

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                        |                                                       |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 .....                              | 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)                                    |
| 基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 .....                    | 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)                          |
| 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 .....                               | 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)                            |
| 广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 .....                        | 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)                   |
| 重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 .....                    | 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)              |
| 济南市夏、冬季 PM <sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 .....      | 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)      |
| 聊城冬季一重污染过程 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 .....           | 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)   |
| 夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 .....                       | 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)                          |
| 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 .....                       | 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)                |
| 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 .....                             | 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)                              |
| 合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 .....                              | 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060) |
| 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 .....                        | 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)                |
| 北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 .....                                | 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)                |
| 基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 .....                         | 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)              |
| 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 .....                      | 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)               |
| 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 .....                   | 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)                              |
| 黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 .....                     | 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)          |
| 伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 .....                             | 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)                     |
| 马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 .....                              | 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)                             |
| 柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析 .....                             | 徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)                                |
| 地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 .....                    | 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)                                    |
| 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 .....                         | 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)               |
| 蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 .....                     | 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)      |
| 锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 .....                         | 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)      |
| 洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 .....                           | 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)          |
| 我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 .....                            | 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)                     |
| 东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 .....                           | 储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)                  |
| 处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 .....                              | 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)                      |
| 华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 .....                          | 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)           |
| 制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 .....                        | 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)                                    |
| 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 .....                            | 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)                         |
| 城市污水管网中不同生化作用的基质流向 .....                               | 姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)                         |
| 微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性 .....                               | 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)                         |
| UV 强化草酸络合 Fe <sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 .....          | 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)                              |
| 焦化废水 A/O <sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... | 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)         |
| 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 .....                      | 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)              |
| NaCl 盐度对 A <sup>2</sup> /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 .....   | 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)                |
| 温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 .....                         | 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)                       |
| 游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 .....                   | 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)                     |
| HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 .....                           | 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)                    |
| 长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 .....                                 | 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)                     |
| 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 .....                           | 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)                 |
| 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 .....                            | 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)                                 |
| 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 .....                    | 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)                  |
| 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 .....                  | 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)                          |
| 臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 .....                          | 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)                          |
| 再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 .....                      | 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)                      |
| 黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 .....                           | 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)                |
| 村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 .....                                | 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)            |
| 《环境科学》征订启事 (3986) .....                                | 《环境科学》征订启事 (3986)                                     |
| 《环境科学》征稿简则 (4050) .....                                | 《环境科学》征稿简则 (4050)                                     |
| 信息 (4085, 4104, 4337) .....                            | 信息 (4085, 4104, 4337)                                 |

# 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质

李昊<sup>1</sup>, 刘彦君<sup>2</sup>, 陈坦<sup>3</sup>, 闫秋鹤<sup>1</sup>, 代辉祥<sup>1</sup>, 王洪涛<sup>1\*</sup>, 陆文静<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081)

**摘要:** 非甲烷有机物(NMOCs)是大气光化学反应生成臭氧过程的主要前体物, 填埋场作业面是其重要无组织释放源. 为控制对流层臭氧污染, 必须控制 NMOCs 浓度, 而识别高臭氧生成贡献物质是前提. 本研究采集填埋场作业面气体样品, 分析其组分特征, 并以等效丙烯浓度法和最大增量反应活性法计算其臭氧生成潜势. 结果表明, 填埋场作业面共检出符合检出频率与浓度条件的 36 种 5 大类物质, NMOCs 年均总浓度约为  $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 夏季总浓度最高, 各类物质浓度呈含氧化合物 > 含硫化合物 > 卤代烃 > 苯系物 > 碳氢化合物的规律; 综合两种计算方法结果, 全年范围内高臭氧生成贡献物质为乙醇、间二甲苯、丙烯、乙酸乙酯和正戊烷; 春季与全年类似, 夏秋两季高贡献物质为乙醇、1-丁烯、甲苯、环己烷和苯乙烯, 冬季乙醇贡献极高. 通过比较, 等效丙烯浓度法更适合估算作业面臭氧生成潜势.

**关键词:** 填埋场; 作业面; 非甲烷有机物(NMOCs); 臭氧生成潜势; 高贡献物质

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4070-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201802074

## Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face

LI Hao<sup>1</sup>, LIU Yan-jun<sup>2</sup>, CHEN Tan<sup>3</sup>, YAN Qiu-he<sup>1</sup>, DAI Hui-xiang<sup>1</sup>, WANG Hong-tao<sup>1\*</sup>, LU Wen-jing<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Life and Environmental Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Non-methane organic compounds (NMOCs) are major ozone precursors in atmospheric photochemical reactions. The working face of a landfill is a significant source of fugitive NMOC emissions. In order to control tropospheric ozone pollution, it is necessary to minimize NMOCs, and this requires identification of contributing substances. In this study, gas samples were collected from the working face of a landfill and analyzed. Their ozone formation potential was calculated using the propylene-equivalent concentration method and the maximum incremental reactivity method. In total, 36 kinds of substances met the standard for detection frequency and concentration. The average annual concentration of NMOCs was about  $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , with total concentration greatest in summer. Concentrations of materials were as follows: oxygenated compounds > sulfur compounds > halogenated hydrocarbons > benzene series > hydrocarbons. Based on the results of the two calculation methods, ethanol, m-xylene, propylene, ethyl acetate, and n-pentane were found to be significant ozone formation contributors across the whole year. The pattern for spring was similar. Contributors to high ozone formation were ethanol, 1-butene, toluene, cyclohexane, and styrene in summer and spring, while ethanol contributed very significantly in winter. The propylene-equivalent concentration method was found to be more suitable for estimating ozone formation potential from the working face.

**Key words:** landfill; working face; non-methane organic compounds (NMOCs); ozone formation potential; highly contributing substances

近年来,我国生活垃圾处理量逐年增加,2016 年全国生活垃圾无害化处理量高达 1.97 亿 t,其中卫生填埋量 1.19 亿 t,约占 60.4%<sup>[1]</sup>. 未来相当长时间内,卫生填埋仍将是我国主要的生活垃圾处置方式. 生活垃圾卫生填埋过程中伴随大量填埋气产生,其中非甲烷有机物(non-methane organic compounds, NMOCs)虽然含量很低,但其成分复杂,造成的环境影响不容忽视<sup>[2-4]</sup>. 实际操作过程中,新鲜垃圾进入填埋场后,首先在作业面上倾倒、摊铺、压实,垃圾在妥善覆盖前通常会直接暴露于环境介质中,此过程会一直持续到填埋场封

场. 因此,填埋场作业面是 NMOCs 的重要无组织释放源<sup>[5-10]</sup>.

NMOCs 是臭氧重要的前体物,有研究表明,在对流层中, NMOCs 与氮氧化物在光照条件下可发生光化学反应产生臭氧<sup>[11]</sup>. 臭氧是大气中主要的污染物之一,其浓度和超标天数呈上升趋势. 在京津冀、长三角地区,臭氧还是仅次于 PM<sub>2.5</sub> 的空气污染物;

收稿日期: 2018-02-08; 修订日期: 2018-03-14

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509055)

作者简介: 李昊(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为固体废物处理处置工程, E-mail: li-h15@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: htwang@tsinghua.edu.cn

在珠三角地区, 臭氧是首要的空气污染物<sup>[12~15]</sup>.

目前国内外对于 NMOCs 臭氧生成潜势的研究对象主要限于城区空气和有组织的工业废气与机动车尾气<sup>[15~22]</sup>, 对无组织释放面源生活垃圾处理设施产生的臭氧生成潜势尚研究较少. 邵珠泽等<sup>[23]</sup>研究了生活垃圾堆肥设施 NMOCs 臭氧生成潜势, Kumar 等<sup>[24]</sup>研究了绿化废物堆肥过程中产生的 NMOCs 臭氧生成潜势. 但是, 对于生活垃圾填埋场这一重要的 NMOCs 无组织释放源, 目前缺少相关研究. 本文以北京阿苏卫生活垃圾填埋场为例, 监测生活垃圾填埋场作业面四季 NMOCs 的种类与含量, 计算各种 NMOCs 的臭氧生成潜势, 识别全年及各季节高臭氧生成贡献物质, 控制了高贡献物质浓度减少臭氧产生.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

采用静态箱负压采样方法采集气体样品. 采样装置由苏玛罐(3.2 L)和静态箱(50 cm × 50 cm × 50 cm)两部分构成, 通过导管连接. 静态箱是一种测量面源物质释放速率的装置, 可用于采集近地面空气样品, 分析某些典型物质的排放特征<sup>[25]</sup>. 可将静态箱内初始时刻的气体浓度作为填埋场环境空气中 NMOCs 的浓度. 苏玛罐内部真空, 采集时打开苏玛罐阀门, 静态箱内气体抽进苏玛罐内, 5~6 s 后, 拧紧阀门. 本研究在春夏秋冬四季分别采样 2 次, 采样时间都安排在 10:00~11:00 之间, 每次采集 3 个平行样.

采集得到的样品首先进行低温液氮预浓缩, 每个样品进样体积为 400 mL, 通过三级冷阱浓缩系统 (Entech7100, USA) 进行预浓缩. 预浓缩的气体样品以气体色谱质谱 (GC Agilent7890C, USA; MS Agilent5975C, USA) 分析. 气相色谱柱采用 DB-5 ms(60 m × 0.32 mm × 1.0 μm) 柱, 升温程序控制为 3 个不同的温度区间. 具体升温程序控制过程如下: 以 5 °C · min<sup>-1</sup> 的速率从 35 °C 升到 150 °C, 然后以 15 °C · min<sup>-1</sup> 的速率从 150 °C 升到 220 °C, 随后在 220 °C 保持 7 min. 载气 (He) 的流量为 1.5 mL · min<sup>-1</sup>. 质量选择检测器的扫描范围设置为 15~300 *m/z*, 电离电压设置为 70 eV. 化合物通过其流出时间与标准物质的比较来鉴别, 随后再使用美国 EPA 推荐的包含 65 种物质的标准样品 (TO-15 toxic organic Spectra Gases Inc. USA) 标定. 共进行 0、10 × 10<sup>-9</sup>、20 × 10<sup>-9</sup>、40 × 10<sup>-9</sup> 这 4 个浓度点的

标定, 标线的线性相关系数  $R^2 \geq 0.99$ . 每次样品测试前先使用纯氮气作为空白样品, 空白样品监测到的总物质浓度 < 0.1 × 10<sup>-9</sup>, 若超过此浓度, 重新清洗直至符合要求<sup>[26, 27]</sup>.

### 1.2 臭氧生成潜势计算

NMOCs 对于对流层中光化学臭氧生成的贡献主要与 NMOCs 与羟基自由基 (·OH) 和 NO<sub>x</sub> 的反应有关<sup>[28]</sup>. NMOCs 臭氧生成潜势的研究方法主要有羟基自由基反应活性法 ( $L^{\cdot OH}$  法)、等效丙烯浓度法 (PEC 法) 和最大增量反应法 (MIR 法) 等<sup>[29]</sup>. 其中,  $L^{\cdot OH}$  法和 PEC 法原理相同, 后者是在前者基础上归一化处理的方法, 故本研究采用 PEC 法和 MIR 法两种方法.

PEC 法计算公式为:

$$PEC = \frac{K^{\cdot OH} \times c_i}{K_p^{\cdot OH}} \quad (1)$$

式中, PEC 为某种 NMOC 的等效丙烯浓度 (以 eq-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 计, 下同), μg · m<sup>-3</sup>;  $K^{\cdot OH}$  为该种 NMOC 与 ·OH 的反应速率常数, 无量纲;  $c_i$  为 NMOC 的浓度, μg · m<sup>-3</sup>;  $K_p^{\cdot OH}$  为丙烯与 ·OH 的反应速率常数, 无量纲.

MIR 法计算式为:

$$OFP_i = c_i \times MIR_i \quad (2)$$

式中, OFP<sub>*i*</sub> 是 NMOCs 中物质 *i* 的臭氧产生潜势, μg · m<sup>-3</sup>;  $c_i$  为物质 *i* 的浓度, μg · m<sup>-3</sup>; MIR<sub>*i*</sub> 为物质 *i* 的最大增量反应活性系数, 无量纲.

PEC 法通过计算 NMOCs 与 ·OH 产生过氧自由基的能力来表达臭氧生成潜势, 所需的常数简单易查, 但忽略了 NMOCs 在大气中的二次反应. 而 MIR 法则考虑 NMOCs 在大气中的一系列反应, 从而计算出臭氧生成潜势, 其缺点在于目前还没有某些 NMOCs 的系数, 在计算过程中不得不忽略这些物质<sup>[28]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 作业面 NMOCs 组分与浓度

本研究按照春季 (3、4、5 月)、夏季 (6、7、8 月)、秋季 (9、10、11 月)、冬季 (12、1、2 月) 划分四季. 4 个季节填埋场作业面上分别定量检出 44、46、37、36 种物质. 检出的物质可以分为碳氢化合物、卤代烃、苯系物、含硫化合物和含氧化合物 (醛、酮、醚、酯、醇) 等 5 大类. 作业面全年检出频次大于 50% 且浓度较高 (> 1 μg · m<sup>-3</sup>) 的 NMOC 如表 1 所示, 共 36 种, 包括碳氢化合物 8 种、卤代烃 8 种、苯系物 11 种、含硫化合物 3 种和含氧化合物 6 种.

表 1 填埋场作业面 NMOCs 全年浓度较高的物质

Table 1 Substances contributing highly to NMOCs in the working face of the landfill throughout the year

| 种类    | 主要 NMOCs 物质                                                      |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| 碳氢化合物 | 正己烷、庚烷、丙烯、环己烷、正戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、1-丁烯                             |
| 卤代烃   | 二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、FREON11、1,2-二氯乙烷、三氯甲烷、四氯乙烯、三氯乙烯、FREON12            |
| 苯系物   | 甲苯、乙苯、间二甲苯、邻二甲苯、1,3-二氯苯、4-乙基甲苯、1,4-二氯苯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯、苯乙烯、苯 |
| 含硫化合物 | 二甲基二硫醚、二硫化碳、甲硫醚                                                  |
| 含氧化合物 | 乙醇、乙酸乙酯、丙酮、2-丁酮、异丙醇、醋酸乙烯酯                                        |

各季节填埋场作业面 NMOCs 浓度变化如图 1 所示. 全年平均总浓度在 $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 且呈夏季>秋季>春季>冬季的趋势. 夏季气温较高, 垃圾中微生物作用较为活跃, 各类 NMOCs 产生量较大且容易挥发, 而冬季各类物质浓度普遍较低. 物质种类上来看, 所关注的五大类物质作业面的浓度整体呈含氧化合物>含硫化合物>卤代烃>苯系物>碳氢化合物的规律. 填埋场作业面释放的 NMOCs 种类及浓度很大程度上取决于填埋垃圾组分及垃圾的好氧降解程度. 含氧化合物主要来源于

垃圾中有机物的降解与挥发, 来源广, 故其浓度较高, 且保持稳定; 含硫化合物主要来源于含硫物质(如厨余垃圾)的降解, 来源有限, 容易产生波动, 故在监测结果中, 春夏季节浓度较高, 秋冬两季浓度较低; 苯系物、卤代烃和碳氢化合物普遍浓度较低, 易受监测位点的影响而产生一定的波动.

36 种 NMOCs 在四季的浓度、 $\cdot\text{OH}$ 反应速率常数以及 MIR 系数如表2所示. 某些卤代烃与硫化物系数尚无研究, 因此在计算臭氧生成潜势时忽略这些物质.

表 2 各季节作业面 NMOCs 浓度<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Concentration of NMOCs across seasons/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目        | $K^{\cdot\text{OH}[30]}$ | $\text{MIR}_i^{[31]}$ | 春季       | 夏季       | 秋季       | 冬季       |
|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| 正己烷       | 5.200                    | 1.240                 | 81.55    | ND       | 24.52    | 4.28     |
| 庚烷        | 6.760                    | 1.070                 | 75.88    | ND       | 6.71     | 7.87     |
| 丙烯        | 26.300                   | 11.660                | 70.01    | 26.40    | 30.33    | ND       |
| 环己烷       | 26.000                   | 1.250                 | 20.46    | 233.35   | 14.19    | ND       |
| 正戊烷       | 3.8                      | 1.310                 | ND       | 83.35    | 536.19   | 126.49   |
| 2-甲基戊烷    | 50.225                   | 5.623                 | ND       | 50.23    | 23.32    | 3.36     |
| 3-甲基戊烷    | 21.475                   | 5.2                   | ND       | 21.48    | 15.05    | 4.63     |
| 1-丁烯      | 21.987 5                 | 31.4                  | ND       | 21.99    | 1.20     | ND       |
| 二氯甲烷      | 0.145                    | 0.041                 | 81.44    | 371.51   | 70.81    | 9.49     |
| 1,2-二氯丙烷  | 0.776                    | 0.290                 | 76.81    | 1793.61  | 9.89     | 33.85    |
| FREON11   | NA                       | NA                    | 73.51    | ND       | 73.23    | 13.57    |
| 1,2-二氯乙烷  | 0.253                    | 0.210                 | 52.29    | 126.96   | ND       | 1.71     |
| 三氯甲烷      | 0.106                    | 0.022                 | 35.76    | ND       | 40.94    | 11.28    |
| 四氯乙烯      | NA                       | NA                    | 10.23    | 12.23    | 21.58    | 408.85   |
| 三氯乙烯      | 2.344                    | NA                    | 4.57     | 12.23    | 1.22     | ND       |
| FREON12   | NA                       | NA                    | 2.7      | ND       | 3.54     | 1.73     |
| 甲苯        | 5.630                    | 4.000                 | 171.96   | 119.31   | 131.17   | 30.01    |
| 乙苯        | 7.000                    | 2.700                 | 153.5    | 20.28    | 22.2     | 8.03     |
| 间二甲苯      | 23.100                   | 9.750                 | 135.1    | 22.78    | ND       | ND       |
| 邻二甲苯      | 13.600                   | 7.640                 | 116.57   | 10.46    | 37.04    | 7.56     |
| 1,3-二氯苯   | 0.724                    | 0.178                 | 52.79    | ND       | 1.26     | 2.18     |
| 4-乙基甲苯    | 12.022                   | 5.590                 | 50.68    | ND       | 21.86    | ND       |
| 1,4-二氯苯   | 0.326                    | 0.178                 | 29.74    | 35.08    | ND       | 2.02     |
| 1,2,4-三甲苯 | 32.500                   | 11.760                | 26.57    | 9.5      | ND       | 6.93     |
| 1,3,5-三甲苯 | 56.700                   | 8.870                 | 18.71    | 1.5      | ND       | ND       |
| 苯乙烯       | 58.000                   | 1.730                 | 6.72     | 12.52    | 57.24    | ND       |
| 苯         | 1.220                    | 0.720                 | 5.71     | 45.68    | 21.55    | 2.41     |
| 二甲基二硫醚    | NA                       | NA                    | 2 258.72 | 3 819.15 | ND       | 11.11    |
| 二硫化碳      | 2.760                    | 0.250                 | 13.01    | 137.89   | 6.57     | ND       |
| 甲硫醚       | 4.786                    | NA                    | ND       | 567.35   | 139.85   | ND       |
| 乙醇        | 0.940                    | 1.530                 | 3 107.44 | 4 978.43 | 5 072    | 5 443.59 |
| 乙酸乙酯      | 1.600                    | 0.630                 | 997.17   | 141.71   | 1 791.65 | 26.73    |
| 丙酮        | 0.170                    | 0.360                 | 347.78   | 406.05   | 247.97   | 15.72    |
| 2-丁酮      | 1.22                     | NA                    | ND       | 1 707.89 | 1 084.76 | 25.50    |
| 异丙醇       | 5.129                    | 2.700                 | 297.84   | ND       | 27.09    | ND       |
| 醋酸乙烯酯     | 6.200                    | 3.200                 | 2.58     | ND       | 2.47     | ND       |

1) NA 表示尚无该参数, ND 表示没有检出相应物质, 下同

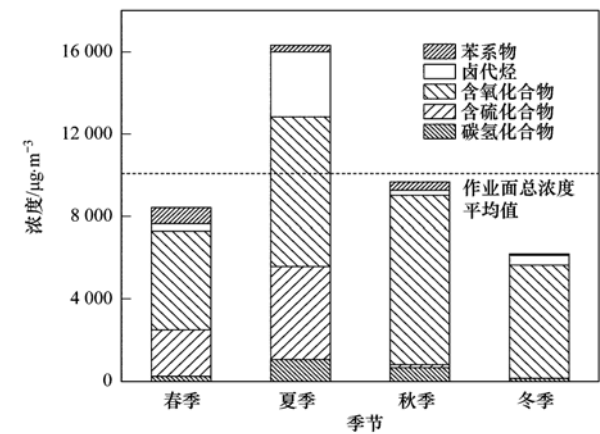


图 1 作业面 NMOCs 浓度随季节变化  
Fig. 1 Concentration of NMOCs in the working area across seasons

2.2 作业面 NMOC 臭氧生成潜势分析

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势如表 3 及表 4 所示. 采用等效丙烯浓度法, 春夏秋冬四季等效丙烯浓度分别是 733.52、945.88、751.79 和 251.16  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 等效丙烯浓度法算得的各季节等效丙烯浓度的关系与作业面各季节浓度关系一致. 从全年的角度考虑, 排名前十位的高浓度 NMOCs 有乙醇、环己烷、间二甲苯、甲硫醚、苯乙烯、2-甲基戊烷、乙酸乙酯、2-丁酮、丙烯及正戊烷, 年平均等效丙烯浓度分别为 166.21、88.31、69.34、64.35、56.22、48.96、44.98、43.58、42.25 及 35.93  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 10 种高浓度物质贡献较为平均, 差别并不明显.

表 3 作业面 NMOCs 臭氧生成潜势 (PEC 法)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$   
Table 3 Ozone formation potential of NMOCs in the working face (PEC method)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目        | 春季     | 夏季     | 秋季     | 冬季     | 年平均    |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 正己烷       | 16.12  | ND     | 4.85   | 0.85   | 7.27   |
| 庚烷        | 19.50  | ND     | 1.72   | 2.02   | 7.75   |
| 丙烯        | 70.01  | 26.40  | 30.33  | ND     | 42.25  |
| 环己烷       | 20.23  | 230.69 | 14.03  | ND     | 88.31  |
| 正戊烷       | ND     | 12.04  | 77.47  | 18.28  | 35.93  |
| 2-甲基戊烷    | ND     | 95.92  | 44.53  | 6.42   | 48.96  |
| 3-甲基戊烷    | ND     | 17.54  | 12.29  | 3.78   | 11.20  |
| 1-丁烯      | ND     | 18.38  | 1.00   | ND     | 9.69   |
| 二氯甲烷      | 0.45   | 2.05   | 0.39   | 0.05   | 0.73   |
| 1,2-二氯丙烷  | 2.27   | 52.92  | 0.29   | 1.00   | 14.12  |
| FREON11   | NA     | NA     | NA     | NA     | NA     |
| 1,2-二氯乙烷  | 0.50   | 1.22   | ND     | 0.02   | 0.58   |
| 三氯甲烷      | 0.14   | ND     | 0.17   | 0.05   | 0.12   |
| 四氯乙烯      | NA     | NA     | NA     | NA     | NA     |
| 三氯乙烯      | 0.41   | 1.09   | 0.11   | ND     | 0.54   |
| FREON12   | NA     | NA     | NA     | NA     | NA     |
| 甲苯        | 36.81  | 25.54  | 28.08  | 6.43   | 24.21  |
| 乙苯        | 40.86  | 5.40   | 5.91   | 2.14   | 13.57  |
| 间二甲苯      | 118.66 | 20.01  | ND     | ND     | 69.34  |
| 邻二甲苯      | 60.28  | 5.41   | 19.15  | 3.91   | 22.19  |
| 1,3-二氯苯   | 1.45   | ND     | 0.03   | 0.06   | 0.52   |
| 4-乙基甲苯    | 23.17  | ND     | 9.99   | ND     | 16.58  |
| 1,4-二氯苯   | 0.37   | 0.43   | ND     | 0.03   | 0.28   |
| 1,2,4-三甲苯 | 32.83  | 11.74  | ND     | 8.57   | 17.71  |
| 1,3,5-三甲苯 | 40.34  | 3.23   | ND     | ND     | 21.79  |
| 苯乙烯       | 14.82  | 27.61  | 126.23 | ND     | 56.22  |
| 苯         | 0.26   | 2.12   | 1.00   | 0.11   | 0.87   |
| 二甲基二硫醚    | NA     | NA     | NA     | NA     | NA     |
| 二硫化碳      | 1.37   | 14.47  | 0.69   | ND     | 5.51   |
| 甲硫醚       | ND     | 103.24 | 25.45  | ND     | 64.35  |
| 乙醇        | 111.06 | 177.94 | 181.28 | 194.56 | 166.21 |
| 乙酸乙酯      | 60.66  | 8.62   | 109.00 | 1.63   | 44.98  |
| 丙酮        | 2.25   | 2.62   | 1.60   | 0.10   | 1.64   |
| 2-丁酮      | ND     | 79.23  | 50.32  | 1.18   | 43.58  |
| 异丙醇       | 58.08  | ND     | 5.28   | ND     | 31.68  |
| 醋酸乙烯酯     | 0.61   | ND     | 0.58   | ND     | 0.60   |
| 合计        | 733.52 | 945.88 | 751.79 | 251.16 | 670.59 |

表 4 作业面 NMOCs 臭氧生成潜势(MIR 法)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Ozone formation potential of NMOCs in the working face (MIR method)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目        | 春季        | 夏季        | 秋季        | 冬季       | 年平均       |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 正己烷       | 101.12    | ND        | 30.40     | 5.30     | 45.61     |
| 庚烷        | 81.19     | ND        | 7.18      | 8.42     | 32.26     |
| 丙烯        | 816.32    | 307.82    | 353.65    | ND       | 492.60    |
| 环己烷       | 25.58     | 291.69    | 17.74     | ND       | 111.67    |
| 正戊烷       | ND        | 109.19    | 702.41    | 165.70   | 325.76    |
| 2-甲基戊烷    | ND        | 282.44    | 131.13    | 18.90    | 144.16    |
| 3-甲基戊烷    | ND        | 111.70    | 78.26     | 24.06    | 71.34     |
| 1-丁烯      | ND        | 690.49    | 37.68     | ND       | 364.08    |
| 二氯甲烷      | 3.34      | 15.23     | 2.90      | 0.39     | 5.47      |
| 1,2-二氯丙烷  | 22.27     | 520.15    | 2.87      | 9.82     | 138.78    |
| FREON11   | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 1,2-二氯乙烷  | 10.98     | 26.66     | ND        | 0.36     | 12.67     |
| 三氯甲烷      | 0.79      | ND        | 0.90      | 0.25     | 0.65      |
| 四氯乙烯      | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 三氯乙烯      | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| FREON12   | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 甲苯        | 687.84    | 477.24    | 524.68    | 120.06   | 452.45    |
| 乙苯        | 414.45    | 54.76     | 59.94     | 21.69    | 137.71    |
| 间二甲苯      | 1 317.23  | 222.11    | ND        | ND       | 769.67    |
| 邻二甲苯      | 890.59    | 79.91     | 282.99    | 57.73    | 327.81    |
| 1,3-二氯苯   | 9.40      | ND        | 0.22      | 0.39     | 3.34      |
| 4-乙基甲苯    | 283.30    | ND        | 122.20    | ND       | 202.75    |
| 1,4-二氯苯   | 5.29      | 6.24      | ND        | 0.36     | 3.97      |
| 1,2,4-三甲苯 | 312.46    | 111.72    | ND        | 81.51    | 168.56    |
| 1,3,5-三甲苯 | 165.96    | 13.31     | ND        | ND       | 89.63     |
| 苯乙烯       | 11.63     | 21.66     | 99.03     | ND       | 44.10     |
| 苯         | 4.11      | 32.89     | 15.52     | 1.73     | 13.56     |
| 二甲基二硫醚    | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 二硫化碳      | 3.25      | 34.47     | 1.64      | ND       | 13.12     |
| 甲硫醚       | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 乙醇        | 4 754.38  | 7 617.00  | 7 760.16  | 8 328.70 | 7 115.06  |
| 乙酸乙酯      | 628.22    | 89.28     | 1128.74   | 16.84    | 465.77    |
| 丙酮        | 125.20    | 146.18    | 89.27     | 5.66     | 91.58     |
| 2-丁酮      | NA        | NA        | NA        | NA       | NA        |
| 异丙醇       | 804.17    | ND        | 73.14     | ND       | 438.66    |
| 醋酸乙烯酯     | 8.26      | ND        | 7.90      | ND       | 8.08      |
| 总计        | 11 487.32 | 11 262.13 | 11 530.55 | 8 867.85 | 10 786.96 |

采用臭氧生成潜势方法,春夏秋冬四季臭氧生成潜势分别为11 487.32、11 262.13、11 530.55和8 867.85  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 全国大部分地区全年臭氧浓度为80~280  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[13]</sup>, 填埋场作业面臭氧生成潜势是正常情况的50~100倍; 环境空气质量标准要求臭氧的浓度限值为200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (GB 3095-2012), 填埋场作业面臭氧生成潜势超出标准限值40倍, 是重要的臭氧生成源. MIR法算得臭氧生成潜势春夏秋三季比较接近, 冬季远小于其他季节, 结果与各季节等效丙烯浓度区别明显. 从全年的角度考虑, 排名前十位的高浓度NMOCs有: 乙醇、间二甲苯、丙烯、乙酸乙酯、甲苯、异丙醇、1-丁烯、邻二甲苯、正戊烷、4-乙基甲苯, 年平均臭氧生成潜势分别为7 115.06、769.67、492.6、465.77、452.45、

438.66、364.08、327.81、325.76、202.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 乙醇对于臭氧生成潜势的贡献远超其他物质, 差别十分明显.

对比两种方法, 各季节臭氧生成潜势排序不太一致, 特别是MIR法中夏季的结果偏低, 主要是因为缺少PEC法中两种高贡献物质甲硫醚和2-丁酮的MIR系数, 导致在夏季浓度较高的两种物质无法计入MIR法结果中. 采用PEC法能够更加全面地表征臭氧生成情况, 故推荐采用PEC法. 从全年的角度, 两种计算方法都给出了有较高臭氧生成贡献的10种物质, 其中都包括乙醇、间二甲苯、丙烯、乙酸乙酯及正戊烷这5种. 故可以认为此5种物质是生活垃圾填埋场作业面全年产生的高臭氧贡献物质.

### 2.3 作业面 NMOCs 各季节高贡献物质

各季节垃圾组分差别较大, 故填埋场作业面产生的 NMOCs 也有较大区别, 除了要从全年角度整体把握填埋场主要高贡献臭氧生成物质外, 还应分

季节对主要物质进行进一步分析. 图 2 与图 3 给出了两种方法计算得出的作业面不同季节几种重要 NMOCs 臭氧生成潜势比例.

春季, 两种方法得到的高贡献物质较为一致,

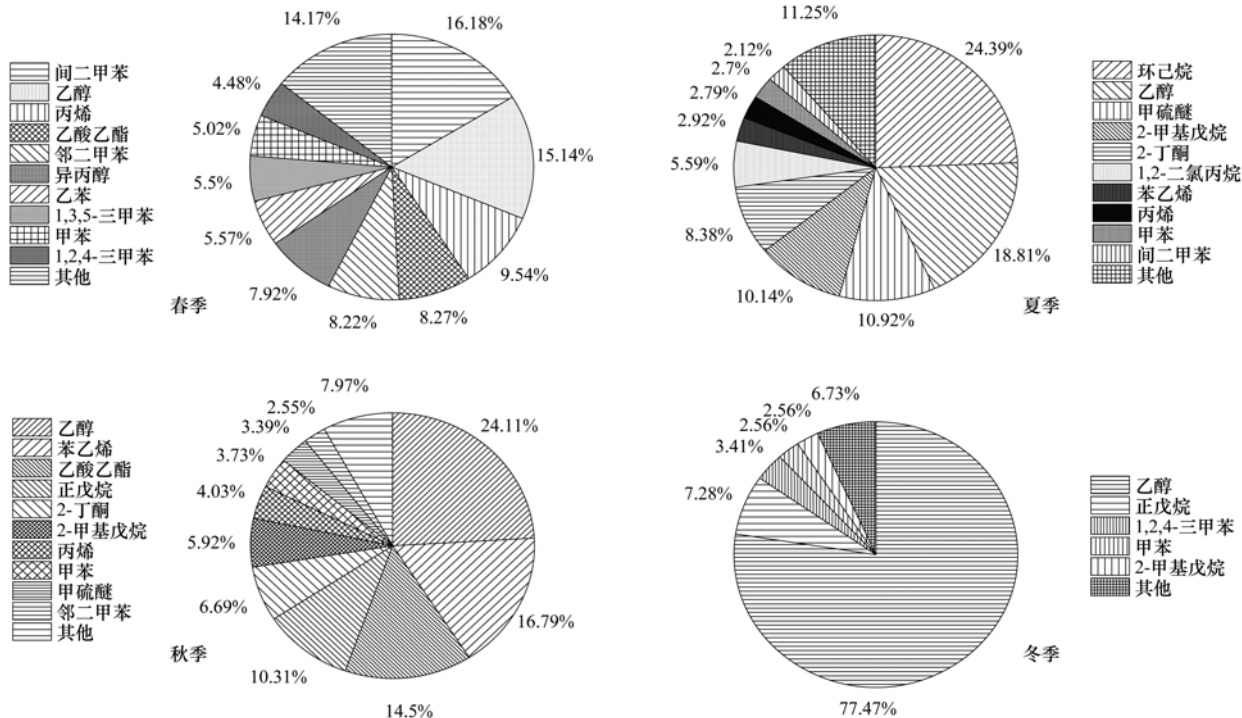


图 2 作业面不同季节几种重要 NMOCs 臭氧生成潜势比例 (PEC 法)

Fig. 2 Ozone formation potential ratio of several important NMOCs in the seasonal working face (PEC method)

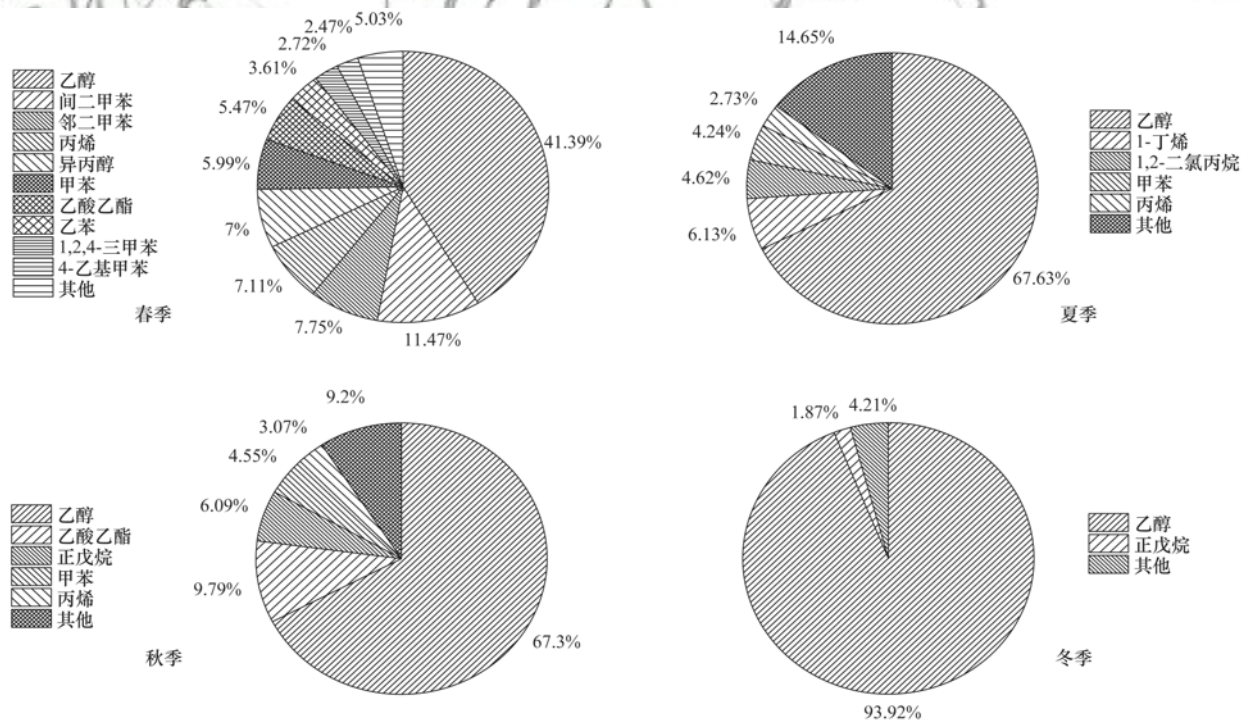


图 3 作业面不同季节几种重要 NMOCs 臭氧生成潜势比例 (MIR 法)

Fig. 3 Ozone formation potential ratio of several important NMOCs in the seasonal working face (MIR method)

都包括间二甲苯、乙醇、丙烯、乙酸乙酯、邻二甲苯、异丙醇、乙苯及1,2,4-三甲苯等。夏季与秋季, MIR法中乙醇占较高比例(大于60%), 其他物质占比较小, 可能与高浓度物质 MIR系数缺失有关。故除了两种算法共有的物质之外, 还应将PEC法中较高贡献的物质考虑在内。故夏季高贡献物质包括乙醇、1-丁烯、甲苯、丙烯以及环己烷、甲硫醚; 秋季高贡献物质包括乙醇、乙酸乙酯、正戊烷、甲苯、丙烯以及苯乙烯等。冬季乙醇占比十分高, 明显是最重要贡献物质, 其他如正戊烷等也起到了一定的作用。

### 3 结论

(1) 填埋场作业面检出36种较高频次且较高浓度NMOCs, 年均总浓度约为 $10\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 夏季总浓度最高, 以乙醇为主的含氧化合物是NMOCs中浓度最高的物质。

(2) 综合两种估算方法, 全年范围内高臭氧生成贡献物质为乙醇、间二甲苯、丙烯、乙酸乙酯和正戊烷, 若要减少填埋场作业面臭氧生成, 需优先控制这5种物质。

(3) 春季高贡献物质与全年较为一致, 包括乙醇、二甲苯、丙烯和乙酸乙酯等; 夏秋两季高贡献物质包括乙醇、1-丁烯、甲苯、环己烷与苯乙烯等; 冬季乙醇是最主要的高贡献物质。

(4) 因缺少几种高浓度检出物的MIR系数, 采用PEC法能够更加完整地表征出作业面臭氧生成情况, 更适合本研究对臭氧生成的估算。

#### 参考文献:

- [1] 2016年《中国环境状况公报》(摘录)[J]. 环境保护, 2017, 45(11): 35-47.  
China Environmental Status Bulletin 2016 (Excerpt) [J]. Environmental Protection, 2017, 45(11): 35-37.
- [2] Liu Y J, Lu W J, Dastyar W, *et al.* Fugitive halocarbon emissions from working face of municipal solid waste landfills in China[J]. Waste Management, 2017, 70: 149-157.
- [3] Liu Y J, Liu Y T, Li H, *et al.* Health risk impacts analysis of fugitive aromatic compounds emissions from the working face of a municipal solid waste landfill in China [J]. Environment International, 2016, 97: 15-27.
- [4] Liu Y J, Lu W J, Guo H W, *et al.* Aromatic compound emissions from municipal solid waste landfill: Emission factors and their impact on air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2016, 139: 205-213.
- [5] Abdul-Wahab S A, Al-Hajri A, Yetilmezsoy K. Impact of the ambient air quality due to the dispersion of non-methane organic compounds from Barka Landfill [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13(4): 1099-1108.
- [6] Barlaz M A, Green R B, Chanton J P, *et al.* Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(18): 4891-4899.
- [7] Saquing J M, Chanton J P, Yazdani R, *et al.* Assessing methods to estimate emissions of non-methane organic compounds from landfills[J]. Waste Management, 2014, 34(11): 2260-2270.
- [8] 何晶晶, 曾阳, 唐家富, 等. 城市生活垃圾初期降解挥发性有机物释放特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 854-858, 869.  
He P J, Zeng Y, Tang J F, *et al.* Emission of volatile organic compounds during initial decomposition phase of municipal solid waste [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(6): 854-858, 869.
- [9] 冉靓, 赵春生, 耿福海, 等. 上海市区非甲烷有机化合物(NMOCs)的观测分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 199-206.  
Ran L, Zhao C S, Geng F H, *et al.* Analysis of nonmethane organic compounds (NMOCs) measurements in urban Shanghai [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(2): 199-206.
- [10] 武蕾丹, 王秀艳, 杨文, 等. 某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 511-516.  
Wu L D, Wang X Y, Yang W, *et al.* Ozone formation potential and priority species of VOCs in an industrial park [J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 511-516.
- [11] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 11-17.  
Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen [J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 11-17.
- [12] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4003-4012.  
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4003-4012.
- [13] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015年中国近地面臭氧浓度特征分析[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 4976-4982.  
Duan X T, Cao N W, Wang X, *et al.* Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 4976-4982.
- [14] 周莉. 北京及周边地区挥发性有机物的观测与分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. 87-94.  
Zhou L. Observation and analysis of volatile organic compounds in Beijing and its surrounding areas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. 87-94.
- [15] 王庆九, 谢放尖, 杨峰, 等. 南京VOCs排放的臭氧生成潜势(OFP)分析与VOCs控制措施研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(23): 86, 128.
- [16] 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.

- [17] 徐敬. 北京地区大气有机物对臭氧生成的影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012. 51-59.
- [18] 印丽媛. 华北地区不同类型站点大气挥发性有机物(VOCs)特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. 101-114.
- Yin L Y. Investigation on atmospheric volatile organic compounds of different types of stations in North China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012. 101-114.
- [19] 王刚, 魏巍, 米同清, 等. 典型工业无组织源 VOCs 排放特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 1957-1964.
- Wang G, Wei W, Mi T Q, *et al.* Characteristics of VOCs emitted from typical industrial fugitive[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 1957-1964.
- [20] 田亮, 魏巍, 程水源, 等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(1): 314-320.
- Tian L, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of volatile organic compounds from the use of solvents in typical industry [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(1): 314-320.
- [21] 张新民, 赵文娟, 孟凡. 基于 OFP 的大气挥发性有机物污染源分级控制解析[J]. 环境保护, 2017, **45**(13): 22-25.
- Zhang X M, Zhao W J, Meng F. Study on classification control of atmospheric volatile organic compounds emission pollution sources based on OFP[J]. Environmental Protection, 2017, **45**(13): 22-25.
- [22] 李勤勤, 张志娟, 李杨, 等. 石油炼化无组织 VOCs 的排放特征及臭氧生成潜力分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1323-1331.
- Li Q Q, Zhang Z J, Li Y, *et al.* Characteristics and ozone formation potential of fugitive volatile organic compounds (VOCs) emitted from petrochemical industry in Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1323-1331.
- [23] 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 等. 生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- Shao Z Z, Zheng G D, Wang Y G, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from a municipal solid waste composting plant [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- [24] Kumar A, Alaimo C P, Horowitz R, *et al.* Volatile organic compound emissions from green waste composting: Characterization and ozone formation [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(10): 1841-1848.
- [25] Wang X J, Jia M S, Zhang H, *et al.* Quantifying N<sub>2</sub>O emissions and production pathways from fresh waste during the initial stage of disposal to a landfill[J]. Waste Management, 2017, **63**: 3-10.
- [26] Duan Z H, Lu W J, Li D, *et al.* Temporal variation of trace compound emission on the working surface of a landfill in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **88**: 230-238.
- [27] Li D, Lu W J, Liu Y J, *et al.* Analysis of relative concentration of ethanol and other odorous compounds (OCs) emitted from the working surface at a landfill in China[J]. PLoS One, 2015, **10**(3): e119305.
- [28] 李国昊, 魏巍, 魏峰, 等. 夏秋季节焦化厂附近大气中臭氧及其前体物变化特征和臭氧生成潜势分析[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(3): 1130-1138.
- Li G H, Wei W, Wei F, *et al.* Diurnal variations of ozone and its precursors and ozone formation potential of VOCs at the boundary of a coking plant during summer and autumn [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(3): 1130-1138.
- [29] 楼晟荣. 大气环境中 OH 自由基反应活性的检测技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. 27-32.
- Lou S R. Experimental determination of the OH reactivity in ambient air [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. 27-32.
- [30] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, **97**(D5): 6037-6055.
- [31] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. Chemical Reviews, 2003, **103**(12): 4605-4638.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....                                                                    | HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)                                  |
| Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....                                                                                  | LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)                    |
| Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....                                                                          | YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)                     |
| Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....                                                          | SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)            |
| Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....                                      | LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)             |
| Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....                                  | LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)        |
| PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....                                                     | ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)            |
| Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....                                                     | WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)                    |
| Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....                                                                  | YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)                 |
| Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....                                                                    | XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)             |
| Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....                                                                                                     | MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)             |
| Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....                                                                     | LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)                     |
| Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....                                                                                 | LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)             |
| Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....                                                         | GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)                    |
| Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....                                                       | GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)             |
| Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....               | ..... ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)       |
| Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....                                  | ..... XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)               |
| Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....                                                               | ..... LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)      |
| Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....                                                            | ..... WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)   |
| Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin .....                                                                     | ..... XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)             |
| Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....                            | ..... ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)                         |
| Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....       | ..... ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161) |
| Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....               | ..... LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)       |
| Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....                                             | ..... HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)           |
| Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....                                                          | ..... LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)        |
| Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....                                                   | ..... NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)         |
| Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....                                                                            | ..... CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)               |
| Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....                                                                                     | ..... WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)          |
| Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....                                                      | ..... HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)        |
| Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....                                        | ..... HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)                               |
| Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....                                                                                         | ..... ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)          |
| Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....                                                                                        | ..... YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)       |
| Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....                                                                             | ..... WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)   |
| Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....                                                                              | ..... HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)          |
| Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....                                    | ..... WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)      |
| Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....                                                              | ..... YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)              |
| Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....                                       | ..... ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)         |
| Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....                                                                                                | ..... CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)            |
| Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....                                                                                          | ..... SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)            |
| Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....                                                                                     | ..... AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)       |
| Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....                                                                                     | ..... LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)         |
| Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....                                                    | ..... SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)            |
| Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....                                                                                    | ..... LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)                |
| Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....                                         | ..... LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)              |
| Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite ..... | ..... XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)       |
| Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....                                                                            | ..... ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)              |
| Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....                                   | ..... HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)               |
| Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....                          | ..... LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)               |
| Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....                                                                          | ..... JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)                    |