

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                     |                                 |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 基于过氧化物的消毒技术研究进展                                                                     | 习海玲,赵三平,周文                      | (1645)                  |
| 环境损害评估:国际制度及对中国的启示                                                                  | 张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明     | (1653)                  |
| 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示                                                            | 徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生           | (1667)                  |
| 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展                                                       | 张志剑,刘萌,朱军                       | (1679)                  |
| 基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究                                                                | 刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾          | (1687)                  |
| 我国东北地区地表水酸化现状                                                                       | 徐光仪,康荣华,罗遥,段雷                   | (1695)                  |
| 西安市对渭河水质的影响分析                                                                       | 于婕,李怀恩                          | (1700)                  |
| 极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究                                                  | 叶丰,黄小平,施震,刘庆霞                   | (1707)                  |
| 应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准                                                           | 韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟               | (1715)                  |
| 长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法                                                       | 蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟               | (1725)                  |
| 温州城市降雨径流中BOD <sub>5</sub> 和COD污染特征及其初始冲刷效应                                          | 王骏,毕春娟,陈振楼,周栋                   | (1735)                  |
| 影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究                                                                | 余小龙,沈芳,张晋芳                      | (1745)                  |
| 香溪河库湾春季pCO <sub>2</sub> 与浮游植物生物量的关系                                                 | 袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤          | (1754)                  |
| 紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究                                                                | 雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄允秋                | (1761)                  |
| 高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究                                                      | 马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松             | (1767)                  |
| 纳米Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 | 何洁,杨晓芳,张伟军,王东升                  | (1773)                  |
| 水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究                                                               | 马杜娟,刘国光,吕文英,姚锐,周丽华,谢成屏          | (1782)                  |
| 酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究                                                             | 康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦               | (1790)                  |
| 镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究                                                                  | 柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东              | (1797)                  |
| 基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法                                                            | 金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌                 | (1802)                  |
| 不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究                                                                | 万金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智                 | (1808)                  |
| 壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果                                                            | 张聪璐,胡筱敏,英诗颖,王芳                  | (1815)                  |
| 城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究                                                                | 孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮               | (1822)                  |
| 倒置A <sup>2</sup> /O-MBR处理城市污水的中试研究                                                  | 张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹        | (1828)                  |
| 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究                                                                 | 袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵                   | (1835)                  |
| 短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N <sub>2</sub> O释放特性                                                 | 梁小玲,李平,吴锦华,王向德                  | (1845)                  |
| 基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化                                                          | 张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营                 | (1851)                  |
| 多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响                                                             | 陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松               | (1857)                  |
| 浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价                                                      | 徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞                 | (1864)                  |
| 苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应                                                               | 赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松                 | (1871)                  |
| 四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征                                                              | 邵敏,陈永亨,李晓宇                      | (1877)                  |
| 咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究                                                               | 赵继红,赵永升,张宏忠,张香平                 | (1882)                  |
| 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征                                                           | 樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉                 | (1887)                  |
| 内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征                                                      | 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君           | (1895)                  |
| 福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究                                                                 | 郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋              | (1901)                  |
| 重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究                                                              | 王玉玲,能昌信,王彦文,董路                  | (1908)                  |
| 丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响                                                          | 郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君           | (1915)                  |
| 海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应                                                                   | 史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明          | (1922)                  |
| 1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究                                                     | 刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银                  | (1930)                  |
| 1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性                                                               | 蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕         | (1937)                  |
| 2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解                                                             | 张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君 | (1945)                  |
| 养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性                                                          | 裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金           | (1951)                  |
| 1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析                                                 | 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国         | (1958)                  |
| 黄山降水酸度及电导率特征分析                                                                      | 石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建           | (1964)                  |
| 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析                                                              | 文彬,银燕,秦彦硕,陈魁                    | (1973)                  |
| 广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征                                                             | 谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫         | (1982)                  |
| 福建省三大城市冬季PM <sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征                                            | 陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺         | (1988)                  |
| 上海市含碳大气颗粒物的粒径分布                                                                     | 袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘遂庆        | (1995)                  |
| 上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算                                                                   | 崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜      | (2003)                  |
| 沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义                                                       | 钱鹏,郑祥民,周立旻                      | (2010)                  |
| 厦门秋季近郊地面CO <sub>2</sub> 浓度变化特征研究                                                    | 李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可               | (2018)                  |
| GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b                                                   | 郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林               | (2025)                  |
| 城市居家环境空气真菌群落结构特征研究                                                                  | 方治国,欧阳志云,刘芃,孙力,王小勇              | (2031)                  |
| 城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究                                                           | 郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林           | (2038)                  |
| 内河多点分散码头大气污染叠加影响特征                                                                  | 刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨          | (2044)                  |
| 义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究                                                                   | 刘瑞卿,王钧伟                         | (2051)                  |
| 基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究                                                    | 谢元博,李巍                          | (2057)                  |
| 《环境科学》征订启事(1652)                                                                    | 《环境科学》征稿简则(1789)                | 信息(1807,1821,1881,1987) |
| 编辑征稿通知(1863)                                                                        |                                 |                         |

# 城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究

郭薇<sup>1</sup>, 王伯光<sup>1,2\*</sup>, 唐小东<sup>1</sup>, 刘舒乐<sup>1</sup>, 何洁<sup>1</sup>, 张春林<sup>1,2</sup>

(1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632; 2. 广东省普通高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632)

**摘要:** 采用二次热解析-气相色谱/质谱仪 (GC/MS) 与电子鼻对广州市某典型城市污水处理厂排放的挥发性恶臭有机物 (MVOCs) 进行检测与分析, 结果表明: ①芳香烃是该污水处理厂排放的最普遍、浓度最高的挥发性恶臭有机物质, 浓度范围为  $96.61 \sim 818.03 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 均占各处理单元总 MVOCs 含量的 50% 以上, 远高于其他 MVOCs 物种。②城市污水厂的挥发性芳香烃主要来源于生活污水, 而污泥处理过程是污水处理厂释放这些污染物的重要环节, 各单元排放的芳香烃化合物总浓度由高至低表现为: 污泥脱水机房 > 污泥浓缩池 > 曝气池 > 格栅 > 生化池 > 沉砂池。③主成分分析 (PCA) 能够区分各单元排放的废气气味特征, 识别指数达到 71%, 而按照各处理单元挥发性芳香烃的组成水平配制的模拟气体, 其 PCA 识别指数高达 94%, 反映了不同处理单元挥发性芳香烃的气味也有很大不同。④将 T70/2 传感器所测得的实际气体与模拟气体的气味指纹进行比较, 实际气体的气味指纹要大于模拟气体, 从相关性方面分析得知挥发性芳香烃的气味指纹与各单元的气味指纹均呈现较好的正相关, 其中曝气池挥发性芳香烃的气味指纹与实际气体气味指纹相关性尤为显著, 达到 0.98。

**关键词:** 恶臭污染; 电子鼻; 挥发性芳香烃; 污水处理厂; 定量评价

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-2038-06

## Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant

GUO Wei<sup>1</sup>, WANG Bo-guang<sup>1,2</sup>, TANG Xiao-dong<sup>1</sup>, LIU Shu-le<sup>1</sup>, HE Jie<sup>1</sup>, ZHANG Chun-lin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Environment Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** The malodorous volatile organic compounds (MVOCs) from a typical municipal sewage treatment plant in Guangzhou were detected and analyzed using thermal-desorption/GC-MS and electronic nose, respectively. The results showed that: ① Aromatic hydrocarbons were the main malodorous volatile organic compounds of the sewage treatment plant, with concentrations ranging from  $96.61 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $818.03 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , accounting for more than 50% of the total MVOCs, much higher than other MVOCs species. ② Volatile aromatic hydrocarbons (VAH) in municipal sewage treatment plant were mainly from domestic wastewater, and the sludge treatment process played an important part in release of these pollutants. The total concentration of aromatic hydrocarbons emitted from each processing unit in a descending order was: the sludge dehydration room > sludge thickener > aeration tank > grille > biochemical pool > grit chamber. ③ Principal component analysis (PCA) was able to distinguish the characteristic of odor emission from each processing unit, with the recognition index reaching 71%, and the PCA recognition index of simulated gases which simulated the VAH levels of different processes reached 94%, indicating that there was big difference among the smell of the VAH emitted from different processes. ④ The comparison of the original odor fingerprint and simulated odor fingerprint measured by the sensor T70/2 showed that the original odor fingerprint was greater than the simulated odor fingerprint, and the correlation analysis indicated that the VAH had a great contribution to the odor fingerprint of each unit, and the contribution of VAH odor of the aeration tank to the original odor fingerprint reached 0.98.

**Key words:** odor pollution; electronic nose; volatile aromatic hydrocarbons (VAH); sewage treatment plant; quantification assessment

城市污水处理厂是城市发展过程中必不可少的基础设施,也是非常重要的城市恶臭污染来源<sup>[1]</sup>。污水处理厂在运行过程中不仅产生氨气和  $\text{H}_2\text{S}$  等无机恶臭物质,还直接或间接向大气中排放芳香烃、羰基化合物、有机硫化物等大量挥发性恶臭有机物 (MVOCs)<sup>[2]</sup>,其中芳香烃是城市污水中重要的污染物<sup>[3]</sup>,同时也是污水处理厂逸散 MVOCs 的重要成

分<sup>[4]</sup>。这些 MVOCs 的化学成分极为复杂,含量变化幅度大,并具有较强的极性和大气化学活性<sup>[5]</sup>,成为当前恶臭污染测量、评价和控制的难点。

收稿日期: 2012-11-03; 修订日期: 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40975077)

作者简介: 郭薇 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: jerry.guowei@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: tbongue@jnu.edu.cn

目前常用的化学分析仪器和人鼻嗅辨法等难以实现恶臭气味指纹、化学组成及其含量水平的同步测试<sup>[6]</sup>。电子鼻是近年来发展较快的恶臭指纹分析技术,在食品工业、医疗卫生、药品工业、安全保障、公安与军事和室内空气检测等领域有较多研究<sup>[7]</sup>。它利用气敏传感器阵列模拟人的嗅觉形成过程,并能够对不同恶臭气味的气味指纹进行识别和定量分析<sup>[8~11]</sup>。如何将电子鼻分析技术应用于环境监测和定量评价已引起了广泛关注<sup>[12~16]</sup>。为此,本研究选取广州地区典型城市污水处理厂采集废气样品,联合使用预浓缩-气质联用仪与电子鼻两种仪器测量 MVOC 的化学组成、含量水平和气味指纹,着重探讨挥发性芳香烃的组成、含量及其气味之间的相互关系,旨在为建立 MVOC 恶臭气味的定量评价方法提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2010 年 9 月 8~10 日对广州市猎德污水处理厂进行恶臭废气外场采样,该污水处理厂为目前广州市规模最大的污水处理厂,处理的污水主

要包括生活污水和少量的工业废水。采样点位为 3 号(格栅)、4 号(沉砂池)、5 号(曝气池)、6 号(生化池)、7 号(污泥浓缩池)、8 号(污泥脱水机房)等厂内主要的恶臭排放源,以及 1 号(厂区下风向)、2 号(环境背景点)。将填充有 100 mg Tenax 的吸附管置于自制液氮制冷低温采样器中,用中流量大气采样器(武汉天虹,TH-110,流量为 0.3 L·min<sup>-1</sup>)捕集 VOCs,采集时间为 15 min,采样体积为 4.5 L。同时使用 3 L 铝箔气体采样袋(大连德霖)进行样品采集用于电子鼻气味指纹分析。各采样点位使用吸附管和气袋同步采集样品,每天采集 3 次,共采集了 72 根吸附管样品和 72 个气袋样品。

1.2 气味模拟样品配置

苯系物标样购自上海科创公司。基于外场观测获得的各处理车间苯系物组成特征和含量水平,采用静态稀释法配制各车间臭气的模拟气体(表 1)。采用高纯氮气作为稀释气,将各组模拟气体分别稀释成 5 个不同浓度水平的混合气体样品,稀释倍数依次为 0、2、5、10、20,以进一步研究物质浓度与电子鼻响应值的定量关系。

表 1 各处理单元模拟气体的配置方案/μg·m<sup>-3</sup>

| Table 1 Composition and concentration of the simulated gases for each treatment unit /μg·m <sup>-3</sup> |       |        |       |        |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 模拟气体名称                                                                                                   | 苯     | 甲苯     | 乙苯    | 间/对二甲苯 | 邻二甲苯  | 苯乙烯   |
| 3 号-MG                                                                                                   | 17.38 | 73.63  | 25.05 | 24.23  | 7.86  | 3.90  |
| 4 号-MG                                                                                                   | 14.38 | 46.51  | 20.69 | Nd     | 11.59 | 2.89  |
| 5 号-MG                                                                                                   | 18.31 | 63.67  | 35.36 | 31.86  | 9.83  | 5.41  |
| 6 号-MG                                                                                                   | 12.30 | 36.68  | 30.11 | 26.34  | 8.59  | 10.27 |
| 7 号-MG                                                                                                   | 14.81 | 440.95 | 11.55 | 7.70   | 1.63  | 9.09  |
| 8 号-MG                                                                                                   | 14.09 | 718.98 | 25.12 | 22.99  | 8.31  | 27.40 |

1.3 样品检测

1.3.1 化学成分分析

采用二次热解吸仪(上海科创 HL-800)与气相色谱-质谱仪(SHIMADZU QP2010PLUS)联用技术进行 MVOCs 的定性和定量分析,样品在 180℃ 进行快速热脱附,脱附产物由高纯氮气带入 GC/MS 系统进行检测。使用 PLOT 色谱柱分离,升温程序为:开始按 9℃·min<sup>-1</sup>的速度从 -20℃(液态 CO<sub>2</sub> 制冷)升至 120℃ 保留 5 min,再以 10℃·min<sup>-1</sup>的速度升至 200℃,最后以 8℃·min<sup>-1</sup>的速度升至 230℃ 保留 8 min。质谱监测器采用全扫描(SCAN),扫描范围(*m/z*)为 35~250,电压 0.9 kV,电离方式为 EI 离子源,采用外标法及峰面积法定量分析。

1.3.2 恶臭气味分析

恶臭气味分析所采用的电子鼻为法国 Alpha

M. O. S 公司生产的 FOX2000 型号,配置自动进样器 HS100 和 AlphasoftV12.3 软件。该仪器由 6 个金属氧化物传感器按一定阵列组合而成(表 2),其中 T70/2 传感器对芳香烃的气味最敏感,因此本研究选取该传感器分析挥发性芳香烃的气味指纹。

表 2 传感器性能

| Table 2 Property of Sensors |       |         |         |
|-----------------------------|-------|---------|---------|
| 阵列序号                        | 传感器名称 | 敏感特征物   | 参考物质    |
| 1                           | T30/1 | 强极性有机物  | 硫醚、乙醚等  |
| 2                           | P10/1 | 碳氢化合物   | 甲烷      |
| 3                           | P10/2 | 碳氢化合物   | 甲烷和丙烷   |
| 4                           | P40/1 | 强氧化气体   | 氟和氯     |
| 5                           | T70/2 | 芳香族化合物  | 甲苯、二甲苯等 |
| 6                           | PA/2  | 醇类、有机溶剂 | 乙醇、甲醇   |

传感器腔室的工作温度恒定为 65℃,载气为干燥空气,载气流速为 150 mL·min<sup>-1</sup>。将采集的气袋

样品及配置的模拟气体分别按 20、10、5、2、0 等稀释倍数稀释和进样分析,测量各气体样品的恶臭气味指纹。采用被动进样方式,进样时间为 15 s,数据采集时间 120 s,采样延迟时间 10 min。每个样品重复分析 3~5 次。

### 1.3.3 质量控制与保证

采样前将吸附管于 300℃ 下通高纯氮气烘烤 2 h,采样前现场校准采样器流量,采样前后流量误差范围 <5%。空白样和平行样的数量不低于样品总量的 20%,采样后采样管密封避光,于 -20℃ 保存,48 h 内完成分析;采样前聚氨酯采样袋利用高纯氮气重复清洗 5 次后抽真空带入现场采样。空白样品进电子鼻分析后各传感器响应值均为基线水平,同一样品重复进样 5 次,且重复分析的 RSD 均小于 5%,在 3 d 内完成所有样品分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水处理厂排放的挥发性芳香烃组成及含量水平

该污水处理厂共检测出烷烃、卤代烃、烯烃、芳香烃、含氧有机物和硫醚等 6 类共 70 种 VOCs 成分,其中有 54 种 MVOC 成分。污泥脱水机房是排放 VOCs 种类最多的处理单元,这与 Gostelow 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

污水处理厂中各处理单元所产生的恶臭物质的组成和浓度不尽相同<sup>[18]</sup>。各处理单元排放的 MVOC 浓度由高至低呈现为:污泥脱水机房 > 污泥浓缩池 > 曝气池 > 格栅 > 生化池 > 沉砂池。污泥脱水机房处理的生活污泥含大量有机物,经离心脱水机的剧烈搅动,促进了挥发性芳香烃物质在水相内和气水两相界面的扩散和传质;而浓缩池中,污泥浓缩时间长达 14~15.5 h,由于污泥停留时间较长而产生缺氧环境,导致大量恶臭气体挥发<sup>[19]</sup>。

由图 1 可知,芳香烃在城市污水处理厂各单元排放的 MVOC 污染物中所占的百分比含量(质量分数,下同)最高,这与 Dutta 等<sup>[20]</sup>的研究结论一致。各处理单元排放的芳香烃组成及其浓度不同(图 2),芳香烃浓度的变化范围为 96.61~818.03  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。大多数芳香烃化合物在各单元中的检出率为 100%,说明它们为该源稳定排放的 MVOCs 种类。刘舒乐等<sup>[21]</sup>采用主成分分析方法,也指出芳香烃是城市污水厂恶臭气味的主要贡献者。因此,研究城市污水处理厂排放的挥发性芳香烃的恶臭气味特征及其恶臭气味定量评价方法具有重要意义。

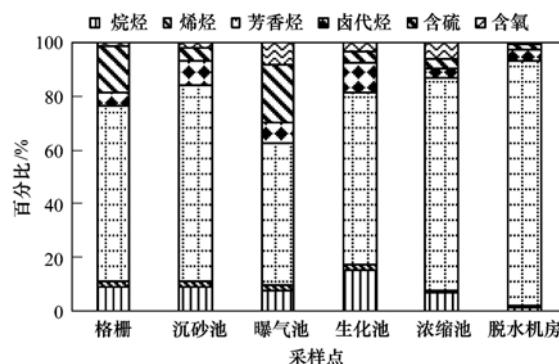


图 1 各处理单元排放的 MVOCs 物种及含量百分比

Fig. 1 Composition and proportions of MVOCs in each processing unit

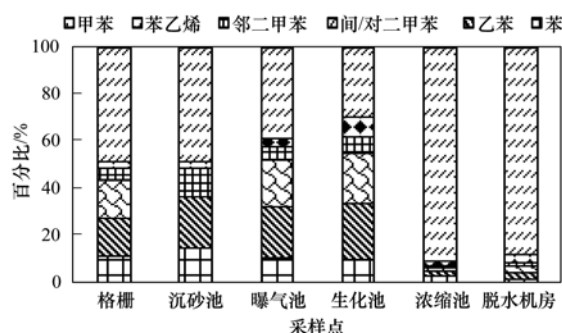


图 2 各处理单元排放的主要芳香烃物种及含量百分比

Fig. 2 Composition and proportions of aromatic hydrocarbons in each processing unit

### 2.2 污水处理厂的气味指纹分析

电子鼻传感器能够测量挥发性成分的气味差异和气味强度,并记录气味随时间的变化特征,即“气味指纹”<sup>[22]</sup>。由于各处理车间排放 MVOCs 的组成、含量不同,导致其恶臭气味污染特征不同,因此它们的气味指纹也具有差异。电子鼻工作站运用主成分分析法(PCA)对各处理单元气体样品的 6 组传感器测量数据进行降维处理,筛选出样品气味指纹的主成分<sup>[23]</sup>。各处理单元气体样品及其模拟气体的气味指纹的 PCA 分析结果如图 3 所示。其中横、纵坐标分别表示第一主成分和第二主成分对样品气味指纹的贡献率。贡献率越大,说明主成分可以较好地反映原来多指标的信息,识别指数(discrimination index, DI)是区分样品程度的表征<sup>[24]</sup>。

从图 3(a)中可知,①实际气体样品的 PC1 和 PC2 的累计方差贡献率相加达 94.95%,包含了样品的主要信息,可见这两个主因子能够很好地反映该污水厂的恶臭气味指纹特征;②DI 指数达到 71%,反映了各处理单元样品气味指纹之间没有重叠,可较好地量化它们的差异程度;③7 号污泥浓

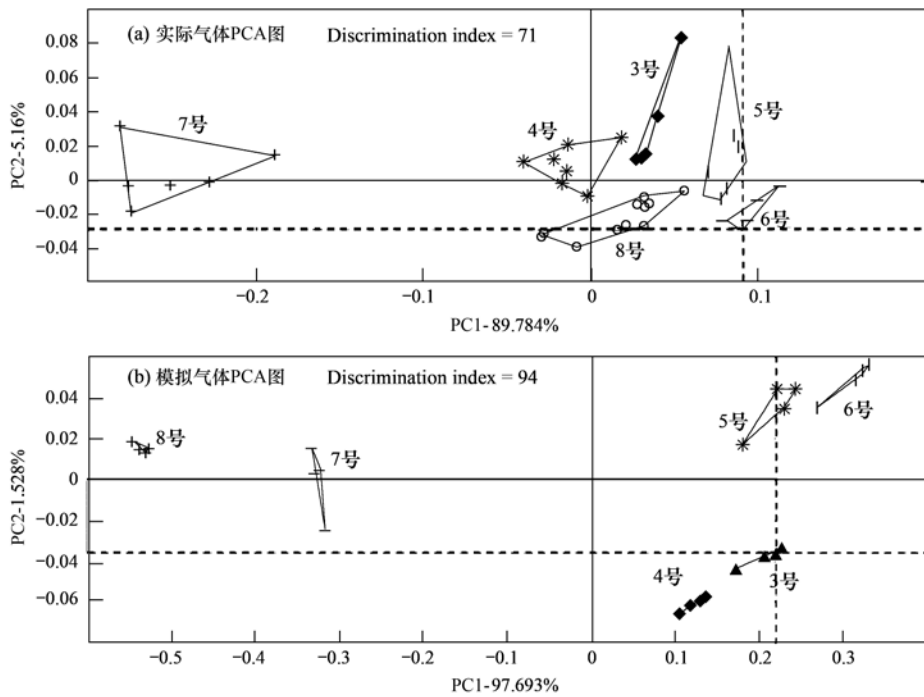


图3 各处理单元实际气体样品及其模拟气体样品的 PCA 分析比较

Fig. 3 Comparison of PCA results between real samples and simulated samples in each processing unit

缩池在 PCA 图上的恶臭气味指纹与其他处理单元样品区分明显,反映出该点的恶臭气味特征与其他单元样品存在显著性差异.这是由于该单元处理工艺污泥停留时间长,易形成缺氧环境,导致大量卤代烃、有机硫化物等挥发性气体产生,造成其恶臭状况最为显著.可见,PCA 方法可量化各处理单元样品气味之间的差异性,并有效地进行恶臭气味的来源识别.

从图 3(b)可知,模拟气体样品的 PC1 和 PC2 的累计方差贡献率相加达 99.22%,也很好地包含了模拟气体中的气味指纹信息;识别指数高达 94%,反映不同模拟气体样品间由于苯系物组成水平不同,导致其气味指纹明显不同.其中模拟气体气味指纹的主成分可分为 3 个区,即 7 号和 8 号区、3 号和 4 号区、5 号和 6 号区,各区的挥发性芳香烃组成和含量水平相似.其中,8 号模拟气体气味指纹与其它样品距离最远,说明其气味差异明显,这是由于 8 号挥发性芳香烃浓度最高;而 7 号点与 8 号点距离较近,是由于其芳香烃组成比例、含量水平最为接近.可见,气体的芳香烃组成及含量水平会影响其电子鼻气味指纹.

### 2.3 挥发性芳香烃的组成、含量及其气味指纹之间的定量关系

从图 4 可知,在一定的浓度阈值内,电子鼻的响

应强度与挥发性芳香烃的组成、含量水平呈现自然对数关系,随着挥发性芳香烃浓度水平的不断提高,电子鼻的响应值也随之增高.模拟气体能够较好地模拟出沉砂池、曝气池、生化池、污泥浓缩池等 4 个处理车间排放的实际气体气味,模拟的气味强度和实际气体气味强度与浓度的定量曲线呈现平行增长的关系,具有很好的相关性,其中污泥浓缩池的模拟气体气味指纹与实际气体气味指纹的相关性尤为显著,达到 0.98,说明该样品挥发性芳香烃的气味指纹强度对该点恶臭气体的气味指纹强度有很大影响;而格栅与脱水机房的相关性较差,因为污水流经格栅进入污水处理系统,水中各种污染物相互作用,产生大量有刺激性气味的有机硫化物,而脱水机房的生活污泥含大量有机物,经离心脱水机的剧烈搅动,释放出大量的挥发性芳香烃及其他挥发性有机物,使其实际气体中的 VOCs 组成十分复杂,最后造成格栅和脱水机房与实际气体中含有除挥发性芳香烃之外的其它成分复杂的挥发性物质,干扰其挥发性芳香烃的气味指纹强度.

由于污水厂排放的废气中除了含有大量挥发性芳香烃之外,还含有烷烃、卤代烃、硫化物等其他气味物质的干扰,因此,实际气体样品的气味指纹要大于模拟气体的气味指纹.

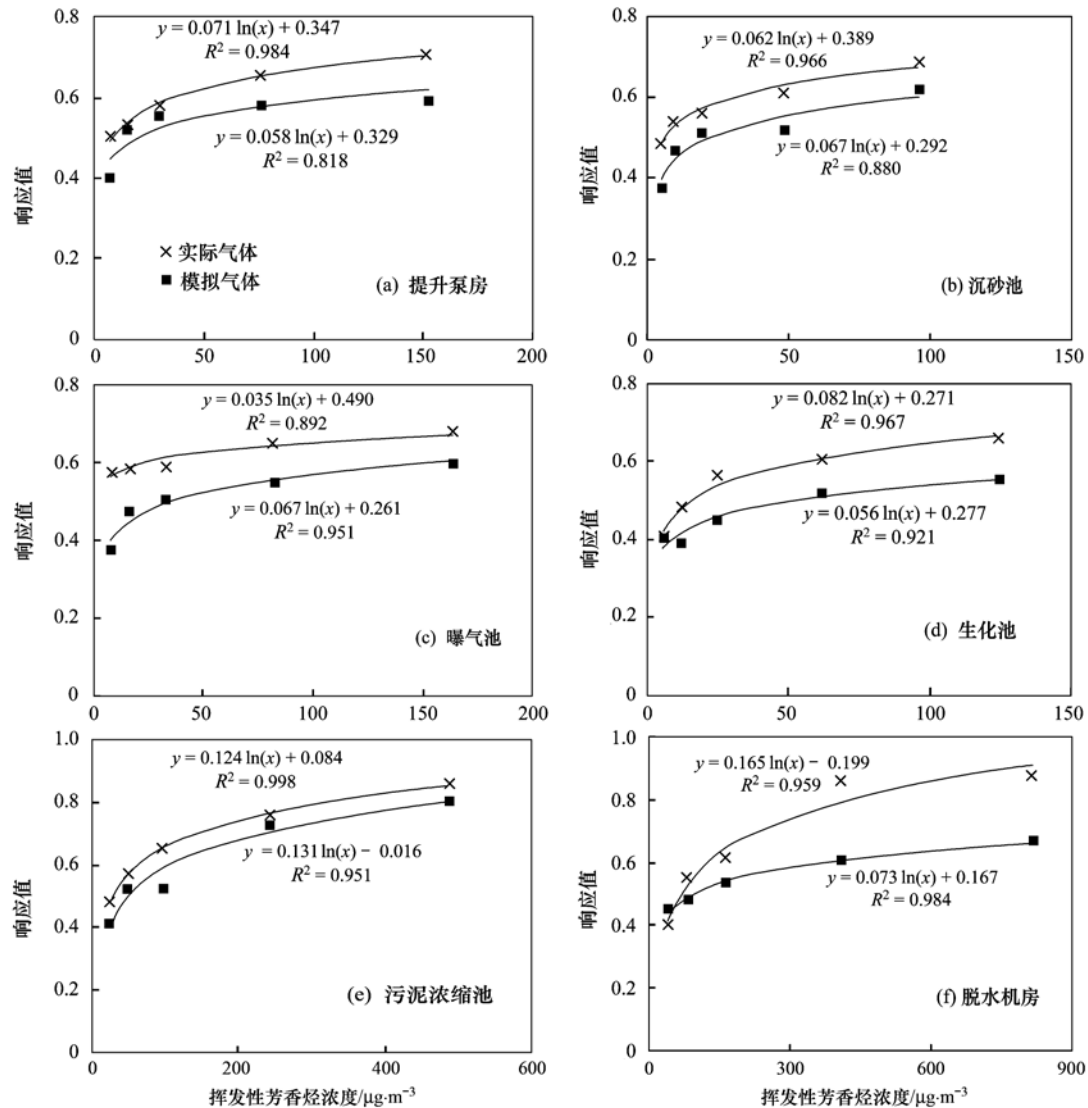


图4 实际气体与模拟气体的气味强度-浓度定量关系分析

Fig. 4 Intensity-concentration qualitative relationship analysis of real gases and simulated gases

### 3 结论

(1)挥发性芳香烃是污水处理厂最为常见的污染物,主要包括苯、甲苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯等,总浓度范围在  $96.61 \sim 818.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其在污泥浓缩池和污泥脱水机房中的排放浓度最高。

(2)主成分分析法能够很好地揭示各处理单元气体之间的气味指纹差异。值得指出的是,由于芳香烃组成和含量水平的差异,城市污水厂气味指纹的主成分按各样品芳香烃总浓度的相对高、中、低而分为3个区块。但是污泥浓缩池由于污泥停留时间长,易形成缺氧环境,导致大量卤代烃、有机硫化物等挥发性气体产生,造成其恶臭状况最为明显,影

响了分区。

(3)污水厂的气味指纹与其挥发性芳香烃的组成、含量水平呈现自然对数关系。从相关性分析可知芳香烃物种对各单元恶臭气体的气味指纹强度有很大影响,其中污泥浓缩池的实际气体气味指纹强度与模拟气体气味指纹强度相关性尤为显著,达到0.98;实际气体样品的气味指纹大于模拟气体的气味指纹。

#### 参考文献:

- [1] Onkal-Engin G, Demir I, Engin S N. Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(7): 843-850.
- [2] 唐小东,王伯光,赵德骏,等.城市污水处理厂的挥发性恶臭有机物组成及来源[J].中国环境科学,2011,31(4):

- 576-583.
- [ 3 ] 徐艳玲,程永清,秦华宇,等. 污水处理厂及其纳污水体中挥发性有机物[J]. 城市环境与城市生态, 2007, **20**(6): 32-35.
- [ 4 ] Dincer F, Muezzinoglu A. Chemical characterization of odors due to some industrial and urban facilities in Izmir, Turkey [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(22): 4210-4219.
- [ 5 ] Hamoda M F. Air pollutants emissions from waste treatment and disposal facilities[J]. Environmental Science and Health, 2006, **41**(1): 77-85.
- [ 6 ] 石磊. 恶臭污染测试与控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [ 7 ] 刘辉,牛智有. 电子鼻技术及其应用研究进展[J]. 中国测试, 2009, **35**(3): 6-10.
- [ 8 ] Bourgeois W, Stuetz R M. Use of a chemical sensor array for detecting pollutants in domestic wastewater[J]. Water Research, 2002, **36**(18): 4505-4512.
- [ 9 ] Rock F, Barsan N, Weimar U. Electronic nose: Current status and future trends[J]. Chemical Reviews, 2008, **108**(2): 705-725.
- [ 10 ] Laothawornkitkul J, Moore J P, Taylor J E, *et al.* Discrimination of plant volatile signatures by an electronic nose: a potential technology for plant pest and disease monitoring [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(22): 8433-8439.
- [ 11 ] Peris M, Escuder-Gilbert L. A 21st century technique for food control: electronic noses [J]. Analytica Chimica Acta, 2009, **638**(1): 1-15.
- [ 12 ] Sironi S, Capelli L, Céntola P, *et al.* Development of a system for the continuous monitoring of odours from a composting plant: Focus on training, data processing and results validation methods [J]. Sensor and Actuators B-Chemical, 2006, **124**(2): 336-346.
- [ 13 ] Littarru P. Environmental odours assessment from waste treatment plants: Dynamic olfactometry in combination with sensorial analysers "electronic noses" [J]. Waste Management, 2007, **27**(2): 302-309.
- [ 14 ] Sohn J H, Hudson N, Gallagher E, *et al.* Implementation of an electronic nose for continuous odour monitoring in a poultry shed [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2008, **133**(1): 60-69.
- [ 15 ] Romain A C, Godefroid D, Nicolas J. Monitoring the exhaust air of a compost pile with an e-nose and comparison with GC-MS data [J]. Sensors and Actuators B-chemical, 2005, **106**(1): 317-324.
- [ 16 ] Wilson A D, Baietto M. Applications and advances in electronic-Nose technologies[J]. Sensors, 2009, **9**(7): 5099-5148.
- [ 17 ] Gostelow P, Parsons S A, Stuetz R M. Odour measurements for sewage treatment works [J]. Water Research, 2001, **35**(3): 579-597.
- [ 18 ] Shinichi A, Hiroyuki S, Daiya B. Analysis of odor compounds in sewerage process water and Deodor methods[J]. Journal of Japan Society on Water Environment, 2004, **27**(10): 643-649.
- [ 19 ] 马涛,刁锐. 城市污水处理厂恶臭对大气环境的影响与防治措施研究[J]. 内蒙古环境, 2009, **21**(4): 82-86.
- [ 20 ] Dutta R, Hines E L, Gardner J W, *et al.* Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: an artificial intelligence approach [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2003, **94**(2): 228-237.
- [ 21 ] 刘舒乐,王伯光,何洁,等. 城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3582-3587.
- [ 22 ] 朱先约,宗永立,李炎强,等. 利用电子鼻区分不同国家的烤烟[J]. 烟草科技, 2008, **248**(3): 27-30.
- [ 23 ] 海铮. 基于电子鼻的牛肉新鲜度检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. 12-14.
- [ 24 ] 贾洪峰,卢一,何江红,等. 肉类电子鼻识别模型的建立[J]. 食品与机械, 2011, **27**(3): 96-97.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                               |                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....                                                                                                                 | XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)                           |
| Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....                                                                                      | ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)              |
| Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....                                                | XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)           |
| Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....                                                                   | ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)                              |
| Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....                                                                                          | DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)        |
| Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....                                                                                                        | XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)             |
| Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....                                                                                                            | YU Jie, LI Huai-en (1700)                                             |
| Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 ..... | YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)              |
| Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....                        | HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)       |
| Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....                                                                                  | CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)              |
| Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....                                                                   | WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)           |
| Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....                                                                                | YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)                        |
| Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....                                                                                        | YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)       |
| Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....                                                                                 | LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)                   |
| Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....                                                              | MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)         |
| Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....                  | HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)           |
| Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....                                                        | MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)          |
| Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....                                                                                         | KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)          |
| Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....                                                                                   | LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)       |
| Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....                                                                               | JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)     |
| Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....                                                                                 | WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)          |
| Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....                                                                         | ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)       |
| Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....                                                                                      | MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)        |
| Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....                                                                             | ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)     |
| Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....                                                                                        | YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)                |
| Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....                               | LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)            |
| Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....                                                                       | ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)      |
| Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....                                                               | CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)          |
| Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....                                   | XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)         |
| Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....                                                                         | ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)        |
| Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....                                                 | SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)                           |
| QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....                                                                                                      | ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882) |
| Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....                                | FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)          |
| Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....          | GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)              |
| Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....                                                                                           | ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)            |
| Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....                                                                 | WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)       |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....                                       | GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)            |
| Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....                                                       | SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)       |
| Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....                                             | LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)        |
| Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....                                                                           | CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)                   |
| Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....                                                                                               | ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)           |
| Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....                                                                  | PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)            |
| Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....                                                                                    | CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)    |
| Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....                                                                                                       | SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)           |
| Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....                                       | WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)                 |
| Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....                                                          | TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)      |
| Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....                | CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)      |
| Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....                                                                                   | YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)              |
| Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....                          | CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)           |
| Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....                                                                 | QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)                        |
| Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....                                                                                 | LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)                |
| <i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....                                                                            | GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)               |
| Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....                                                                                                 | FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)          |
| Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....                                                   | GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)          |
| Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....                                                                        | LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)        |
| Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....                                                                                                       | LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)                                     |
| Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....                             | XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)                                            |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

( HUANJING KEXUE )

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                    |                  |    |                                                                                                                                                                                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                              | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                            |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                      | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                            |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                              | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                         |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                               | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                         |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                            | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                           |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                            | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                         |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                               | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                              |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                            | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                        |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                           | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                     |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行