 和 PM_{2.5} 质量浓度月变化

Fig.2 Monthly changes of O₃ and PM_{2.5} mass concentrations in O₃ prevention and control typical regions from 2019 to 2021

装备制造等多种产业聚集分布的特征。这些产业在生产过程中排放大量的 O₃ 前体物 NO_x^[24]、VOCs^[25-26]，造成包头市 O₃ 污染。

包头市近年机动车数量也逐年增加，由此导致机动车尾气排放量逐年增加，特别是 NO_x^[27]，成为包头市 O₃ 污染的重要原因之一。

包头市及周边主要的火电、黑色及有色金属冶炼等行业涉及重要的燃烧源。2015 年包头市电力行业等燃烧源的 VOCs 和 NO_x 排放量分别为 2 647.01、52 036.89 t/a；钢铁、有色金属冶炼、焦化及煤化工、水泥等建筑工业燃烧源的 VOCs 和 NO_x 排放量分

别为 14 330.40、41 718.81 t/a；生活源的 VOCs 和 NO_x 排放量分别为 15 390.98、3 499.52 t/a；移动源的 VOCs 和 NO_x 排放量分别为 12 573.65、21 969.75 t/a。O₃ 由 VOCs 和 NO_x 等物质在紫外光照和高温等条件的作用下发生光化学反应生成。VOCs 除加速 O₃ 生成并增加大气氧化性外，还会促进 SO₂、NO_x 等污染气体转化成硫酸盐和硝酸盐气溶胶，进而形成 PM_{2.5}。

2.3.2 气象因素对 O₃ 的影响

近地面 O₃ 浓度还与气象条件有密切关系^[28]。2021 年包头市年平均气温为 8.4 ℃，年平均风速为

表 4 2020—2021 年包头市 O₃ 和气象因素相关关系
Table 4 Correlation between O₃ and meteorological factors in Baotou City from 2020 to 2021

年份	气象因素	春(3—5 月)	夏(6—8 月)	秋(9—11 月)	冬(1—2、12 月)	全年
2020	温度	0.694	0.692	0.689	0.705	0.640
	风速	0.613	0.499	0.703	0.721	0.425
2021	温度	0.711	0.784	0.685	0.497	0.691
	风速	0.430	0.317	0.374	0.502	0.396

2.9 m/s,年总降水量为 240.4 mm,年日照时数为 2 978.9 h,年平均相对湿度为 58%。2020—2021 年包头市 O₃ 浓度与温度、风速的 Pearson 相关系数如表 4 所示。O₃ 浓度与气温、风速均呈正相关关系,这是因为温度越高越有利于光化学反应生成 O₃。O₃ 浓度与风速呈正相关关系可能是因为风对污染物的混合作用大于扩散作用^[29]。具体分析发现,包头市 O₃ 小时浓度在温度处于超过 25 ℃时就开始超过 GB 3095—2012 二级标准限值。2020—2021 年包头市 O₃ 浓度随风速增大而升高主要发生在风速低于 5 m/s 时。由此可见,包头市在温度大于 25 ℃且风速小于 5 m/s 时最易促使 O₃ 浓度升高。

3 结 论

(1) 内蒙古自治区 2020、2021 年相比 2019 年 O₃ 污染程度出现下降趋势。2019—2021 年基本反映了内蒙古自治区的 O₃ 污染现状,12 个盟市的 O₃ 质量浓度均未超过 GB 3095—2012 二级标准限值(160 μg/m³)。空间分布上呈西部和东南部高,中部和东北部低的特点,建议对乌海及周边地区、河套灌区和“一湖两海”O₃ 防治典型区进行重点管控,5—8 月应为重点管控时段。

(2) 以包头市为例初步探究内蒙古自治区的 O₃ 污染原因发现,产业结构和机动车尾气是包头市 O₃ 污染的重要原因,温度大于 25 ℃且风速小于 5 m/s 时温度和风速增大易促进 O₃ 浓度升高。

参考文献:

[1] TURNER M C, JERRETT M, POPE C A, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, 193(10): 1134-1142.

[2] ZHANG L, WANG T, LV Q, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 1017-1031.

[3] 汪宇, 区宇波, 陈多宏, 等. 臭氧污染对广东省 2020 年空气质量目标影响的探讨[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 120-128.

[4] 孟晓艳, 宫正宇, 张霞, 等. 全国及重点区域臭氧污染现状[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 17-26.

[5] 胡亚男, 王佳, 徐丽娜, 等. 内蒙古近地面臭氧污染时空分布特

征及气象条件分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 65-72.

[6] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1132-1142.

[7] 孟晓艳, 王瑞斌, 杜丽, 等. 试点城市 O₃ 浓度特征分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(1): 64-70.

[8] 夏佳琦, 陈强, 刘晓, 等. 乌海市臭氧传输特征与潜在源区[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3012-3020.

[9] FREDERICKSEN T S, KOLB T E, SKELLY J M, et al. Light environment alters ozone uptake per net photosynthetic rate in black cherry trees[J]. Tree Physiology, 1996, 16(5): 485-490.

[10] FUHRER J, SKARBY L, ASHMORE M R. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe[J]. Environmental Pollution, 1997, 97(1/2): 91-106.

[11] FUHRER J, BOOKER F. Ecological issues related to ozone: agricultural issues[J]. Environment International, 2003, 29(2/3): 141-154.

[12] 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: 775-786.

[13] XU X B. Recent advances in studies of ozone pollution and impacts in China: a short review[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2021, 19: 100225.

[14] 周海军, 樊庆云, 卢振国, 等. 包头市大气臭氧污染特征分析[J]. 环境监测管理和技术, 2019, 33(1): 19-23.

[15] 曹星辉. 鄂尔多斯市 2015 年环境空气中污染物变化趋势分析[J]. 环境与发展, 2018, 30(12): 152-153.

[16] 江靖, 宋桂英. 呼和浩特市臭氧污染与气象条件相关分析及其天气学分型[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区气象台, 2020.

[17] 王冰, 李光明, 马红磊, 等. 濮阳市 VOCs 污染特征及其臭氧生成潜势分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(3): 59-65.

[18] YU D, TAN Z F, LU K D, et al. An explicit study of local ozone budget and NO_x-VOCs sensitivity in Shenzhen China[J]. Atmospheric Environment, 2020, 224: 117304.

[19] 刘杰, 王明飞, 邓建明, 等. 山东省 AQI、颗粒物和臭氧时空演化特征及关键影响因素识别分析[J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 273-284.

[20] 肖致美, 李鹏, 孔君, 等. 天津市持续高温强光照天气下臭氧污染差异性分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3322-3330.

[21] 王峰, 汪健伟, 翟晋, 等. 卫星观测资料改进活性 VOCs 源排放及其对臭氧模拟影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2504-2514.

[22] 严文莲, 刘端阳, 王磊, 等. 江苏 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象条件分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5098-5106.

[23] LEE S B, BAE G N, LEE Y M, et al. Correlation between light intensity and ozone formation for photochemical smog in urban air of Seoul[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2010, 10(6): 540-549.

(下转第 574 页)