

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第 45 卷 第 3 期 2024 年 3 月 15 日

目 次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	(1233) (1243) (1254) (1255) (1274) (1285) (1293) (1293) (1304) (1315) (1328) (1337)
·····································	(1349) (1361) (1371) (1382) (1392) (1402)
 崔志谋,史小红,赵胜男,卢俊平,张昊,刘莹慧,郭鑫,王彦隽 重庆市长寿湖水库表层水体重金属时空分布及风险评价 张瑞淏,刘娅君,罗泳楠,李杰芹,李彩霞,李佳佳,张成长江流域微塑料污染特征及生态风险评价 "丁爽,李卫明,张续同,刘子健,高雅坤,李映成,王芳炜 "江水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 "丁夏人黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价 "新南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价 都阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 	(1415) (1428) (1439) (1448) (1457) (1468) (1468) (1480) (1492)
杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测 不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 ······代孟均,张兵,杜倩倩,孙季珲,田蕾,王义东 长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素 ····································	(1502) (1512) (1525) (1539) (1553) (1553) (1561) (1577) (1586)
基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析 ————————————————————————————————————	(1530) (1598) (1598) (1615) (1629) (1644) (1655) (1665) (1674)
 一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、	(1684) (1692) (1702) (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	(1724) (1739) (1749) (1760) (1760) (1769) (1781) (1793) (1803) (1812) (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 ····································	(1821) (1830) (1840) (1849) (1859)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析

潘锦秀,安欣欣,刘保献*,李云婷,李倩,孙峰,张章,邱启鸿,陈阳

(北京市生态环境监测中心大气颗粒物监测技术北京市重点实验室,北京 100048)

摘要:基于 2016~2022年北京市环境监测和气象观测数据,结合后向轨迹聚类和潜在源区贡献分析北京市臭氧(O₃)污染特征、 气象影响和潜在源区.结果表明,2016~2022年北京市共发生41次具有跳变特征的O₃污染过程,平均为5.9次·a⁻¹,发生时间集中 在5~7月,跳变当日(OJD2)较跳变前一日(OJD1)的ρ(O₃-8h)平均值偏高78.3%,峰值浓度偏高78.9%,OJD2区域O₃浓度高值带 呈现由南向北推进的特征.北京市跳变O₃污染发生主要原因可归纳为不利气象条件导致的本地积累叠加区域传输影响.跳变 型O₃污染发生时具有偏南风频率增加、温度上升、气压降低和降水减少的特征,偏南风频率增加为O₃及其前体物的传输提供条 件,在本地高温作用下快速发生光化学反应,叠加降水较少,综合推高OJD2的O₃浓度水平.聚类分析得到6条气团输送路径, OJD2来自偏北方向的气团减少11.2%,来自偏南和偏东方向气团增加6.7%和4.4%,气团以短距离传输为主,偏南和偏东方向 对应的O₃浓度较高,对北京污染贡献较大.潜在源区分析揭示 OJD2的O₃污染的主要潜在源区是京津冀中南部和东部,贡献了 82.6%污染轨迹.跳变型O₃污染区域输送贡献明显,需要加强京津冀区域联防联控.

关键词: 臭氧污染; 跳变; 气象要素; 轨迹聚类; 潜在源区

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1371-11 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202304048

Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in

Beijing

PAN Jin-xiu, AN Xin-xin, LIU Bao-xian*, LI Yun-ting, LI Qian, SUN Feng, ZHANG Zhang, QIU Qi-hong, CHEN Yang

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China) **Abstract:** Based on environmental monitoring data and meteorological observation data from 2016 to 2022 in Beijing, combined with backward trajectory clustering and potential source area contribution analysis, the characteristics, meteorological impacts, and potential source areas of ozone (O_3) pollution were analyzed. The results showed that there was a total of 41 O₃ pollution processes with jumping characteristics in Beijing from 2016 to 2022, with an average of 5/9 times a year. The occurrence time was concentrated in May to Iuly, and the day of the jump (OJD2) was higher than the day before the jump (OJD1). The average value of $\rho(O_3 \cdot 8h)$ was 78.3% higher, and the peak concentration was 78.9% higher. The high O₃ concentration zone in the OJD2 region exhibited a characteristic of advancing from south to north. The main reasons for the occurrence of jumped O₃ pollution in Beijing could be summarized as local accumulation caused by unfavorable meteorological conditions and regional transmission impact. The occurrence of jump-type ozone pollution was characterized by an increase in southerly wind frequency, temperature rise, pressure decrease, and precipitation decrease. The increase in southerly wind frequency provided conditions for the transport of O₃ and its precursors, and rapid photochemical reactions occurred under local high temperatures, with less superimposed precipitation, comprehensively pushing up the ozone concentration level of OJD2. Six air mass transporting pathways were identified through clustering analysis; the air mass from the direction north of OJD2 decreased by 11.2%, whereas the air mass from the south and east directions increased by 6.7% and 4.4%, respectively, with the air masses mainly transmitting over short distances. The ozone concentration corresponding to the south and east directions w

Key words: ozone pollution; jumping characteristics; meteorological elements; trajectory clustering; potential source area

随着我国工业化和城市化进程的加快,PM_{2.5}和 O₃成为对城市大气环境和人类健康影响最大的2类 污染物^[1-3].自2013年《大气污染防治行动计划》颁布 实施以来,北京市大气污染防治工作取得显著成效, 城市 PM_{2.5}浓度持续下降^[4,5],2021年北京市ρ(PM_{2.5}) 年均值下降至33 μg·m⁻³,较2013年下降了63.1%,这 一改善效果被联合国环保署称为"北京奇迹"^[6].但 近年来随着经济的发展、人口的增长以及机动车保 量的增加,O₃污染的问题日益突出,已经成为影响北 京市环境空气质量的又一大因素^[7].近地面O₃除少 量来自平流层传输外,主要由挥发性有机化合物 (VOCs)和氦氧化物(NO₂)等前体物在太阳光作用下 发生光化学反应生成^[8,9],对人体健康^[10]和生态系统^[11]具有不利影响.据统计2015~2019年中国0₃污染导致过早死亡人数正缓慢增加,空间分布特征与0₃浓度相似^[12].

我国不同区域秋冬季部分大气重污染过程中, 会出现 PM_{2.5}暴发式增长现象^[13-15],国内外研究者已 对 PM_{2.5}暴发式增长的形成机制展开了多项研

基金项目:北京市科技计划项目(Z211100004321006);国家重点研 发计划项目(2021YFC1809000)

收稿日期: 2023-04-06;修订日期: 2023-05-25

作者简介:潘锦秀(1990~),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向 为大气环境监测,E-mail:Jinxiu_Pan@163.com

^{*} 通信作者,E-mail:liubaoxian28@163.com

究[16~18]. 京津冀区域夏季0,污染过程频发[19.20],在研 究该区域夏季0,污染时,发现一些污染过程中会出 现 O₃跳变的特征.统计北京市长期的 O₃最大 8 h 滑动 平均(03-8h)浓度发现,03-8h浓度由前一日的优良水 平,跳变两个或以上空气质量级别第二日上升至轻 度、中度甚至重度污染现象常有发生.0,作为光化学 反应的产物,其与前体物NO,和VOCs存在复杂的非 线性关系[21-23],加之夏半年天气系统切换较快,容易 出现温度快速升高、气压快速下降、南风频率明显 增加的特征,大大地增加了空气质量预报的难度,使 得发生跳变的 03 污染的预防与控制十分困难. 现阶 段已有研究针对 0,区域持续性污染过程研究较多, 主要有不利气象条件下本地光化学产生与区域传输 两个方面原因.持续性0.污染过程期间,京津冀区 域典型天气形势为高温、低湿、异常南风、下沉气流 和异常反气旋气团作用[24,25],以来自于北京市以南 的短距离传输为主,主要潜在源区是河北省南部、山 西省东北部、河南省东北部以及山东省北部[26,27],但 针对O₃污染的跳变型特征及成因仍缺乏系统性的 认知.

因此本研究分析北京市O₃污染跳变型特征、气 象影响及潜在源区,通过更好地揭示O₃跳变的原因, 以期为空气质量预报及区域联防联控决策提供参 考,并为我国的O₃污染防治工作提供参考、

1 材料与方法

1.1

数据来源

本研究选取了 2016~2022 年北京市 O₃-8h、O₃小时(O₃-1h)和NO₂小时的环境监测数据和气象观测数 据进行分析,环境监测数据来自于北京市生态环境 监测中心,京津冀区域O₃-8h数据来自中国环境监测 总站.气象数据来自中国气象局(http://data.cma. cn/),要素包括日及小时降水量、相对湿度、气温、气 压、风速风向.后向轨迹模型中使用的气象资料为 美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化 系统(GDAS)数据,空间分辨率为1°×1°,时间分辨率 为6h,分别为00:00、06:00、12:00和18:00(UTC,世 界时),变量包括气温、气压、湿度、风场和压力垂直 速率等.GDAS资料从公开网址(ftp://arlftp.arlhq. noaa.gov/pub/archives/gdas1)下载得到.

O₃ 污染分析是按照《环境空气质量指数(AQI) 技术规定(试行)》(HJ 633-2012),根据 O₃-8h 的划 分为5个级别:优(0~100 μg·m⁻³)、良(101~160 μg·m⁻³)、轻度污染(161~215 μg·m⁻³)、中度污染 (216~265 μg·m⁻³)和重度污染(266~800 μg·m⁻³).本 研究以 O₃-8h 浓度前后两日变化两个或以上空气质 量级别作为 O₃发生跳变的判定依据,具有该类跳 变特征的 O₃污染过程记为一次跳变型 O₃污染过 程,其中,跳变前一日记为 OJD1,跳变当日记为 OJD2.在研究 O₃污染跳变型特征与气象要素的关 系用到 O₃-1h,当其浓度超过国家二级标准 200 μg·m⁻³时,即为超标.

1.2 后向轨迹聚类与潜在源区贡献分析

与CAMx和CMAQ等复杂空气质量模型相比,后向轨迹分析具有不依赖污染物排放信息且容易掌握等优点,被广泛应用于污染输送与来源分析^[28-30].有研究后向轨迹模型、潜在源区贡献(potential source contribution function, PSCF)模型,将观测到大气污染物信息与气象信息相结合,从而确定大气污染物的迁移路径及潜在源区^[31-33].

本研究基于 Meteoinfo 软件以及 GDAS 资料对北 京市 2016~2022 年发生跳变的 O₃污染过程的 OJD1和 OJD2 分别进行后向轨迹聚类及 PSCF 分析,以北京 市(40°N,116°E)为后向轨迹起点,气团高度设置为 10 m,模拟时间分辨率为 1 h,向后追溯 24 h 气团轨 迹,反演 OJD1 和 OJD2 均得到 984 条后向轨迹,在此 基础上采用欧氏距离法,对到达起点的所有轨迹进 行聚类分组,采用总空间方差(total spatial variance, TSV)方法确定聚类数目为 6类.受体高度取 10 m 主 要考虑到目前大气国控点高度一般在 3~15 m 的近地 面,计算 24 h 后向轨迹主要基于 O₃ 明显的日变化 特征.

潜在源区贡献分析是一种基于气流轨迹分析来 识别污染源区的方法^[34],该方法基于后向轨迹模拟 的结果,首先将研究区域划分为 $i \times j$ 个网格,利用污 染轨迹 M_{ij} 与所有轨迹 N_{ij} 在途经网格时的停留时间比 值来表征每个格网格对受体点的污染贡献^[35-37],即 第i行第j列格点的污染源贡献值可定义为 PSCF_{ij}= M_{ij}/N_{ij} ,其次,为减少 PSCF作为一种条件概率分析的 不确定性,引入权重函数 W_{ij} 来尽可能降低不确定性 以减少误差,WPSCF_i值($W_{ij} \times PSCF_{ij}$)越大表示经过该 网格污染轨迹比例越高,高值所在区就是影响O₃的 潜在源区.权重函数 W_{ij} 具体定义为:

 $W_{ij} = \begin{cases} 1. 0, & N_{ij} > 3. 0N_{avg}, \\ 0. 7, & 1. 5N_{avg} < N_{ij} \le 3. 0N_{avg}, \\ 0. 4, & 1. 0N_{avg} < N_{ij} \le 1. 5N_{avg}, \\ 0. 2, & N_{ij} \le 1. 0N_{avg}. \end{cases}$

式中,Navg为所有格点轨迹数的平均值.

本研究将 OJD1 和 OJD2 到达北京的轨迹 $\rho(O_3-$ 1h)超过 120 μ g·m⁻³(OJD2 O₃-1h 平均值)认为该轨迹 为污染轨迹,反之则为清洁轨迹.

2 结果与分析

2.1 跳变型 O₃污染过程概况

2.1.1 总体特征

表1给出2016~2022年北京市发生跳变的0,污 染过程跳变前后两日 03-8h 浓度差及空气质量级别 差统计结果.北京市2016~2022年共发生41次跳变 型 0. 污染过程,不同年份发生次数处于 2~10次范围 内,平均为5.9次·a⁻¹,其中2016年、2018~2020年发 生频次较高,平均为6.3次·a⁻¹,2017年、2021~2022 年发生频次相对较低,平均为3.3次·a⁻¹.跳变型0,污 染过程主要发生在 5~7月,占统计案例的 80%,而 5~7 月案例中又以6、7月居多.41个案例中OJD2较OJD1 空气质量等级跳变2级案例36个,占统计案例的 88%,前后两日ρ(0₃-8h)差处于71~140 μg·m⁻³范围 内,其中空气质量由OJD1的1级优跳变为OJD2的3 级轻度污染案例18个,由2级良跳变为4级中度污染 案例16个,由3级轻度污染跳变为5级重度污染案例 2个.OJD2较OJD1空气质量等级跳变3级案例5个, 占统计案例的12%,前后两日ρ(0₃-8h)差处于118~ 168 μg·m⁻³范围内,其中空气质量由 OJD1 的1级优跳 变为OJD2的4级中度污染案例2个,由2级良跳变为 5级重度污染案例3个.

为了研究跳变型03污染的气象条件变化,表1还 对跳变前后两日最高气温差(℃)、最低气压差 (hPa)、平均湿度差(%)、日累计降水量差(mm)和风 向进行了统计.结果表明,跳变型0,污染案例中 OJD2与OJD1相比:①偏南风频率增多.跳变型0,污 染过程发生时 OJD1 风向多为东北风或偏东转西南 风作用,全天都受南风作用案例较少,OJD2南风作用 概率较大,南风有利于0,及其前体物汇聚.②最高气 温存在增温现象. OJD1最高气温处于 19.0~37.8℃之 间,平均最高温度为30.2℃,而OJD2最高气温处于 23.9~38.4℃之间,平均最高温度为32.6℃,较OJD1 平均高2.4℃,高温度有利于促进光化学反应生成 0.3地面气压存在减压现象.地面变压相对比较平 稳,平均为负变压(-0.9hPa),负变压有利于O₃及其 前体物汇聚.④降水过程少.0JD1受午后雷阵雨作 用较频繁,31.7%的案例出现降水过程,平均日累计 降水量为12.3 mm, 而 OJD2出现降水的案例为 12.2%,平均日累计降水量为3.9 mm,降水发生频次 及降水量均低于OJD1. 降水发生时,一方面太阳辐射 减弱,抑制0,生成,另一方面,已经生成的0,也会得 到一定程度的清除. ⑤地面相对湿度一般偏高. OJD1 受降水影响,日均相对湿度处于30%~90%之间, OJD2 受暖湿气流影响,处于 30%~79% 之间,平均相

对湿度相当,均为57%.

跳变3级0,污染过程与所有跳变案例平均状态 (简称"平均状态")相比,OJD1和OJD2均具有更高的 最高温度,其范围分别为27~37.8℃和31~38.4℃之 间;负变压程度更大(-1.2hPa);空气较平均水平干 燥,相对湿度较"平均状态"降低7个百分点;无降水 现象发生.综合而言,跳变3级的案例中,OJD1上午 时段在东北风下,传输至京的前体物浓度水平较低, 即使温度较高、空气干燥, 0,浓度仍能维持优良水 平,而OJD2风向以偏东风转南风作用,利于区域东部 和中南部高浓度0,及其前体物传输,叠加各气象要 素的大幅变化均向着利于O₃生成的方向发展,使得 空气质量较前一日跳变3级.因此,当夏季预报出地 面气压场持续减弱,风向由东北风转偏南风作用向 南风作用为主转变,气温出现大幅上升时出现 O₃跳 变的可能性较大,在预报时还应特别注意午后降水 对当日O3生成抑制、清除作用,及降水过程后一日的 0.预报.

2.1.2 区域特征

如图1所示为跳变前后两日京津冀区域O₃-8h浓 度平均值空间分布情况,OJD1区域呈现"南高北低" 的空间分布特点 [图1(a)], 区域中南部城市的 $\rho(0_3-$ 8h)较高,为140~160 μg·m⁻³,区域北部的较低,为 120~130 µg·m⁻³. OJD2 区域各城市 O₃-8h 浓度平均值 普遍有所上升,高浓度带明显向西北方向延伸,呈现 "山前高平原地区相对较低"的分布态势[图1(b)], 北京发展成为 $\rho(0_3-8h)$ 区域最高值,为213 $\mu g \cdot m^{-3}$, 其次为保定和廊坊,其浓度均大于200 µg·m-3,区域 中南部城市处于170~190 µg·m-3之间. 就跳变前后 两日 O3-8h 浓度差而言,北京 OJD2 较 OJD1 高 93 µg·m⁻³,其次为北京近周边的廊坊、天津、唐山和保 定,OJD2较OJD1高50~70 µg·m-3,而区域中南部城市 OJD2 仅较 OJD1 高 20~30 µg·m-3, 这主要可能是在偏 南风作用下,区域中南部高浓度O₃及前体物向北传 输,叠加本地排放发生光化学反应生成的污染物在 山前堆积,使得OJD2山前城市O₃浓度较前一日发生 跳变,体现了0,区域传输的特征.

2.1.3 日变化特征

从跳变前后的 O_3 日变化情况分析[如图 2(a)], 跳变前后 $\rho(O_3$ -1h)平均值为79 μ g·m⁻³和120 μ g·m⁻³, 跳变后 O_3 浓度有较为明显的上升,升幅为52%. 总体 而言,跳变前后两日 O_3 浓度峰值出现在17:00,谷值 出现在06:00,但明显不同的是,OJD2的 $\rho(O_3$ -1h)平 均峰值为229 μ g·m⁻³,远远大于OJD1的峰值(128 μ g·m⁻³), $\rho(O_3$ -1h)谷值则表现为OJD1较OJD2高4 μ g·m⁻³,该特征与韩丽等^[38]研究的成都地区O₃超标天

— 衣Ⅰ 2010~2022 中北京印姚安空 U₁/5 架过住 U₁-01 承皮及	表1	2016~2022年北京市跳变型 O	,污染过程 O,-8	h浓度及气象要素统i
---	----	--------------------	------------	------------

Table 1	Statistical results of O	-8h and meteorological	elements at region o	f jumping ozone j	pollution in Beijing fr	om 2016 to 2022
				J. L. Q I		

		5		-				-
年份	OJD2日期 (月-日)	$\rho(O_3-8h)$ 差 /µg・m ⁻³	空气质量级 别差	最高温度 差/℃	最低气压 差/hPa	平均湿度差 /%	累积降水 差/mm	风向变化
	04-28	86	2	6.6	-0.3	-1.2	0	东北转西南:偏东转东南
	05-17	100	2	0.8	0.5	9.3	0	西南;偏南
	05-30	133	3	3.3	-3.6	10.6	0	东北转偏南;偏东转东南
	06-01	71	2	2.0	3.6	-5.1	0	偏东转东南;东北转偏南
	06-08	79	2	4.1	-3.2	-4.7	-13.7	偏东转偏南;偏南为主
2016	06-29	78	2	6.1	-1.3	-4.3	-24.6	偏北转西南;偏东转西南
	07-13	79	2	6.0	4.1	-14.0	-0.5	偏南转偏北;偏东转偏南
	07-17	137	3	4.0	3.3	-2.8	0	东北转西南;东北转偏南
	07-27	81	2	1.4	-1.8	12.3	7.4	东北转偏南;偏南为主
	08-14	119	2	0.0	0.6	-14.1	0	偏北为主;东北转西南
	07-07	82	2	6.1	-6.7	-17.7	-38.4	偏东为主;西南转东南
2017	07-11	115	2	-1.6	2.9	7.3	0	偏东转偏南;偏东转西南
2017	07-16	82	2	2.1	1.7	-3.0	-1	偏东为主;偏东转偏南
	08-08	71	2	-0.6	-2.2	12.7	0.9	偏北转偏南;偏南为主
	05-24	66	2	1.9	-3.9	12.1	0	西南为主;西南为主
	05-31	63	2	1.4	2.4	4.6	0	东北转西南;东北转西南
	06-21	66	2	-1.1	1.0	-9.6	0	西南为主;偏东转西南
2018	06-23	118	3	4.5	-3.3	-3.9	0	偏东转西南;偏东转偏南
	07-08	122	2	3.9	-1.2	-1.4	0.5	偏东为主;东南为主
	08-09	86	2	3.4	0.5	-7.8	-18.8	东北转偏东;西南为主
	08-17	68	2	-0.6	-1.9	11.8	0	东北转偏南;偏南为主
	05-23	108	2	2.6	0.9	-3.3	0	东北转偏南;偏东转偏南
\cap	06-11	84	121	0.2	1.2	9.0	0	东北转东南;东北转东南
61	06-18	95	20	5.4	-4.3	-0.2	0	偏南为主;东北转偏南
2019	07-18	130	5 2/1	4.4	-1.2	-2.6	0.2	东北转偏东;东北转偏南
25	07-21	140	2	8.9	-1.1	-11.2	0	偏南为主;西南为主
Ca 1/1	07-30	89	2	3.8	-0.8	-11.7	-32.2	偏北为主;西南为主
NG VI	08-15	88	2	1-0.2	-4.3	-2.0	0	西南转东北;偏东转西南
10P	05-06	95	2	3.2	2.6	-12.3	0	偏南为主;东北转东南
	05-28	97	2	2.8	-1.4	10.8	-0.2	西北为主;东北转偏南
M	06-01	82	2	2.8	-3.0	3.0	-9.2	东北转偏西;偏北转西南
2020	06-07	61	2	4.8	-2.9	-1.6	0	偏北转偏东;东北转偏南
	06-16	69	2	-0.9	-1.0	9.8	0	偏南为主;东北转西南
	07-20	121	3	2.1	1.5	-2.3	0	东北转西南;西南为主
	09-06	68	2	0.3	2.1	14.3	0	东北转偏南;东北转偏南
2021	06-15	81	2	5.5	1.9	-25.4	-2.3	北转东;偏东转东南
2021	07-31	97	2	4.0	-0.6	0.5	-8.5	偏北为主;东北转偏南
	04-08	89	2	0.8	-7.4	21.1	0	西南为主;东北转东南
2022	05-28	103	2	0.2	-5.8	5.7	0	东北转西南;西南为主
2022	06-25	168	3	0.6	-2.8	2.6	0	东北转西南;偏南为主
	07-16	87	2	-2.9	-1.9	-1	0	东北转西南;偏东转偏南

变化特征较一致.其主要原因从时次的分布上分析, 00:00~08:00时,OJD2的ρ(O₃-1h)较OJD1的平均低 3~14 μg·m⁻³,这是由于OJD2该时段是在OJD1夜间 高浓度氮氧化物背景浓度的基础上叠加大气较稳 定,氮氧化物在近地面累积,高于OJD1同时间段浓度 水平,导致在午夜-清晨时段氮氧化物对O₃的滴定消 耗作用加强,从而使得O₃浓度下降幅度大于OJD1. 09:00开始受太阳辐射影响气温上升,光化学反应活 跃消耗NO₂生成O₃,午后太阳辐射最强,在光化学反 应作用下O₃于17:00左右达到最大浓度,从时次的分 布上分析,该时段OJD2受传输影响及本地生成影响, O₃小时浓度水平快速上升,迅速超过OJD1同时间段 浓度水平,浓度差在7~105 μg·m⁻³范围内.17:00到午 夜是O₃消耗阶段,主要是17:00后紫外辐射强度迅速





减弱以及新的 O_3 前体物排放高峰对 O_3 浓度起到消耗作用,使得 O_3 快速下降,从时次的分布上分析,该时段由于OJD2起点较高, $\rho(O_3)$ 水平较OJD1高52~102 μ g·m⁻³.

NO₂的日变化规律与O₃呈相反变化趋势[如图 2 (b)],跳变前后 ρ (NO₂)小时平均值为 30 μ g·m⁻³和 33 μ g·m⁻³,升幅为 10%.从时次的分布上分析,凌晨时段 光解反应停滞,同时 NO 和O₃反应生成 NO₂,造成夜 间 NO₂高值,导致 OJD2 00:00~08:00 时段 ρ (NO₂)较 OJD1 平均高 8~11 μ g·m⁻³.09:00~17:00 随着太阳辐 射增强,OJD2 与 OJD1 NO₂浓度差缩小,在O₃浓度达 到峰值浓度时,浓度差达到 0.17:00 到午夜,OJD2 较 OJD1 低 0~6 μ g·m⁻³,一方面可能与区域传输及化学 反应有关,另一方面可能与该时段 OJD2 地面温度较 高,边界层高度更高,更有利于 NO₂消散有关.

跳变 3 级的 O_3 污染过程 O_3 和 NO_2 的日变化规律 与"平均状态"较一致,在凌晨时段 OJD2 的 $\rho(O_3)$ 低于 OJD1 的,浓度差在该时段较"平均状态"有所缩小;在 白天-夜间时段 OJD2 的 $\rho(O_3)$ 高于 OJD1 的,且浓度差 在该时段较"平均状态"扩大.跳变 3 级案例 O_3 日变 化与"平均状态"相比,OJD1在 03:00~06:00 时段 $\rho(O_3)$ 低于"平均状态"3~6 μ g·m⁻³,对应的 $\rho(NO_2)$ 较 "平均状态"高 0~8 μ g·m⁻³,说明在跳变 3 级的案例中 OJD1 该时段氮氧化物对 O_3 滴定作用强于"平均状 态";而 OJD2在 03:00~06:00表现为 $\rho(O_3)$ 高于"平均 状态"3~9 μ g·m⁻³,对应的 $\rho(NO_2)$ 高于"平均状态"1~5 μ g·m⁻³,说明跳变 3 级的污染过程 OJD2 该时段氮氧 化物对 O_3 滴定作用强度弱于"平均状态",造成 O_3 在 凌晨时段累积,为白天高浓度 O_3 提供了较高的起点.





2.2 跳变型 03 污染与气象要素的关系

2.2.1 风速和风向

从风向频率可以大致了解不同方向的气流对O₃ 的相对影响程度,图3是跳变前后两日不同风向风速 和O₃-1h浓度的风玫瑰图,可以看出,OJD1频率最高 风向为东北风[图3(a)],达到21.8%,北风和西北风 频率和为14.4%,南风和西南风频率分别为12.9%

和 20.4%, 而 OJD2 西南风频率最大 [图 3(b)], 达到 25.4%,其次为南风23.1%,偏南风(东南、南风和西 南风)频率和较 OJD1 增加 15.5%, 偏北风(北风、东 北风和西北风)频率和较 OJD1 减少 10%. 当风向以 偏南风为主时,有利于上游的O,及其前体物向北京 输送,继而在高温作用下快速生成0,达到污染水平, 偏南风频率增加是跳变型 0. 污染发生的主要原因.

就不同风向平均 $\rho(0_3-1h)$ 而言,除东北和西北风,其 他风向 OJD2 的 ρ (O₃-1h) 平均值水平基本较 OJD1 高 $3 \sim 72 \mu g \cdot m^{-3}$,当风向为东南、南风和西南风时 $\rho(O_3 - P_3)$



表 2

1h)较高, OJD1的分别为78、95和97 μg·m⁻³, OJD2 的分别为148、167和153 μg·m⁻³. 就不同风速下ρ (0₃-1h)平均值而言,跳变前后两日风速基本集中在 1~3 m·s⁻¹,频率达到70% 左右,随着风速的增大频率 减小.如表2所示,O₃浓度从静风状态(≤1.0m·s⁻¹)开 始随风速增加而增加,当风速高于4m·s⁻¹后出现 O₃ 浓度随风速增加而降低现象.综合而言,当风速为3~ $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 4~5 m·s⁻¹的偏南风时 O₃处于高浓度水平, OJD2的ρ(0₃-1h)较OJD1的分别高111 μg·m⁻³和101 $\mu g \cdot m^{-3}$.



黑色实线为风向频率,颜色表示不同风速风向下0,浓度 图 3 OJD1和OJD2不同风向风速及O₃浓度分布 O3 concentrations distribution under different wind directions and wind speeds of OJD1 and OJD2 OJD1和OJD2不同风向风速范围内频率及O3浓度水平

	Table2 O3 concer	ntrations under the differ	rent ranges of wind speeds and wi	ind direction of OJD1 a	und OJD2	
C 30	IT I		OJD1	8 11	OJD2	
RVU	项目	风频/%	$ ho(O_3-1h)$ 平均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$	风频/%	$\rho(O_3-1h)$ 平均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$	
1.2	北风	7.9	67	3.6	70	
("]	东北	21.8	66	21.0	53	
1	偏东	15.1	69	12.5	93	
回点	东南	6.8	78	7.1	148	
)A([H]	偏南	12.9	95	23.1	167	
	西南	20.4	97	25.4	153	
	偏西	7.1	75	4.2	93	
	西北	6.5	76	1.5	74	
	≤1	12.3	55	12.2	49	
	1~2	42.5	74	44.7	92	
团油/m+a ⁻¹	2~3	27.3	88	24.9	154	
八述/m·s ·	3~4	11.1	97	10.7	208	
	4~5	3.0	88	4.7	189	
	<u>\</u> 5	2.2	74	1.2	02	

2.2.2 气温和气压

图4为跳变前后两日O₃-1h浓度与温度、气压、 相对湿度和降水量散点图. OJD1 的 $\rho(0_3-1h)$ 大于 200 μg·m⁻³的散点个数较少[图4(a)],仅有8个,超 标平均温度为32.2℃,最低超标气温为27.8℃;OJD2 的ρ(0₃-1h)大于 200 μg·m⁻³散点数明显较多,为187 个,超标平均温度为32.6℃,最低超标气温为

22.6°C,大量超标散点集中在28~38°C之间,ρ(0₃-1h)最大值较 OJD1 高 42%. 0,浓度与温度呈正相关 关系, OJD2的O3浓度与温度相关性更好, R²等于 0.58 明显大于 OJD1 的 0.38,表明 OJD2 的 O3浓度对 温度更为敏感.

京津冀地面气压场东高西低会导致来自高纬度 的北风减弱[44,45],同时京津冀区域地面异常南风则加 剧了污染物向京津冀区域的传输.O₃浓度与地面气 压为负相关关系[图4(b)],OJD2地面气压较OJD1 相比低 3~5 hPa,低气压控制下京津冀区域通常为高 温、晴空、偏南风和高日照时数天气,利于O₃光化学 反应生成及传输.跳变前后两日地面气压分别处于 990~1018 hPa和987~1013 hPa.OJD1在993 hPa和 1000 hPa附近时出现O₃高值,OJD2在988 hPa和995 hPa附近出现高值.

2.2.3 湿度和降水

湿度和降水也是影响 O₃浓度水平的重要的气象 要素,OJD1 出现 O₃-1h 超标时湿度处于 35% 左右[图 4(c)],超标现象发生的时间集中于 15:00~18:00. OJD2 出现 O₃-1h 浓度超标时,湿度处于 16%~70% 范 围内,时间范围较 OJD1 明显扩大,在 11:00~20:00 均 有 O₃-1h 浓度超标现象发生. OJD1 和 OJD2 在湿度为 38%和46%左右存在光化学反应强度临界值,分别 在38%和46%之前,随湿度的增加而增大,而在这之 后随湿度的增加而减小,当湿度大于70%,跳变前后 两日均未有超标现象发生.

跳变型 O₃污染过程降水主要发生在 OJD1[图4 (d)],统计的 984 h 中有 79 h 出现降水,其发生时间 主要在夜间-凌晨和午后-傍晚时段,小时降水量在 0.1~16.4 mm内,有降水发生时, ρ (O₃-1h)均低于 150 µg·m⁻³,特别是发生在午后-傍晚时段的降水过 程对 O₃的生成和清除起到明显作用,这也是 OJD1 的 O₃浓度较低的一个重要原因;而 OJD2 降水过程 明显较少,统计的 984 h 中仅 13 h 出现降水,降水 量较小在 0.2~4.7 mm内,出现时间主要在夜间-凌 晨时段,对午后高浓度 O₃生成和清除未起到明显 作用.



图4 O₃浓度与气象要素的散点图和拟合直线



^{2.3} 跳变型 O,污染传输路径及潜在源区

聚类轨迹和潜在源区空间分布显示(图5和表 3),就OJD1而言,来自北京偏东和偏北的气团概率较 大.聚类1、2、3和6都来自北京西北方向,其中聚类 2(9.3%)为长距离输送气团,起源于蒙古国,途经我 国内蒙地区和京津冀区域北部,气团较清洁传输距



Fig. 5 Clustering of backward trajectories of OJD1 and OJD2 and potential source regions of O_3

表 3 OJD1和 OJD2 各聚类轨迹参数统计

	7	Table3 Paramete	er statistics of each clus	ter trajectory of OJD1 a	nd OJD2	mad
项目	聚类编号	占比/%	ρ(0 ₃ -1h)平均值 /μg·m ⁻³	污染轨迹频率 注 /%	污染轨迹ρ(O ₃ -1h)平均 /μg·m ⁻³	」值 污染轨迹贡献 率/%
	1	12.2	91	30.0	141	19.1
	2	9.3	69	17.6	157	8.5
OID1	3	8.1	83	30.0	157	12.8
0JD1	4	17.2	79	13.6	147	12.2
\cap	1 5	41.2	75	13.3	160	28.7
61	6	12.1	84	29.4	147	18.6
1.2	611	19.8	74	22.6	183	9.6
25	2	10.7	101	34.3	196	7.8
0102	V C 3	16.1	166	70.3	211	24.2
9 0,02	CR VA	7.8	145	67.5	206	11.3
1º P	5	15.1	114	40.3	188	13.1
	6	30.5	125	52.0	195	34.0

离远,传输速度快,有利于污染物的扩散,导致对应 的 $\rho(O_3-1h)$ 最低为 69 μ g·m⁻³,其中污染轨迹占该类 轨迹总数的 17.6%,贡献率为 8.5%,污染轨迹的 $\rho(O_3-1h)$ 平均值为 157 μ g·m⁻³,从潜在源区可以看出, 聚类 2的 WPSCF在 0.2~0.3之间.聚类1(12.2%)、 3(8.1%)和6(12.1%)均来自内蒙古中部地区的短距 离输送,途经京津冀区域北部,对应的 $\rho(O_3-1h)$ 平均 值在 OJD1中处于较高浓度水平,分别为91、83 和 84 μ g·m⁻³,这 3 类轨迹分别贡献了 19.1%、12.8% 和 18.6%的污染轨迹,污染轨迹 $\rho(O_3-1h)$ 平均值为 141、157 和 147 μ g·m⁻³.聚类4(17.2%)和聚类 5(41.2%)分别为起源于京津冀区域中南部和东部短 距离传输气团,其WPSCF值在 0.1~0.2和 0.2~0.6, 分别贡献了 12.2%和 28.7%的污染轨迹,污染轨迹 $\rho(O_3-1h)$ 平均值分别为147 μ g·m⁻³和 160 μ g·m⁻³.

与OJD1相比,OJD2来自偏北方向的气团减少

11.2%, 而来自偏南和偏东方向气团增加6.7%和 4.4%, 以短距离传输为主, 且受气象条件影响, 潜 在源区 WPSCF 值增加, 范围扩大, 各类轨迹携带的 O₃-1h 浓度均较 OJD1 增加. 聚类 1 (19.8%) 和 2 (10.7%)都来自北京西北方向,气团相对清洁,对 应的 $\rho(O_3-1h)$ 平均值在OJD2中较低,分别为74 μg·m⁻³ 和 101 μg·m⁻³, 从 潜 在 源 区 可 以 看 出, 其 WPSCF 值在 0.4 以下,聚类 1 和 2 贡献污染轨迹的 概率低于其他类型,分别为9.6%和7.8%,污染轨 迹 ρ(0₃-1h) 平均值为 183 μg·m⁻³ 和 196 μg·m⁻³,其 中聚类2的污染轨迹 $\rho(0_3-1h)$ 浓度较高与其途经京 津冀区域中部的气团中携带较高的0,浓度有关. 聚类3(16.1%)和4(7.8%)来自京津冀区域中部和 南部重工业较发达区域的短距离输送,移动速度较 慢,气团途经这些地区时携带并传输大量的0,及其 前体物到北京,其对应的 $\rho(O_3-1h)$ 平均值在 OJD2 的 6 类轨迹中处于较高浓度水平,分别为 166 μg·m⁻³和145 μg·m⁻³,这2类轨迹分别贡献了24.2% 和 11.3% 的 污染轨迹, 污染轨迹 $\rho(0_3-1h)$ 分别为 211 μg·m⁻³和 206 μg·m⁻³. 从潜在源区也可以看出, WPSCF高值区域主要在京津冀区域中部和南部地 区,其WPSCF值在0.6~0.9之间,表明这些地区是 影响北京市 OJD2 高浓度 O₃最大的潜在源区.聚类 6(30.5%)和聚类5(15.1%)分别为起源于京津冀区 域东部和海上气团的短距离传输,对应的 $\rho(0_3-1h)$ 分别为125 µg·m⁻³和114 µg·m⁻³,其WPSCF 值在0.4 ~0.5,表明该地区对北京市 OJD2 高浓度 O3贡献的 低于区域中南部,这2类轨迹贡献污染轨迹的比例 最高,分别贡献了34.0%和13.1%,污染轨迹ρ(0₃-1h)平均值低于聚类3和4,分别为195 µg·m⁻³和 188 μg·m⁻³. 结合后向轨迹和潜在源区分析可以进 一步证实北京市跳变型 0,污染过程 0JD2 的 0,最大 的潜在源区为京津冀中南部和东部地区,高浓度的 O₃及前体物随着气团的移动传输至京,叠加北京本 地光化学反应生成的 O3, 使得 OJD2 北京市 O3浓度 大幅上升发生跳变.

3 结论

(1)2016~2022年北京市共发生41次跳变型 O_3 污染过程,主要集中在5~7月,其中空气质量跳变2级的案例占88%,跳变3级的案例占12%,跳变前后两日 ρ (O_3 -8h)差分别为71~114 μ g·m⁻³和118~168 μ g·m⁻³. 从 O_3 浓度日变化看,OJD2的 O_3 浓度在09:00~23:00 明显高于OJD1 同时间段浓度平均,峰值浓度 OJD2 较 OJD1 偏高78.9%.

(2)OJD2偏南风频率增多是跳变型 O_3 污染过程 发生的主要原因,当风速处于 $3\sim4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $4\sim5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南风作用时, $\rho(O_3-1h)$ 较OJD1高100 $\mu g\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.OJD2的 O_3 浓度对温度更为敏感,其相关性高于 OJD1, O_3 超标的温度范围扩大,OJD1和OJD2最低超标温度分别为27.8°C和22.6°C.降水频率和降水量的减少也是OJD2跳变的原因之一.

(3)后向轨迹聚类和潜在源区分析表明,跳变型 O₃污染过程 OJD2 各类轨迹携带的 O₃浓度均较 OJD1 增加,并表现为更多偏南和偏东方向近距离传输影 响.OJD1和 OJD2 主要潜在源区是京津冀区域中南部 及东部,对污染轨迹的贡献率分别为 40.9% 和 82.6%.

参考文献:

[1] Zheng J J, Jiang P, Qiao W, et al. Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 314-322.

- Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 14-25.
- [3] 王文兴,柴发合,任阵海,等.新中国成立70年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J].环境科学研究,2019,32 (10):1621-1635.
 Wang W X, Chai F H, Ren Z H, et al. Process, achievements and experience of air pollution control in China since the founding of the People's Republic of China 70 years ago[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10):1621-1635.
- [4] 薛文博,许艳玲,史旭荣,等.我国大气环境管理历程与展望
 [J].中国环境管理,2021,13(5):52-60.
 Xue W B, Xu Y L, Shi X R, et al. Atmospheric environment management in China: progress and outlook[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 52-60.
- [5] 北京市生态环境局.十年接续奋斗 实现蓝天常驻 30! 2022 年北京市 PM_{2.5}年均浓度再创新低[EB/OL]. http://sthjj. beijing. gov. cn/bjhrb/index/xxgk69/zfxxgk43/fdzdgknr2/ywdt28/ xwfb/326013559/index.html, 2023-01-06.
- [6] 朱法华. 推动绿色发展促进人与自然和谐共生[J], 中国环保 产业, 2022, (11): 8.
- [7] 陈菁,彭金龙,徐彦森.北京市2014~2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估[J].环境科学,2021,42(9):4071-4082.
 Chen J. Peng J L, Xu Y S. Spatiotemporal distribution and health impacts of PM_{2.5} and O₅ in Beijing, from 2014 to 2020 [J]. Environmental Science, 2021, 42(9):4071-4082.
- [8] Stevenson D S, Dentener F J, Schultz M G, et al. Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D8), doi: 10.1029/2005JD006338.
- [9] Fowler D. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications[EB/OL]. https://royalsociety.org/~/ media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7925. pdf, 2021-02-22.
- [10] Lippmann M. Health effects of ozone a critical review [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1989, 39 (5) : 672-695.
- [11] Arneth A, Harrison S P, Zaehle S, et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(8): 525-532.
- [12] Zheng D Y, Huang X J, Guo Y H. Spatiotemporal variation of ozone pollution and health effects in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(38): 57808-57822.
- [13] 胡京南,柴发合,段菁春,等.京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5}爆发式增长成因与应急管控对策[J].环境科学研究, 2019, **32**(10):1704-1712.
 Hu J N, Chai F H, Duan J C, *et al.* Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1704-1712.
- [14] Zhong J T, Zhang X Y, Dong Y S, et al. Feedback effects of boundary-layer meteorological factors on cumulative explosive growth of PM_{2.5} during winter heavy pollution episodes in Beijing from 2013 to 2016 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(1): 247-258.
- [15] Sun W W, Wang D F, Yao L, et al. Chemistry-triggered events of PM_{2.5} explosive growth during late autumn and winter in Shanghai,

China[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j. envpol. 2019. 07. 032.

- [16] 郑海涛,刘建国,李杰,等.河南省一次PM_{2.5}污染过程区域 性影响数值模拟[J].环境科学研究,2016,29(5):617-626.
 Zheng H T, Liu J G, LI J, *et al.* Modeling impacts of regional transport on PM_{2.5} air pollution: case study in Henan Province[J].
 Research of Environmental Sciences, 2016, 29(5): 617-626.
- [17] 谭吉华,赵金平,段菁春,等.广州秋季灰霾污染过程大气颗 粒物有机酸的污染特征[J].环境科学,2013,34(5):1982-1987.

Tan J H, Zhao J P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of organic acids in atmospheric particles during haze periods in autumn in Guangzhou[J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1982-1987.

[18] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014年10月北京市4次典型空 气重污染过程成因分析[J].环境科学研究,2015,28(2): 163-170.

Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(2): 163-170.

[19] 花丛,江琪,迟茜元,等.我国中东部地区 2015—2020 年夏半年 PM_{2.5}和臭氧复合污染气象特征分析[J].环境科学研究,2022,35(3):650-658.
 Hua C, Jiang Q, Chi X Y, *et al.* Meteorological characteristics of

 $PM_{2.5}$ and O_3 air combined pollution in central and Eastern China in the summer half years of 2015-2020 [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(3): 650-658.

- [20] 姜华,常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境 科学研究, 2021, 34(7): 1576-1582.
 - Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(7): 1576-1582.
- Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog.
 [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, 44(6): 1342-1346.
- [22] Shao M, Wang W J, Yuan B, et al. Quantifying the role of PM_{2.5} dropping in variations of ground-level ozone: inter-comparison between Beijing and Los Angeles [J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2021. 147712.
- [23] 韩婷婷,李颖若,邱雨露,等.上甸子区域背景站 VOCs 污染 特征及其对臭氧生成贡献[J].环境科学,2020,41(6):2586-2595.

Han T T, Li Y R, Qiu Y L, *et al.* Characteristics of VOCs and their roles in ozone formation at a regional background site in Beijing, China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2586-2595.

- [24] 唐贵谦,李昕,王效科,等.天气型对北京地区近地面臭氧的 影响[J].环境科学,2010,31(3):573-578.
 Tang G Q, Li X, Wang X K, *et al.* Effects of synoptic type on surface ozone pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2010,31(3):573-578.
- [25] 朱媛媛,刘冰,桂海林,等.京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估[J].环境科学,2022,43
 (8):3966-3976.

Zhu Y Y, Liu B, Gui H L, *et al.* Characteristics of ozone pollution, meteorological impact, and evaluation of forecasting results based on a neural network model in Beijing-Tianjin-Hebei

Region[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 3966-3976.

- [26] 张莹,许建敏,汪瑶,等.京津冀区域2015~2020年臭氧持续 污染事件特征、气象影响及潜在源区分析[J].中国环境科 学,2023,43(6):2714-2721.
 Zhang Y, Xu J M, Wang Y, et al. Analysis of Characteristics, Impact of meteorologic conditions and potential sources for persistent ozone pollution events in the Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2015~2020 [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):2714-2721.
- [27] 王雪松,李金龙,张远航,等.北京地区臭氧污染的来源分析
 [J].中国科学 B辑:化学,2009,39(6):548-559.
 Wang X S, Li J L, Zhang Y H, et al. Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing, China[J].
 Science in China Series B: Chemistry, 2009, 39(6): 548-559.
- [28] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 88-96.
 Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 88-96.
- [29] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [30] 王世强,黎伟标,邓雪娇,等.广州地区大气污染物输送通道的特征[J].中国环境科学,2015,35(10):2883-2890.
 Wang S Q, Li W B, Deng X J, et al. Characteristics of air pollutant transport channels in Guangzhou region [J]. China Environmental Science, 2015, 35(10):2883-2890.
- [31] 王旭东,尹沙沙,杨健,等.郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J].环境科学,2021,42(2):604-615.
 Wang X D, Yin S S, Yang J, et al. Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou city[J]. Environmental Science, 2021, 42(2):604-615.
- [32] 张树宪,李洋,张众志,等.基于CMAQ/ISAM空气质量模型的北京市夏季臭氧来源解析研究[J].环境科学研究,2022, 35(5):1183-1192.

Zhang S X, Li Y, Zhang Z Z, *et al.* Source apportionment of ozone in summer in Beijing based on CMAQ/ISAM air quality model[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(5): 1183-1192.

- [33] 何涛, 乔利平, 徐圃青, 等. 常州市臭氧污染传输路径和潜在 源区[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 77-83.
 He T, Qiao L P, Xu P Q, *et al.* Study of transport pathways and potential sources of ozone pollution in Changzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(4): 77-83.
 [34] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time
- [34] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park [J]. Atmospheric Environment (1967), 1985, 19 (8): 1263-1270.
- [35] 符传博,陈红,丹利,等. 2019年秋季海南省4次臭氧污染过 程特征及潜在源区分析[J].环境科学,2022,11(43):5000-5008.
 Fu C B, Chen H, Dan L, et al. Characteristics and potential sources of four ozone pollution processes in Hainan province in autumn of 2019 [J]. Environmental Science, 2022, 11 (43):
- 5000-5008.
 [36] 李颜君,安兴琴,范广洲.北京地区大气颗粒物输送路径及 潜在源分析[J].中国环境科学,2019,39(3):915-927.
 Li Y J, An X Q, Fan G Z. Transport pathway and potential source area of atmospheric particulates in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019, 39(3):915-927.

1381

[37] 王琰玮,王媛,张增凯,等.不同季节天津市PM_{2.5}与O₃潜在源区及传输路径分析[J].环境科学研究,2022,35(3):673-682.
Wang Y W, Wang Y, Zhang Z K, et al. Analysis of potential source areas and transport pathways of PM_{2.5} and O₃ in Tianjin by

source areas and transport pathways of $PM_{2.5}$ and O_3 in Hanjin by season [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(3): 673-682.

- [38] 韩丽,陈军辉,姜涛,等.成都市春季0₃污染特征及关键前体物识别[J].环境科学,2021,42(10):4611-4620.
 Han L, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics of O₃ pollution and key precursors in Chengdu during spring[J]. Environmental Science, 2021,42(10):4611-4620.
- [39] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京大气中NO、NO₂和O₃浓度变化的相关性分析[J].环境科学,2007,28(4):706-711.
 An J L, Wang Y S, Li X, *et al.* Analysis of the relationship between NO, NO₂and O₃ concentrations in Beijing [J]. Environmental Science, 2007, 28(4):706-711.
- [40] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014年北京市城区臭氧超标日 浓度特征及与气象条件的关系[J].环境科学,2016,37(6): 2041-2051.
 Cherry D.W. et al. Cherry training of energy

Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2041-2051.

[41] 崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征





与气象因子的关联性研究[J].环境科学学报,2021,41(2):373-385.

Cui M R, Bai L Y, Feng J Z, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 373-385.

- [42] 王占山,李云婷,安欣欣,等. 2006~2015年北京市不同地区 O₃浓度变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 1-8.
 Wang Z S, Li Y T, An X X, *et al.* Variation of O₃ concentration in different regions of Beijing from 2006-2015 [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 1-8.
- [43] 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 等. 基于 GAMs 模型分析成都市气象 因子交互作用对 O₃浓度变化的影响[J]. 环境科学, 2021, 42 (11): 5228-5238.
 Zhang Y, Ni C J, Feng X Y, *et al.* Interactive effects of the influencing factors on the changes of O₂ concentrations based on

influencing factors on the changes of O_3 concentrations based on GAMs model in Chengdu[J]. Environmental Science, 2021, 42 (11): 5228-5238.

- [44] Chen H P, Wang H J. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(12): 5895-5909.
- [45] Qian W H, Huang J. Applying the anomaly-based weather analysis on Beijing severe haze episodes [J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 878-887.



HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, et al. Life CycleREN Xiao-song, LI Zhao-rui Hebei Region SHAO Ying-chao SHAO Ying-chao	(1233) (1243) (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, et al.	(1265) (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Mediu	m- and Long-term Study ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al</i> .	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ver	(1293)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the 1	IANG Zheng, ZHOU Img-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> Northern Slope of Tianshan Mountains	(1304)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, et al.	(1313)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	·····GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, et al.	(1337)
Found on characteristics ; source Apportonment, and meteorological response of water source round in $m_{2.5}$ in Amazag, North China Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM, ϵ and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	U Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, et al.	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	·······PAN Jin-xiu, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, et al.	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, et al.	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, et al.	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the	Middle Keaches of the Yangtze Kiver	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Surface Sed	del	(1402)
	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, et al.	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing …	·····ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, et al.	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, et al.	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Lanal of Tichang City		(1448) (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the	Yellow River of Ningxia	(1457)
	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, et al.	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	······ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, et al.	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, et al.	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	ANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, et al.	(1502)
Effects of Land Use Types on water Quality at Different Burler Scales; Hanjin Section of the Haine River Basin as an Example	DAI meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, et al.	(1512) (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	····ZHANG Jin, CHEN Ming-ving, HAO Zhi-neng, et al.	(1529)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, et al.	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	·······HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, et al.	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on	Improved Remote Sensing Ecological Index	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	······································	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle a	nd Lower Reaches of the Yangtze River	
	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, et al.	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	····LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, et al.	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Kotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, et al.	(1644)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages		(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	G Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, et al.	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut	Field	
	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, et al.	(1684)
Effects of Straw Returning and blochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Mitrate Mitrogen Soli After riooding in Rice-ve	getable Rotation System in Tropical China HII Tian-vi, CHE Iia-vue, HII Yu-iie, et al.	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	······CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, et al.	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, et al.	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, et al.	(1724)
Characteristics of Cd Fluxe in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	······YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, et al.	(1739)
Forential Ecological Risk Assessment of Son Heavy Metals in Fengdong New District Dased on Information Dilution Model	XIAO Kai-gi XII Hong-gen GAN lie et al	(1749)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil ···	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, et al.	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, et al.	(1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	······YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, et al.	(1793)
Effect of EDUS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	······LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farm	iland XIAO Bing WANG Qiu-shi GAO Pei-pei et al.	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Mingin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de. et al.	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, et al.	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, et al.	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamya aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, et al.	(1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (1	Janio rerio J Embryos	(1050)
	TAN LIEITING, LITANG TAN, BAU AUTINI, et al.	(1039)