

# 中山市大气挥发性有机物污染特征、臭氧生成潜势及污染防治能力评估

杨 栩,陈弘丽,利雪儿

广东省中山生态环境监测站,广东 中山 528400

**摘要:**首次选取中山市23个镇街典型点位,分别在2022年夏季和冬季开展挥发性有机物(VOCs)手工采样监测,分析其污染特征、臭氧生成潜势(OFP),并评估各点位的VOCs污染防治能力。结果显示:在夏季,东区点位VOCs质量浓度最高,达 $3\ 252\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;而在冬季,大涌点位VOCs污染最严重,高达 $2\ 785\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。各点位监测结果与中山市气候特征和经济发展特点相吻合。总体上,体积分数位于前列的VOCs成分主要有芳香烃、醛酮类和烷烃,质量浓度位于前列的物种主要有乙酸乙酯、2-丁酮、丙酮、二氯甲烷和苯系物。各点位的冬季OFP比夏季更高,其中大涌点位的OFP在两个季节均为最高。芳香烃在冬季对各点位OFP的贡献特别显著。在夏季,对OFP贡献突出的物种主要有乙醛、异戊二烯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯;在冬季,对OFP贡献突出的物种主要有间/对-二甲苯、邻-二甲苯和甲苯。通过数据模型分析发现,中山港、小榄和坦洲点位的VOCs污染防治能力强,大涌点位的VOCs污染防治能力差,中心城区、新区和经济薄弱区域点位的VOCs污染防治能力较差,其余点位的VOCs污染防治能力相对较强。

**关键词:**挥发性有机物(VOCs);污染特征;臭氧生成潜势(OFP);污染防治能力评估;中山市

**中图分类号:**X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-6002(2025)01-0076-11

**DOI:**10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.09

## Analysis of Pollution Characteristics, Ozone Formation Potential and Evaluation of Pollution Prevention Capability on Ambient VOCs in Zhongshan City

YANG Xu, CHEN Hongli, LI Xue'er

Zhongshan Ecological and Environmental Monitoring Station of Guangdong Province, Zhongshan 528400, China

**Abstract:** For the first time the pollution characteristics of volatile organic compounds (VOCs) and ozone generation potential (OFP) were analyzed through offline monitoring of VOCs in summer and winter of 2022 at 23 typical sites of Zhongshan City, and the VOCs pollution prevention capability for each site was evaluated. The results showed that the mass concentration of total volatile organic compounds (TVOCs) was higher in winter than in summer for all the sites. The VOCs mass concentration of the Dongqu site in summer was the highest among all the sites ( $3252\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) while the atmospheric environment of the Dachong site suffered from the most severe VOCs pollution in winter ( $2785\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The results of each site were coincided with the characteristics of atmosphere and economic development of Zhongshan. Overall the main components of the volume fractions at different sites which locates at the first ranks were aromatics, aldehydes-ketones and alkanes, while the species identified the first ranks of the mass concentrations were ethyl acetate, 2-butanone, acetone, dichloromethane and benzene series (BTEX). The OFP concentration was higher in winter than in summer for each monitoring site. The Dachong site in both seasons gained the highest OFP concentration. The aromatics had significant contribution on the generations of the ozone at each site in winter. The main species, located first ranks for OFP contributions at each site, were acetaldehyde, isoprene, *m/p*-xylene and *o*-xylene in summer while were *m/p*-xylene, *o*-xylene and toluene in winter. Through the data model it was found that the pollution prevention capability of VOCs at the site of Zhongshan Port, Xiaolan and Tanzhou was great, while it was poor at the site of Dachong. The sites from city center, new developmental zone and weak economy area were obviously relatively poor on the pollution prevention capability of VOCs while the other sites were relatively strong.

**Keywords:** volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; ozone generation potential (OFP); evaluation of pollution prevention capability; Zhongshan City

收稿日期:2023-06-30;修订日期:2023-09-15

基金项目:中山市社会公益与基础研究项目(2021SYF08,2021B2004)

第一作者简介:杨 栩(1989-),男,广东中山人,硕士,工程师。

通讯作者:陈弘丽

近几年,我国大气污染形势出现新变化,细颗粒物( $PM_{2.5}$ )污染防治效果显著,污染水平持续下降,但臭氧( $O_3$ )污染对于许多城市的影响日益明显<sup>[1]</sup>。挥发性有机物(VOCs)具有较强的致畸性、致癌性和毒性,能通过呼吸和皮肤直接接触等方式进入人体并造成急性或者慢性伤害<sup>[2]</sup>。更重要的是,作为 $O_3$ 的前体物,VOCs污染会造成大气光化学烟雾和灰霾等环境问题,导致以大气氧化性增加为特征的复合大气污染问题日益突出<sup>[3-4]</sup>。最近10年,国内越来越多的城市开始开展VOCs污染防治研究。在中山市所处的粤港澳大湾区,已有广州、深圳、佛山等城市对各自的VOCs污染特征、来源、臭氧生成潜势(OFP)、健康风险等内容开展了不同程度的研究。研究显示,广州市冬季VOCs主要来源于汽车尾气排放和溶剂使用,贡献率分别为22.4%和20.5%<sup>[5]</sup>。深圳市通过对非甲烷碳氢化合物(NMHCs)进行在线监测,分析了VOCs的时间变化特征和主要污染来源。研究结果显示,芳香烃的OFP最高,其次为烯烃,而烷烃最低<sup>[6-7]</sup>。佛山市通过位于狮山镇的大气超级站对当地大气VOCs污染特征及来源进行了分析,研究结果显示:观测期间共测得56种VOCs物种;总挥发性有机物(TVOCs)的体积浓度为 $(39.64 \pm 30.46) \times 10^{-9}$ ,主要组成为烷烃(56.5%)和芳香烃(30.1%);大气VOCs在冬季和春季浓度较高,各组分浓度呈“U”形日变化特征,且污染时段的日变化幅度明显大于非污染时段;VOCs的OFP为 $107.40 \times 10^{-9}$ ,其中芳香烃对总OFP贡献最大(54.6%);贡献率最高的10种VOCs的OFP之和占总OFP的80.3%,体积浓度之和占TVOCs体积浓度的59.9%<sup>[8]</sup>。

中山市位于广东省中南部,珠江口西岸,北接广州和佛山,西邻江门,南连珠海,东隔珠江口与深圳、香港相望,形成了以五金电镀、服装制造、家具制造、印刷和电子设备制造等为主的“一镇一品”或“一镇多品”的专业镇经济模式。近几年,全市 $PM_{2.5}$ 等5项常规大气污染指标总体呈现下降趋势,但 $O_3$ 污染仍然突出。2022年,中山市 $O_3$ 日最大8h平均浓度范围为 $8 \sim 274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,日最大8h平均浓度第90百分位数( $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )超过了《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准;存在首要污染物[空气质量指数(AQI)>50]的天数中, $O_3$ 为首要污染物的天数占比超过80%, $O_3$ 超标天数达59 d。由此, $O_3$ 成为影响中

山市AQI达标率的首要指标。同时,中山市工业VOCs的年排放量超5万t,排放源主要为大量使用涂料、油墨的家具制造、印刷、五金加工等行业。此外,中心城区周边分布有较多的汽修厂、加油站,两者均是VOCs的重要排放源。虽然过往已开展过针对中山市特定行业TVOC污染现状及迁移规律的研究,但目前相比广东省其他城市,关于中山市VOCs的研究还较为匮乏。

本研究选取了中山市23个镇街的典型性点位,分别在2022年的夏季和冬季开展VOCs手工采样及监测,首次基于多点位监测数据对全市各镇街主要工业集聚区的VOCs时空变化特征和OFP进行分析,同时首次采用新的计算评估方法对各镇街工业集聚区的VOCs污染特征和经济水平进行关联性分析,对各片区VOCs污染防治能力开展评估,以期为管理部门有针对性地制定污染防治对策和建立预警体系提供关键技术支撑。

## 1 材料与分析方法

### 1.1 监测时间与点位

本研究在综合考虑中山市各镇街的制造业企业数量和分布等重要因素后,对各镇街涉VOCs企业分布集中的区域进行采样点位布设。同时,兼顾采样的可行性和方便性,分别于2022年夏季和冬季在全市23个镇街最具代表性的VOCs排放点位进行了采样(表1)。每个季节分别选取大气扩散条件较差的一天进行样品采集,采样时段为09:00—16:00。采样人员共分成3组,每组需至少配置一个运输空白样品,且在每个点位采集两个平行样品,最终共得到54个有效样品。

### 1.2 采样与分析方法

本次采样采用容积为3L的SUMMA真空不锈钢采样罐对环境空气中的VOCs进行收集。进行样品采集时,利用真空罐内外的压力差作动力,将环境空气收集至采样罐中。使用大气预浓缩系统(美国Nutech,8910)、静态稀释仪(美国Nutech,2203)、气相色谱-质谱仪(美国Agilent,7890B-5977B)和罐清洗仪(美国Entech,3100A)等仪器对采集到的样品进行分析。分析时,将样品经过三级冷阱捕集系统的浓缩富集后,输入气相色谱-质谱系统。使用含117种VOCs的标准混合气体(美国Linder)建立包含5个不同浓度梯度

的校准曲线,确保目标化合物在校准曲线中的相关系数达到 0.991~0.999。对于每批待分析样品,通过实验室空白、运输空白、平行样品,以及每

24 h 校准一次校准曲线等质控方式,来保证数据的有效性。本研究以在每个点位当天采集的样品的浓度来表示当季节的浓度。

表 1 采样点位信息

Table 1 Informations of VOCs sampling points

点位名称	点位坐标	周边企业及环境描述
石岐	22.533 59°N, 113.365 63°E	胶黏油漆厂、家具厂、混凝土厂
东区	22.546 26°N, 113.408 61°E	化工厂
西区	22.577 16°N, 113.327 82°E	化工厂(牙膏)
南区	22.460 58°N, 113.345 19°E	PU 时款袋、棉布和尼龙化妆袋生产厂
港口	22.601 43°N, 113.417 16°E	家具厂、塑料厂
五桂山	22.440 98°N, 113.354 23°E	喷漆涂料厂、电器厂、金属厂
中山港	22.566 08°N, 113.524 58°E	机动设备喷漆厂
翠亨	22.540 44°N, 113.625 16°E	造船厂(周围空旷、临海)
南朗	22.510 99°N, 113.502 49°E	金属电器厂
民众	22.682 48°N, 113.502 79°E	油墨涂料厂、化工厂
小榄	22.587 79°N, 113.278 09°E	五金电镀厂
东升	22.573 85°N, 113.258 77°E	合成树脂厂、油漆厂、辅助材料厂、涂料厂
古镇	22.670 56°N, 113.189 09°E	塑料制品厂、灯饰厂
横栏	22.511 00°N, 113.244 13°E	黏合剂厂、平版胶印油墨厂、塑胶涂料厂
东风	22.676 30°N, 113.287 85°E	家电厂
南头	22.736 10°N, 113.283 20°E	家具厂、塑料厂、混凝土厂、模具厂
黄圃	22.729 29°N, 113.434 51°E	油漆厂、涂料厂(含易燃溶剂)
三角	22.678 19°N, 113.403 54°E	化工原料溶剂厂、涂料化工厂
阜沙	22.680 55°N, 113.348 91°E	塑料厂、薄膜厂、玻璃厂
坦洲	22.269 98°N, 113.486 39°E	电镀厂、五金厂、印刷厂
大涌	22.475 99°N, 113.285 12°E	家具厂
板芙	22.384 89°N, 113.334 70°E	油墨厂、制鞋厂、电子厂、家具厂
神湾	22.288 28°N, 113.340 83°E	家具厂、纺织印染厂

### 1.3 OFP 计算

VOCs 是  $O_3$  的重要前体物,不同 VOCs 物种的光化学反应活性差别较大,对  $O_3$  的生成贡献也不同。OFP 是用以衡量 VOCs 中各组分对  $O_3$  生成的贡献的重要指标,因此,本研究对各监测点位 VOCs 物种的 OFP 进行分析,找出各点位贡献较大的 VOCs 物种并进行比较,这对于中山市全面科学控制  $O_3$  生成具有重要意义。关于 OFP 的计算,众多研究都基于 CARTER<sup>[9]</sup> 提出的 MIR 系数法来计算 OFP 值,计算方法见公式(1)。

$$OFP_i = MIR_i \times \rho_i \quad (1)$$

式中:OFP<sub>i</sub> 为某 VOCs 物种 *i* 的臭氧生成潜势,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\rho_i$  为某 VOCs 物种 *i* 的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; MIR<sub>i</sub> 为某 VOCs 物种 *i* 的最大增量活性系数,常被用来评估各 VOCs 组分对 OFP 的贡献,本研究使用文献[9]中的 MIR 值。

### 1.4 VOCs 污染防治能力评估

研究显示,地方公共财政支出水平与环境污染水平呈显著负相关,即地方公共财政支出增多有利于改善环境污染<sup>[10]</sup>。地方财政支出水平与可反映城市经济基础的地区生产总值和税收指标

直接相关,VOCs 污染水平则是与当地产业结构、涉 VOCs 排放企业数量及规模有关。由此可认为,地区 VOCs 污染防治水平是以地区经济发展水平为基础。本研究首次提出了一种新的计算评估方法,通过地区 VOCs 污染特征与经济发展水平关联性分析,对当地 VOCs 污染防治能力进行评估,从而为管理部门后续制定更有效的 VOCs 污染防治对策提供理论和技术支撑。经济决定税收,税收源于经济,而税收收入又是财政收入的重要组成部分,因此,税收收入不仅与可反映经济总体状况的地区生产总值有非常好的相关性,也与第二、三产业增加值之间存在非常好的线性关系,且第二产业对税收的影响更为明显<sup>[11]</sup>。中山市与国内大部分制造业城市相同,在产业结构方面表现为第二产业增加值在地区生产总值中占重要比重。鉴于一个地区的税收收入与地区生产总值、财政收入和支出存在相关性,财政收入和支出又与该地区 VOCs 污染水平和涉 VOCs 企业数量及规模相关,本研究在污染防治能力评估中选取税收收入、地区生产总值、涉 VOCs 企业排放浓度等指标作关联性分析,计算方法见公式(2)。

$$\beta = (R_T/G_{DP})/(\rho/n) \quad (2)$$

式中: $R_T$  为某地税收收入,亿元; $G_{DP}$  为某地地区生产总值,亿元; $\rho$  为某地涉 VOCs 企业的污染排放总浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $n$  为某地纳入统计的涉 VOCs 企业数量,家; $\beta$  为某地污染防治能力评估系数,家 $\cdot\text{m}^3/\mu\text{g}$ 。 $R_T/G_{DP}$  表示该地区生产总值的含金量,该值越大意味着可投入到 VOCs 污染治理方面的财政支出占比越大; $\rho/n$  表示该地区涉 VOCs 企业的污染排放平均浓度。通过二者的关联性分析可知, $\beta$  表示当地方财政支出用于支持涉 VOCs 企业污染防治后,一个污染浓度单位需要多少家涉 VOCs 企业共同排放。从数量关系可知, $\beta$  越大说明该地区 VOCs 污染防治能力越强,反之亦然。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各监测点位 VOCs 时空特征

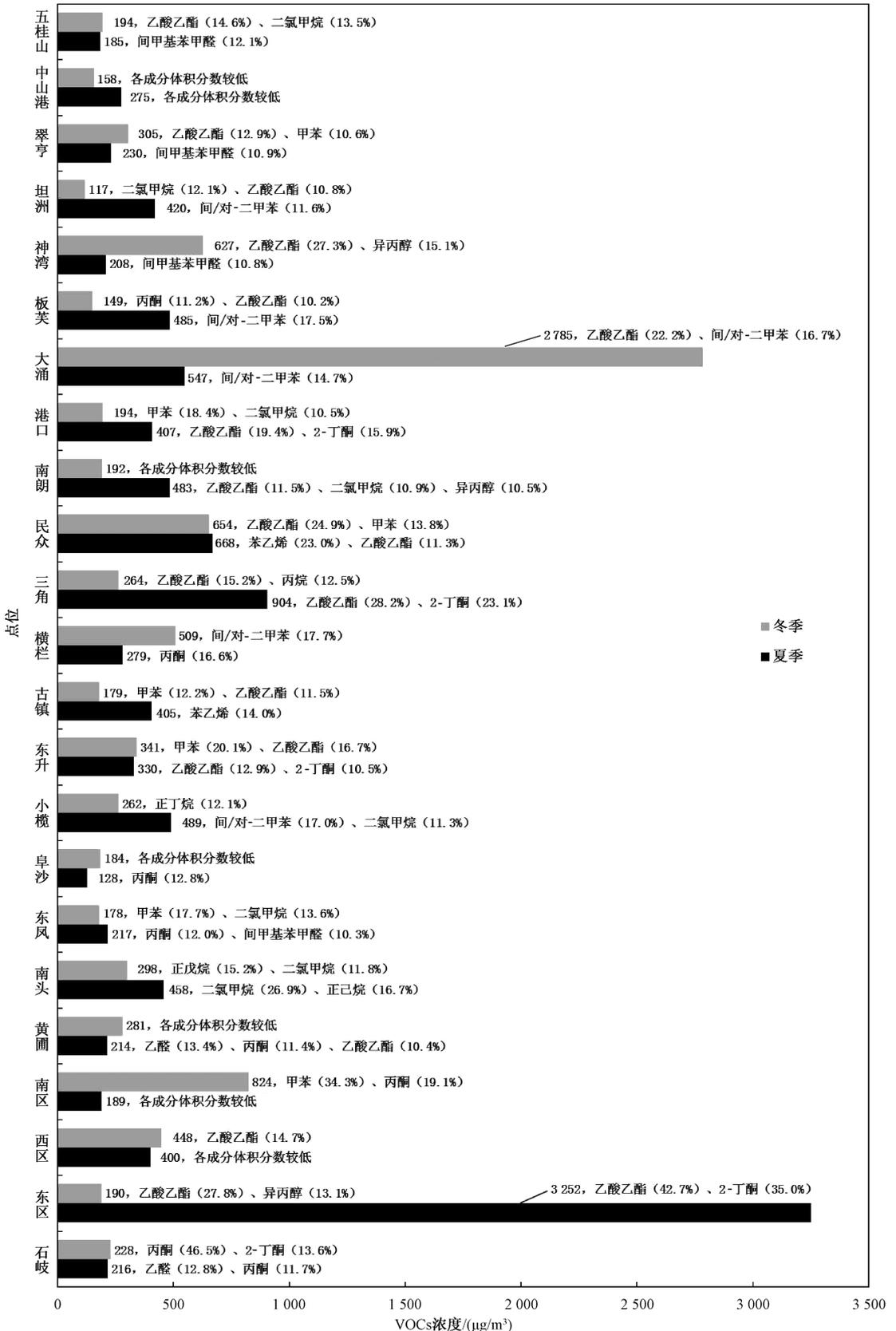
经过监测分析,在夏季,全市各个监测点位分别有 41~93 种 VOCs 物种被检出。其中:最少的是阜沙点位,共检出 41 种;最多的是板芙点位,共检出 93 种。而在冬季,各点位被检出的 VOCs 物种数量相对夏季整体偏少。其中:最少的是坦洲点位,只有 35 种被检出;最多的是大涌点位,有 75 种被检出。关于 VOCs 污染排放浓度,有 10 个监测点位的夏季浓度明显高于冬季。显然,这几个点位的大气环境在夏季受 VOCs 影响较大(图 1)。有 7 个监测点位的浓度在冬季明显更高,表明其大气环境在冬季受 VOCs 影响更显著。另外,有 6 个监测点位的夏冬季浓度相当。分监测点位来看,在夏季,阜沙点位 VOCs 质量浓度最低,只有  $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;最高值出现在东区点位,高达  $3252 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在冬季,坦洲点位 VOCs 质量浓度最低,只有  $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而大涌点位 VOCs 污染最严重,VOCs 质量浓度高达  $2785 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从图 1 可见,每个监测点位的 VOCs 浓度水平和主要物种(体积分数占比 $\geq 10\%$ )无论是在夏季还是在冬季都不相同。对于大部分点位,体积分数占比高且质量浓度位于前列的物种主要有乙酸乙酯、2-丁酮、丙酮、二氯甲烷和苯系物。

苯和甲苯的浓度比值(B/T)常用来判断苯系物的来源,不同来源的 B/T 值具有专一性<sup>[12-14]</sup>。本研究根据每个点位的苯和甲苯监测浓度,计算每个监测点位的 B/T 值,发现大部分点位的 B/T 值均明显小于 0.5,说明其苯系物的来源主要为颜料、溶剂等的工业排放或挥发,这与相关监测点

位的产业特性及周边环境描述相一致。而小部分监测点位(黄圃、五桂山和中山港)的 B/T 值大于 0.5,其中黄圃点位的 B/T 值高达 0.8,表明其苯系物污染除受周边涂料厂、油漆厂影响外,可能也受到燃煤排放和石油化工排放的影响。观察点位周边环境可知,黄圃监测点位离火力发电厂较近,所以该片区在一定程度上可能受发电厂燃煤排放影响较大。五桂山和中山港点位的 B/T 值接近 0.5,表明其苯系物可能主要来自汽车尾气等交通源排放。

综上,各个点位监测结果与中山市气候特征和经济发展特点相吻合。一方面,在夏秋季,由于高频副热带高压天气系统所导致的高温少雨、弱北风天气,以及高强度太阳辐射的影响,更多有利于  $\text{O}_3$  生成的 VOCs 物种得以形成,所以在夏季有更多的 VOCs 物种被检出。另一方面,中山是一座传统制造业城市,家具、印刷、五金加工等产业发达,会大量使用涂料、油墨。同时,中心城区周边分布有较多汽修厂、加油站等 VOCs 大型排放源。各监测点位位于不同的产业集聚区或功能区,导致各点位 VOCs 在夏冬两个季节的浓度分布特征不尽相同。从各监测点位体积分数位于前列的 VOCs 物种来看,其特征与各点位周边产业分布相吻合。分别以夏季(东区)和冬季(大涌)浓度最高点位为例进行分析。东区点位位于中山市主城区,附近是城区仅有的以合成树脂、油漆和涂料产业为主的工业集聚区。该区域 2022 年第二、第三季度的规上工业增加值降幅逐步收窄,而第四季度的降幅又继续增大,意味着东区的工业产能在第二、三季度正处于恢复期,导致该区域夏季 VOCs 排放量较大。大涌点位所处区域是红木家具生产重镇,而下半年是红木家具的产销旺季,导致大涌点位冬季 VOCs 浓度较高。

从 VOCs 成分来看,23 个监测点位的体积分数占比较高的 VOCs 成分在夏冬两个季节并不一致(图 2)。在夏季,14 个监测点位的体积分数占比最高 VOCs 成分是醛酮类,6 个监测点位为芳香烃,其余 3 个监测点位则是烷烃、酯类和卤烃。在冬季,14 个点位的体积分数占比最高 VOCs 成分是烷烃类,7 个点位为芳香烃,其余点位则是醛酮类或酯类。整体上,大部分点位大气环境中,体积分数占比较高的 VOCs 成分主要有芳香烃、醛酮类、烷烃,这显然与在中山市制造业中产值占比较大的化工、印染和家具制造等产业相关。



注:每个条形柱对应的数字为该点位的VOCs浓度水平,单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;各化合物名称及其后方括号内的百分比表示该点位的主要物种( $\geq 10\%$ )及其体积分数。

图1 各采样点位夏冬季VOCs浓度水平和主要物种

Fig. 1 VOCs concentration level and main species at each sampling point in summer and winter

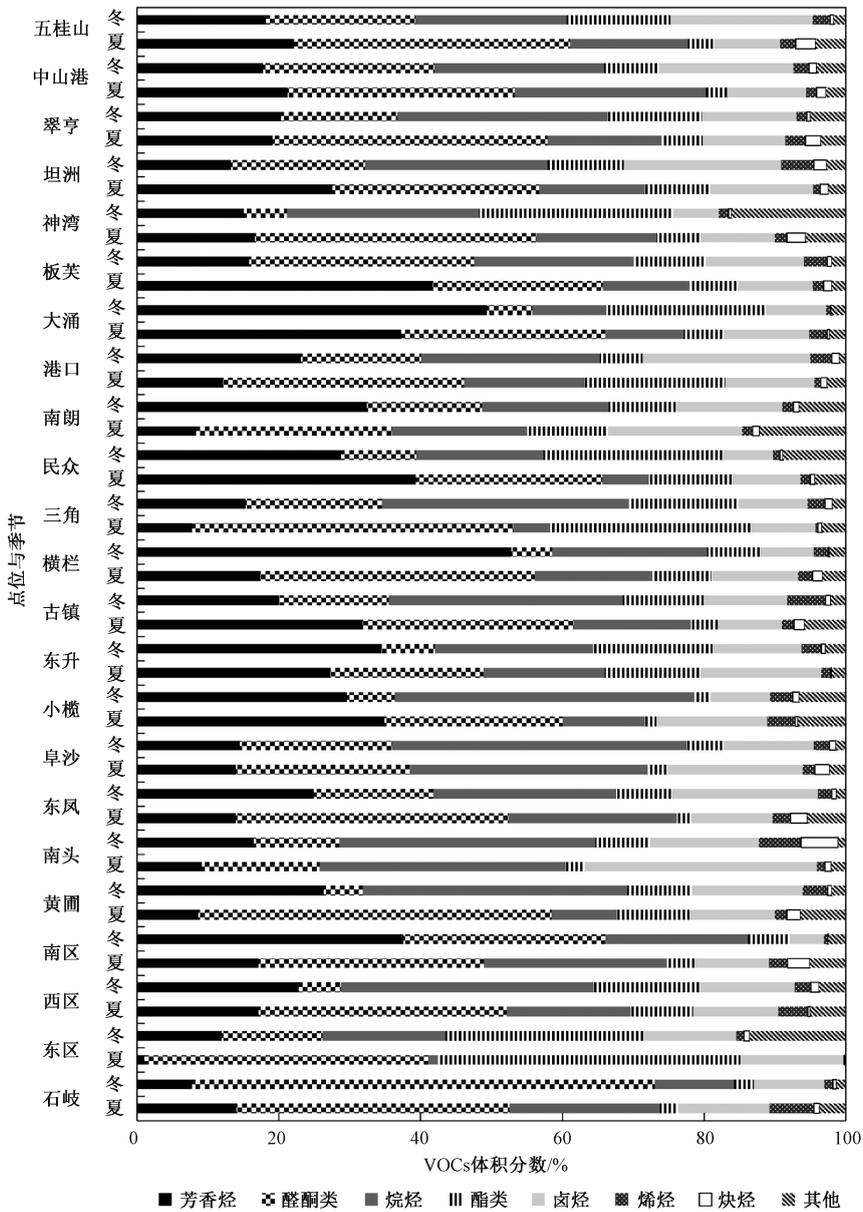


图 2 各点位夏冬季 VOCs 成分体积分数对比

Fig. 2 Comparison of volume fraction of VOCs components at each point in summer and winter

## 2.2 OFP 分析

VOCs 对  $O_3$  的生成有重要作用。VOCs 物种的差异性造成其光化学反应活性差别较大,对  $O_3$  的生成的贡献也不同。本研究进一步分析了中山市不同点位大气环境中各 VOCs 污染物的 OFP,识别了影响这些点位  $O_3$  生成的重要 VOCs 物种。

分析表明,14 个点位的冬季 OFP 比夏季高。分点位来看,大涌点位的 OFP 无论是在夏季还是在冬季均为最高,分别为  $1\ 512\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $14\ 272\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;阜沙点位的夏季 OFP 最低 ( $203\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ );东区点位的冬季 OFP 最低 ( $175\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ );除大涌

点位外,分别有 4 个(东区、民众、板芙和小榄)和 6 个(西区、东升、民众、横栏、神湾和南区)点位的夏季和冬季 OFP 超过了  $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

从 VOCs 成分来看(图 3),在夏季,芳香烃在 20 个点位均是 OFP 占比最大的成分;烷烃、醛酮类和卤烃分别为其余点位的 OFP 占比最大成分,但芳香烃的 OFP 占比在各点位仍处于前 3 位。在冬季,芳香烃在所有点位的 OFP 占比均为最大。对全市各点位观测结果进行分析可知,芳香烃在中山市大气环境中的光化学反应活性较强,尤其是在冬季,对  $O_3$  生成的贡献尤为显著。

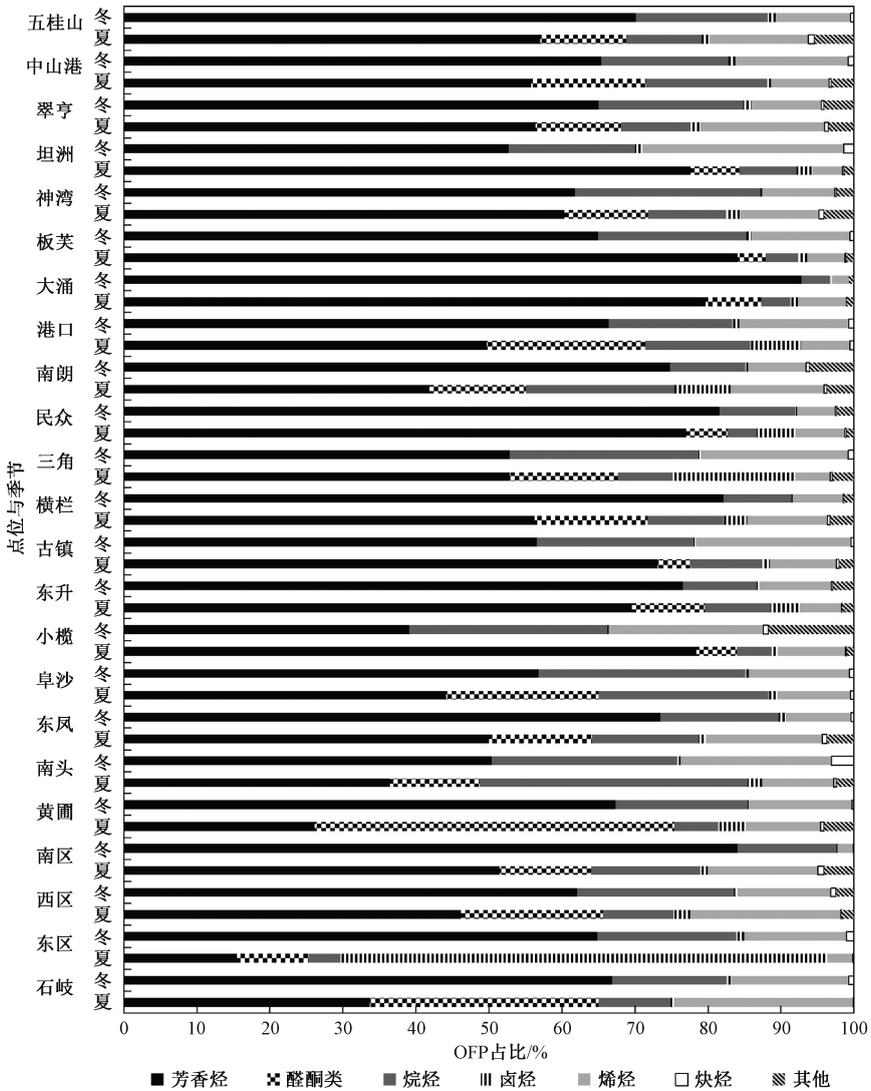


图3 各点位夏冬季 VOCs 成分 OFP 占比对比

Fig. 3 Comparison of OFP proportion of VOCs components at each point in summer and winter

从 VOCs 物种来看(图 4),各个点位的 OFP 贡献前 3 位物种不尽相同,但是从数据分析结果可以看出,在夏季,大部分监测点位的 OFP 贡献前 3 位物种主要有乙醛、异戊二烯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯,而在冬季, OFP 主要贡献物种为间/对-二甲苯、邻-二甲苯和甲苯。异戊二烯一般来自植物排放。夏季太阳辐射越强、温度越高时,植物排放速率越快,所以异戊二烯在夏季的体积分数较高<sup>[15-16]</sup>。乙醛既可能来自大气环境,也可能来自建筑材料的排放。苯系物可能来自汽车尾气等交通源或有机溶剂使用源。根据各点位 B/T 值,苯系物来自有机溶剂使用源的可能性较大。综上可知,苯系物在各点位大气环境中的化学反应活性较高,各点位大气环境受有机溶剂使用源

影响较大。

### 2.3 VOCs 污染防治能力分析

一个地方的 VOCs 污染防治能力与涉 VOCs 排放企业数量、规模及当地经济发展水平有关。选取各点位所代表片区的 VOCs 平均浓度、涉 VOCs 排放企业数量、税收收入和地区生产总值数据进行模型运算。从模型 1 模拟结果(图 5)可知,有 10 个点位(小榄、中山港、古镇、东风、坦洲、横栏、东升、南头、三角和黄圃)的涉 VOCs 企业污染排放平均浓度水平低于或接近预测平均趋势线,说明这 10 个片区的 VOCs 污染防治已取得一定成效;大涌点位的涉 VOCs 企业污染排放平均浓度远高于其他点位,表明大涌片区在涉 VOCs 排放企业污染防治方面有所欠缺;中

心城区点位(东区、石岐、西区、南区、五桂山和港口)、新区片区点位(翠亨、南朗)、经济薄弱片区点位(神湾、民众、板芙、阜沙)的涉 VOCs 企

业污染排放平均浓度水平均高于预测平均趋势线,表明其涉 VOCs 企业的污染排放平均浓度较高。

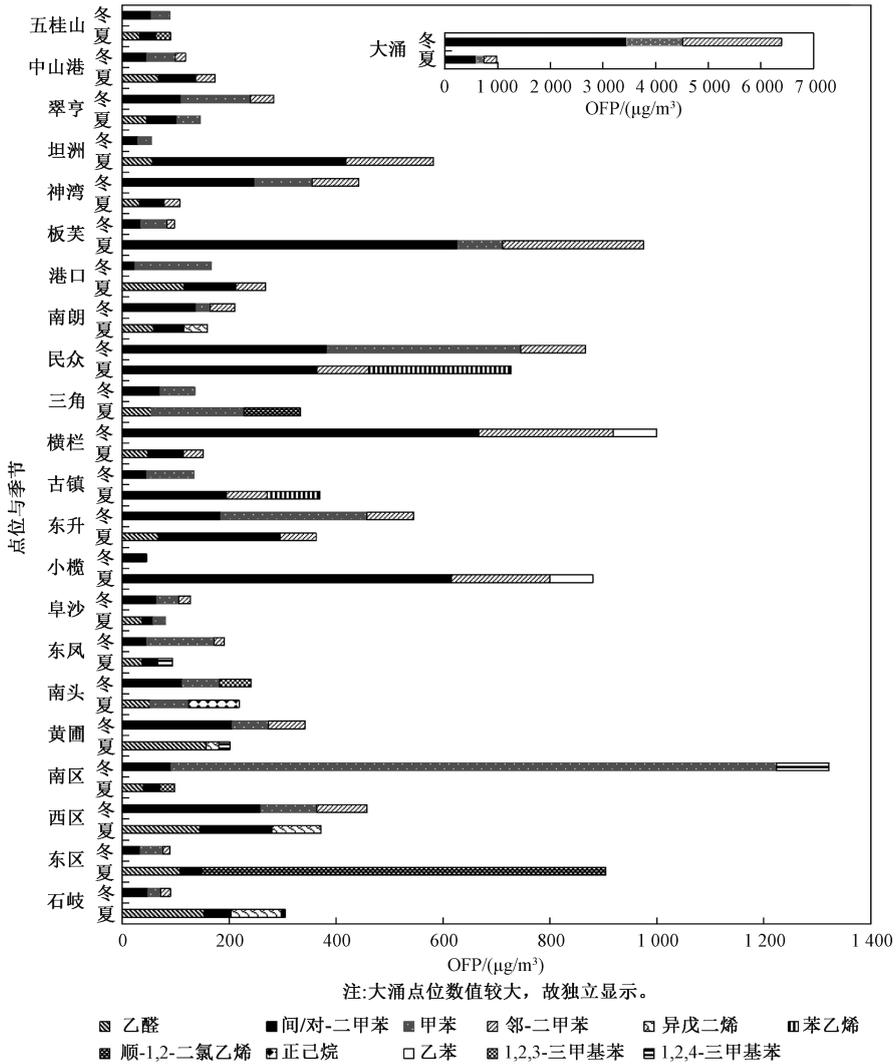


Fig. 4 Comparison of the top 3 species with the largest contribution to OFP at each point in summer and winter

模型 2(图 6)通过耦合各点位的经济系数与污染水平来反映其所代表片区的 VOCs 污染防治系数。中山港、小榄和坦洲点位是仅有的 3 个  $\beta$  值(污染防治能力评估系数)超过 1 的监测点位,表明这 3 个点位所在片区由于经济基础雄厚, VOCs 污染防治能力较强。大涌点位的  $\beta$  值远低于预测平均趋势线,表明其 VOCs 污染防治能力差。这主要是因为该点位所在片区以红木家具制造和牛仔裤制造为主要产业,产品附加值偏低,而污染排放水平较高,造成大涌片区在涉 VOCs 排放企业污染防治政策举措实施和财政支出方面均有所欠缺。中心城区点位(东区、石岐、西区、南

区、五桂山和港口)、新区片区点位(翠亨、南朗)和经济薄弱片区点位(神湾、民众、板芙、阜沙)的  $\beta$  值均小于 0.1,表明其 VOCs 污染防治能力存在不足。中心城区点位所在片区以第三产业为主,制造业占比较小。虽然该片区地方财政相对充盈,但受数量较多的汽修厂、加油站 VOCs 排放影响较大,财政支出并未有效满足该片区的污染防治需求。新区片区和经济薄弱片区点位 VOCs 污染防治能力存在不足既有工业基础较为薄弱的原因,也有企业数量少但污染排放量大的原因,导致其财政支出难以有效提升自身片区的 VOCs 污染防治能力。其余片区点位的  $\beta$  值都在 0.1 到 1 之

间,这些点位所属片区既有一定的经济基础,也能较好地控制片区的 VOCs 污染,VOCs 污染防治能力水平相对较好。

基于各点位 VOCs 污染分布特征、OFP 特征和污染防治能力分析结果,中山市在 VOCs 污染防治方面可主要从以下两大方向作进一步改进和提升:一是管治方面,建议加强对溶剂使用源和工业源的 VOCs 排放管控,以 O<sub>3</sub> 污染防治为重点,

推进 VOCs 与氮氧化物(NO<sub>x</sub>)协同减排;强化对涉 VOCs 重点企业的检查力度,督促其加强深度治理;加强中心城区“油、路、车”污染防治统筹,提升移动源监管水平。二是产业方面,建议根据中山市产业结构特点,坚持新型战略性产业引进和传统产业升级改造双驱并进,提升自身产业竞争力,实现经济发展与环境保护相互协调的高质量发展之路。

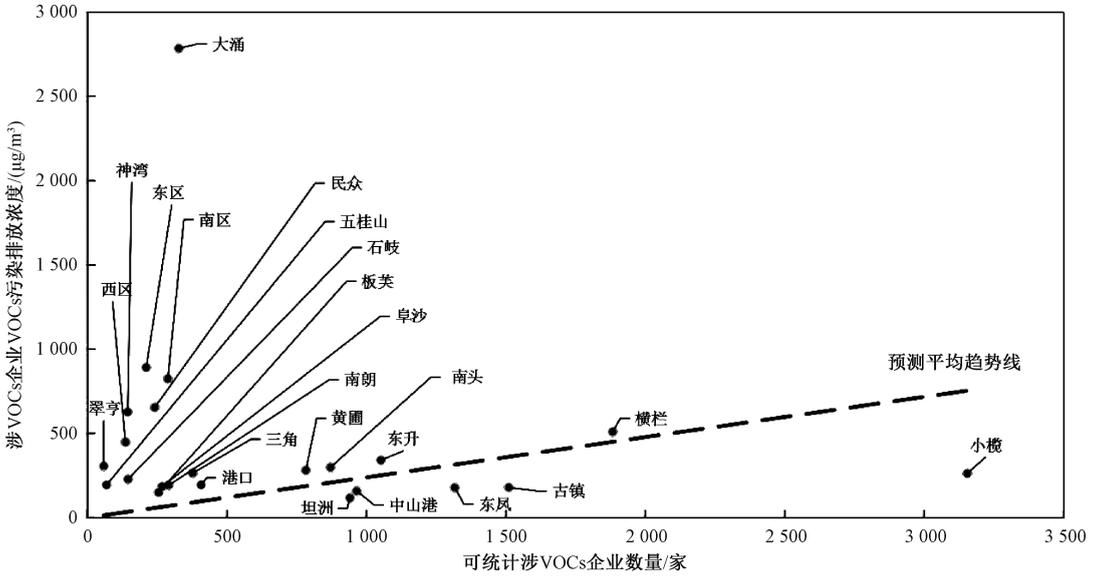


图5 各点位涉 VOCs 企业数量与 VOCs 污染排放浓度水平的关系

Fig. 5 The relationship between the number of VOCs related enterprises and VOCs pollution emission concentration level at each point

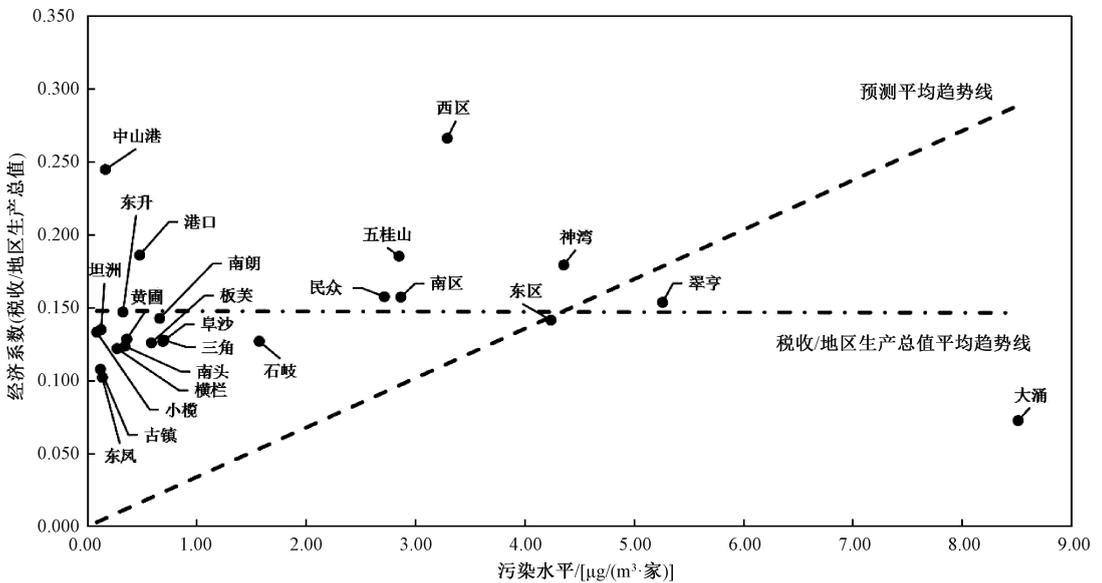


图6 各点位污染水平与经济系数的关系

Fig. 6 The relationship between pollution level and economic coefficient at each point

### 3 结论

1) 中山市 23 个监测点位中,有 10 个监测点位的夏季 VOCs 浓度比冬季更高,有 7 个监测点位的 VOCs 浓度在冬季明显更高,有 6 个监测点位的夏冬季浓度相当。分监测点位来看,在夏季,阜沙点位的 VOCs 浓度最低,只有  $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;最高浓度值出现在东区点位,高达  $3\,252 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在冬季,坦洲点位的 VOCs 浓度最低,只有  $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;大涌点位 VOCs 污染最重,VOCs 浓度高达  $2\,785 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。各点位监测结果与中山市气候特征和经济发展特点相吻合。

2) 从 VOCs 成分来看,在夏季,14 个监测点位的体积分数占比最高 VOCs 成分是醛酮类,6 个监测点位的体积分数占比最高 VOCs 成分是芳香烃,其余 3 个监测点分别是烷烃、酯类和卤烃;而在冬季,14 个点位的体积分数占比最高 VOCs 成分是烷烃,7 个点位的体积分数占比最高的 VOCs 成分是芳香烃,其余点位则为醛酮类或酯类。总体上,大部分点位大气环境中,体积分数占比较高的 VOCs 成分主要有芳香烃、醛酮类和烷烃。

3) 对于多数点位,体积分数占比较高且质量浓度位于前列的物种主要有乙酸乙酯、2-丁酮、丙酮、二氯甲烷和苯系物。根据每个点位的 B/T 值可见,黄圃、南区和中山港点位夏季 VOCs 的主要来源可能是交通源或工业有机溶剂使用源,其他点位的来源主要为颜料、溶剂等的工业排放或挥发。这与各点位的周边环境描述较为一致。

4) 在夏季,芳香烃在 20 个监测点位均是对  $\text{O}_3$  生成贡献最大的 VOCs 成分;在其余点位,OFP 占比最大的成分分别为烷烃、醛酮类和卤烃,但是芳香烃的 OFP 占比仍处于各点位的前 3 位。在冬季,芳香烃在所有点位的 OFP 占比均为最大。对于大部分监测点位,夏季的 OFP 贡献前 3 位物种主要有乙醛、异戊二烯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯,冬季的 OFP 主要贡献物种为间/对-二甲苯、邻-二甲苯和甲苯。

5) 通过数据模型分析发现,中山港、小榄和坦洲点位是仅有的 3 个  $\beta$  值超过 1 的监测点位,表明其所在片区的 VOCs 污染防治能力强;大涌点位的  $\beta$  值远远低于 0.1,表明其所在片区的 VOCs 污染防治能力差;中心城区、新区和经济基础较薄弱区域点位的  $\beta$  值均小于 0.1,表明其所

在片区的 VOCs 污染防治能力水平较差;其余点位的  $\beta$  值都在 0.1 到 1 之间,表明其所在片区的 VOCs 污染防治能力水平相对较好。

6) 通过对各点位 VOCs 污染分布特征、OFP 特征和污染防治能力进行分析,建议中山市在管治方面应加强对溶剂使用源和工业源的 VOCs 排放管控,强化涉 VOCs 重点企业深度治理,提升中心城区片区移动源监管水平;在产业方面应坚持新型战略性产业引进和传统产业升级改造双驱并进,提升产业竞争力,从而实现经济发展与环境保护相互协调的高质量发展之路。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [R]. 北京:生态环境部,2021-05-26.
- [ 2 ] 李友平,唐娅,范忠雨,等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价 [J]. 环境科学,2018,39(2):576-584.  
LI Youping, TANG Ya, FAN Zhongyu, et al. Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu [J]. Environmental Science, 2018, 39(2):576-584.
- [ 3 ] 颜敏,黄晓波,张文忠,等. 深圳大气挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(2):57-65.  
YAN Min, HUANG Xiaobo, ZHANG Wenzhong, et al. Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds in Shenzhen [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(2):57-65.
- [ 4 ] 饶芝菡,赵豆豆,母康生,等. 遂宁市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(3):96-104.  
RAO Zhihan, ZHAO Doudou, MU Kangsheng, et al. Characterization and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Suining in Summer [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(3):96-104.
- [ 5 ] 裴成磊,谢雨彤,陈希,等. 广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 [J]. 环境科学, 2022, 43(10):4 305-4 315.  
PEI Chenglei, XIE Yutong, CHEN Xi, et al. Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter [J]. Environmental Science, 2022, 43(10):4 305-4 315.
- [ 6 ] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等. 深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. 中国环境科学,

- 2012,32(12):2140-2148.
- ZHU Shaofeng, HUANG Xiaofeng, HE Lingyan, et al. Variation Characteristics and Chemical Reactivity of Ambient VOCs in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2140-2148.
- [7] 朱波, 王川, 于广河, 等. 深圳城市大气中非甲烷烃季节变化特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(2): 418-425.
- ZHU Bo, WANG Chuan, YU Guanghe, et al. Characterization of Seasonal Variation of Non-methane Hydrocarbons in the Urban Atmosphere in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 418-425.
- [8] 邓思欣, 刘永林, 司徒淑娉, 等. 珠三角产业重镇大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 2993-3003.
- DENG Sixin, LIU Yonglin, SITU Shupin, et al. Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in an Industrial Town of Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 2993-3003.
- [9] CARTER W P L. Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, 44(7): 881-899.
- [10] 朱小会, 陆远权. 开放经济、环保财政支出与污染治理——来自中国省级与行业面板数据的经验证据[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10): 10-18.
- ZHU Xiaohui, LU Yuanquan. Open Economy, Fiscal Expenditure of Environmental Protection and Pollution Governance: Evidences from China's Provincial and Industrial Panel Data [J]. *China Population Resources and Environment*, 2017, 27(10): 10-18.
- [11] 李继昆, 杨悦华. 关于税收与 GDP 构成的多元分析和思考[J]. *天津经济*, 2022(10): 48-50, 56.
- LI Jikun, YANG Yuehua. The Multivariate Analysis and Considering on Tax and GDP Structure [J]. *Tianjin Economic*, 2022(10): 48-50, 56.
- [12] SOFUOGLU S C, ASLAN G, INAL F, et al. An Assessment of Indoor Air Concentrations and Health Risks of Volatile Organic Compounds in Three Primary Schools [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, 214(1): 36-46.
- [13] ZHANG Y L, WANG X M, BARLETTA B, et al. Source Attributions of Hazardous Aromatic Hydrocarbons in Urban, Suburban and Rural Areas in the Pearl River Delta (PRD) Region [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 250/251: 403-411.
- [14] 梁思远, 王帅, 高松, 等. 北京市城区挥发性有机物污染特征及其对臭氧影响分析[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(6): 21-30.
- LIANG Siyuan, WANG Shuai, GAO Song, et al. Characteristics of Volatile Organic Compounds and Its Impact on O<sub>3</sub> Formation in Beijing Urban Area [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(6): 21-30.
- [15] BORBON A, FONTAINE H, VEILLEROT M, et al. An Investigation into the Traffic-Related Fraction of Isoprene at an Urban Location [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(22): 3749-3760.
- [16] STEEGHS M, BAIS H P, DE GOUW J A, et al. Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry as a New Tool for Real Time Analysis of Root-Secreted Volatile Organic Compounds in Arabidopsis [J]. *Plant Physiology*, 2004, 135(1): 47-58.