

2018—2019年河北省O₃污染时间变化和空间集聚特征研究

郭燕燕¹ 查慧敏² 罗欣欣¹ 钱金平^{1*}

(1.河北师范大学资源与环境科学学院,河北 石家庄 050024;

2.河北省科学院地理科学研究所,河北 石家庄 050011)

摘要 基于河北省2018—2019年O₃监测数据,分析了河北省O₃污染的时空变化特征和空间集聚特征。结果表明,2018、2019年河北省11个地级市的O₃超《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的二级标准限值(160 μg/m³)天数平均值分别为74、73 d;季节变化规律为夏季>春季>秋季>冬季;1年中的月变化呈先上升后下降的趋势,6月达到最高值,12月达到最低值。河北省O₃浓度具有显著的空间集聚特征,O₃浓度高的热点主要分布在东南部地区,O₃浓度低的冷点主要分布在东北部地区。邯郸市、邢台市、衡水市、沧州市、石家庄市和保定市O₃浓度较高,属于重污染地区,需加强区域联防联控。

关键词 河北省 O₃ 时间变化 空间集聚

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.10.012

Studies on the characteristics of O₃ pollution temporal variation and spatial agglomeration in Hebei Province during 2018-2019 GUO Yanyan¹, ZHA Huimin², LUO Xinxin¹, QIAN Jinping¹. (1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024; 2. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang Hebei 050011)

Abstract: Based on the O₃ monitoring data of Hebei Province during 2018-2019, the characteristics of O₃ pollution temporal variation and spatial agglomeration in Hebei Province were analyzed. Results showed that the number of days that O₃ exceeded the second level (160 μg/m³) of "Ambient air quality standards" (GB 3095-2012) were 74 and 73 d for 2018 and 2019, respectively. Seasonal variation of O₃ concentration was in the order of summer> spring> autumn> winter. The monthly variation of O₃ concentration showed a trend of first increase and then decrease, with the maximum appearing in June and the minimum in December. The O₃ concentration in Hebei Province had a significant spatial agglomeration characteristics. The hot spots with high O₃ concentration gathered in the southeastern region, while the cold spots with low O₃ concentration gathered in the northeastern region. As heavily polluted areas, Handan, Xingtai, Hengshui, Cangzhou, Shijiazhuang and Baoding had relatively higher O₃ concentration. These areas needed to take measures together.

Keywords: Hebei Province; O₃; temporal variation; spatial agglomeration

近地面O₃作为光化学烟雾的标识物之一^[1],主要是由氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等在一定光照条件下经过一系列复杂的化学反应生成^[2]。O₃易对人体造成伤害,例如改变人体肺功能等,严重的可危及生命^[3]。近年来,随着我国经济的发展,工业化水平提高,城镇化进程加快,机动车保有量激增^[4],大气O₃污染也逐渐加重,O₃成为了继PM_{2.5}之后的又一大气污染物^[5]。《2018年中国生态环境状况公报》显示,2018年京津冀及周边地区和长三角地区以O₃为首要污染物的天数分别占总超标天数的46.0%、49.3%,超过了PM_{2.5}而居于第1位。O₃污染与以PM_{2.5}引起的雾霾不同,由于

可见性弱而易被忽视^[6],并且其污染形成机制复杂^[7],因此治理难度更大。在PM_{2.5}治理逐渐取得明显效果的同时,O₃污染备受关注。

河北省作为京津冀地区面积最大的省份,工业企业众多,人口稠密,机动车保有量超过2 000万辆^[8],其人为因素造成的O₃前体物NO_x、VOCs等排放强度高,因此O₃污染比较严重^[9]。由于O₃在对流层中的寿命较长,能进行区域传输^[10],因此河北省的O₃污染还会导致京津等地区空气质量受影响。以往对河北省O₃污染的研究主要以省内单个城市为研究对象^[11-13],对河北省内城市间的O₃污染时空差异研究还相对缺乏。本研究根据2018—

第一作者:郭燕燕,女,1994年生,硕士研究生,主要从事大气污染监测与控制研究。*通讯作者。

2019 年河北省 11 个地级市的 O₃ 浓度数据对 O₃ 浓度的时间变化和空间集聚特征进行分析, 以期为河北省 O₃ 污染治理提供科学依据, 从而更好地服务于京津冀大气环境协同治理。

1 数据与方法

1.1 数据来源

从河北省网格化精准监测平台(<http://117.78.34.120:8007/BigData/Main>)获得 2018—2019 年河北省 11 个地级市的 168 个国家环境空气监测点的每日常规污染物(O₃、NO₂)数据和气象(温度、相对湿度)数据。污染物监测设备运行维护和质量控制依照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ 193—2016)进行, 数据有效性依据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013)进行判断, 剔除部分因停电、仪器校准等原因出现的缺失或异常数据, 最终获得 120 257 个有效数据, 数据有效率达到 98.06%。各监测点的每日 O₃ 数据取日最大 8 h 滑动平均值, 以此计算月均值和季均值进行月评价和季评价。由于 HJ 663—2013 对年评价有明确规定, 因此年评价用年 O₃ 日最大 8 h 滑动平均值第 90 百分位数。

1.2 空间特征分析方法

利用全局莫兰指数检验 O₃ 在省域尺度上的空间自相关性^[14]。全局莫兰指数取值范围为[-1, 1], 大于 0 表示空间分布上存在集聚特征, 等于 0 表示空间分布上呈随机状态, 小于 0 表示空间分布上存在离散特征, 越接近于 0, 集聚或离散特征越不明显。为弥补全局莫兰指数无法反映局部单元的具体

情况的缺陷, 用热点分析^[15]方法计算 Gi* 以了解局部区域高值区(热点)与低值区(冷点), 若 Gi* 为正值, 则为热点, 若 Gi* 为负值, 则为冷点, 热点和冷点的可信度保证在 90% 以上, 无统计学意义的点视为无特征点。以上两种空间特征分析方法均借助 ArcGIS 10.2 完成, 其中热点分析工具选取 FIXED_DISTANCE_BAND 空间关系概念化方式^{[5][1265]}。

2 结果与讨论

2.1 O₃ 浓度时间变化特征

2.1.1 O₃ 浓度年评价

2018—2019 年河北省 11 个地级市的年 O₃ 日最大 8 h 滑动平均值第 90 百分位数见图 1(a)。其中, 2018 年 11 个地级市的 O₃ 为 165~204 μg/m³, 2019 年 11 个地级市的 O₃ 为 158~206 μg/m³。河北省人口稠密, 重工业企业众多且广泛分布于省内各个地级市^{[10][15]}, 因此将河北省各地级市视为二类环境空气功能区, 参照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的二级标准限值(160 μg/m³)进行评价, 2018—2019 年河北省 11 个地级市的 O₃ 浓度几乎都超标。在王玫等^{[16][269]}的研究中曾指出, 2017 年河北省 11 个地级市的 O₃ 浓度均超过 GB 3095—2012 的二级标准限值, 其中唐山市、沧州市、廊坊市、保定市、衡水市和承德市 2014—2017 年连续 4 年超标, 石家庄市和张家口市也从 2016 年开始连续出现超标。由此可见, 河北省的 O₃ 污染形势很严峻。其中廊坊市 2019 年较 2018 年同比上升明显, 结合河北省气象局的《2019 年河北省气候公报》可知, 2019 年廊坊市的年日照时数偏长, 年均气温全省最

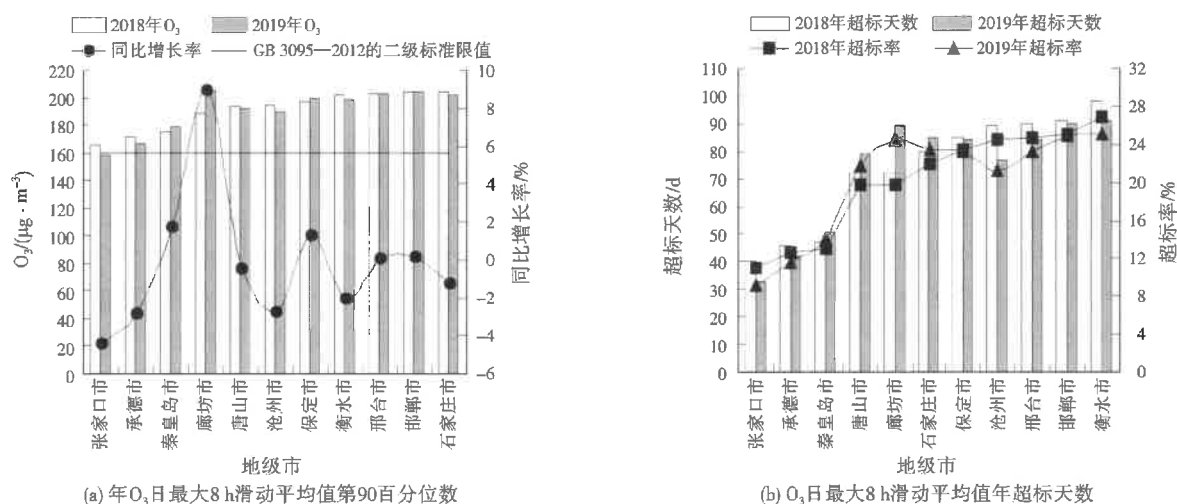


图 1 2018—2019 年河北省 O₃ 浓度年评价

Fig.1 Annual evaluation of O₃ concentration in Hebei Province during 2018-2019

高,相对湿度为40%~60%,导致O₃前体物在高温、强辐射、高湿度条件下转化为O₃^[17]。

2018—2019年河北省11个地级市的O₃日最大8h滑动平均值超标天数见图1(b)。2018—2019年河北省11个地级市的O₃年超标天数平均值分别为74、73d,超标率分别为20.27%、20.00%,2019年较2018年超标率有降低,但降幅较小。2019年较2018年O₃超标率有降的原因可能与政府减排措施有关。2019年河北省针对全省夏季大气污染特征和存在的突出问题制定了《河北省大气污染集中整治夏季会战方案》,各地级市积极响应,开展了O₃污染治理专项行动。例如,邢台市钢铁龙头企业德龙钢铁有限公司拆除了两台96m²烧结机,中煤旭阳焦化有限公司的4座5.5m的焦炉全部使用了干熄焦等^[18];邯郸市对化工、印刷、工业涂装等重点行业实施了错时生产管控,每天10:00—18:00禁止涉VOCs生产工序作业^[19]。

2.1.2 O₃浓度季评价

将全年划分为4个季节,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12和1月为冬季。对比分析2018、2019年O₃季均值(见图2)可以看出,两年O₃浓度季节变化趋势一致,均为夏季>春季>秋季>冬季。2019年秋季同比上升5.58%,其余季节O₃浓度均呈同比下降趋势。

对11个地级市四季O₃季均值变化情况分别进行统计(见表1)可知,2018、2019年O₃质量浓度最高值均出现在邯郸市的夏季,分别为179、174μg/m³,衡水市与邯郸市的季节O₃浓度基本相当。夏季O₃浓度由高到低排名前4位的地级市是邯郸市、邢台市、石家庄市和衡水市;排名后4位的是唐山市、张家口市、秦皇岛市和承德市,说明冀南地区

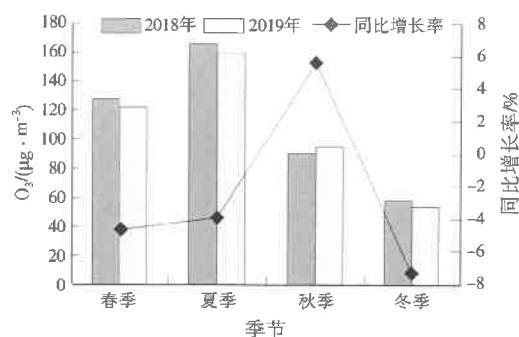


图2 2018—2019年河北省O₃浓度季评价
Fig.2 Seasonal evaluation of O₃ concentration in Hebei Province during 2018-2019

夏季O₃浓度高于冀北地区。总体上,除秋季外,2019年O₃浓度低于2018年。

2.1.3 O₃浓度月评价

由图3可见,2018、2019年1—12月O₃浓度整体变化趋势为先上升后下降,6月O₃质量浓度最高,分别为197、184μg/m³,12月O₃最低,分别为44、38μg/m³。2019年9月较2018年同期O₃质量浓度高出34μg/m³,同比上升29.06%,这也是造成2019年秋季同比上升5.58%的主要原因。2018年6月邢台市O₃质量浓度在11地级市中最高,达到217μg/m³(见表2),2019年6月邯郸市O₃质量浓度最高,为205μg/m³(见表3);两年中均是张家口市6月O₃质量浓度全省最低,依次为150、148μg/m³。

其他污染物和气象条件是影响O₃浓度的重要因素^[20]。选取2019年O₃浓度较高的石家庄市和O₃浓度较低的张家口市分析每月O₃与NO₂、温度和湿度的关系(见表4)。O₃浓度随温度升高而升高,但与NO₂是此消彼长的关系。齐艳杰等^[21]的研究表明,NO₂作为O₃的前体物在高温、强光下易

表1 2018—2019年河北省各地级市O₃浓度季评价

Table 1 Seasonal evaluation of O₃ concentration in prefecture-level cities of Hebei Province during 2018-2019

地级市	2018年				2019年			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
	μg/m ³							
保定市	128	172	85	53	122	165	92	64
沧州市	133	167	97	59	125	158	100	71
承德市	127	138	81	68	118	131	86	72
邯郸市	135	179	102	60	131	174	103	71
衡水市	136	177	102	59	130	168	103	70
廊坊市	117	161	79	55	120	166	97	64
秦皇岛市	126	141	87	60	115	137	92	67
石家庄市	127	178	85	51	125	168	91	62
唐山市	125	156	81	55	118	149	93	63
邢台市	128	178	99	55	126	171	100	67
张家口市	123	144	88	71	109	138	88	77

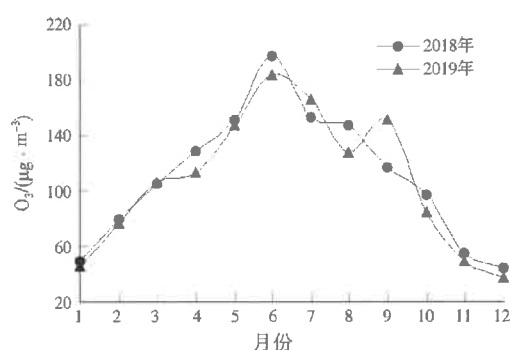


图3 2018—2019 年河北省 O₃ 浓度月评价
Fig.3 Monthly evaluation of O₃ concentration in Hebei Province during 2018-2019

表2 2018 年河北省各地级市 O₃ 浓度月评价

Table 2 Monthly evaluation of O₃ concentration in prefecture-level cities of Hebei Province in 2018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

地级市	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
保定市	43	76	102	130	153	209	159	147	115	91	48	39
沧州市	52	81	111	139	150	199	149	154	125	106	61	44
承德市	67	83	104	132	145	161	134	120	104	83	55	54
邯郸市	50	86	115	129	160	216	160	161	126	118	63	43
衡水市	49	81	112	138	157	216	164	151	129	111	66	46
廊坊市	47	74	87	122	141	189	151	143	109	84	45	42
秦皇岛市	54	73	102	128	147	168	123	133	118	89	55	54
石家庄市	39	77	107	123	152	212	167	153	112	94	50	36
唐山市	49	72	97	129	150	190	138	138	114	82	45	44
邢台市	45	82	109	126	151	217	160	157	126	111	60	40
张家口市	65	89	101	121	146	150	146	135	106	92	66	58

表3 2019 年河北省各地级市 O₃ 浓度月评价

Table 3 Monthly evaluation of O₃ concentration in prefecture-level cities of Hebei Province in 2019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

地级市	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
保定市	39	75	104	111	150	189	174	131	161	76	40	34
沧州市	49	82	109	113	151	183	163	129	149	95	56	39
承德市	58	79	103	111	140	155	134	103	131	78	48	49
邯郸市	46	83	119	120	155	205	181	136	155	94	60	38
衡水市	47	81	116	118	155	193	171	139	158	95	57	33
廊坊市	45	72	98	110	153	190	179	130	165	82	44	38
秦皇岛市	55	71	96	110	139	150	148	113	145	80	50	39
石家庄市	35	72	108	115	152	197	176	131	153	80	41	30
唐山市	44	66	94	109	149	174	156	117	158	78	42	37
邢台市	43	78	114	115	149	203	176	135	156	92	53	32
张家口市	61	83	94	106	126	148	144	121	124	84	57	58

表4 O₃ 与 NO₂、温度、相对湿度的关系分析

Table 4 Relationship of O₃ with NO₂, temperature and relative humidity

月份	石家庄市				张家口市			
	O ₃ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO ₂ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度/°C	相对湿度/%	O ₃ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO ₂ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度/°C	相对湿度/%
1	35	79	-0.21	44.32	61	29	-7.82	36.77
2	72	50	0.93	57.59	83	22	-6.79	47.38
3	108	42	11.72	36.33	94	22	2.31	37.76
4	115	35	14.70	59.31	106	19	5.41	42.32
5	152	33	23.19	44.56	126	18	8.97	34.17
6	197	27	27.43	54.84	148	17	19.28	51.26
7	176	24	27.95	71.39	144	17	20.25	65.04
8	131	26	27.04	72.93	121	17	19.29	63.23
9	153	38	27.61	66.44	124	23	18.11	57.88
10	80	42	15.55	67.22	84	28	9.06	53.99
11	41	54	7.53	61.47	57	32	4.60	56.42
12	30	56	0.86	61.54	58	30	3.43	63.20

表5 2018—2019年河北省O₃浓度全局莫兰指数¹⁾
Table 5 Global Moran's index of O₃ concentration in Hebei Province during 2018-2019

时间	2018年	2019年
春季	0.06 *	0.25 *
夏季	0.37 *	0.45 *
秋季	0.48 *	0.27 *
冬季	0.33 *	0.38 *
全年	0.26 *	0.36 *

注: ¹⁾ * 表示通过1%水平的显著性检验。

2018—2019年河北省O₃浓度空间集聚特征总体一致(见图4),热点主要分布在东南部地区,集聚区域包括沧州市西部、衡水市、邢台市和邯郸市;冷点主要分布在东北部地区,集聚区域主要包括唐山市和秦皇岛市,2019年相比2018年向西扩展到了承德市和张家口市;无特征点主要集聚在中部地区。综上所述,东南部热点区域较为稳定,该区域O₃浓度较高主要有两方面的原因:一是地形,由于河北省地势东南低西北高,北部的燕山和西部的大行山对

东南地区的污染可以起到屏障作用,根据曾佩生^[23]的研究发现,河北省春夏季以偏南风为主,秋冬季以偏北风为主,东南平原地区风速较小,污染物不易扩散,远距离输送来的污染物也主要在此聚集^[24];二是东南地区纬度较低,温度偏高,加上经济发展水平也较高,因此本地排放的NO_x和VOCs较多,为O₃生成提供了大量前体物^[25]。

2.3 重污染地区O₃浓度分析

由于邯郸市、邢台市、衡水市、石家庄市、保定市和沧州市O₃浓度较高,因此本节将这些地级市作为重污染地区进行重点分析。

由图5可见,重污染地区超标主要发生在6—7月,尤其是6月,2018年6月邢台市O₃质量浓度最高,为217 μg/m³,2019年6月邯郸市O₃质量浓度最高,为205 μg/m³。O₃浓度除了受高温、强光等气象条件影响外,还可能与本地源排放有关^[26-29]。

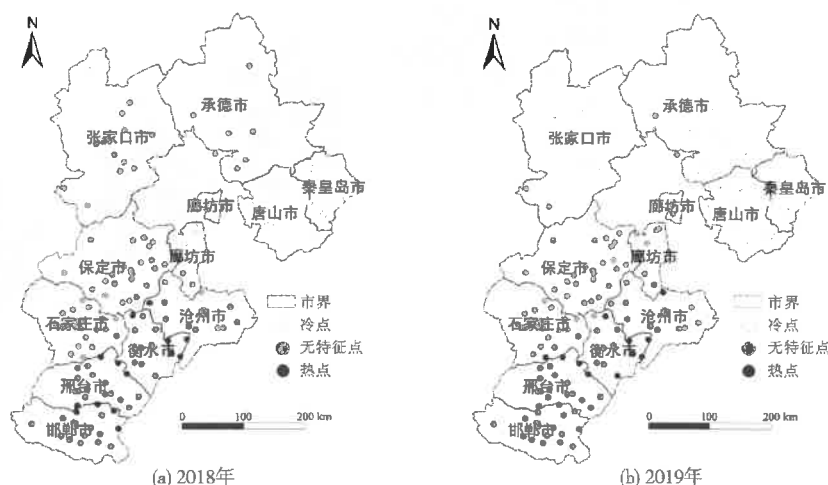


图4 2018—2019年河北省O₃浓度空间集聚特征

Fig.4 The spatial agglomeration characteristics of O₃ concentration in Hebei Province during 2018-2019

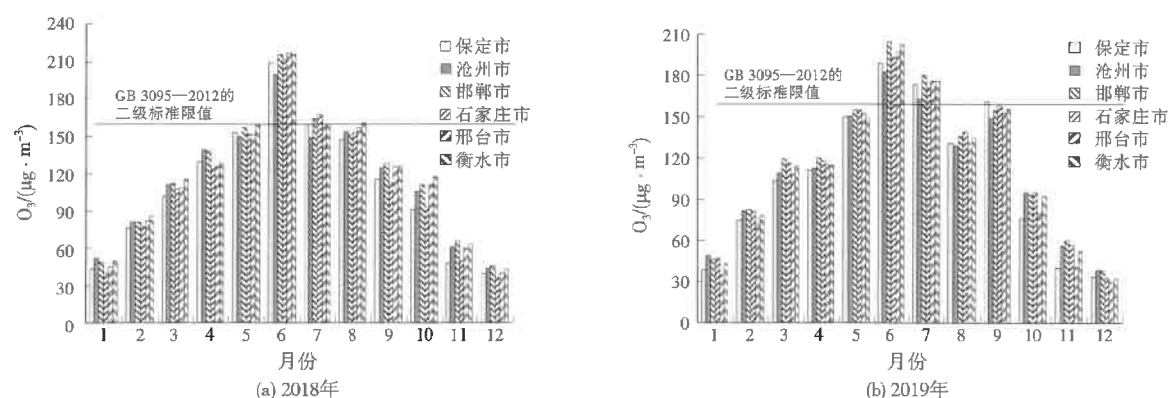


图5 2018—2019年重污染地区O₃浓度月评价

Fig.5 Monthly evaluation of O₃ concentration in heavily polluted areas during 2018-2019

3 结论与展望

年评价表明,2018 年河北省 11 个地级市的 O₃ 为 165~204 μg/m³,2019 年为 158~206 μg/m³,2018、2019 年超标天数平均值分别为 74、73 d,超标率分别为 20.27%、20.00%;两年 O₃ 浓度季节变化均为夏季>春季>秋季>冬季;O₃ 在 1 年中的月变化呈先上升后下降的趋势,最高值出现在 6 月,最低值出现在 12 月。河北省各地级市 O₃ 浓度在空间上存在显著的正相关关系,呈集聚态势,O₃ 浓度高的热点主要分布在东南部地区,O₃ 浓度低的冷点主要分布在东北部地区。邯郸市、邢台市、衡水市、沧州市、石家庄市和保定市 O₃ 浓度较高,属于重污染地区。

本研究分析了 2018—2019 年河北省 O₃ 浓度时间变化特征和空间集聚特征,但是两年的对比还不能看出河北省 O₃ 浓度是否会持续下降。而且,由于 O₃ 生成的机理比较复杂,本研究未对 O₃ 浓度的影响因素进行深入分析,对 O₃ 下降是否与政府减排措施有必然关系还需要进一步验证,因此下一步研究应着重从长时间序列进行分析并加强影响因素探究,从而为河北省 O₃ 污染治理工作提供更清晰、更明确的科学依据,提高河北省 O₃ 污染治理成效。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG Y G, HOPKE P K, XIA X Y, et al. Source apportionment of airborne particulate matter using inorganic and organic species as tracers[J]. Atmospheric Environment, 2012, 55: 525-532.
- [3] LEHMAN J, SWINTON K, BORTNICK S, et al. Spatio-temporal characterization of tropospheric ozone across the eastern United States[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(26): 4357-4369.
- [4] 易睿,王亚林,张殷俊,等.长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J].环境科学学报,2015,35(8):2370-2377.
- [5] 李霄阳,李思杰,刘鹏飞,等.2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J].环境科学学报,2018,38(4).
- [6] 刘建,吴兑,范绍佳,等.前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J].中国环境科学,2017,37(3):813-820.
- [7] WANG T, XUE L K, 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: 1582-1596.
- [8] 河北省统计局.河北省 2019 年国民经济和社会发展统计公报

- [R]. 石家庄:河北省统计局,2020.
- [9] 秦人洁,张洁琼,王雅倩,等.基于 KZ 滤波法的河北省 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度不同时间尺度分析研究[J].环境科学学报,2019,39(3):821-831.
- [10] 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).
- [11] 马志强,王跃思,孙扬,等.北京市与香河县大气臭氧及氮氧化合物的变化特征[J].环境化学,2007,26(6):832-837.
- [12] 黄争超,洪礼楠,尹佩玲,等.保定市夏季臭氧污染来源及大气传输影响研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(3):665-672.
- [13] 赵乐,刘新军,范莉茹,等.石家庄夏季典型时段臭氧污染特征及来源解析[J].中国环境监测,2019,35(4):78-84.
- [14] MORAN P A P. The interpretation of statistical maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1948, 10(2): 243-251.
- [15] ORD J K, GETIS A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286-306.
- [16] 王孜,郑有飞,柳艳菊,等.京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J].中国环境科学,2019,39(7).
- [17] 孙国金,朱绍东,李优楠,等.绍兴市臭氧污染特征及气象因素分析[J].环境污染与防治,2020,42(5):608-613.
- [18] 邢台市人民政府.德龙钢铁关停拆除两座烧结机[EB/OL]. [2020-06-18]. http://www.xingtai.gov.cn/ywdt/jrxt/xtyw/201906/t20190617_534744.html.
- [19] 邯郸市生态环境局.邯郸市 2019 年夏季 VOCs 暨臭氧协同治理攻坚行动方案[EB/OL]. [2020-05-06]. http://hdzfxgk.hd.gov.cn/gszbm/auto23735/202001/t20200107_1233284.html.
- [20] 赵伟,高博,刘明,等.气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J].环境科学,2019,40(1):55-66.
- [21] 齐艳杰,于世杰,杨健,等.河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J].环境科学,2020,41(2):587-599.
- [22] 何炬,张雪松,邓振,等.多尺度下农村居民点空间分布特征及其影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(6):8-17.
- [23] 曾佩生.京津冀及其周边地区低空局地风场气候特征的研究[D].成都:成都信息工程大学,2018.
- [24] 张华,陈琪,谢冰,等.中国的 PM_{2.5} 和对流层臭氧及污染物排放控制对策的综合分析[J].气候变化研究进展,2014,10(4):289-296.
- [25] 王燕丽,薛文博,雷宇,等.京津冀地区典型月 O₃ 污染输送特征[J].中国环境科学,2017,37(10):3684-3691.
- [26] 保定市统计局.保定市 2018 年国民经济和社会发展统计公报[R].保定:保定市统计局,2019.
- [27] 石家庄市统计局.石家庄市 2019 年国民经济和社会发展统计公报[R].石家庄:石家庄市统计局,2020.
- [28] 孙爽,李令军,赵文吉,等.京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J].环境科学,2019,40(4):1585-1593.
- [29] 杨俊益,辛金元,吉东生,等.2008—2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析[J].环境科学,2012,33(11):3693-3704.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2020-07-26)