

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征

段菁春¹, 周雪明^{2,3}, 张鹤丰¹, 谭吉华^{2,3*}, 胡京南¹, 柴发合¹

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 2015 年春季在沧州市城区、郊区和潜在污染源附近选择了 15 个采样点进行同期采样。研究表明沧州市 NMHCs 总体上市区高于近郊及远郊区县; 市区以高新区 NMHCs 浓度最高; 郊县采样点除河间市略高外, 其它采样点的浓度均明显低于市区浓度; 机动车的道路排放是沧州市 NMHCs 的重要来源之一; 沧州大化和沧州炼油在停产期间未对市区 NMHCs 产生明显影响; 大港油田采油三厂采取了较完善的油气回收措施, 未对市区 NMHCs 产生明显影响; 平均来看, 沧州市 NMHCs 中烷烃占 65%, 烯烃占 16%, 芳烃占 19%; 臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFPs) 主要来源于二甲苯 (19%)、乙烯 (14%)、甲苯 (11%)、丙烯 (5%)、异戊烷 (5%) 和异戊烯 (5%) 等; 气溶胶生成潜势 (formation potential of secondary organic aerosol, SOAFPs) 主要来源于甲苯 (28%)、蒎烯 (28%)、二甲苯 (16%)、乙苯 (9%) 和苯 (9%) 等。

关键词: 非甲烷烃 (NMHCs); 沧州; 空间变化; 臭氧生成潜势; 挥发性有机物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1769-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201608132

Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City

DUAN Jing-chun¹, ZHOU Xue-ming^{2,3}, ZHANG He-feng¹, TAN Ji-hua^{2,3*}, HU Jing-nan¹, CHAI Fa-he¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Simultaneous collections of non-methane hydrocarbons (NMHCs) were carried out at 15 sampling sites including urban, suburb and potential pollution areas in Cangzhou City in spring 2015. The results showed that NMHCs were generally higher in urban areas than those in suburb and rural areas; the highest concentration of NMHCs was observed at Cangzhou High-tech zone (urban area); the concentrations of NMHCs were significantly lower at rural sites than in most urban sites except Hejian site; vehicular emissions were the main sources of NMHCs in Cangzhou; Cangzhou chemical fertilizer plant and Cangzhou oil refinery had no significant influence on urban NMHCs during their shutdown period; Dagang Oilfield, with better oil and gas recovery systems, did not have a significant impact on urban NMHCs. In general, alkanes, alkenes and aromatics accounted for 65%, 16% and 19% of NMHCs in Cangzhou City, respectively; xylene (19%), ethylene (14%), toluene (11%), propylene (5%), isopentane (5%) and isopentene (5%) were the most dominant contributors to ozone formation potential; aerosol formation potential was mainly derived from toluene (28%), pinene (28%), xylene (16%), ethylbenzene (9%) and benzene (9%).

Key words: non-methane hydrocarbons (NMHCs); Cangzhou; spatial variation; ozone formation potential; volatile organic compounds (VOCs)

非甲烷烃 (non-methane hydrocarbons, NMHCs) 是环境空气中最主要的挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs)^[1]。在阳光紫外线照射下, NMHCs 不仅可以通过氢氧 ($\cdot\text{OH}$) 等自由基发生大气光化学反应, 氧化后再与氮氧化物 (NO_x) 反应生成臭氧, 某些 NMHCs 如甲苯、乙苯、二甲苯和三甲苯等还会通过光化学反应生成高浓度的二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA)^[2-4], 同时 NMHCs 中的部分化合物如苯和甲苯还会对人体产生直接的毒害作用^[5]。NMHCs 来源复杂, 既有生物来源, 如植物排放^[6]; 也有人为来源^[7-10], 如机动车排放、油品挥发、工业燃烧排放和涂料生产及应用排放等。

沧州市位于中国空气污染最严重京津冀地区的东南部, 冬季霾频发, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为代表大气污染物浓度居高不下, 夏季近地面臭氧污染严重, 这均与沧州市 NMHCs 污染具有一定联系^[1]。根据文献^[11], 沧州市 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过现行环境空气质量标准 1.52 倍。沧州市 2015 年机动车保有量已超过 150 万辆。虽然沧州市在推广新

收稿日期: 2016-08-19; 修订日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41475116, 41275134, 41675127); 中国环境科学研究院研究专项 (2012ysky09); 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0208900)

作者简介: 段菁春 (1974~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为大气污染控制与空气质量管理, E-mail: duanjc@craes.org.cn

* 通信作者, E-mail: tanjh@ucas.ac.cn

能源汽车、提升燃油品质、开展加油站油气回收利用等方面采取了相当多的措施,机动车 VOCs 排放仍不容忽视. 除了机动车排放外,沧州市还存在大量石油开采、炼油和化工等排放 VOCs 的工业企业. 近年来,国内研究者虽然对北京、广州、上海等大城市大气 VOCs,特别是 NMHCs 的污染特征,时空变化规律开展了较多的研究^[12~15],但对沧州市这样的地级市 NMHCs 的时空分布特征报道较少. 本研究通过对沧州市 15 个采样点的同期采样,开展沧州市 NMHCs 空间分布和臭氧生成潜势的初步研究,该研究对于了解沧州市 NMHCs 污染特征,以期环境保护部门制定 VOCs 控制对策具有重要参考意义.

1 材料与方法

1.1 采样点选取

为获得沧州市 NMHCs 空间分布特征,同时初步了解主要 NMHCs 污染源的排放特征以及对环境大气的影 响,本研究共选取 15 个采样点. 其中市环境保护局、沧县城建局、电视转播站、省质控站等 4 个采样点位于主城区内,代表城市污染特征;经济开发区和高新区 2 个采样点,代表工业开发区污染特征;在东南西北这 4 个方向选取黄骅市、泊头市、河间市和青县 4 个采样点,代表沧州市远郊区县污染特征;利用采样车以巡回采样方式在沧州市潜在

污染源沧州大化和沧州炼油的下风向,大港油田采油三厂作业区内,城市重要交通十字路口,以及沧州近郊农田内设置大化门口、沧炼北、采油三厂和新华路口这 4 个潜在污染源采样点,代表潜在污染源可能对沧州市污染的影响;选取沧州西站西 1 个采样点,位于沧州市近郊农业区,远离特点污染源,代表沧州市区背景污染水平,具体采样点信息详见图 1 和表 1.



图 1 沧州市 NMHCs 采样点位置分布示意
Fig. 1 Map of sampling sites of NMHCs in Cangzhou City

表 1 沧州市 NMHCs 罐采样采样点位及采样时间

Table 1 Information of location and data during the NMHCs sampling in Cangzhou City			
监测点名称	代表性	位置	采样时间
沧州西站西	近郊区	沧州西站西 2.5 km	2015-04-27T09:14
沧州市环境保护局	城区	东经 116°51'38",北纬 38°18'36"	2015-04-27T09:00
沧县城建局	城区	东经 116°52'20",北纬 38°17'1"	2015-04-27T09:00
电视转播站	城区	东经 116°50'42",北纬 38°18'46"	2015-04-27T09:00
省质控站	城区	东经 116°49'70",北纬 38°16'51"	2015-04-27T09:00
经济开发区	工业区	东经 116°56'7",北纬 38°16'56"	2015-04-27T09:00
高新区	工业区	东经 116°47'45",北纬 38°20'22"	2015-04-27T09:00
黄骅市	远郊区县	东经 117°19'24",北纬 38°22'04"	2015-04-27T09:00
青县	远郊区县	东经 116°47'58",北纬 38°34'59"	2015-04-27T09:00
泊头市	远郊区县	东经 116°34'34",北纬 38°04'59"	2015-04-27T09:00
河间市	远郊区县	东经 116°6'47",北纬 38°26'15"	2015-04-27T09:00
大化门口	潜在污染源	大化门口	2015-04-27T08:13
沧炼北	潜在污染源	沧炼北	2015-04-27T08:26
采油三厂	潜在污染源	东经 116°59'6",北纬 38°13'24"	2015-04-27T10:30
新华路口	潜在污染源	新化路与清池大道交汇处	2015-04-27T11:15

1.2 样品采集

采样日期为 2015 年 4 月 27 日,在沧州市 10 个环境空气质量监测站点同期进行采样,采样时间为

上午 09:00;另有 5 个非固定采样点采取巡回采样的方式进行采样,采样时间为上午 08:13 ~ 11:15. 非甲烷烃(NMHCs)用容积为 2L 的美国 NUPRO 公

司 97-300 系列采样罐采集,采集前用美国 ENTECH 公司 3100 型打样罐清洗仪用高纯氮气 (>99.999%) 清洗 5 次后抽成真空。采样时缓慢打开采样阀门,尽量使空气均匀进入罐中,当采样罐中的气压与空气大气压平衡时关闭阀门,每个样品采样时间大约 3min。样品采集后送中国科学院广州地球化学所有机地球化学国家重点实验室进行定量分析,分析工作在一周内完成。

1.3 样品分析

NMHCs 样品的分析在预浓缩系统/色谱/质谱上根据美国 EPA 的 TO-14 法测定完成。分析条件:色谱柱为 HP-VOC 毛细管柱 (60 mL × 0.32 mm i. d. × 1.8 μm), 柱温 40℃ 保留 2 min, 然后以 6℃·min⁻¹ 由 40℃ 升至 230℃, 再保留 10 min。氮气流速为 1.2 mL·min⁻¹, 分流模式为不分流进样, 进样量为 250 mL。NMHCs 通过对照标样与样品的保留时间以及质谱图进行定性并通过色谱图峰面积计算定量。混合标样 (Supelco TO-14 Calibration Mix) 稀释成 7 个不同浓度做标准曲线, 标准曲线的回归系数 R^2 大于 0.995。

2 结果与讨论

2.1 沧州市 15 个采样点 NMHCs 浓度分布及组成特征

从图 2 可以看出,沧州市 NMHCs 以新华路口机动车道路边最高,表明机动车的排放是沧州市 NMHCs 的重要来源之一;采样点大化门口和沧炼北距离沧州市区重要 NMHCs 污染源沧州大化和沧州炼油较近,虽然采样点 NMHCs 略有升高,但与城区其它采样点相比变化不大,这主要是因为采样期间两企业均停产;采样点采油三厂是潜在的油气挥发污染源之一,但实际 NMHCs 浓度较低,这表明大港油田采油三厂采取了较完善的油气回收措施;郊县采样点青县、河间市、泊头市和黄骅市,除河间市略高外,其它郊县采样点的浓度均明显低于沧州市区的采样点浓度,表明沧州市的 NMHCs 可能主要来自于市区;在沧州市区的几个采样点中高新区 NMHCs 浓度最高,表明这里可能存在涉 VOCs 的污染源排放。

从总体上看(图 2),沧州市 NMHCs 中烷烃、烯烃、芳烃和炔烃的构成比例较为接近,其中烷烃约占 53.1%, 烯烃 12.6%, 芳烃 15.6% 和炔烃 18.7%。

从图 3 可以看出,沧州市 NMHCs 中,烷烃以乙

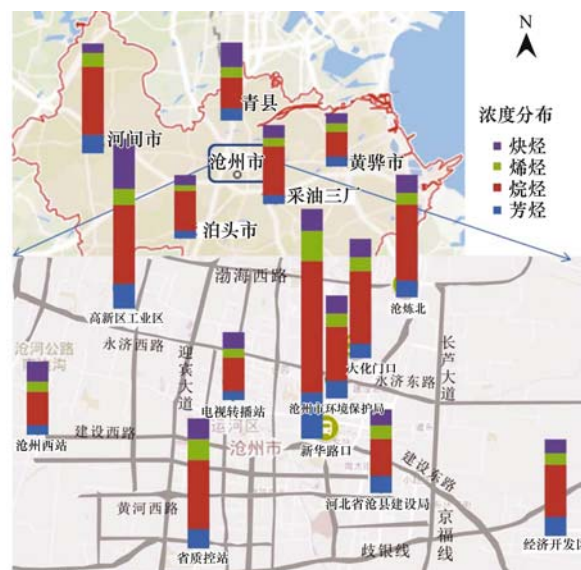


图 2 沧州市 NMHCs 浓度分布特征

Fig. 2 Spatial characteristics of NMHCs in Cangzhou City

烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷等为主;烯烃以乙烯、丙烯、异丁烯和异戊烯等为主;芳烃以苯、甲苯、二甲苯和乙苯等为主。

2.2 沧州市 NMHCs 的臭氧生成潜势

为了评估 NMHCs 臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFPs),最常用的方法是利用 NMHCs 组分的最大臭氧益增活性 (MIR) 计算臭氧生成潜势的方法^[16~18]。臭氧生成潜势可以用 VOCs 物种的浓度与 MIR 系数的乘积来衡量,计算公式为:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times [\text{VOC}]_i \quad (1)$$

式中, $[\text{VOC}]_i$ 为观测到大气中某种 VOC 浓度; MIR_i 为该 VOC 化合物在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数。

从图 4 和表 2 可以看出沧州市 OFPs 以新华路口机动车道路边最高,表明机动车的排放对沧州市臭氧的形成有重要影响;工业点源大化门口和沧炼北与城区其它采样点 OFPs 相比变化不大,这主要是因为采样期间两企业均停产;潜在污染源采油三厂采取了较完善的油气回收措施, OFPs 也较低;郊县采样点青县、河间市、泊头市和黄骅市,除河间市略高外,其它郊县采样点的 OFPs 浓度均明显低于沧州市区;沧州市区除电视转播站和火车西站二个点较低外,其他几个点 OFPs 都比较高,由于市区受机动车影响较大,说明市区机动车对臭氧的生成有重要影响。从沧州市臭氧生成潜势分布来看, OFPs 主要来源于芳烃贡献,其次是烯烃和烷烃,炔烃对 OFPs 也有少量贡献。从图 5 可以看出沧州市的臭氧生成潜势 (OFPs) 最主要的物种来源由大到小依次为:二甲苯 (19%)、乙烯

(14%)、甲苯(11%)、丙烯(5%)、异戊烷(5%)和异戊烯(5%)等.

2.3 沧州市 NMHCs 的气溶胶生成潜势

大气中的 VOCs 可以通过·OH、NO₃和 O₃ 等氧化剂的氧化作用生成 SOA. SOA 不仅会恶化空气质量危害人体健康,而且会降低大气能见度并影响全球气候变化. 国内外研究者提出多种方法评估 SOA 对大气颗粒的贡献率^[19~24],但由于不同的方法各有其不足之处,因此现有的方法尚不能准确评估 SOA 的浓度水平及贡献率. 国内研究表明,利用元素碳示踪法评估,广州 SOA 对 PM_{2.5} 的贡献约为 4.2%~6.8%^[25]. 本研究通过气溶胶生成系数 (fractional aerosol coefficient, FAC) 对 SOA 的生成

潜势(formation potential of secondary organic aerosol, SOAFPs)进行估算^[26~30],气溶胶生成系数 FAC 是 SOA 生成潜势的一种表达方式. 对于可以形成 SOA 的 VOC 组分*i*,其 FAC 可以定义为:

$$FAC_i = \frac{\text{生成的 SOA 浓度 } a_i (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})}{\text{初始 VOC 浓度 } c_{i,0} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})} \quad (2)$$

这样,前体 VOC 的环境初始浓度乘以相应的 FAC 值就可以得到生成的 SOA 浓度. 目前使用比较多的一套 FAC 值是 Grosjean 等^[26,27]在综合大量烟雾箱实验数据和大气化学动力学数据的基础上提出^[28~30]. 这种方法的优点在于它能从 VOCs 的排放清单或环境浓度直接估算出 SOA 的浓度,并能反映各 SOA 前体物的相对贡献^[4].

表 2 沧州市芳烃、烷烃、烯烃、炔烃、臭氧生成潜势以及气溶胶生成潜势/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Concentrations of aromatics, alkanes, alkenes, alkyne, OFPs and SOAFPs in Cangzhou City/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

采样点位	芳烃	烷烃	烯烃	炔烃	总烃	OFP	SOAFPs
沧州西站西	8.90	16.39	4.01	5.54	34.84	65.8	0.53
高新区	24.82	46.79	7.72	13.43	92.76	209.3	1.84
电视转播站	8.31	16.21	2.96	4.57	32.05	58.6	0.33
省质控站	18.45	38.58	10.49	5.69	73.22	156.9	1.33
市环境保护局	17.53	28.47	5.74	4.77	56.52	137.5	1.01
沧县城建局	16.60	23.42	7.37	4.48	51.87	120.4	1.59
经济开发区	18.80	32.44	5.08	3.85	60.17	140.2	1.08
青县	11.81	15.60	4.19	6.73	38.33	92.0	0.53
河间市	17.52	38.90	5.78	2.53	64.73	135.3	0.90
泊头站	7.70	25.98	2.66	2.79	39.13	78.6	0.43
黄骅市	9.76	15.02	3.63	2.80	31.22	72.8	0.58
大化门口	13.98	39.25	5.75	5.04	64.02	124.3	0.82
沧炼北	16.59	42.28	4.89	4.99	68.74	136.4	1.01
采油三厂	8.07	24.02	3.09	3.55	38.73	62.8	0.40
新华路口	46.17	67.71	13.74	6.07	133.69	333.7	2.84

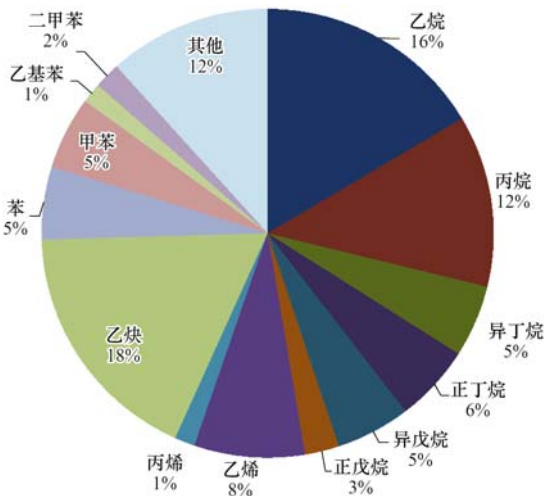


图 3 沧州市 NMHCs 物种构成特征

Fig. 3 Species composition characteristics of NMHCs in Cangzhou City

从图 6 可以看出沧州市市区气溶胶生成潜势除电视转播站和火车西站二个点较低外,其他几个点 SOAFPs 都比较高. 其中以新华路口机动车道路边最高,表明机动车的排放对沧州市二次有机气溶胶的形成有重要影响;郊县采样点青县、河间市、泊头市和黄骅市,除河间市略高外,其它郊县采样点的 SOAFPs 浓度均明显低于沧州市区. 结果还表明沧州市气溶胶生成潜势主要来源于芳烃和烯烃,烷烃和炔烃贡献微小. 从图 7 可以看出沧州市的气溶胶生成潜势 (SOAFPs) 最主要的物种来源由大到小依次为:甲苯(28%)、苯烯(28%)、二甲苯(16%)、乙苯(9%)和苯(9%)等.

3 结论

(1)沧州市区以高新区 NMHCs 浓度最高,表明

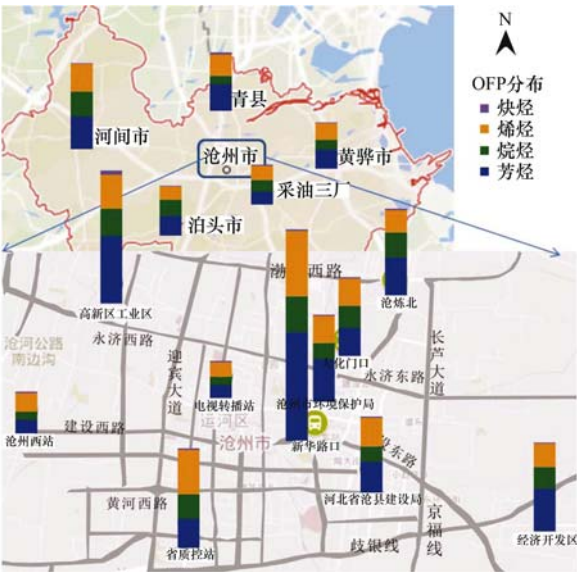


图 4 沧州市臭氧生成潜势 (OFPs) 的空间分布
Fig. 4 Spatial characteristics of OFPs in Cangzhou City

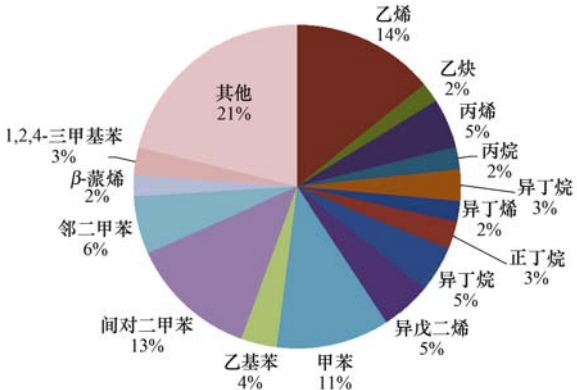


图 5 沧州市 OFPs 物种构成特征
Fig. 5 Species composition characteristics of OFPs in Cangzhou City

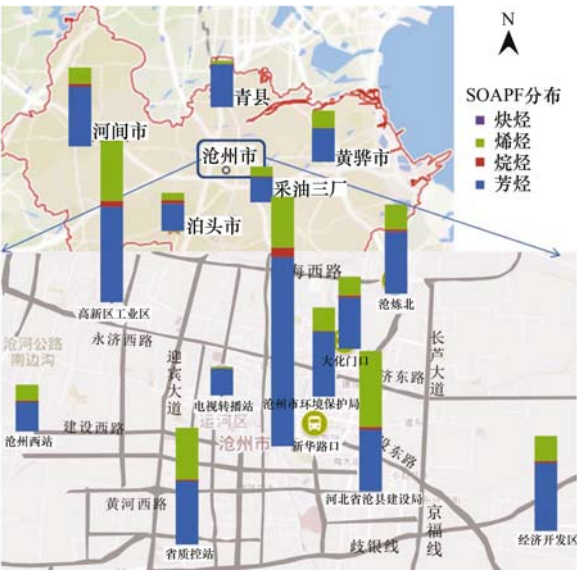


图 6 沧州市气溶胶生成潜势 (SOAFPs) 的空间分布
Fig. 6 Spatial characteristics of SOAFPs in Cangzhou City

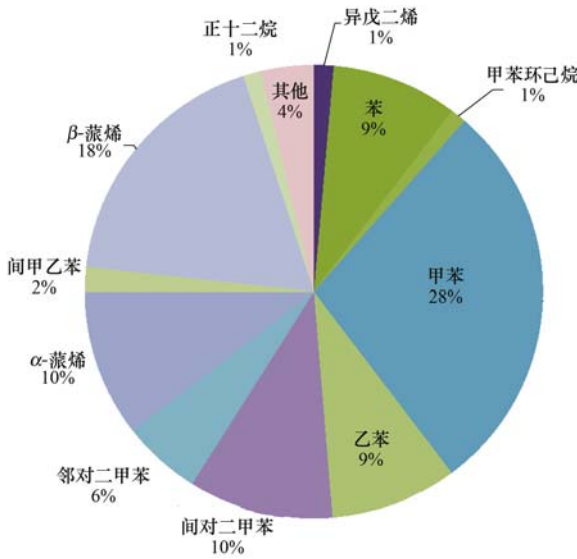


图 7 沧州市 SOAFPs 物种构成特征
Fig. 7 Species composition characteristics of SOAFPs in Cangzhou City

这里可能存在涉 VOCs 的污染源排放;远郊区县除河间市略高外,其它采样点的浓度均明显低于沧州市区浓度;机动车的排放是沧州市 NMHCs 的重要来源之一;停产期间未发现沧州大化和沧州炼油对市区 NMHCs 的明显影响;大港油田采油三厂未对市区 NMHCs 产生明显影响。

(2)沧州市 NMHCs 中,烷烃以乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷等为主;烯烃以乙烯、丙烯、异丁烯和异戊烯等为主;芳烃以苯、甲苯、二甲苯和乙苯等为主。

(3)沧州市的臭氧生成潜势(OFPs)从物种上主要源于二甲苯(1%)、乙烯(14%)、甲苯(11%)、丙烯(5%)、异戊烷(5%)和异戊烯(5%)等。

(4)沧州市的气溶胶生成潜势(SOAFPs)从物种来源上看主要源于甲苯(28%)、萘烯(28%)、二甲苯(16%)、乙苯(9%)和苯(9%)等。

(5)建议沧州市加强对机动车排放水平的管控,同时加强高新区涉 VOCs 企业的排放管理。

致谢:感谢中国科学院广州地球化学研究所王新明老师为采样提供的采样罐和对 NMHCs 的分析定量;感谢沧州市环境保护局和环境监测中心为本研究提供的采样帮助。

参考文献:

[1] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2008, 88(1): 25-35.
[2] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J].

- Atmospheric Research, 2009, **94**(2): 238-245.
- [3] 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.
- [4] 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): 969-975.
- Lv Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing Summertime[J]. Environmental Science, 2009, **30**(4): 969-975.
- [5] Tang J H, Chan L Y, Chan C Y, *et al.* Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(38): 8620-8632.
- [6] 张钢锋, 谢绍东. 基于树种蓄积量的中国森林 VOC 排放估算[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2816-2822.
- Zhang G F, Xie S D. Estimation of VOC Emission from forests in China based on the volume of tree species [J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2816-2822.
- [7] 邵敏, 赵美萍, 白郁华, 等. 燕山石化地区 NMHC 的特征研究[J]. 环境化学, 1994, **13**(1): 40-45.
- Shao M, Zhao M P, Bai Y H, *et al.* A study of NMHC character in atmosphere of yanshan petrochemical region [J]. Environmental Chemistry, 1994, **13**(1): 40-45.
- [8] 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1473-1478.
- Shen M J, Hao J M, Wang L T. VOC emission situation and control measures of gas station in China [J]. Environmental Science, 2006, **27**(8): 1473-1478.
- [9] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Estimation and forecast of volatile organic compounds emitted from paint uses in China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- [10] 马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 等. 佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3549-3554.
- Ma Y L, Tan J H, He K B, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds during haze episode in Foshan City [J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3549-3554.
- [11] 沧州市环境保护局. 2014 年沧州市环境状况公报[R]. 沧州: 沧州市环境保护局, 2015.
- [12] 张新民, 柴发合, 岳婷婷, 等. 天津武清大气挥发性有机物光化学污染特征及来源[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- Zhang X M, Chai F H, Yue T T, *et al.* Photochemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Wuqing, Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- [13] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化, 臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 10-16.
- Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during olympics period [J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 10-16.
- [14] Pang X B, Mu Y J, Zhang Y J, *et al.* Contribution of isoprene to formaldehyde and ozone formation based on its oxidation products measurement in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(13): 2142-2147.
- [15] Xu J, Ma J Z, Zhang X L, *et al.* Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(23): 12241-12252.
- [16] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [17] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.
- [18] So K L, Wang T. C₃-C₁₂ non-methane hydrocarbons in subtropical Hong Kong: spatial-temporal variations, source-receptor relationships and photochemical reactivity [J]. Science of the Total Environment, 2004, **328**(1-3): 161-174.
- [19] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(22): 3837-3855.
- [20] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(11): 2361-2371.
- [21] Pandis S N, Harley R H, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [22] Strader R, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [23] Hildemann L M, Rogge W F, Cass G R, *et al.* Contribution of primary aerosol emissions from vegetation-derived sources to fine particle concentrations in Los Angeles [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101**(D14): 19541-19549.
- [24] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [25] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [26] 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.
- [27] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. Atmospheric Environment (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [28] Barthelmie R J, Pryor S C. Secondary organic aerosols: formation potential and ambient data [J]. Science of the Total Environment, 1997, **205**(2-3): 167-178.
- [29] Dechapanaya W, Russell M, Allen D T. Estimates of anthropogenic secondary organic aerosol formation in Houston, Texas [J]. Aerosol Science and Technology, 2004, **38**(S1): 156-166.
- [30] Kourtidis K, Ziomias I. Estimation of secondary organic aerosol (SOA) production from traffic emissions in the city of Athens [J]. Global NEST Journal, 1999, **1**(1): 33-38.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)