

山东省沿海城市大气挥发性有机物污染特征分析

张光岳¹, 张 扬², 马海斌³, 张凤菊⁴

1. 潍坊市污染物排放总量控制中心, 山东 潍坊 261000

2. 山东省潍坊生态环境监测中心, 山东 潍坊 261041

3. 潍坊学院化学化工与环境工程学院, 山东 潍坊 261061

4. 山东省生态环境监测中心, 山东 济南 250101

摘要:于2018年11月—2019年1月采集了青岛、烟台、日照、威海、潍坊、东营和滨州7个沿海城市的环境空气样品,分析了117种VOCs的污染水平、臭氧(O₃)生成潜势、二次有机气溶胶(SOA)生成潜势。结果显示,观测期间,7个沿海城市大气VOCs质量浓度表现为东营(422 μg/m³)>滨州(366 μg/m³)>烟台(324 μg/m³)>青岛(261 μg/m³)>威海(226 μg/m³)>潍坊(192 μg/m³)>日照(146 μg/m³)。其中,青岛、烟台、日照和东营以卤代烃为主要VOCs污染物,威海、潍坊和滨州以烷烃为主要VOCs污染物。滨州O₃生成潜势和SOA生成潜势最大,分别为872 μg/m³和0.70 μg/m³;日照O₃生成潜势最小,为220 μg/m³;东营SOA生成潜势最小,为0.22 μg/m³。芳香烃是7个城市SOA的重要前体物。

关键词:沿海城市;VOCs;臭氧生成潜势;二次有机气溶胶生成潜势

中图分类号:X511;X820.4 文献标志码:A 文章编号:1002-6002(2024)04-0080-08

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2024.04.09

Pollution Characteristics of Ambient Air VOCs of Seven Coastal Cities in Shandong Province

ZHANG Guangyue¹, ZHANG Yang², MA Haibin³, ZHANG Fengju⁴

1. Weifang Total Pollutant Discharge Control Center, Weifang 261000, China

2. Weifang Eco-Environment Monitoring Center of Shandong Province, Weifang 261041, China

3. College of Chemistry, Chemical & Environmental Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China

4. Shandong Provincial Eco-Environment Monitoring Centre, Jinan 250101, China

Abstract: Air pollutants were collected in Qingdao, Yantai, Rizhao, Weihai, Weifang, Dongying and Binzhou of Shandong Province during November 2018 to January 2019, and the pollution levels, ozone (O₃) formation potential, secondary organic aerosol (SOA) formation potential of 117 kinds of VOCs were analyzed by preconcentration-gas chromatography/mass spectrometry and high performance liquid chromatography. The results showed that concentrations of air VOCs varied significantly with the seven coastal cities, with Dongying (422 μg/m³) > Binzhou (366 μg/m³) > Yantai (324 μg/m³) > Qingdao (261 μg/m³) > Weihai (226 μg/m³) > Weifang (192 μg/m³) > Rizhao (146 μg/m³). Among them, the main VOCs pollutants in Qingdao, Yantai, Rizhao and Dongying were halogenated hydrocarbons, and alkane were the main VOCs pollutants in Weihai, Weifang and Binzhou. The O₃ formation potential and SOA formation potential of Binzhou were the highest, which were 872 μg/m³ and 0.70 μg/m³, respectively. The O₃ formation potential was the smallest in Rizhao, which was 220 μg/m³. And Dongying had the lowest SOA formation potential, which was 0.22 μg/m³. Aromatic hydrocarbons were important precursors of SOA in seven cities.

Keywords: coastal city; volatile organic compounds; ozone formation potential; secondary organic aerosol formation potential

研究表明,臭氧(O₃)和细颗粒物(PM_{2.5})已成为影响我国现阶段城市空气质量的首要污染因子,主要体现为夏季O₃浓度偏高、冬季PM_{2.5}浓度偏高,并由此引发了光化学烟雾、雾霾等一系列次生环境污染问题,成为我国打赢大气污染防治

攻坚战的主要障碍^[1-2]。挥发性有机物(VOCs)是O₃、PM_{2.5}和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物,其成分复杂,某些组分因具有毒性和致癌性会危害到人体健康^[3-4]。随着工业化进程的加快,我国的大气污染类型已从以二氧化硫(SO₂)、氮氧

收稿日期:2024-05-08;修订日期:2024-06-19

基金项目:山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2020ZD21)

第一作者简介:张光岳(1983-),男,山东淄博人,硕士,高级工程师。

通讯作者:张凤菊

化物(NO_x)为主要特征污染物的煤烟型污染,转变为以 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和SOA为主要特征污染物的区域性复合型污染^[5]。因此,作为 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物,环境空气中VOCs的含量、组成、空间分布、来源已成为我国环境管理领域的例行监测重点及科研人员的研究热点。

目前,我国对VOCs排放规律、来源、光化学活性的研究主要集中于京津冀、长三角、珠三角、成渝等地区及部分重点城市(桂林、兰州、郑州、大连等)^[6-20],而对于山东省,仅济南、泰安、聊城、烟台、威海、临沂及菏泽等部分城市开展了环境空气中VOCs的浓度水平、污染特征及来源等研究^[21-27],针对青岛、日照、东营、潍坊和滨州等沿海城市环境空气中VOCs的浓度水平、SOA生成潜势的研究开展较少。2019年,青岛、烟台、威海、日照、东营、潍坊和滨州等沿海城市环境空气中的 O_3 浓度均为超标状态。本研究对

山东省7个沿海城市环境空气中的VOCs进行采样,利用预浓缩-气质联用法和高效液相色谱法对7个城市的环境空气样品进行检测,对冬季环境空气中117种VOCs的浓度水平、SOA生成潜势等进行分析,旨在为山东省沿海城市VOCs减排、大气复合污染防治提供更精准的数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样点位设置

为系统研究青岛、烟台、威海、日照、东营、潍坊和滨州等7个沿海城市城区环境空气中VOCs的浓度水平,选择7个能综合反映居民区、交通区、工业区环境空气质量状况的代表性监测点位进行VOCs样品采集,各监测点位分布及基本信息见表1。

表1 7个沿海城市采样点位基本信息
Table 1 Basic information of sampling points in seven coastal cities

序号	采样点位置及编号	采样点经纬度	采样点状况
1	青岛市南区(A)	120.346485°N, 36.067392°E	位于居民交通区,地处青岛市中心,周边有多个景点、居民区,临近交通干道,车流量密集
2	烟台盛泉工业园(B)	121.427527°N, 37.438224°E	位于工业交通区,周边有水产、供热等公司,人口密集
3	威海环翠区(C)	122.087053°N, 37.519036°E	位于综合区,周边有实验小学、文物局、规划设计院、环保科技公司、档案馆等,车流量大
4	日照东港区(D)	119.525176°N, 35.423438°E	属于背景点,周边为银河公园,植被覆盖率高
5	东营开发区(E)	118.697731°N, 37.434191°E	位于居民商业区,人口密集,临近交通干道,车流量大
6	潍坊奎文区(F)	119.149181°N, 36.702477°E	位于居民交通区,周边有多个机关单位,人口密集,车流量大
7	滨州滨城区(G)	118.023119°N, 37.484431°E	位于综合区,周边有居民区、医院、学校、饭店、白鹭湖湿地公园

1.2 样品采集

2018年11月—2019年1月,分别在7个点位采集环境空气样品。VOCs样品的采样时间为当日10:00—次日10:00,采集24h平均样品,连采3d,检测结果取3d质量浓度的平均值。进行样品采集时,采用经硅烷化惰性处理的苏玛罐采样24h,并在采样前用高纯氮气对苏玛罐进行加湿加热清洗。醛酮类化合物的采样时间为当日12:00—15:00,采集3h平均样品。

1.3 生成潜势计算

O_3 生成潜势采用最大增量反应活性浓度

(MIR)法进行计算。该方法常用来比较单个VOCs物种的 O_3 生成潜势,计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = \rho_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中: OFP_i 为污染物*i*的 O_3 生成潜势, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; MIR_i 为污染物*i*的最大增量反应活性,采用CARTER^[28]的研究结果, g/g ; ρ_i 为污染物*i*在大气环境中的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

SOA生成潜势采用气溶胶生成系数(FAC)法进行估算,计算公式如下:

$$\text{SOA}_p = \rho_0 \times \text{FAC} \quad (2)$$

式中: SOA_p 为SOA生成潜势, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ρ_0 为VOCs

的污染源原始排放浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; FAC 为 SOA 生成系数, 其取值采用 GROSJEAN 等^[29-30]的研究结果。

VOCs 经氧化后, 实际监测到的排放浓度与排放源原始排放浓度之间的关系如公式 (3) 所示:

$$\rho_t = \rho_0 \times (1 - \varphi_r) \quad (3)$$

式中: ρ_t 为实际监测到的经氧化后的 VOCs 排放浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ρ_0 为 VOCs 污染源原始排放浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; φ_r 为 VOCs 物种中参与氧化反应的百分数, %。

1.4 质量控制

为保证监测数据的有效性, 在采样和分析过程中, 严格执行相关标准规范中的质量保证和质量控制措施。其中, 采样前将苏玛罐置于 50 ~ 80 °C 条件下加湿清洗 3 个循环, 随后将苏玛罐抽至真空 (<10 Pa)。每清洗 10 个苏玛罐, 应随机抽取 1 个进行清洁度检验, 确保所有目标化合物的检测结果低于方法检出限。每 10 个苏玛罐至少抽取 1 个检查气密性。将苏玛罐抽真空并静置数天后, 罐内压力变化应 $\leq 0.7 \text{ kPa}/\text{d}$ 。每 10 个样品或每批样品应至少分析 1 个平行样, 确保分析结果的相对偏差不超过 25%; 应分析 1 次校准曲线中间浓度质控标准气体, 确保目标化合物的浓度偏差 $\leq 30\%$ 。

醛酮类样品采集系统由智能空气采样器及采样导管、DNPH 采样管等组成。使用密封帽将采样管的两端管口封闭, 采样流速设为 0.5 L/min。每一批采样管抽取 10% 进行空白值检验, 空白值应满足以下要求: 甲醛, 小于 0.15 $\mu\text{g}/\text{管}$; 乙醛, 小于 0.10 $\mu\text{g}/\text{管}$; 丙酮, 小于 0.30 $\mu\text{g}/\text{管}$; 其他物质, 小于 0.10 $\mu\text{g}/\text{管}$ 。此外, 所采集样品中醛酮类物质的含量 (以甲醛计) 的上限应小于采样管 DNPH 含量的 75%。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度组成与分布特征

7 个沿海城市冬季空气中的总挥发性有机物 (TVOCs) 的平均质量浓度在 146 ~ 422 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 平均质量浓度为 297 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 具体见图 1。7 个沿海城市 TVOCs 的质量浓度分别为: 东营, 422 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 滨州, 366 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 烟台, 324 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 青岛, 261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 威海, 226 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 潍坊, 192

$\mu\text{g}/\text{m}^3$; 日照, 146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究显示, 北京市城区春季大气^[6]、天津市混合区冬季大气^[7]、天津市中心城区冬春季大气^[31]、兰州市采样点周边夏季环境空气^[16]中 VOCs 的平均质量浓度分别为 34.36、90.44、67.75、99.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。本研究中的 7 个沿海城市冬季环境空气中 TVOCs 的平均质量浓度均高于北京、天津和兰州。

东营冬季环境空气 VOCs 中, 含量前 10 位的组分主要有二氯甲烷、1-丁烯、丙酮、甲苯、乙基-4-甲基苯、2-丁酮、三氯甲烷、乙酸乙酯、苯和正己烷。三氯甲烷、苯、甲苯均在 USEPA 公布的有毒有害空气污染物名单中, 其中苯被国际癌症研究机构列为一类致癌物, 三氯甲烷被列为二类致癌物。大气中的苯、甲苯主要来源于汽车燃料的不完全燃烧排放、有机溶剂挥发及工业生产过程排放, 二氯甲烷、丙酮、三氯甲烷、1-丁烯和正己烷等是液化石油气和汽油蒸气等燃料挥发物的特征组分。东营冬季 VOCs 中的苯和甲苯的浓度较高, 说明东营冬季环境空气 VOCs 除液化石油气等燃料泄漏和挥发来源外, 还可能存在苯系物排放源。

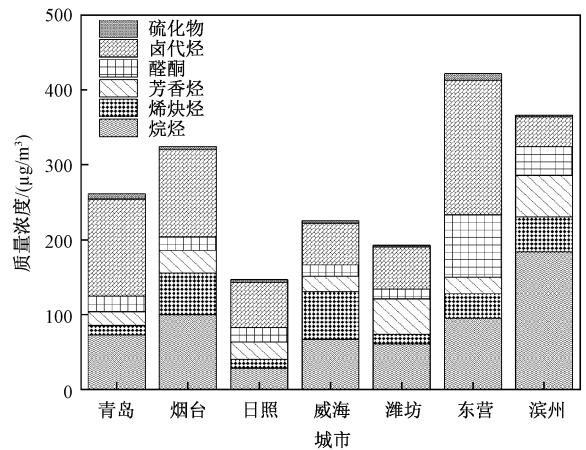


图 1 7 个沿海城市冬季大气中 6 种 VOCs 组分的质量浓度

Fig. 1 Concentration of six VOCs components in the air of seven coastal cities in winter

图 2 是 7 个沿海城市的烷烃、烯炔烃、芳香烃、醛酮、卤代烃和硫化物质量浓度百分比。从图 2 可知, 青岛、烟台、日照、东营的主要 VOCs 污染物是卤代烃, 对应的 TVOCs 占比分别为 49.8%、36.0%、41.3%、42.6%; 威海、潍坊、滨州的主要 VOCs 污染物为烷烃, 对应的 TVOCs 占比分别为 29.7%、31.6%、50.3%。青岛、烟台、日照、东营冬

季大气中,烷烃对 VOCs 的贡献率分别为 28.2%、30.7%、19.7%、22.7%。烯炔烃对威海冬季大气 VOCs 的贡献率为 28.2%,卤代烃对潍坊冬季大气 VOCs 的贡献率为 29.0%,芳香烃对滨州冬季大气 VOCs 的贡献率为 15.3%。监测结果表明,山东省 7 个沿海城市冬季大气 VOCs 以卤代烃和烷烃为主要组分,其次是烯炔烃和芳香烃。

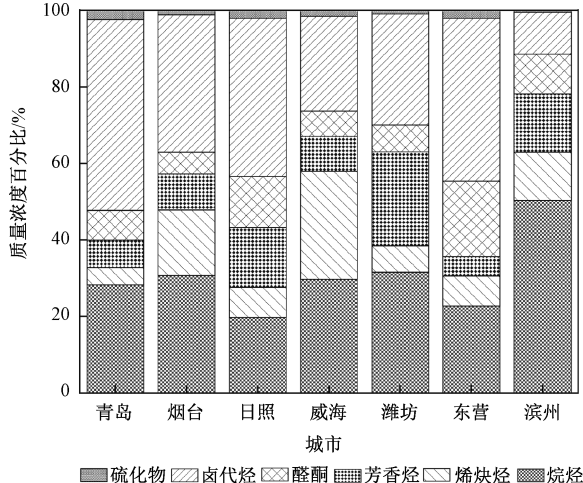


图 2 7 个沿海城市冬季大气中 6 种 VOCs 组分的质量浓度百分比

Fig. 2 Percentage of concentration of six VOCs components in the air of seven coastal cities in winter

2.2 O₃ 生成潜势

本研究中的 O₃ 生成潜势计算方法及最大增量反应活性浓度均参考相关文献^[15]。7 个沿海城市冬季环境空气中 VOCs 的 O₃ 生成潜势为:滨州, 872 μg/m³;烟台, 751 μg/m³;威海, 700 μg/m³;东营, 433 μg/m³;潍坊, 347 μg/m³;青岛, 233 μg/m³;日照, 220 μg/m³。滨州 O₃ 生成潜势最大,主要是由于滨州冬季大气中的 1-丁烯、2-甲基丁烷和丙烯浓度较高。要想彻底改善滨州冬季环境空气质量,降低光化学污染事件的发生概率,应从源头彻查 VOCs 的排放源,提高治理效率。烟台冬季环境空气中含有较高浓度的 1-戊烯和丙烯醛,因而烟台市冬季环境空气 VOCs 对 O₃ 生成潜势贡献较大。

对烷烃、烯炔、芳香烃、炔烃和醛酮类等对 7 个城市冬季 O₃ 生成潜势的贡献进行分类分析,结果见图 3。从图 3 可知:对青岛 O₃ 生成潜势贡献最大是烷烃;在烟台、威海和滨州,烯炔对 O₃ 生成潜势的贡献率最大;在日照和潍坊,芳香烃对 O₃ 生成潜势的贡献率最大;在重工业城市东营,醛酮

类对 O₃ 生成潜势的贡献率最大。因此,在采取措施治理环境空气 VOCs 污染时,不仅要考虑污染物组分的浓度,同时也要考虑各组分的化学反应活性及其在大气中的化学反应速率,才能更加有效地改善环境空气质量。

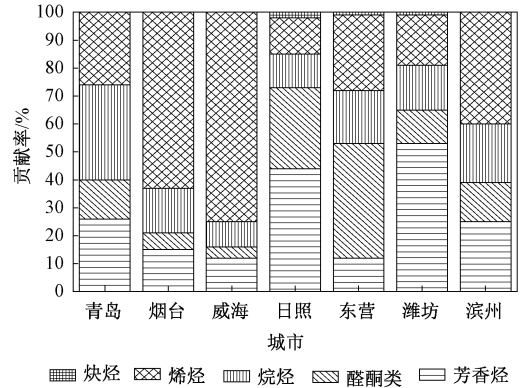


图 3 7 个沿海城市冬季 O₃ 生成潜势贡献率
Fig. 3 Contribution rate of winter O₃ formation potential in seven coastal cities

2.3 SOA 生成潜势

7 个沿海城市大气 VOCs 的 SOA 生成潜势具体见图 4。由图 4 可知,7 个城市冬季大气中 VOCs 的 SOA 生成潜势分别为:滨州, 0.70 μg/m³;潍坊, 0.60 μg/m³;烟台, 0.37 μg/m³;威海, 0.28 μg/m³;日照, 0.28 μg/m³;青岛, 0.24 μg/m³;东营, 0.22 μg/m³。研究结果显示,25 种高碳烷烃和芳香烃对 SOA 具有生成潜势。滨州 SOA 生成潜势最大,东营 SOA 生成潜势最小,前者是后者 3.18 倍,说明 7 个沿海城市的 VOCs 对 SOA 的生成潜势存在较大差异。张敬巧等^[32]采用主成分分析方法对廊坊市颗粒物污染前期、中期和后期 VOCs 的 SOA 生成潜势进行了研究,得到的 SOA 生成潜势为 1.06~1.18 μg/m³;王倩等^[33]采用主成分分析方法对上海地区春秋两季 VOCs 的 SOA 生成潜势进行了研究,其计算结果为 2 μg/m³ 左右;吕子峰等^[34]的研究表明,北京市夏季城市大气中 VOCs 的 SOA 生成潜势为 8.48 μg/m³;徐虹等^[35]研究发现,天津市冬季重污染期间 VOCs 的 SOA 生成潜势为 0.49~1.21 μg/m³。整体来看,山东省 7 个沿海城市 VOCs 的 SOA 生成潜势低于廊坊、上海、北京和天津。

从 7 个采样城市来看,VOCs 的总体 SOA 生成潜势为 2.69 μg/m³,其中烷烃的 SOA 生成潜势占 6.5%,芳香烃的 SOA 生成潜势占 93.5%。由图 5 可知,青岛、烟台、日照、威海、潍坊、东营、滨

州冬季大气中,芳香烃的 SOA 生成潜势分别为 0.22、0.35、0.27、0.25、0.57、0.20、0.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 贡献率分别为 91.5%、95.2%、95.8%、87.4%、95.4%、91.3%、93.7%; 烷烃的 SOA 生成潜势分别为 0.020、0.018、0.012、0.036、0.028、0.019、0.044 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 贡献率分别为 8.5%、4.8%、4.2%、12.6%、4.6%、8.7%、6.3%。由此可知,芳香烃是 7 个沿海城市冬季环境空气中 SOA 的重要前体物。SOA 生成潜势排名前 10 位的组分及其占比分别为: 甲苯, 33.6%; 间/对-二甲苯, 18.2%; 苯, 10.6%; 邻-二甲苯, 7.6%; 乙苯, 6.2%; 间-二乙苯, 5.4%; 1,2,4-三甲苯, 3.9%; 间-乙基甲苯, 2.9%; 壬烷, 2.7%; 癸烷, 1.9%。

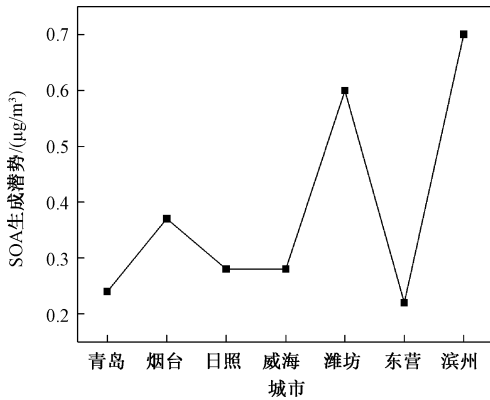


图 4 7 个沿海城市 VOCs 的 SOA 生成潜势

Fig. 4 SOA formation potential of VOCs in seven coastal cities

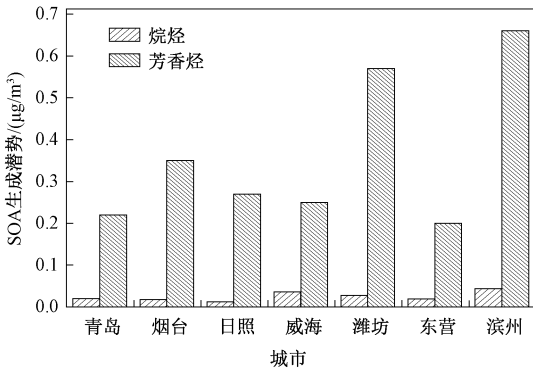


图 5 7 个沿海城市 VOCs 关键物种的 SOA 生成潜势

Fig. 5 SOA formation potential of VOCs key species in seven coastal cities

2.4 来源解析

本研究采用特征比值法 (B/T) 进行大气中 VOCs 的来源分析^[22,27]。当 B/T 值在 0.5 左右时,大气中的 VOCs 主要来自机动车尾气;当 B/T

值 > 0.5 时,主要来自机动车尾气、石油化工废气或者化石燃料燃烧废气;当 B/T 值 > 1 时,主要来自生物燃料燃烧废气;当 B/T 值远大于 1 时,主要为煤炭燃烧贡献;当 B/T 值 < 0.5 时,主要贡献源为机动车尾气及有机溶剂挥发物等。经计算,7 个沿海城市中,青岛、烟台、潍坊、东营、滨州、威海、日照的 B/T 值分别为 0.42、0.74、1.75、0.78、0.60、0.73、1.14。计算结果表明,青岛市大气中 VOCs 的主要来源为机动车尾气和有机溶剂挥发物,烟台、东营、滨州、威海 4 个城市大气中 VOCs 的主要来源为机动车尾气、石油化工废气或者化石燃料燃烧废气,潍坊、日照大气中 VOCs 的主要来源为煤炭燃烧废气。

3 结论

1) 研究时段内山东省 7 个沿海城市冬季大气中 VOCs 的质量浓度为 146 ~ 422 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中,东营 VOCs 浓度最高,日照最低。青岛、烟台、日照和东营冬季大气中的主要 VOCs 污染物为卤代烃,威海、潍坊和滨州冬季大气中的主要 VOCs 污染物是烷烃。7 个城市冬季大气 VOCs 的 O_3 生成潜势在 220 ~ 872 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,其中烯烃、芳香烃和醛酮为冬季大气 VOCs 中的化学活性特征组分。

2) 7 个城市冬季大气中 SOA 的主要前体物均为芳香烃,芳香烃是影响 O_3 和 SOA 生成的关键物种。青岛市大气中 VOCs 的主要来源为机动车尾气和有机溶剂挥发物,烟台、东营、滨州、威海 4 个城市大气中的 VOCs 主要由机动车尾气、石油化工废气或者化石燃料燃烧废气贡献,潍坊、日照大气中 VOCs 的主要来源为煤炭燃烧废气。

3) 根据 O_3 和 SOA 生成贡献特征因子及 B/T 特征值,建议青岛应加强对机动车尾气排放和有机溶剂挥发排放的管控,烟台、东营、滨州、威海应针对机动车尾气排放、化石燃料燃烧排放等开展针对性排查和管控,潍坊和日照要重视燃煤排查及相关企业超低排放改造等。

参考文献 (References):

[1] 王笑哲,赵莎,郭灵辉,等. 京津冀及周边地区“2+26”城市臭氧的季节性变化规律[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1786-1797.

WANG Xiaozhe, ZHAO Sha, GUO Linghui, et al.

- Seasonal Variation of Ozone in '2+26' Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(8):1 786-1 797.
- [2] 黄语哲, 方华, 许红玲, 等. 气象条件与排放对内陆沿江城市 2019—2022 年大气 PM_{2.5} 和 O₃ 污染影响研究 [J/OL]. *环境科学学报*, 2024-06-04. <https://link.cnki.net/urlid/11.1843.x.20240604.0956.001>.
- HUANG Yuzhe, FANG Hua, XU Hongling, et al. Evaluating the Influence of Meteorology and Emission on PM_{2.5} and O₃ in Inland Cities Along the Yangtze River from 2019 to 2022 [J/OL]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024-06-04. <https://link.cnki.net/urlid/11.1843.x.20240604.0956.001>.
- [3] 苏文鹏, 毛慧, 乐小亮, 等. 泰州市夏季大气典型 VOCs 的污染特征与健康风险评估 [J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(4):78-83.
- SU Wenpeng, MAO Hui, YUE Xiaoliang, et al. Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Summer in Taizhou [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, 14(4):78-83.
- [4] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市高新区大气 VOCs 源解析及风险评估 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(S2):201-208.
- QI Yijin, NI Jingwei, ZHAO Dongxu, et al. Source Apportionment and Risk Assessment of Ambient Volatile Organic Compounds from the High-Tech Zone in Zhengzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(S2):201-208.
- [5] 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 Wenbo, XU Yanling, SHI Xurong, et al. Atmospheric Environment Management in China: Progress and Outlook [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(5):52-60.
- [6] 张利慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3):526-535.
- ZHANG Lihui, WU Zhenhai, LI Bin, et al. Pollution Characterizations of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Spring of Beijing Urban Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3):526-535.
- [7] 高璟贇, 唐邈, 陈魁, 等. 天津市不同功能区大气挥发性有机物污染特征及来源分析 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 38(5):43-47.
- GAO Jingyun, TANG Miao, CHEN Kui, et al. Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Different Function Areas, Tianjin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 38(5):43-47.
- [8] 于玉洁, 杨臣强, 杨瑞, 等. 石家庄市城区春季 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2024, 45(8):4 459-4 469.
- YU Yujie, YANG Chenqiang, YANG Rui, et al. Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Shijiazhuang in Spring [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4 459-4 469.
- [9] 刘营营, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸大气 VOCs 污染特征及其在 O₃ 生成中的作用 [J]. *环境化学*, 2020, 39(11):3 101-3 110.
- LIU Yingying, WANG Litao, QI Mengyao, et al. Characteristics of Atmospheric VOCs, and Their Role in O₃ Generation in Handan [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(11):3 101-3 110.
- [10] 张晓, 张宁, 韦锐, 等. 秋季石家庄高新区 VOCs 污染特征、化学活性及源解析 [J/OL]. *环境科学*, 2024-05-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401181>.
- ZHANG Xiao, ZHANG Ning, WEI Rui, et al. Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Shijiazhuang High-Tech Industrial Development Zone in Autumn [J/OL]. *Environmental Science*, 2024-05-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401181>.
- [11] ZHAO X, MA H, LU J, et al. Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds During the Remediation of Contaminated Sites in Zhenjiang, China [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 18(2):2 271-2 282.
- [12] 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 等. 武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 [J]. *环境科学*, 2022, 43(6):2 966-2 978.
- SU Weifeng, KONG Shaofei, ZHENG Huang, et al. Real-Time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):2 966-2 978.
- [13] XIONG C, WANG N, ZHOU L, et al. Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds During Summer and Winter in Downtown Chengdu, Southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 258(8):29-42.
- [14] 程龙, 董昊, 刘阳, 等. 合肥市臭氧及其前体物污染特征及源解析 [J]. *中国环境监测*, 2023, 39(3):

- 58-66.
CHENG Long, DONG Hao, LIU Yang, et al. Pollution Characteristics and Sources Apportionment of Ozone and Its Precursors in Hefei [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(3): 58-66.
- [15] 银媛媛, 文建辉, 张旭峰. 桂林市城区大气 VOCs 污染特征及对 O₃ 和 SOA 的生成潜势[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(4): 29-35.
YIN Yuanyuan, WEN Jianhui, ZHANG Xufeng. Pollution Characteristics of Ambient VOCs and Its Formation Potential to Ozone and Secondary Organic Aerosol in Guilin City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(4): 29-35.
- [16] 赵玉龙. 兰州市城区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(6): 117-124.
ZHAO Yulong. Pollution Characteristics and Sources Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Lanzhou Urban Area [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(6): 117-124.
- [17] 林尤静, 颜为军, 徐文帅, 等. 海南区域背景点光化学污染特征及 VOCs 来源解析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2 418-2 430.
LIN Youjing, YAN Weijun, XU Wenshuai, et al. Characteristics of Photochemical Pollution and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Regional Background Station of Hainan [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(5): 2 418-2 430.
- [18] 陈斯, 倪经纬, 齐一谨, 等. 郑州市 O₃ 攻坚期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J/OL]. *环境科学*, 2024-02-23. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202310136>.
CHEN Si, NI Jingwei, QI Yijin, et al. Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Zhengzhou During O₃ Campaign Period [J/OL]. *Environmental Science*, 2024-02-23. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401181>.
- [19] 姚佳, 李振亮, 陈木兰, 等. 重庆市中心城区大气 VOCs 季节污染特征与来源解析[J/OL]. *环境科学*, 2024-05-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202402041>.
YAO Jia, LI Zhenliang, CHEN Mulan, et al. Seasonal Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Central Urban Area of Chongqing [J/OL]. *Environmental Science*, 2024-05-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202402041>.
- [20] 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源[J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 3 944-3 952.
ZHU Kexin, LIU Lizhong, LIU Huanwu, et al. Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 3 944-3 952.
- [21] 张厚勇, 隋浩新, 王在峰, 等. 济南市城区大气挥发性有机物污染特征及来源研究[J/OL]. *中国环境科学*, 2024-04-11. <https://link.cnki.net/doi/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240410.007>.
ZHANG Houyong, SUI Haoxin, WANG Zaifeng, et al. Study on Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Urban Jinan, China [J/OL]. *China Environmental Science*, 2024-04-11. <https://link.cnki.net/doi/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240410.007>.
- [22] 李凯, 潘宁, 梅如波, 等. 泰安市大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2022, 41(2): 1-9.
LI Kai, PAN Ning, MEI Rubo, et al. Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Taian [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(2): 1-9.
- [23] 黄同林, 王艳辉, 王一秋, 等. 聊城市秋冬季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2024, 47(1): 189-200.
HUANG Tonglin, WANG Yanhui, WANG Yiqiu, et al. Characteristics and Source Apportionment of VOCs During the Autumn and Winter in Liaocheng [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 47(1): 189-200.
- [24] 王少伟, 李明, 潘芋燕, 等. 烟台市城区挥发性有机物污染特征及其对臭氧影响分析[J/OL]. *中国无机分析化学*, 2024-04-25. <https://link.cnki.net/urlid/11.6005.06.20240423.1457.002>.
WANG Shaowei, LI Ming, PAN Yuyan, et al. Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Its Effect on Ozone in Yantai City [J/OL]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2024-04-25. <https://link.cnki.net/urlid/11.6005.06.20240423.1457.002>.
- [25] 王丽敏, 苗斌, 丛子翔, 等. 基于走航监测的威海市 VOCs 污染特征分析[J/OL]. *中国环境监测*, 2024-05-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2861.X.20240518.2017.002>.
WANG Limin, MIAO Bin, CONG Zixiang, et al.

- Analysis of VOCs Pollution Characteristics Based on Navigation Monitoring in Weihai City [J/OL]. *Environmental Monitoring in China*, 2024-05-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2861.X.20240518.2017.002>.
- [26] 杨雪,安馨悦,刘玉启,等.山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 696-706.
YANG Xue, AN Xinyue, LIU Yuqi, et al. Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 696-706.
- [27] 曹方方,李红莉,刘春花,等.菏泽市环境空气中VOCs污染特征研究[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(3): 73-79.
CAO Fangfang, LI Hongli, LIU Chunhua, et al. Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air in Heze City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(3): 73-79.
- [28] CARTER W P L. Development of Ozone Reactivity Seals for Volatile Organic Compounds[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994, 44(1): 881-889.
- [29] GROSJEAN D. *In Situ* Organic Aerosol Formation During a Smog Episode; Estimated Production and Chemical Functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, 26(6): 953-963.
- [30] GROSJEAN D, SEINFELD J H. Parameterization of the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, 23(8): 1 733-1 747.
- [31] 刘永全,赵伊琳,刘欢,等.天津市环境空气中挥发性有机物的污染特征[J/OL]. *天津科技大学学报*, 2024-06-21. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20230220>.
- LIU Yongquan, ZHAO Yilin, LIU Huan, et al. Characteristics of Volatile Organic Compounds in Ambient Air in Tianjin [J/OL]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2024-06-21. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20230220>.
- [32] 张敬巧,刘铮,丁文文,等.廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析[J]. *环境科学*, 2023, 45(5): 2 622-2 630.
ZHANG Jingqiao, LIU Zheng, DING Wenwen, et al. Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang [J]. *Environmental Science*, 2023, 45(5): 2 622-2 630.
- [33] 王倩,陈长虹,王红丽,等.上海市秋季大气VOCs对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 424-433.
WANG Qian, CHEN Changhong, WANG Hongli, et al. Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 424-433.
- [34] 吕子峰,郝吉明,段菁春,等.北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 969-974.
LYU Zifeng, HAO Jiming, DUAN Jingchun, et al. Estimate of the Formation Potential of Secondary Organic Aerosol in Beijing Summertime [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 969-974.
- [35] 徐虹,唐邈,肖致美,等.天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及VOCs对SOA生成潜势[J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3 492-3 499.
XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhimei, et al. Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3 492-3 499.