

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单	梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国 (4767)
中国水泥排放清单及分布特征	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞 (4776)
环境空气 PM _{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例	张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹 (4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征	张毓秀, 于兴娜, 刘佩嘉, 安俊琳, 张程 (4803)
郑州市 PM _{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析	张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹 (4813)
山西大学城 PM _{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估	李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇 (4825)
2000~2019 年中国 PM _{2.5} 时空演化特征	夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富 (4832)
北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异	尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军 (4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析	蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐 (4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠 (4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源	孙佳宁, 谢绍东 (4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析	高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜 (4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应	张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双 (4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探	陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫 (4905)
2009~2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素	辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 李骏, 陆隽 (4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征	张宏鑫, 吴亚, 罗伟宇, 陈雯, 刘怀庆 (4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪	孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强 (4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价	李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一 (4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征	张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程 (4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海 (4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序	苏超, 崔严 (4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价	杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷 (4989)
污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响	谢元汕, 张清科, 张滴杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳 (4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律	卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送 (5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素	朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌 (5016)
水库热分层沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响	王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇 (5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析	韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣 (5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响	郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟 (5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级	李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰 (5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制	潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金鑫, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英 (5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N ₂ O 释放的影响	王丝可, 于恒, 左剑恶 (5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A ² /O 污染物去除特性	荣懿, 邵劲博, 于优城, 石炬, 金鹏康 (5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响	田中科, 王芬, 闫钊 (5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价	韩琳, 徐夕博 (5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险	沈城, 刘腹雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛 (5125)
有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子	侯静雯, 施维林, 高娟 (5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英 (5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响	闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰 (5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应	王晓宇, 韩辉 (5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响	赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君 (5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响	张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔 (5176)
生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化	曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋 (5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响	贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰 (5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展	张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥 (5201)
广告: 国家微生物科学数据中心	(前插)
《环境科学》征订启事 (4785) 《环境科学》征稿简则 (4947) 信息 (5015, 5124, 5132)	

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源

孙佳宁, 谢绍东*

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 为精准识别化工园区环境空气 VOCs 排放源, 2017 年 1 月基于连续在线 GC-FID 法逐时监测某化工园区 5 个点环境空气中 43 种 VOCs 数据, 运用统计分析和 PMF 模型识别其来源, 再结合 CPF 方法和企业排放信息达到精准化识别各排放源。结果表明, 5 个监测点平均 VOCs 体积分数为 56.40×10^{-9} , 除一个点其余点均以烷烃含量最高, 主要是乙烷、丙烷、乙烯、甲苯、异丁烷、正丁烷和乙炔; 园区环境空气中 VOCs 来自丁烷泄漏、工艺过程中排放、储罐排放、乙烯合成和城区传输这 5 个来源; 基于气象传输路径分析和企业排放信息, 识别出园区有 7 家化工企业以及园区外运河装卸区是观测期间 VOCs 的主要排放源。本研究以在线监测数据为基础, 联合受体模型、气象条件及企业排放信息, 实现了化工园区内 VOCs 污染来源的精准化定位, 为园区内企业排放的监督管理提供依据。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 化工园区; 正矩阵因子分析法 (PMF); 条件概率函数 (CPF); 排放源

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-4874-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002002

Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data

SUN Jia-ning, XIE Shao-dong*

(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To accurately identify and locate ambient volatile organic compounds (VOCs) emission sources in industrial parks, a continuous online GC-FID method was used to monitor 43 kinds of VOCs on an hourly basis during January 2017 at five sites in an industrial park. A statistical analysis and a PMF model were used to analyze the sources of VOCs, and by combining with CPF and enterprise emission information, the location of each pollution source was accurately identified. The average VOCs concentration was 56.40×10^{-9} and the highest concentration of alkanes was observed at four sites, with the exception of one site. Ethane, propane, ethylene, toluene, isobutane, n-butane, and acetylene were the main contributors. Ambient VOCs in the park mainly derives from five sources: urban transmission, butane leakage, process emissions, storage tank emissions, and ethylene synthesis. The enterprises in the zone B1, A1-A3, C1-C2, F4, E4-E6, F4-F6, and the canal loading and unloading area are the main emission areas of the pollution sources. Using online monitoring data, the research combined a PMF model, meteorological conditions, and corporate emissions information to achieve precise positioning of the pollution sources of VOCs in the industrial park, thus providing a basis for the supervision and management of corporate emissions in industrial parks.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); industrial parks; positive matrix factorization (PMF); conditional probability function (CPF); emission source

2000 年以来化工园区建设呈快速发展势头, 随着经济的发展和新型城镇化进程的推进, 化工企业不断向园区集中, 园区已成为化工行业发展的主要载体, 但其中污染问题也日益突显。化工园区环境空气中挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 具有种类多、成分复杂和浓度水平较高的特点^[1-6], 为有效管理和控制园区内 VOCs 污染问题, 需精准化识别园区内 VOCs 排放企业, 以便实现对园区内企业排放的针对性监管。对化工区环境空气 VOCs 排放来源的研究多采用正矩阵因子分析法 (positive matrix factorization, PMF)^[3-9] 和主成分分析法 (principal component analysis, PCA)^[2,10] 等受体模型的方法, 根据源谱特征解析判断源的类型, 目前在泰国曼谷^[5]、美国得克萨斯州^[11] 以及国内的宁波

市^[3]、南京市^[7,10] 等城市均已开展了相关的研究。近期国内外研究多以源解析结果为基础, 运用最大增量反应性 (maximum incremental reactivity, MIR)、丙烯当量浓度 (propylene-equivalent, PE) 和化学机制模型^[2,7,12] 等方法分析 VOCs 的化学反应活性及其臭氧生成潜势, 或对其健康风险进行研究^[4,13,14], 或对受体模型方法进行完善, 如 Wang 等^[15] 提出确定 PMF 模型因子数的方法, Liao 等^[16] 利用先验信息对解析的排放源进行限制。然而, 目前基于受体模型的解析结果多为一类源, 难以实现园区排放源的精准

收稿日期: 2020-02-01; 修订日期: 2020-05-03

基金项目: 总理基金 VOCs 重点行业排放特征及减排监管技术体系研究 (DQGG0204)

作者简介: 孙佳宁 (1994 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学与环境过程模拟, E-mail: 1701214500@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: sdxie@pku.edu.cn

化识别,导致难以利用园区环境空气中 VOCs 监测数据应用于园区企业监管。

条件概率函数(conditional probability function, CPF)结合污染源贡献和风向因素,被广泛地应用于排放源识别中^[17,18],以判断污染源方向,目前在我国的台湾地区^[19~21]、南京市^[22]、上海市的杭州湾北岸^[23]和韩国的大田工业园区^[24]等地均有所应用,以定量判断污染源的方向特征。本研究基于某化工园区设置的 5 个监测站点监测获得的园区环境空气中 VOCs 在线监测数据,集合受体模型和 CPF 方法,并结合园区内企业的排放信息,探讨了化工园区 VOCs 污染源精准化识别方法,将环境空气中获得的信息定位到具体企业,达到有效地监督企业漏排和偷排现象,以期为园区内环境空气污染排放监管提供新途径。

1 材料与方法

1.1 采样站点和采样时间

该园区占地约 30 km²,以石油和天然气化工为重点,发展合成新材料和精细化工等石油深加工产品,构建乙烯、异氰酸酯和聚碳酸酯等产品系列。为监管园区各企业 VOCs 排放,在园区内设置了如图 1 所示的 5 个站点,实时监测其环境空气中 VOCs 的浓度水平。图 1 中 A1~F7 为企业位置,主要有 23 家化工企业。现场监测点距地面约 3 m,周围企业排放口高度超过 20 m。监测时间为 2017 年 1 月 1~31 日,监测期间 5 个点大气平均温度为 6.9~7.6℃,相对湿度为 68.0%~80.5%,平均风速为 1.5~3.0 m·s⁻¹,各站点风向风速差异较大,说明受到一定的局地影响。

1.2 采样技术与测定方法

5 个点均配有独立的在线 VOCs 检测系统和气象监测系统。环境空气中 VOCs 采用 Airmo GC866 型气相色谱仪实现在线实时监测,时间分辨率为 1 h,采用 OPSIS 差分光谱分析仪和 Thermo 55i 型火焰离子化检测器测量了共 43 种 VOCs 物种,包括 17 种烷烃、10 种烯烃、1 种炔烃、4 种卤代烃和 11 种芳香烃,响应度良好,数据可靠,共得到 66 750 个有效浓度数据。各站点同时采用气象参数测定仪 Metone 和 WXT 520 测定气象数据,包括风速、风向、湿度和温度等。监测由第三方参照文献^[25,26]和园区管理方要求完成监测设备的质量保证。

1.3 精准化识别方法

1.3.1 正矩阵因子分析法

正矩阵因子分析法(PMF)是目前在环境领域



图 1 化工园区站点布置示意

Fig. 1 Map of the sites in the industrial park

污染物源解析方面比较成熟的定量源解析方法,常用于估算各排放源对大气中污染物的相对贡献。其原理在许多文献中均有描述^[2~9,27]。基本思路是以一个 $n \times m$ 的矩阵代表所有采集的样品数据,其中 n 表示样品数, m 表示 VOCs 物种数目,并将这个矩阵按下式进行分解:

$$X = GF \times E \quad (1)$$

式中, G 为 $n \times p$ 的源贡献矩阵, p 为主要污染源的数目, F 为 $p \times m$ 的源廓线矩阵, E 为残差矩阵。PMF 的重点是在矩阵 G 和 F 的所有元素均处于非负状态下,通过不断调整 G 和 F 以寻找目标函数 Q 的最小值。函数 Q 的定义如下:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{E_{ij}}{S_{ij}} \right]^2 \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个组分的浓度 X_{ij} 的不确定性估值, E_{ij} 为残余。本研究应用 USEPA PMF 模型进行分析,使用软件为 USEPA PMF 5.0。

1.3.2 条件概率函数分析法

条件概率函数(CPF)通常基于 PMF 等模型的源解析结果,通过计算各风向上某一污染源贡献超过阈值浓度的占比来确定源贡献的方向,其计算公式为:

$$CPF = m_{\Delta\theta} \div n_{\Delta\theta} \quad (3)$$

式中, $m_{\Delta\theta}$ 是平均风向 $\Delta\theta$ 出现超过 m 浓度阈值(第 75 百分数)的次数, $n_{\Delta\theta}$ 是同一风向数据点的总个数。本研究中, $\Delta\theta$ 设为 22.5°,共 16 个风向区域。由于弱风速下风向较难判断,故本研究采用的气象数据为风速 $> 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风向条件。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 体积分数特征

表 1 给出了监测获得的 5 个点环境空气中 43 种有机污染物的体积分数,表 2 列出了 5 个点总 VOCs 体积分数特征及气象条件.由表 2 可见,2017 年 1 月园区内平均总 VOCs 的体积分数为 56.40×10^{-9} ,4 号点 VOCs 体积分数明显高于其余站点,为 111.41×10^{-9} ,其次为 5 号点(83.74×10^{-9})和 2 号点(82.88×10^{-9}),3 号点和 1 号点 VOCs 体积分数相对较低,分别为 31.32×10^{-9} 和 26.38×10^{-9} .从标准差来看,除 1 号点外各监测点总 VOCs 体积分数标准差均相对较大,数据离散程度较高,说明各点 VOCs 体积分数随时间的变化波动较大.从极大值看,各监测点均有明显异常值出现,该园区 VOCs 体积分数最大值由 5 号点监测所得,为 877.450×10^{-9} .

图 2 为 5 个点各类 VOCs 的浓度及化学组成,从中可以看出,各点 VOCs 化学组成存在较大差异.1、2、3 和 4 号点 VOCs 中烷烃占比最大,5 号点 VOCs 中烯烃占比最大,其次为烷烃.除烷烃外 1 号点 VOCs 中芳香烃、2 号点中烯烃、3 号点中烯烃和芳香烃也占较大比例.炔烃在 5 个点 VOCs 中的占比均较低,不足 10%.统计分析 5 个点 VOCs 平均体积分数前 10 的物种可知,5 个点 VOCs 高体积分数

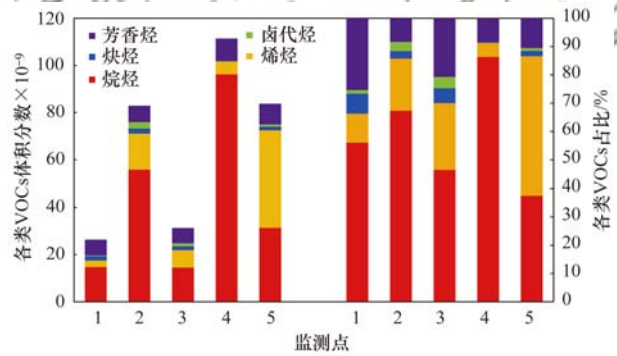


图 2 园区内 5 个监测站点各类 VOCs 化学组成
Fig. 2 Chemical composition of VOCs at five monitoring sites in the park

表 1 化工园区在线监测 VOCs 组分 $\times 10^{-9}$

Table 1 VOCs collected online in the park $\times 10^{-9}$

类型	物种	平均值 $\pm$ 标准差	最大值
烷烃	环戊烷	0.31 $\pm$ 0.66	9.90
	环己烷	0.25 $\pm$ 0.57	13.63
	甲基环己烷	0.20 $\pm$ 0.34	4.23
	正辛烷	0.39 $\pm$ 0.48	4.99
	正癸烷	0.08 $\pm$ 0.15	4.12
	正戊烷	0.98 $\pm$ 1.98	26.23
	正庚烷	0.34 $\pm$ 0.61	9.36
	正己烷	1.07 $\pm$ 2.70	53.66
	正丁烷	5.01 $\pm$ 16.48	164.51
	异戊烷	2.46 $\pm$ 3.93	36.36
	异丁烷	9.85 $\pm$ 47.46	388.70
	乙烷	7.89 $\pm$ 16.83	326.22
	丙烷	6.98 $\pm$ 13.99	284.70
	3-甲基己烷	0.15 $\pm$ 0.29	6.46
	2,3-二甲基戊烷	0.28 $\pm$ 0.46	4.50
烯烃	2,3,4-三甲基戊烷	0.42 $\pm$ 1.15	18.14
	2,2,4-三甲基戊烷	0.14 $\pm$ 0.28	2.80
	反-2-戊烯	0.08 $\pm$ 0.14	1.45
	异戊二烯	0.66 $\pm$ 1.82	31.01
	顺-2-丁烯	0.43 $\pm$ 0.66	12.59
	顺-2-戊烯	0.19 $\pm$ 0.18	2.84
	反-2-丁烯	0.34 $\pm$ 1.24	20.21
	乙烯	8.06 $\pm$ 21.60	354.95
	丙烯	3.11 $\pm$ 16.66	280.42
	1-戊烯	0.11 $\pm$ 0.20	4.46
炔烃	1-丁烯	0.92 $\pm$ 2.65	23.36
	1,3-丁二烯	0.64 $\pm$ 2.62	33.74
	乙炔	1.88 $\pm$ 1.13	6.86
卤代烃	氯甲烷	1.37 $\pm$ 3.48	50.50
	三氯乙烯	0.34 $\pm$ 0.55	5.78
	1,2-二氯乙烷	0.78 $\pm$ 1.93	37.40
	氯苯	0.16 $\pm$ 0.15	1.56
芳香烃	间-二甲苯 + 对-二甲苯	1.14 $\pm$ 1.13	15.19
	邻-二甲苯	0.43 $\pm$ 0.38	5.30
	苯乙烯	0.32 $\pm$ 0.36	5.02
	苯	1.15 $\pm$ 2.46	56.84
	甲苯	2.99 $\pm$ 4.18	57.69
	乙苯	0.86 $\pm$ 0.83	13.07
	1,3,5-三甲苯	0.05 $\pm$ 0.09	2.87
	正丙苯	0.04 $\pm$ 0.06	1.55
	异丙苯	0.43 $\pm$ 1.42	22.51
	1,2,3-三甲苯	0.47 $\pm$ 0.52	3.24
	1,2,4-三甲苯	0.12 $\pm$ 0.12	2.67

表 2 各监测点总 VOCs 体积分数特征

Table 2 Characteristics of total VOCs concentration at each monitoring site

监测点	平均值 $\pm$ 标准差 $\times 10^{-9}$	最大值 $\times 10^{-9}$	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	湿度/%	温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	26.38 $\pm$ 12.84	129.850	3.02	68.00	7.62
2	82.88 $\pm$ 78.90	774.990	2.33	80.07	7.27
3	31.32 $\pm$ 27.94	291.680	1.55	69.27	7.37
4	111.41 $\pm$ 164.38	605.355	2.86	80.52	6.94
5	83.74 $\pm$ 118.02	877.450	1.66	80.37	7.11
平均值	56.40 $\pm$ 88.16	877.450	2.84	75.65	7.26

物种存在一定的相似性,在 5 个点均列前 10 的物种有乙烷、丙烷、乙烯、甲苯,而异丁烷、正丁烷和乙炔

等物种在 4 个站点 VOCs 平均体积分数中位列前 10,可见以上 7 个物种是该园区大气 VOCs 的主要

贡献者。

2.2 VOCs 来源解析

应用 EPA PMF 5.0 模型对 5 个在线监测点获得的 VOCs 数据进行来源解析。通过对因子数的多次试验,最终解析得到 5 个因子,分别为丁烷泄漏、工艺过程中排放、储罐排放、乙烯合成和城区传输。因子 1 中正丁烷贡献率约为 80%,异丁烷贡献率约为 90%,明显高于在其他因子中的贡献,故将此因子确认为丁烷泄漏;因子 2 中氯苯贡献率为 90%,苯、丙烷、乙烷、部分烯烃和乙炔等化工工艺的特征因子的贡献率也较高,将其判断为工艺过程排放;因子 3 中二甲苯、甲苯和乙苯等苯系物及正辛烷、正庚烷等烷烃的贡献率普遍较高,且园区内有储存这些物质的储罐,故将其确认为储罐排放,且以正辛烷、甲苯作为该因子的特征物种;因子 4 中乙烯贡献率接近 90%,确认为乙烯合成;因子 5 中正戊烷、异戊烷、异戊二烯、1,3-丁二烯和乙炔等物种的占比较高,而这些物种多为机动车排放的特征物种,判断可能是由化工区西北方向城区传输而来,故确认其为城区传输。

图 3 给出了各观测点各类污染源贡献的百分比,各站点的排放源占比差异较大,说明园区内局地源是其环境空气中 VOCs 的主要排放来源。位于园区边缘而与城区相连的 1 号(图 1)点城区传输的贡献率为 55.1%,其次为储罐排放和工艺过程排放,乙烯合成工业和丁烷泄漏的贡献较少,仅占 3.0% 和 2.5%。位于化工区内部离城区距离较远的 2 号点中乙烯合成的贡献率最大,为 50.4%,其次为丁烷泄漏、储罐排放、工艺过程中排放,三者分别占 16.0%、13.0% 和 12.3%,城区传输贡献仅为 8.3%。远离城区的 3 号点中工艺过程排放贡献为 34.6%,其次为储罐排放和乙烯合成,分别为 26.7% 和 24.4%,城区传输的贡献不到 1%。4 号点丁烷泄漏贡献高达 84.5%,另 4 种源贡献分别为 2.5%~5.6% 不等。5 号点乙烯合成和储罐排放的排放贡献分别为 29.8% 和 28.8%,其次为城区传输和工艺过程中排放,分别占 20.1% 和 16.4%,这可能是由于 5 号点附近存在一家大型炼油化工企业,该企业年产约 100 万 t 的乙烯。

2.3 VOCs 排放源精准化识别

图 4 给出了 2017 年 1 月该化工园区内 1 号点各类 VOCs 体积分数的逐时变化、各类源的风向概率分布与源贡献的逐日变化。由图 4(a)可见,1 号点在 1 月 1 日芳香烃体积分数异常高,对比图 4(b)~4(f)可知,主要是由储罐排放引起。从中可见,1 号点一直存在城区传输来源,贡献占比为 55.1%,1 月 1

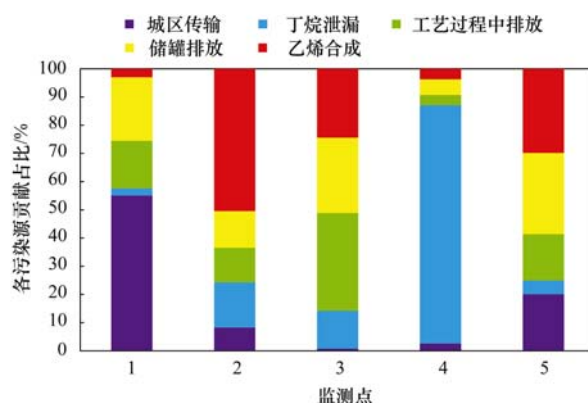


图 3 各站点污染源贡献百分比

Fig. 3 Contribution percentage of each pollution source at five sites

日有来自西偏南方的储罐排放来源,1 月的 1、10、13 和 22 日显示出来自西北、西和偏西南方向的丁烷泄漏,1 月的 8、12、19~21 日和 28 日有来自西北方向的乙烯合成源排放,1 月的 8~10、13 和 20~31 日有来自西北方向的工艺过程排放。城区传输源对 1 号点 VOCs 的贡献主要来自点的西北方向和东北方向,即化工园区外道路交通较为密集的区域。

图 5 给出了 2 号点各类 VOCs 体积分数的逐时变化、各类源的风向概率分布与源贡献的逐日变化。由图 5(a)可以看出,2 号点 1 月 16 日烷烃体积分数异常升高,图 5(c)显示主要来源于丁烷泄漏。由图 5(b)~5(f)可以看出,2 号点在 1 月的 1~3、11、14 和 16 日有来自东北和西北方向的丁烷泄漏源,1 月的 6、8~11 和 14~21 日有来自西北、北和东北方向的工艺过程源,1 月 1 日有来自偏北方向的储罐排放源,1 月的 1 和 12~13 日有来自西北、北和东北方向的乙烯合成源。城区传输源对 2 号点的贡献低(8.3%),1 月的 2~3 和 8~13 日存在来自西北、北和东北方向的排放源,主要来自 2 号点偏北方向的城区。

图 6 给出了 3 号点各类 VOCs 体积分数的逐时变化、各类源的风向概率分布与源贡献的逐日变化。由图 6(a)可以看出,3 号点 1 月 13 和 29 日烯烃体积分数异常升高,图 6(f)显示主要是乙烯合成源排放所致。由图 6(c)可知,1 月的 10 和 14 日有来自西南、东南方向的丁烷泄漏源;1 月的 2~3、8~10、13 和 19~22 日有来自西南方向的工艺过程源[图 6(d)],1 月的 1~2 和 10~22 日有来自西南和东北方向的储罐排放源[图 6(e)],1 月的 13、27 和 29 日有来自西南和东南方向的乙烯合成源[图 6(f)]。城区传输源对远离城区的 3 号点贡献低,为 0.7%,在 1 月的 1~3 日存在来自西南和东南方向的排放源[图 6(b)]。

图 7 给出了 4 号点各类 VOCs 体积分数的逐时

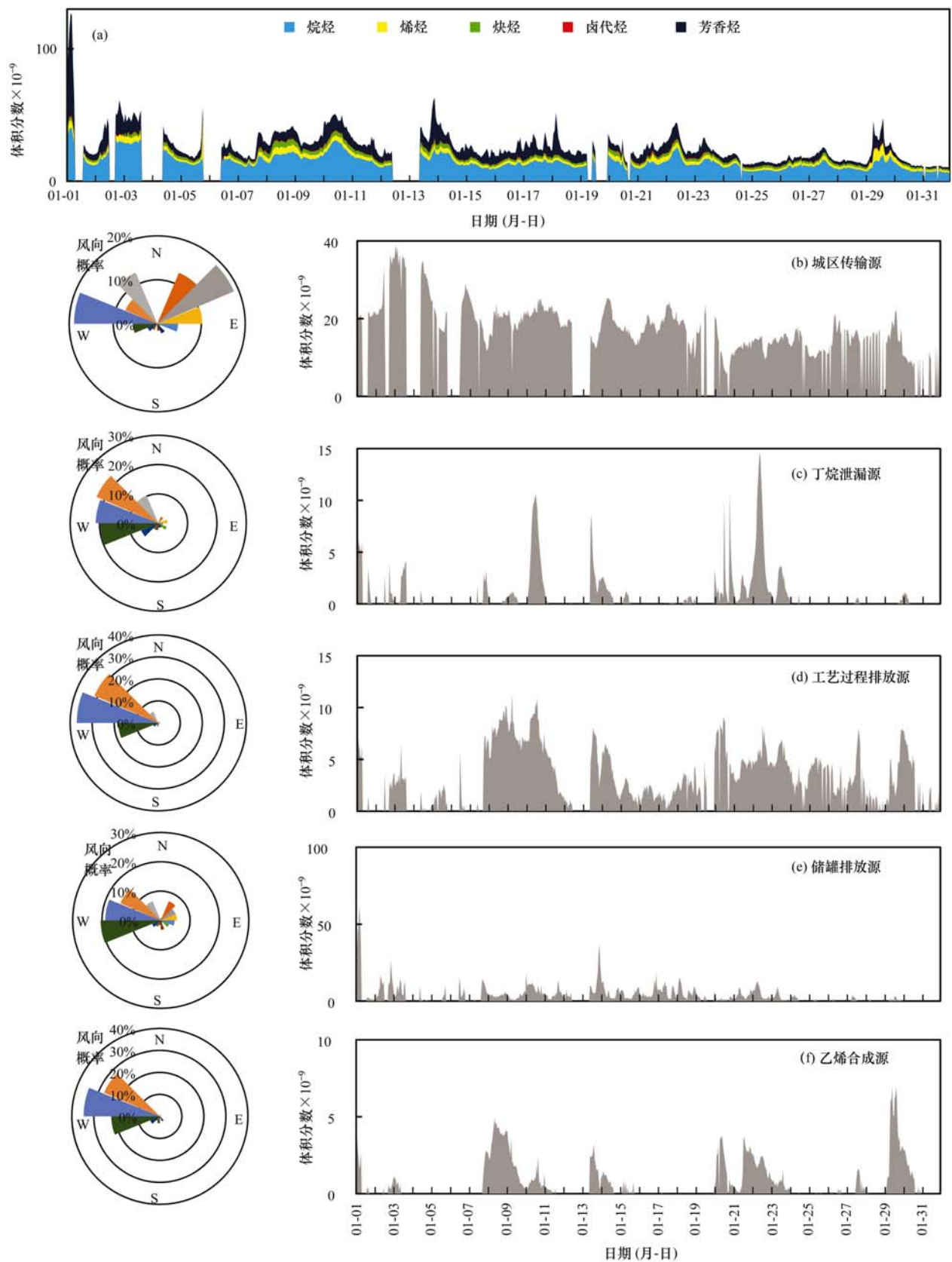


图 4 1 号站点 VOCs 及其各污染源贡献的时间序列和风向因素分布

Fig. 4 Time series and distribution of wind directions of the five pollution sources at the 1st site

变化、各类源的风向概率分布与源贡献的逐日变化。由图 7(a) 可以看出, 4 号点 1 月 19~22 日烷烃浓度异常高, 主要是来自西北方向的丁烷泄漏源[图 7

(c)]。根据图 7(d)~7(f), 1 月的 3、10、13、16 和 19 日存在来自西南和东南方向的工艺过程源, 1 月的 2 和 12~13 日有来自西南和东南方向的储罐排

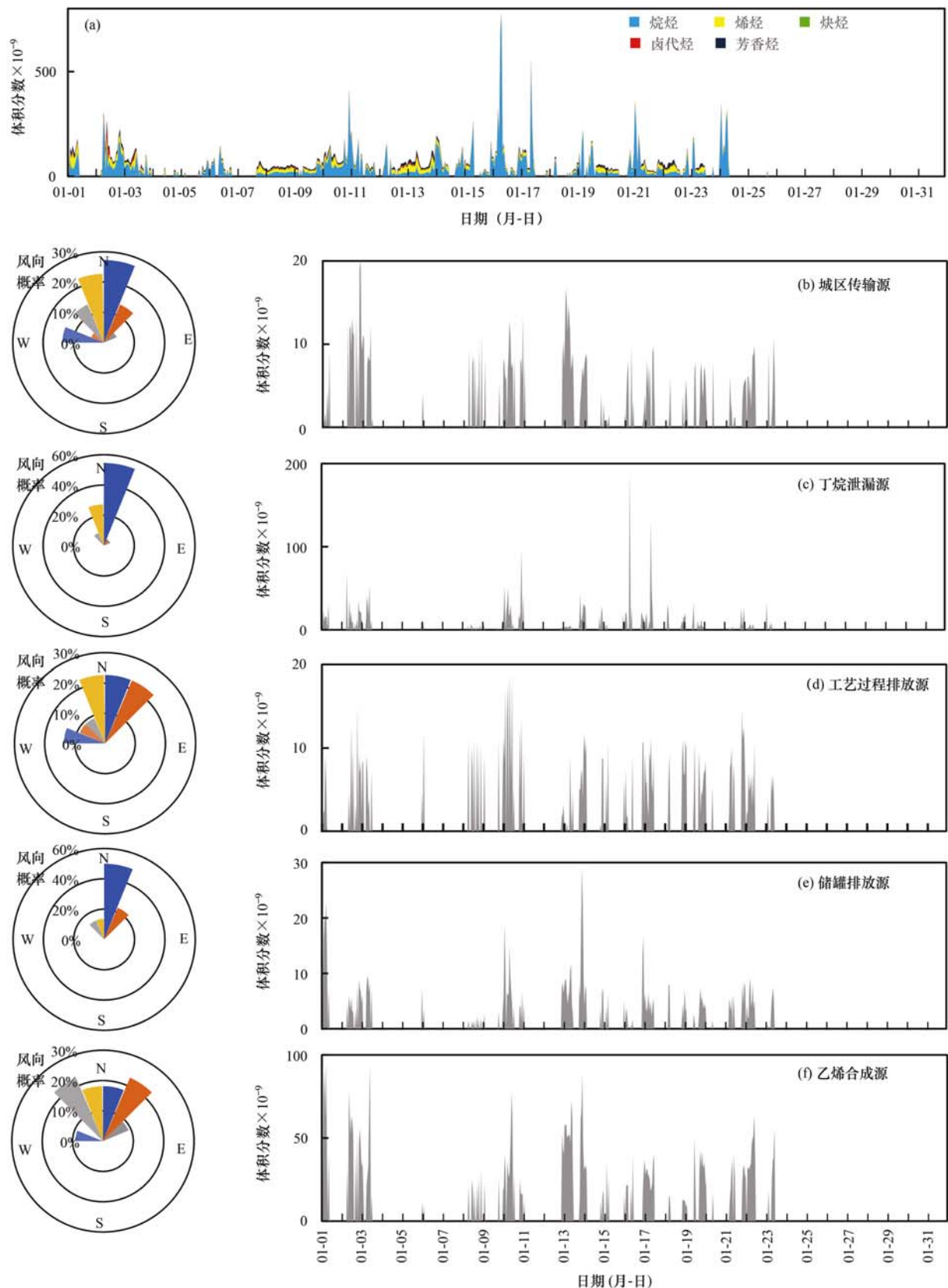


图 5 2 号站点 VOCs 体积分数及其各污染源贡献的时间序列和风向因素分布

Fig. 5 Time series and distribution of wind directions of the five pollution sources at the 2nd site

放源, 1~3 日有来自东北、东南、西北方向的乙烯合成源. 城区传输源对 4 号站点 VOCs 的贡献为 2.5%, 1 月的 1~2、12 和 21~22 日存在偏西和东南方向的排放源, 可能来自园区外的道路交通[图 7

(b)].

图 8 给出了 5 号点各类 VOCs 体积分数的逐时变化、各类源的风向概率分布与源贡献的逐日变化. 由图 8(c) 可见, 5 号点 1 月的 2~3 日有来自西北、

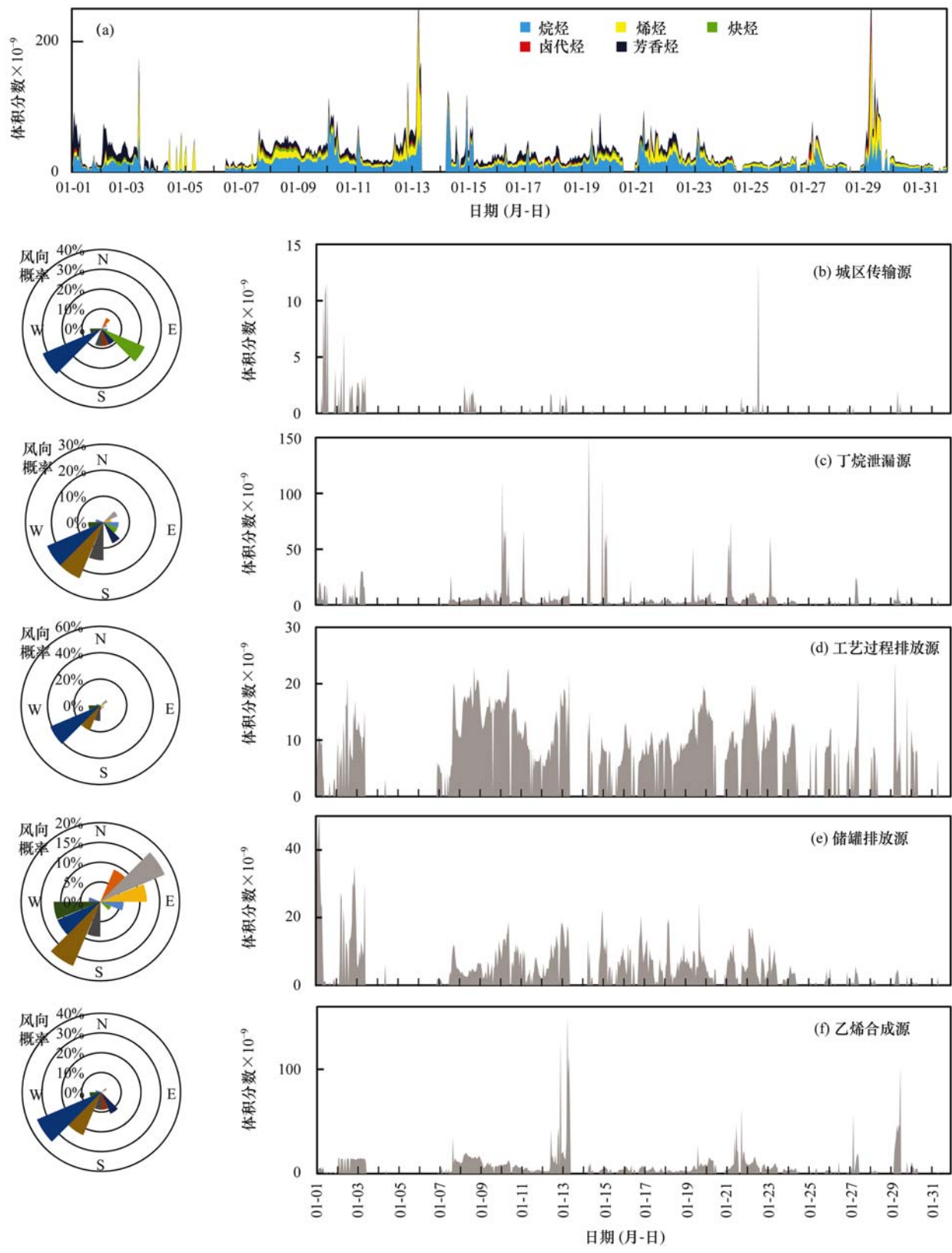


图 6 3 号站点 VOCs 体积分数及其各污染源贡献的时间序列和风向因素分布

Fig. 6 Time series and distribution of wind directions of the five pollution sources at the 3rd site

东北和东南方向的丁烷泄漏源, 1 月的 2、8 ~ 10、14 和 19 日有来自西北、东北和东南方向的工艺过程源[图 8(d)], 1 月的 1 和 13 ~ 14 日有来自西北和东南方向的储罐排放源[图 8(e)], 1 月的 1 ~ 5 日有来自北、东北、东南方向的乙烯合成源[图 8

(f)]. 城区传输源对 5 号点 VOCs 的贡献为 20.1%, 在 1 月的 8 和 13 ~ 14 日有来自西、西北和东北方向的排放源[图 8(b)], 同样可能来自园区外的道路交通. 综合上述各点位各类源来源方向, 丁烷泄漏源

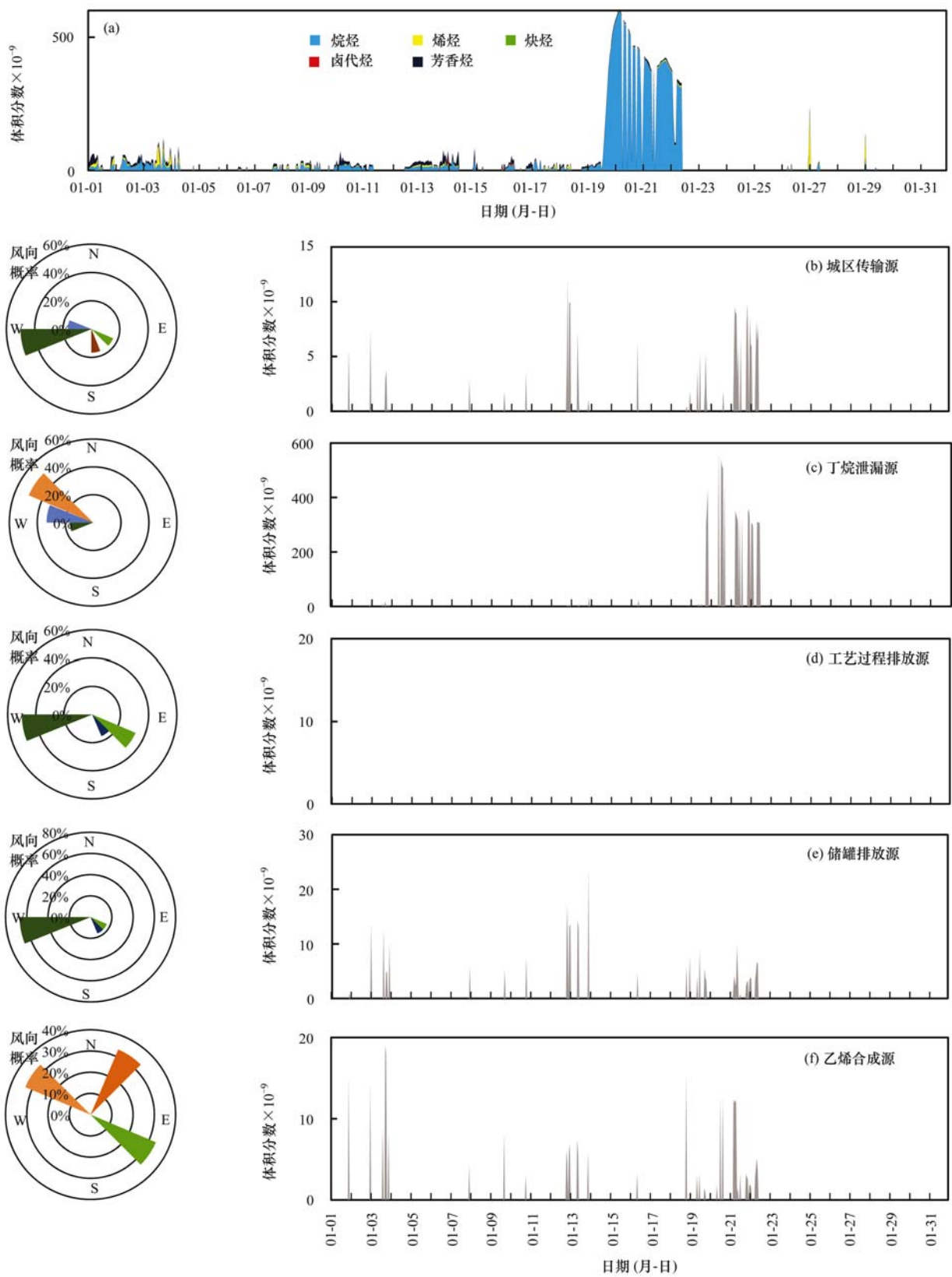


图7 4号点 VOCs 体积分数及其各污染源贡献的时间序列和风向因素分布

Fig. 7 Time series and distribution of wind directions of the five pollution sources at the 4st site

来自1号点的西北、西和偏西南方向、2号点的东北和西北方向、3号点的西南和东南方向、4号点的西北方向、5号点的西北、东北和东南方向,结合该方向上化工企业的排放物特征可知,1号点西南方

向、2号点东北方向上的F4区域以及3号点西南方向、5号点东南方向上的A1~A3与B1区域存在丁烷泄漏的企业,1月中下旬4号点的丁烷泄漏主要来自其西北方向上的运河装卸区.工艺过程源来自

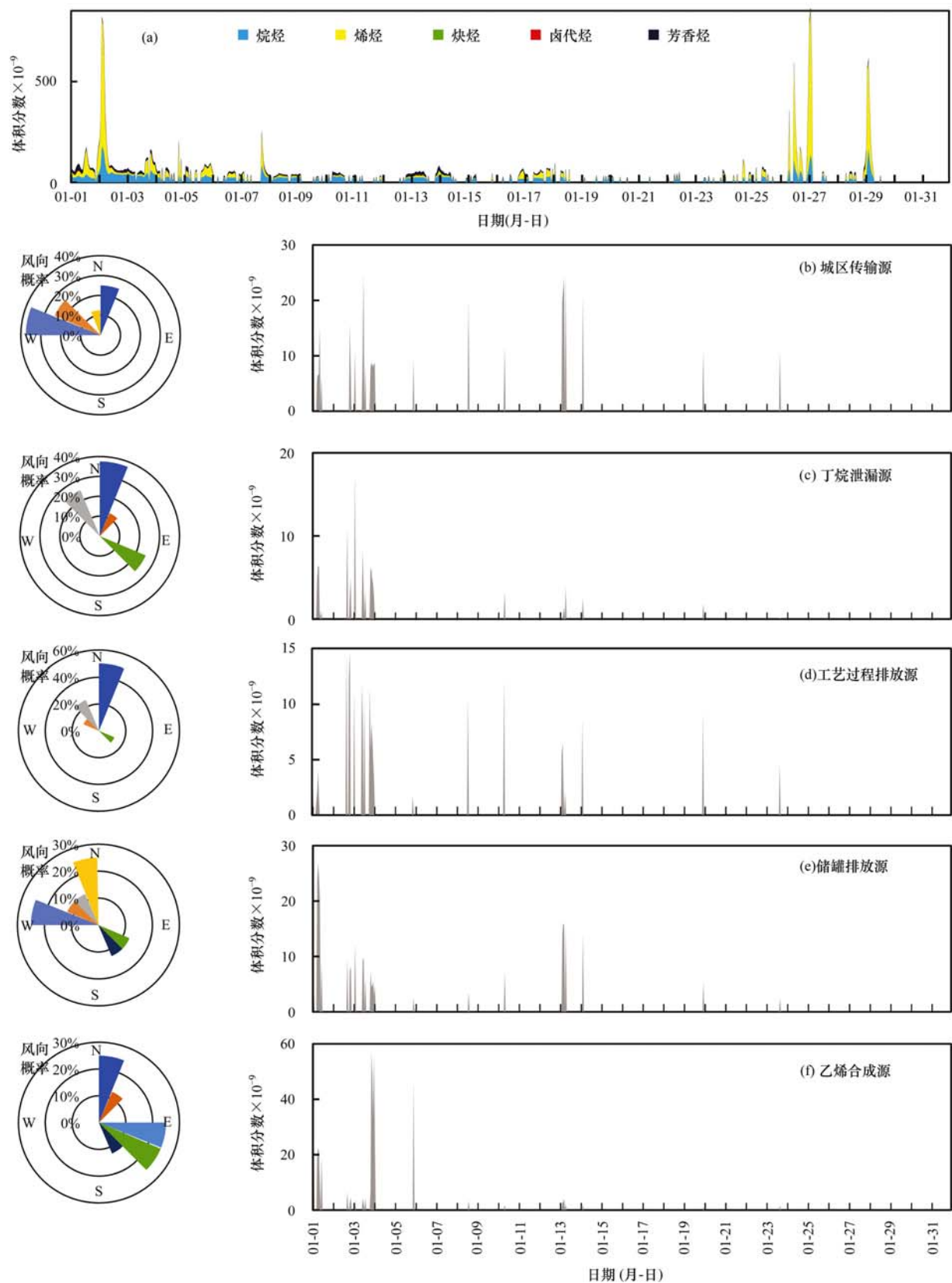


图8 5号点 VOCs 体积分数及其各污染源贡献的时间序列和风向因素分布

Fig. 8 Time series and distribution of wind directions of the five pollution sources at the 5st site

1号点的西北方向、2号点的西北、北和东北方向、3号点的西南方向、4号点的西南和东南方向、5号点的西北、东北和东南方向. 同样结合园区内各方向上企业的排放特征,位于3号点西南方向、4号点东

南方向、5号点偏东向上 D1、C1 ~ C2 区域上的2家企业,位于2号点西北方向上 E4 区域的企业为园区内工艺过程源的主要排放来源. 储罐排放来自1号点西南方向、2号点偏北方向、3号点西南和东北方向、

4 号点西南和东南方向、5 号点西北和东南方向. 结合相应方向上的企业排放信息, 位于 F4 ~ F6 和 E4 ~ E6 的 2 家企业是 1 ~ 3 号点 VOCs 储罐排放的主要来源, 园区外偏西方向也可能存在一定的储罐排放. 乙烯合成源来自 1 号点的西北方向、2 号点的西北、北和东北方向、3 号点的西南和东南方向、4 号点的东北、东南、西北方向、5 号点的北、东北、东南方向. 结合各方向上的企业排放特征物种, 位于 2 号点偏北方向上 F4 ~ F6 的企业、位于 3 号点西南方向和 4 ~ 5 号点东南方向上 C1 ~ C2、A1 ~ A3、B1 的 3 家企业是园区内乙烯合成源的主要来源.

3 结论

(1) 2017 年 1 月化工园区内 VOCs 平均体积分数为 56.40×10^{-9} , 4 号点 VOCs 体积分数明显高于其他各站点, 2 号点和 5 号点 VOCs 体积分数处于中间水平, 1 号点和 3 号点 VOCs 体积分数相对较低. 各点 VOCs 标准差均较大, 数据离散程度较高. 1、2、3、和 4 号这 4 个园区边界点 VOCs 中烷烃占比最大; 5 号点 VOCs 中烯烃占比最大. 统计各点体积分数前 10 物种可知, 乙烷、丙烷、乙烯、甲苯、异丁烷、正丁烷和乙炔这 7 个物种是该化工区大气 VOCs 的主要贡献者.

(2) 化工区环境空气中 VOCs 主要来自丁烷泄漏、工艺过程中排放、储罐排放、乙烯合成和城区传输等 5 个来源; 位于园区边缘的 1 号站点 VOCs 主要来自城区传输, 2 号站点主要来自乙烯合成, 3 号站点主要来自工艺过程排放, 4 号站点主要来自丁烷泄漏, 5 号站点主要来自储罐排放和乙烯合成. 运用 CPF 方法分析各站点 5 个排放源的风向概率并结合企业的特征排放物种进一步精细化识别 VOCs 排放源, 结果发现, 丁烷泄漏源来自园区内 A1 ~ A3、B1、F4 区域的 2 家企业和园区外的运河装卸区, 工艺过程源来自位于 D1、C1 ~ C2 和 E4 区域的 3 家化工企业, 储罐排放源来自位于 E4 ~ E6 和 F4 ~ F6 的 2 家企业, 乙烯合成源来自位于 F4 ~ F6、C1 ~ C2、A1 ~ A3 和 B1 区域上的 4 家企业. 城区传输源主要来自园区周边的交通运输, 此外, 园区外偏西方向也可能存在一定的储罐排放.

(3) 基于化工园区环境空气 VOCs 在线监测数据, 应用受体模型和识别出的各类源的风向概率分布并结合园区企业排放特征, 可以实现化工园区受体点 VOCs 来源的精准化识别, 进而实现基于园区各在线监测点的大量 VOCs 数据精细化监管各企业的排放行为.

参考文献:

- [1] 张玉欣, 安俊琳, 王俊秀, 等. 南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 502-510.
Zhang Y X, An J L, Wang J X, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds in the Nanjing industrial area and evaluation of their contribution to ozone[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 502-510.
- [2] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China [J]. Atmospheric Research, 2016, **169**: 225-236.
- [3] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Characterization of non-methane hydrocarbons and their sources in an industrialized coastal city, Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **593-594**: 641-653.
- [4] Dumanoglu Y, Kara M, Altioek H, *et al.* Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region [J]. Atmospheric Environment, 2014, **98**: 168-178.
- [5] Saeaw N, Thepanondh S. Source apportionment analysis of airborne VOCs using positive matrix factorization in industrial and urban areas in Thailand [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, **6**(4): 644-650.
- [6] 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟. 南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2565-2576.
Cao M Y, Lin Y Q, Zhang Y L. Characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs in the Nanjing industrial area in autumn [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2565-2576.
- [7] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Research, 2016, **176-177**: 64-74.
- [8] 高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4094-4102.
Gao S, Cui H X, Fu Q Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs of high pollution process at chemical industrial area in winter of China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4094-4102.
- [9] 胡天鹏, 李刚, 毛瑶, 等. 某石油化工园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 517-524.
Hu T P, Li G, Mao Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs of a petrochemical industrial park during autumn in China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 517-524.
- [10] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 206-214.
- [11] Karnae S, John K. Source apportionment of PM_{2.5} measured in south Texas near U. S. A. - Mexico border [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(5): 1663-1676.
- [12] Ras M R, Marcé R M, Borrull F. Characterization of ozone precursor volatile organic compounds in urban atmospheres and around the petrochemical industry in the Tarragona region [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(14): 4312-4319.
- [13] Zheng H, Kong S F, Yan Y Y, *et al.* Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a

- petrochemical industrial park along the Yangtze River [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135505.
- [14] Xiong Y, Bari M A, Xing Z Y, *et al.* Ambient volatile organic compounds (VOCs) in two coastal cities in western Canada: spatiotemporal variation, source apportionment, and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135970.
- [15] Wang F J, Zhang Z Y, Acciai C, *et al.* An integrated method for factor number selection of PMF model: case study on source apportionment of ambient volatile organic compounds in Wuhan [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(10): 390.
- [16] Liao H T, Yau Y C, Huang C S, *et al.* Source apportionment of urban air pollutants using constrained receptor models with *a priori* profile information [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 323-333.
- [17] An J L, Su X Q, Zhang Y X, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in Nanjing and Suzhou, two urban sites in the Yangtze River Delta, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **78**(3): 416-429.
- [18] Javed W, Iakovides M, Garaga R, *et al.* Source apportionment of organic pollutants in fine and coarse atmospheric particles in Doha, Qatar [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2019, **69**(11): 1277-1292.
- [19] Gugamsetty B, Wei H, Liu C N, *et al.* Source characterization and apportionment of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{0.1} by using positive matrix factorization [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(4): 476-491.
- [20] Huang Y S, Hsieh C C. Ambient volatile organic compound presence in the highly urbanized city: source apportionment and emission position [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 45-59.
- [21] Hsu C Y, Chiang H C, Shie R H, *et al.* Ambient VOCs in residential areas near a large-scale petrochemical complex: spatiotemporal variation, source apportionment and health risk [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 95-104.
- [22] Wang M, Qin W, Chen W T, *et al.* Seasonal variability of VOCs in Nanjing, Yangtze River delta: implications for emission sources and photochemistry [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117254.
- [23] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(3): 536-546.
- Yan L, Huang Y Z, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds on the north coast of Hangzhou Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 536-546.
- [24] Lim J M, Lee J H, Moon J H, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ at a small industrial area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Research*, 2010, **95**(1): 88-100.
- [25] 国家环保总局. 环境空气质量监测规范(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/gg/200910/t20091021_171691.htm, 2007-01-19.
- [26] 中国环境监测总站. 国家环境空气质量监测城市站运行管理暂行规定[EB/OL]. http://www.cnemc.cn/zzjj/jgsz/dqs/gzdt_dqs/201303/t20130320_643371.shtml, 2013-03-20.
- [27] Zhang Y C, Li R, Fu H B, *et al.* Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 233-248.

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta	 ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ...	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section	 XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China	 GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism	 PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source	 RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules	 ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area	 JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)