

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                              |                                                       |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 .....                                      | 包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 ( 1 )                     |
| 中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 .....                              | 林海涛, 李琦路, 张干, 李军 ( 10 )                               |
| 广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究 .....                               | 黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 ( 16 )                     |
| 南京地区大气 PM <sub>2.5</sub> 潜在污染源硫碳同位素组成特征 .....                | 石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 ( 22 )                          |
| 青奥会前后南京 PM <sub>2.5</sub> 重金属污染水平与健康风险评估 .....               | 张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 ( 28 )                              |
| 南昌市秋季大气 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素富集特征及来源分析 .....               | 林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 ( 35 )                         |
| 南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 .....                                   | 马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 ( 41 )                   |
| 边界层低空急流导致北京 PM <sub>2.5</sub> 迅速下降及其形成机制的个例分析 .....          | 廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 ( 51 )                         |
| 电厂燃煤烟尘 PM <sub>2.5</sub> 中化学组分特征 .....                       | 王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 ( 60 )                       |
| 2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析 .....                              | 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 ( 66 )  |
| APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估 .....                                 | 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 ( 74 )                             |
| 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 .....                                      | 王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 ( 82 )                  |
| 北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 .....                                     | 薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 ( 88 )             |
| 长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 .....                                     | 尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 ( 94 )                     |
| 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 .....                                      | 温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 ( 102 )                        |
| 查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性 .....                          | 李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 ( 112 )                   |
| 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例 .....                   | 孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 ( 123 )                   |
| 大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 .....                                 | 黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 ( 132 )                         |
| 西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 .....                                      | 杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝瑛, 陈琳 ( 141 )                    |
| 合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 .....                                | 樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 ( 148 )                            |
| 辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 .....                              | 王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 ( 156 )                            |
| 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 .....                                  | 黄廷林, 刘飞, 史建超 ( 166 )                                  |
| 低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 .....                         | 游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 ( 173 )                          |
| 北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 .....                                  | 王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 ( 180 )                         |
| 紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 .....                                     | 王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 ( 187 )                             |
| 二氧化钛光催化氧化阿散酸 .....                                           | 许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 ( 193 )                   |
| 紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 .....                                       | 段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 ( 198 )                             |
| 氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 .....                            | 林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 ( 208 )                             |
| 纳米 TiO <sub>2</sub> 吸附 HgCl <sub>2</sub> 水溶液中 Hg( II ) ..... | 周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 ( 220 )                |
| 好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 .....                                   | 周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 ( 228 )                        |
| 3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 .....                             | 古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 ( 240 )                   |
| Fe( II ) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 .....                         | 朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 ( 247 )                   |
| 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 .....                                 | 李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 ( 253 )         |
| 直链烷基苯指示城市化过程初步研究 .....                                       | 徐特, 曾辉, 倪宏刚 ( 262 )                                   |
| 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 .....                                  | 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 ( 270 )          |
| 水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 .....                               | 吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 ( 280 )           |
| 中水浇灌对土壤重金属污染的影响 .....                                        | 周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 ( 288 )                                 |
| 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 .....                                  | 安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 ( 293 )                              |
| 3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 .....                          | 彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 ( 301 )                       |
| 丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响 .....                               | 王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 ( 309 )                           |
| 珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 ( PAEs ) 污染分布特征 .....                    | 李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 ( 317 ) |
| 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 .....                             | 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 ( 325 )                          |
| 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 .....                     | 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 ( 335 )               |
| 序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 .....                                  | 李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 ( 342 )                         |
| 铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 .....                             | 杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 ( 350 )                             |
| 运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 .....                                   | 邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 ( 359 )                             |
| 通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 .....                             | 齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 ( 366 )          |
| 高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 .....                                      | 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 ( 377 )                |
| 应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体 .....                              | 王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 ( 384 )                   |
| 乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 .....                                | 娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 ( 391 )                          |
| 废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 .....                                | 楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 ( 397 )                   |

# 珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征

李彬<sup>1</sup>, 吴山<sup>1</sup>, 梁金明<sup>2</sup>, 邓杰帆<sup>3</sup>, 王珂<sup>1</sup>, 梁文立<sup>2</sup>, 曾彩明<sup>3</sup>, 彭四清<sup>1</sup>, 张天彬<sup>1</sup>, 杨国义<sup>1\*</sup>

(1. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650; 2. 中山市农业科技推广中心, 中山 528400; 3. 东莞市环境科学研究所, 东莞 523009)

**摘要:** 在珠江三角洲典型区域(中山市、珠海市、东莞市和惠州市)内共采集了 131 个农产品样品, 进行了 6 种优先控制污染物邻苯二甲酸酯 (PAEs) 含量水平分析及风险评价。结果表明, 珠三角地区农产品样品中 6 种邻苯二甲酸酯累计含量 ( $\sum$  PAEs) 范围为 nd ~ 79.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均含量为 2.84 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 98.5%。各类农产品中  $\sum$  PAEs 平均含量的顺序依次为蔬菜 (3.03 mg·kg<sup>-1</sup>) > 水稻 (2.52 mg·kg<sup>-1</sup>) > 水果 (1.26 mg·kg<sup>-1</sup>)。各城市产区内农产品中  $\sum$  PAEs 平均含量顺序为: 珠海 (6.53 mg·kg<sup>-1</sup>) > 东莞 (2.59 mg·kg<sup>-1</sup>) > 惠州 (1.53 mg·kg<sup>-1</sup>) > 中山 (1.12 mg·kg<sup>-1</sup>)。农产品中 PAEs 的主要成分为邻苯二甲酸二正丁酯 (DBP)、邻苯二甲酸二 (2-乙基) 己酯 (DEHP) 和邻苯二甲酸二正辛酯 (DnOP), 三者的累计含量占  $\sum$  PAEs 总量的 90.8%。其中生菜 (珠海) 和芥兰 (东莞) 二者中  $\sum$  PAEs 的总量以及生菜、油麦菜 (珠海) 样品中 DEHP 的含量均超过美国和欧洲的建议标准, 存在潜在的健康风险。芥兰、生菜等叶菜类蔬菜在 14 种不同蔬菜样品中的  $\sum$  PAEs 总量较高, 而菜心和苋菜的  $\sum$  PAEs 含量最低。蔬菜品种间结构特征和生长环境 (大气和土壤) 的差异是影响其对 PAEs 的吸收及在体内累积的主要因素。

**关键词:** 邻苯二甲酸酯; 农产品; 污染分布; 风险评价; 珠三角

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0317-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.041

## Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China

LI Bin<sup>1</sup>, WU Shan<sup>1</sup>, LIANG Jin-ming<sup>2</sup>, DENG Jie-fan<sup>3</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, LIANG Wen-li<sup>2</sup>, ZENG Cai-ming<sup>3</sup>, PENG Si-qing<sup>1</sup>, ZHANG Tian-bin<sup>1</sup>, YANG Guo-yi<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Zhongshan Agricultural Science and Technology Promotion Center, Zhongshan 528400, China; 3. Dongguan Research Institute of Environmental Science, Dongguan 523009, China)

**Abstract:** In order to investigate and assess the distribution of phthalic acid esters (PAEs) in agricultural products from typical areas of the Pearl River Delta, South China, 131 agricultural products were sampled for determination of 6 PAEs priority pollutants classified by the U. S. EPA by GC-FID. The results showed that the total contents of the PAEs ( $\sum$  PAEs) in agricultural products samples ranged from nd to 79.86 mg·kg<sup>-1</sup>, and the mean value was 2.84 mg·kg<sup>-1</sup>, with the detected ratio of 98.5%. The average concentrations of  $\sum$  PAEs in different types of agricultural products were ordered by vegetables (3.03 mg·kg<sup>-1</sup>) > rice (2.52 mg·kg<sup>-1</sup>) > fruits (1.26 mg·kg<sup>-1</sup>). The mean concentration of PAEs distributed in the four typical cities of the Pearl River Delta, and decreased in the sequence of Zhuhai (6.53 mg·kg<sup>-1</sup>) > Dongguan (2.59 mg·kg<sup>-1</sup>) > Huizhou (1.53 mg·kg<sup>-1</sup>) > Zhongshan (1.12 mg·kg<sup>-1</sup>). Di-n-butyl phthalate (DBP), di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) and di-n-octyl phthalate (DnOP) contributed more than 90.8% of the total PAEs in samples, and were the main components of PAEs in agricultural products from the Pearl River Delta, with higher percentage contents and detected ratio. Meanwhile, the average concentrations of  $\sum$  PAEs in cabbage mustard, lettuce occurred in Zhuhai and Dongguan cities, followed by lettuce and leaf lettuce in the corresponding DEHP from Zhuhai city, both exceeded the suggested standards in USA and Europe and were of high health risk. There were significant differences among 14 various vegetables in the contents of the 6 PAEs compounds, and the  $\sum$  PAEs contents in cabbage mustard and lettuce as part of leafy vegetables were higher than those in other vegetables, while the lowest were detected in flowering cabbage and edible amaranth.

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-08-17

基金项目: 广东省科技计划项目 (2013B020700002); 中山市科技项目 (2013A3FC0233)

作者简介: 李彬 (1988 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤环境污染修复, E-mail: lishite@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: gyyang@soil.cn

Therefore, the type of vegetables and its growing environment exposed to the atmosphere and soil were the main factors that significantly affected their accumulation of PAEs concentrations.

**Key words:** phthalic acid esters (PAEs); agricultural products; pollution distribution; risk assessment; Pearl River Delta

在塑料、化肥、农药、玩具、化妆品、清洁剂及涂料等行业中邻苯二甲酸酯(phthalic acid esters, PAEs)均得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。塑料加工过程中, PAEs 作为增塑剂仅与产品分子进行物理结合,并未通过化学作用键合到产品的高分子碳链上。随着时间的推移, PAEs 可不断从塑料产品中释出,并经过淋溶、挥发和沉降等过程进入土壤、水体和大气等环境介质中。有研究表明<sup>[4,5]</sup>, PAEs 是一类在环境中长期残留、具有生物累积性、半挥发性和高毒性的环境类激素,进入食物链后可危害人体的健康安全。目前, PAEs 已成为全球性的环境污染物,在土壤<sup>[6,7]</sup>、空气<sup>[8]</sup>、水体<sup>[9]</sup>、河流底泥<sup>[10,11]</sup>和农产品中<sup>[12-14]</sup>都已被检测出,美国国家环保署(EPA)已将其其中 6 种 PAEs 列为优先控制的有毒污染物。

近年来,对土壤中 PAEs 成分的系统性和区域性以及在土壤-蔬菜中的迁移、分配和富集等方面做了较多的研究<sup>[15-20]</sup>,而对典型区域农产品(蔬菜、粮食作物、水果)中多种 PAEs 成分的系统性调查和人体健康风险评价等方面研究却很少。珠三角地区是中国经济发达地区,同时也是广东省重要的农产品生产基地,随着工业化和城市化的快速发展,特别是塑料行业的快速发展,使得塑料中 PAEs 对该地区环境质量产生的影响还需进一步研究。因此,本研究在珠三角典型区域内(东莞、珠海、中山、惠州)采集了 131 个农产品样品,测定了 EPA 规定优先监测的 6 种 PAE 化合物含量,通过调查珠三角地区农产品中 PAEs 污染现状、污染程度,进一步探讨 PAEs 对农产品及当地居民潜在的生态与健康风险,以期为珠三角典型区域内农产品质量安全风险防控提供基础科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

根据珠三角的工业、农业生产布局、种植类型和代表性等因素,采样点分布在面积较大的农产品生产基地,具体包括中山市( $n = 37$ )、珠海市( $n = 28$ )、惠州市( $n = 22$ )和东莞市( $n = 44$ ),其中东莞市、惠州市属于东江流域,中山市和珠海市属于西、北江流域。农产品样品采集于作物收获盛期,采集部位为可食用部分,采集品种包括蔬菜(如:白菜、油麦菜、菜心、生菜、芥兰、芥菜、豆角、蕹菜、苋菜、辣椒、蒲瓜、茄瓜、丝瓜和苦瓜等)、水稻和水果(如香蕉、甘蔗)等 3 类,共采集农产品样品 131 个,每个样品采集 2 kg 左右。

将采集的农产品样品尽快运回实验室,先用自来水洗净,再用双蒸水冲洗,然后将样品放入恒温烘箱中,在 70℃ 下干燥除去水分,待完全干燥后取出用组织破碎机粉碎成粉末。

### 1.2 试剂

有机溶剂二氯甲烷、丙酮等均为分析纯,经过全玻璃蒸馏系统二次蒸馏,经色谱检验无杂峰。正己烷、甲醇为色谱纯。层析用硅胶(80~100 目)依次用二氯甲烷和甲醇进行索氏抽提各 12 h 后,于 130~140℃ 下烘 4 h,保存。氧化铝(100~200 目)在马福炉内于 250℃ 烘 12 h,冷却后保存备用。无水硫酸钠(分析纯)于 450℃ 马福炉中灼烧 6 h,冷却备用。6 种 PAEs 标样(PT806121M)质量浓度为 1 mg·mL<sup>-1</sup>,购自 Chem Service 公司,主要环境参数如表 1 所示。苯甲酸苯甲酯为实验内标物(纯品),回收率指示物(纯品)为间苯二甲酸二苯酯。

表 1 珠江三角洲典型区域农产品中 PAEs 的含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 1 Concentrations of PAEs in agriculture products in Pearl River Delta/mg·kg<sup>-1</sup>

| 中文名称           | 缩写     | 相对分子质量 | 含量         |      |      |           |       |
|----------------|--------|--------|------------|------|------|-----------|-------|
|                |        |        | 范围         | 平均值  | 标准差  | 变异系数 CV/% | 检出率/% |
| 邻苯二甲酸二甲酯       | DMP    | 194.19 | nd ~ 0.77  | 0.08 | 0.12 | 152.29    | 48.9  |
| 邻苯二甲酸二乙酯       | DEP    | 222.24 | nd ~ 1.92  | 0.05 | 0.21 | 441.76    | 13.7  |
| 邻苯二甲酸二正丁酯      | DBP    | 278.35 | nd ~ 6.73  | 0.84 | 1.19 | 140.76    | 77.1  |
| 邻苯二甲酸丁基苄基酯     | BBP    | 312    | nd ~ 2.85  | 0.14 | 0.30 | 216.83    | 67.9  |
| 邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯 | DEHP   | 390.56 | nd ~ 38.05 | 0.70 | 3.58 | 514.28    | 77.9  |
| 邻苯二甲酸二正辛酯      | DnOP   | 390.56 | nd ~ 79.86 | 1.03 | 7.27 | 708.41    | 32.8  |
| 邻苯二甲酸酯总量       | ∑ PAEs |        | nd ~ 79.86 | 2.84 | 9.34 | 329.21    | 98.5  |

### 1.3 样品处理

准确称取研磨好的农产品粉末样品 5 g 于索氏抽滤筒中, 在 250 mL 平底烧瓶中加入 200 mL 二氯甲烷、2 g 活化铜片和回收率指示物后在水浴锅上连续提取 48 h. 水浴温度和冷却循环水温度分别保持在 46℃ 和 10℃, 回流速度为 5~6 次·h<sup>-1</sup>. 提取液在旋转蒸发器上浓缩到 1 mL 后, 加入 10 mL 正己烷进行溶剂转换, 并氮吹浓缩至 1~2 mL. 将浓缩后的抽提液过硅胶/氧化铝 (H/H=2:1) 层析柱, 采用正己烷湿法装柱, 用 40 mL 丙酮/正己烷 (2:8, 体积比) 淋洗出邻苯二甲酸酯. 收集全部洗脱液旋转蒸发至 0.2 mL, 并加入内标物进行定量分析.

### 1.4 测定条件

采用 SHIMADZU GC-2010 气相色谱仪 (岛津公司), 火焰光度检测器 (FID), DB-5 弹性石英毛细管柱 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm) (J&WCo, USA). 进载气与补充气均为 N<sub>2</sub> (纯度 > 99.9995%), 不分流进样, 进样口温度 250℃, 进样量 1 μL, 柱流量 2.5 mL·min<sup>-1</sup>, 检测器温度 310℃, 柱温箱程序升温: 初始温度 100℃, 保留 5 min, 以 6℃·min<sup>-1</sup> 升到 290℃, 保持 10 min. 配制 PAEs 化合物标样标准工作曲线, 分别为 0、100、500、1 000、5 000 ng·mL<sup>-1</sup>. 整个实验过程以间苯二甲酸二苯酯为样品的内标指示物, 以监控整个分析流程的回收率.

### 1.5 质量控制与保证

整个过程杜绝使用任何塑料制品, 玻璃仪器经铬酸洗液浸泡, 蒸馏水洗涤和有机溶剂淋洗后烘干备用, 所有有机溶剂经全玻璃系统二次重蒸. 样品分析前做仪器程序空白, 加标空白、加标基质样和平行样分析. 每一批次 14 个样品中均加入间苯二甲酸二苯酯, 以监控整个流程的回收率. 分析结果显示, 间苯二甲酸二苯酯的空白加标回收率为 81.27%~101.64% (RSD < 7.91%), 间苯二甲酸二苯酯的样品加标回收率为 82.97%~105.26% (RSD < 4.76%).

### 1.6 数据处理

使用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行单因素方差分析. 平行样的测定用平均值表示, 低于分析方法检出限的测定值按“≤检出限”表示, 参加统计时按二分之一最低检出限计算, 在计算检出率时, 按未检出统计.

## 2 结果与讨论

### 2.1 农产品样品中 PAEs 成分的总体分布

在所采集的 131 个农产品样品中, 6 种邻苯二甲

甲酸酯累计含量 (∑PAEs) 范围为 nd~79.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 2.84 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 98.5% (表 1). 其中 6 种 PAEs 单体化合物均被检出.

如表 1 所示, 各 PAEs 单体含量及检出率存在一定差异. DMP 含量范围为 nd~0.77 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.08 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 48.9%; DEP 含量为 nd~1.92 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 13.7%; DBP 含量为 nd~6.73 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.84 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 77.1%; BBP 含量范围为 nd~2.85 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.14 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 67.9%; DEHP 含量范围为 nd~38.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.7 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 77.9%; DnOP 含量范围为 nd~79.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 1.03 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 32.8%. 由图 1 可知农产品中 6 种 PAEs 的质量分数, 其中 DnOP 最高, 占 PAEs 总量的 36.5%, 其次是 DBP, 占总量的 29.8%, 而 DEHP 也占总量的 24.5%, 三者之和占到 ∑PAEs 总量的 90.8%. 因此, 珠江三角洲典型区域内农产品样品中的 PAEs 化合物含量以 DBP、DEHP 和 DnOP 为主.

### 2.2 不同类型农产品中检出的 PAEs 及含量特征

如表 2 所示, 6 种 PAEs 在蔬菜、水果和水稻样品中均有检出. 其中蔬菜中 ∑PAEs 的含量范围为 nd~79.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 3.03 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率为 98.1%, 水稻与水果中 ∑PAEs 的含量范围分别为 0.73~7.01 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.13~6 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 2.52 mg·kg<sup>-1</sup> 和 1.26 mg·kg<sup>-1</sup>, 检出率均为 100%, 其平均含量的顺序依次为: 蔬菜 (3.03 mg·kg<sup>-1</sup>) > 水稻 (2.52 mg·kg<sup>-1</sup>) > 水果 (1.26

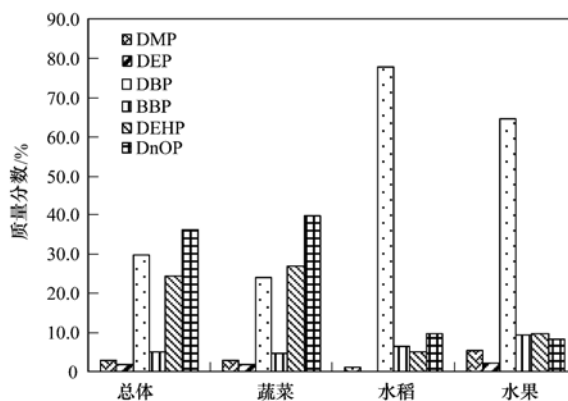


图 1 珠三角农产品中 PAEs 的质量分数

Fig. 1 Percentage content of individual PAEs in agricultural products of different types

mg·kg<sup>-1</sup>), 见表 2, 其中蔬菜与水果中  $\sum$  PAEs 的含量有显著差异.

表 2 珠江三角洲农业区域中各类农产品 PAEs 含量与检出率<sup>1)</sup>

Table 2 Concentration and detected ratio of PAEs in different types of agricultural products from Pearl River Delta

| 农产品<br>(样品数) | 项目       | DMP          | DEP          | DBP          | BBP          | DEHP         | DnOP         | $\sum$ PAEs   |
|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 蔬菜(101)      | <i>R</i> | nd ~ 0.77    | nd ~ 1.92    | nd ~ 5.92    | nd ~ 2.85    | nd ~ 38.05   | nd ~ 79.86   | nd ~ 80       |
|              | <i>M</i> | 0.09 ± 0.13a | 0.05 ± 0.23a | 0.72 ± 1.01b | 0.14 ± 0.33a | 0.82 ± 3.93a | 1.21 ± 8a    | 3.03 ± 10.25a |
|              | 检出率/%    | 51.9         | 13.0         | 75.9         | 65.7         | 76.9         | 29.6         | 98.1          |
| 水稻(12)       | <i>R</i> | nd ~ 0.16    | nd           | 0.64 ~ 6.73  | nd ~ 0.65    | nd ~ 0.31    | nd ~ 1.69    | 0.73 ~ 7.01   |
|              | <i>M</i> | 0.03 ± 0.06a | nd           | 1.96 ± 1.83a | 0.16 ± 0.17a | 0.12 ± 0.08b | 0.24 ± 0.47b | 2.52 ± 2.11ab |
|              | 检出率/%    | 25.0         | 0            | 100          | 91.7         | 91.7         | 58.3         | 100           |
| 水果(11)       | <i>R</i> | nd ~ 0.07    | nd ~ 0.09    | nd ~ 4.91    | nd ~ 0.28    | nd ~ 0.43    | nd ~ 0.5     | 0.13 ~ 6      |
|              | <i>M</i> | 0.07 ± 0.08a | 0.03 ± 0.04a | 0.81 ± 1.42b | 0.12 ± 0.1a  | 0.12 ± 0.13b | 0.1 ± 0.17b  | 1.26 ± 1.63b  |
|              | 检出率/%    | 45.5         | 36.4         | 63.6         | 72.7         | 72.7         | 36.4         | 100           |

1) nd:未检测出; *R*:范围 (mg·kg<sup>-1</sup>); *M*:平均值 ± 标准差 (mg·kg<sup>-1</sup>); 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); 下同

由表 2 可知,不同农产品中 6 种 PAEs 的含量特征不同,其中蔬菜中的 DEHP 和 DnOP 含量分别为 0.82 mg·kg<sup>-1</sup>和 1.21 mg·kg<sup>-1</sup>,高于水稻(0.12 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.24 mg·kg<sup>-1</sup>)和水果(0.12 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.1 mg·kg<sup>-1</sup>);水稻中 DBP 含量(1.96 mg·kg<sup>-1</sup>)则高于蔬菜(0.72 mg·kg<sup>-1</sup>)和水稻(0.81 mg·kg<sup>-1</sup>);三者中 DMP、DEP 和 BBP 含量无显著差异;而水稻中并未检出 DEP. 不同农产品中 PAEs 的质量分数分布也呈现不同特征. 由图 1 可知,蔬菜样品中 PAEs 以 DnOP(39.8%)、DEHP(27%)和 DBP(23.9%)为主,三者之和占总量的 90.7%,而水稻和水果中的 PAEs 化合物均以 DMP 为主,分别占总量的 77.6%和 64.6%. 因此,蔬菜中 PAEs 单体化合物的质量分数与水稻、水果呈现不同的特征.

土壤中的 PAEs 可来自大气中 PAEs 的沉降、污水灌溉和污泥农用、化肥、粪肥和农药的施用,以及堆积的农田塑料薄膜和塑料废品等长期受雨水浸淋对土壤生成的污染<sup>[18,21]</sup>. 而 PAEs 进入土壤或大气环境后,能通过茎叶直接吸收大气中原有的 PAEs 和土壤中挥发出的 PAEs 或从土壤中通过根系吸收或吸附 PAEs 然后滞留在根的表层,或穿过根皮层而进入木质部,通过根毛细胞的作用累积于作物体内<sup>[3,22]</sup>. 珠三角地区农产品基地特别是蔬菜基地通常位于市郊或城乡的结合部,易受到城市“三废”的影响. 另外,珠三角地区蔬菜的种植使用塑料大棚、地膜、高产增效剂等非常普遍,使用水平也比果园要高,这些都有可能导致蔬菜中 PAEs 的浓度水平高于其他种类农产品.

### 2.3 不同种类蔬菜中检出的 PAEs 及含量

蔬菜作为珠三角地区最重要的一类农产品,且采集的种类和数目众多,因此有必要对不同蔬菜种类间 PAEs 含量进行分析. 表 3 列出了采集的 14 种不同蔬菜种类中 6 种 PAEs 的含量范围和平均值. 在所测定的 14 种蔬菜中(如图 2),芥兰、生菜等叶菜类的  $\sum$  PAEs 含量最高,其含量分别为 11.19 mg·kg<sup>-1</sup>、7.58 mg·kg<sup>-1</sup>,蒲瓜是  $\sum$  PAEs 含量最高的茄果类蔬菜,含量为 5.72 mg·kg<sup>-1</sup>,而菜心和苋菜两类的  $\sum$  PAEs 含量最低,仅为 0.46 mg·kg<sup>-1</sup>、0.51 mg·kg<sup>-1</sup>.

白菜、芥兰等叶菜类蔬菜中 DMP 含量最高,分别为 0.12 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.11 mg·kg<sup>-1</sup>,而蒲瓜、苋菜、辣椒、丝瓜和苦瓜等 5 类蔬菜样品中均未检测出;油麦菜和芥菜中 DEP 含量最高,分别为 0.22 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.13 mg·kg<sup>-1</sup>,其中有 9 种蔬菜样品中均未检测 DEP;对于 DBP 而言,蒲瓜中含量最高,

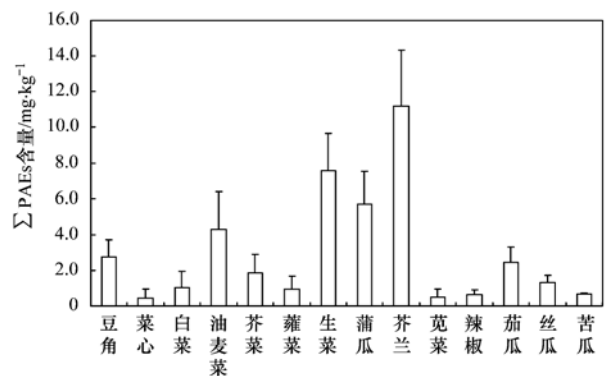


图 2 14 种蔬菜中的  $\sum$  PAEs 含量

Fig. 2 Concentrations of 6 PAEs compounds in fourteen vegetables

为  $3.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而菜心和苋菜两类蔬菜的 DBP 含量最低, 分别为  $0.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; BBP 在生菜中含量最高, 为  $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而在白菜、芥兰中 BBP 含量最低, 分别为  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 生菜中 DEHP 含量最高, 为  $4.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而辣椒和苦瓜中 DEHP 含量最低, 分别为  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 对于 DnOP 而言, 芥兰样品中含量最高, 为  $9.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而 DnOP 在薹菜、苋菜、辣椒和苦瓜中均未检出. 因此, 各类蔬菜对 PAEs 各化合物的吸收表现出不同的特征.

表 3 珠三角农业区域中各类蔬菜中 PAEs 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Table 3 Concentration of PAEs in vegetables from Pearl River Delta/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 农产品<br>(样品数) | 项目 | DMP             | DEP             | DBP             | BBP             | DEHP             | DnOP             |
|--------------|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 豆角(7)        | R  | nd ~0.17        | nd ~0.25        | 0.9 ~4.38       | nd ~0.51        | 0.11 ~0.93       | nd ~1.57         |
|              | M  | $0.09 \pm 0.07$ | $0.04 \pm 0.1$  | $1.76 \pm 1.43$ | $0.14 \pm 0.17$ | $0.4 \pm 0.32$   | $0.32 \pm 0.56$  |
| 菜心(11)       | R  | nd ~0.21        | nd              | nd ~0.92        | nd ~0.23        | nd ~0.49         | nd ~0.1          |
|              | M  | $0.05 \pm 0.07$ | nd              | $0.22 \pm 0.35$ | $0.07 \pm 0.08$ | $0.11 \pm 0.15$  | $0.01 \pm 0.03$  |
| 白菜(18)       | R  | nd ~0.33        | nd              | nd ~3.18        | nd ~0.18        | nd ~0.84         | nd ~0.26         |
|              | M  | $0.12 \pm 0.1$  | nd              | $0.61 \pm 0.78$ | $0.05 \pm 0.06$ | $0.23 \pm 0.28$  | $0.02 \pm 0.06$  |
| 油麦菜(15)      | R  | nd ~0.19        | nd ~1.92        | nd ~4.93        | nd ~1.47        | nd ~11.41        | nd ~11.35        |
|              | M  | $0.05 \pm 0.07$ | $0.22 \pm 0.51$ | $0.72 \pm 1.37$ | $0.22 \pm 0.44$ | $1.65 \pm 3.9$   | $1.42 \pm 3.65$  |
| 芥菜(6)        | R  | nd ~0.25        | nd ~0.79        | 0.23 ~1.44      | nd ~0.28        | nd ~3.27         | nd ~1.79         |
|              | M  | $0.04 \pm 0.1$  | $0.13 \pm 0.32$ | $0.52 \pm 0.47$ | $0.15 \pm 0.11$ | $0.68 \pm 1.29$  | $0.32 \pm 0.72$  |
| 薹菜(7)        | R  | nd ~0.14        | nd              | nd ~1.26        | nd ~0.47        | 0.08 ~0.41       | nd               |
|              | M  | $0.08 \pm 0.06$ | nd              | $0.43 \pm 0.48$ | $0.24 \pm 0.17$ | $0.21 \pm 0.11$  | nd               |
| 生菜(9)        | R  | nd ~0.12        | nd ~0.75        | nd ~1.57        | nd ~2.85        | nd ~38.05        | nd ~19.98        |
|              | M  | $0.05 \pm 0.05$ | $0.08 \pm 0.25$ | $0.53 \pm 0.48$ | $0.33 \pm 0.94$ | $4.35 \pm 12.64$ | $2.24 \pm 6.65$  |
| 蒲瓜(4)        | R  | nd              | nd ~0.09        | 0.53 ~5.92      | 0.22 ~0.31      | 0.37 ~1.86       | 0.43 ~1.67       |
|              | M  | nd              | $0.05 \pm 0.07$ | $3.23 \pm 3.81$ | $0.27 \pm 0.06$ | $1.11 \pm 1.05$  | $1.05 \pm 0.87$  |
| 芥兰(8)        | R  | nd ~0.17        | nd              | nd ~1.75        | nd ~0.07        | nd ~0.78         | nd ~79.86        |
|              | M  | $0.11 \pm 0.06$ | nd              | $0.63 \pm 0.68$ | $0.02 \pm 0.03$ | $0.44 \pm 0.25$  | $9.98 \pm 28.24$ |
| 苋菜(5)        | R  | nd              | nd              | 0.18 ~0.39      | nd ~0.21        | nd ~0.21         | nd               |
|              | M  | nd              | nd              | $0.28 \pm 0.15$ | $0.11 \pm 0.15$ | $0.1 \pm 0.15$   | nd               |
| 辣椒(4)        | R  | nd              | nd              | 0.22 ~0.8       | nd ~0.21        | nd ~0.04         | nd               |
|              | M  | nd              | nd              | $0.51 \pm 0.42$ | $0.1 \pm 0.15$  | $0.02 \pm 0.03$  | nd               |
| 茄瓜(4)        | R  | nd ~0.25        | nd              | 0.26 ~3.25      | 0.18 ~0.35      | 0.14 ~0.77       | nd ~0.28         |
|              | M  | $0.08 \pm 0.12$ | nd              | $1.47 \pm 1.46$ | $0.26 \pm 0.07$ | $0.46 \pm 0.34$  | $0.16 \pm 0.12$  |
| 丝瓜(5)        | R  | nd              | nd              | 0.43 ~1.42      | nd ~0.26        | 0.11 ~0.45       | nd ~0.61         |
|              | M  | nd              | nd              | $0.83 \pm 0.41$ | $0.08 \pm 0.11$ | $0.24 \pm 0.14$  | $0.15 \pm 0.26$  |
| 苦瓜(5)        | R  | nd              | nd              | 0.45 ~0.54      | nd ~0.21        | 0.05 ~0.09       | nd               |
|              | M  | nd              | nd              | $0.49 \pm 0.06$ | $0.1 \pm 0.15$  | $0.07 \pm 0.03$  | nd               |

在相同生长环境下,蔬菜的种间差异即蔬菜自身的生理结构特征(如:叶面积大小,叶面绒毛、叶片形状、根系类型、所含的亲脂性物质种类及其含量等)和生长期(叶龄)是影响其对 PAEs 的吸收及在体内的累积主要因素<sup>[23]</sup>. 此外,蔬菜的生长环境、污染源的距離以及气象条件(常年风向)也会直接影响蔬菜中的 PAEs 含量. 王家文等<sup>[24]</sup>对塑料厂工业区附近农田蔬菜内部组织及其生长环境(大气和土壤)中 DEHP 的浓度水平进行了研究,结果表明,实验组工业区中蔬菜可食用部分 DEHP 浓度为  $0.23 \sim 9.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远远高于对照组蔬菜中 DEHP 的浓度水平,蔬菜各部分中 DEHP 的含量为叶菜类 > 果菜类 > 根茎类,随着采样点距工业区的距离增大,蔬菜可食用部分中 DEHP 的浓度水平也逐渐降低. 大气沉降也是蔬菜累积 DEHP 的最主要途径. 而曾巧云等<sup>[25]</sup>对菜心中邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收途径进行了初步研究,结果表明:菜心根系和茎叶可以吸收累积 PAEs 化合物,并与土壤污染程度成正

比,但根系吸收运移是茎叶中 PAEs 化合物的主要来源途径. 此外,植物累积 DEHP 的能力与其脂肪含量呈正相关,当脂肪含量相近时,表面粗糙或具有细密绒毛的叶片富集 DEHP 的能力较强<sup>[1, 22]</sup>.

2.4 不同农产品中检出的 PAEs 及含量的地区特征

珠三角不同城市区域内农产品中 PAEs 的含量状况如表 4 所示. 中山市农产品中  $\sum$  PAEs 的含量范围为 0.15 ~ 3.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 1.12  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 检出率为 100%; 珠海市和惠州市农产品中  $\sum$  PAEs 的含量范围分别为 0.05 ~ 63.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.18 ~ 7.01  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 6.53 和 1.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 检出率均为 100%; 东莞市农产品中  $\sum$  PAEs 的含量范围为 nd ~ 79.86  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 2.59  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 检出率为 95.5%. 珠三角农产品中  $\sum$  PAEs 平均含量的顺序依次为: 珠海 (6.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 东莞 (2.59  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 惠州 (1.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 中山 (1.12  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (表 4), 将  $\sum$  PAEs 在城市农产品中的含量进行统计分析, 珠海市农产品中  $\sum$  PAEs 的平均含量均高于其它城市, 其中珠海与中山市农产品中  $\sum$  PAEs 的平均含量有显著差异.

道路、交通以及城市化与工业化的影响因素也是影响植物中 PAEs 污染水平的重要因素. 东莞市经济发展较快, 集中了珠江三角洲较多的工业企业 (如印刷厂、漂染厂、皮革厂、电镀厂、玩具厂、塑胶厂、玻璃厂等), 这些企业会使用并产生大量的废

弃塑料, 从而直接影响该地区土壤和大气环境中 PAEs 的含量, 使得农产品中 PAEs 残留量较高. 珠海市第三产业经济发展迅速, 但随着城市人口的增长, 城市生活垃圾的排放量急剧增加, 同时作为农产品主要基地的斗门区却集中了大量的工业企业, 产生的工业固体废弃物以及生活垃圾都对珠海市农产品中 PAEs 的含量水平产生影响. 中山市是珠三角重要的农产品产区, 也是向港澳地区供给农产品的重要生产基地, 近年来该市对环境保护较为重视, 曾于 1997 年获联合国人类居住环境最佳范例奖<sup>[17]</sup>, 而惠州市多山, 经济发展相对滞后, 工业不甚发达, 因此惠州和中山二者农产品中 PAEs 的含量相对较低.

由表 4 可知, 除 DnOP 外, 剩余 5 种 PAEs 化合物在珠海市农产品中的平均含量分别为 0.14、0.21、1.64、0.35 和 2.39  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  均高于其他城市, 且与中山市农产品中 PAEs 的含量有显著差异; 东莞市农产品中 DnOP 的平均含量为 1.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 和其他城市相比并无显著差异; 而惠州市农产品中未检出 DEP. 对比图 3 中珠三角 4 个典型城市区域内农产品中 PAEs 的质量分数, 中山和惠州农产品样品中 PAEs 均以 DBP 为主, 分别占总量的 57% 和 75.6%; 而东莞农产品中 PAEs 以 DnOP (70.3%) 为主, 其次是 DBP, 占总量的 14%; 珠海市农产品中以 DEHP (36.6%)、DnOP (27.6%) 和 DBP (25.1%) 为主, 三者之和占总量的 89.3%. 因此, 不同城市区域内农产品中 PAEs 单体化合物的质量分数均呈现不同的特征.

表 4 珠三角不同城市农业区域中各类农产品 PAEs 含量与检出率

| Table 4 Concentration and detected ratio of PAEs in farm products from different areas of Pearl River Delta |                                  |              |              |               |              |              |               |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| 农产品                                                                                                         | 项目                               | DMP          | DEP          | DBP           | BBP          | DEHP         | DnOP          | $\sum$ PAEs    |
| 中山(37)                                                                                                      | $R/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | nd ~ 0.14    | nd ~ 0.07    | nd ~ 1.72     | nd ~ 0.47    | nd ~ 1.86    | nd ~ 0.61     | 0.15 ~ 3.15    |
|                                                                                                             | $M/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 0.03 ± 0.05b | 0.01 ± 0.01b | 0.64 ± 0.38bc | 0.13 ± 0.12b | 0.23 ± 0.32b | 0.06 ± 0.14a  | 1.12 ± 0.57b   |
|                                                                                                             | 检出率/%                            | 35.1         | 2.7          | 91.9          | 75.7         | 91.9         | 29.7          | 100            |
| 珠海(28)                                                                                                      | $R/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | nd ~ 0.77    | nd ~ 1.92    | nd ~ 5.92     | nd ~ 2.85    | nd ~ 38.05   | nd ~ 19.98    | 0.05 ~ 63.19   |
|                                                                                                             | $M/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 0.14 ± 0.19a | 0.21 ± 0.41a | 1.64 ± 1.83a  | 0.35 ± 0.59a | 2.39 ± 7.58a | 1.80 ± 4.46a  | 6.53 ± 13.04a  |
|                                                                                                             | 检出率/%                            | 53.6         | 57.1         | 60.7          | 96.4         | 71.4         | 78.6          | 100            |
| 惠州(22)                                                                                                      | $R/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | nd ~ 0.26    | nd           | nd ~ 6.73     | nd ~ 0.35    | nd ~ 0.73    | nd ~ 0.3      | 0.18 ~ 7.01    |
|                                                                                                             | $M/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 0.02 ± 0.06b | nd           | 1.14 ± 1.53ab | 0.14 ± 0.09b | 0.15 ± 0.2b  | 0.06 ± 0.11a  | 1.51 ± 1.67ab  |
|                                                                                                             | 检出率/%                            | 9.1          | 0            | 95.5          | 90.9         | 90.9         | 27.3          | 100            |
| 东莞(44)                                                                                                      | $R/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | nd ~ 0.52    | nd ~ 0.05    | nd ~ 1.75     | nd ~ 0.08    | nd ~ 0.84    | nd ~ 79.86    | nd ~ 80        |
|                                                                                                             | $M/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 0.11 ± 0.1a  | 0.01 ± 0.01b | 0.36 ± 0.4c   | 0.02 ± 0.03b | 0.28 ± 0.26b | 1.82 ± 12.04a | 2.59 ± 11.96ab |
|                                                                                                             | 检出率/%                            | 77.3         | 2.3          | 65.9          | 31.8         | 65.9         | 9.1           | 95.5           |

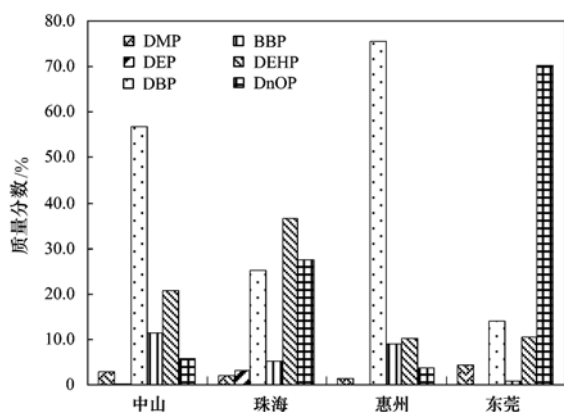


图3 珠三角各地农业区域中农产品中 PAEs 的质量分数

Fig. 3 Percentage content of individual PAEs in agricultural products from different areas of Pearl River Delta

## 2.5 农产品中 PAEs 含量的分析和评价

对珠江三角洲地区农产品中 PAEs 的污染特征和分布规律也曾有报道,张茂生等<sup>[26]</sup>的结果显示不同蔬菜中  $\sum$  PAEs 在  $0.41 \sim 7.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,其中生菜、油麦菜等蔬菜的  $\sum$  PAEs 均大于  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,这与本次调查的珠三角地区蔬菜样品的含量较为接近。蔡全英等<sup>[19]</sup>调查了广州、深圳一些菜场的蔬菜,6 种 PAEs 化合物 (DMP、DEP、DnBP、BBP、DEHP 和 DnOP) 的总含量 ( $\sum$  PAEs) 在  $0.07 \sim 11.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,菜心平均含量  $4.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,小白菜平均值  $1.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,豆角平均值  $1.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。王丽霞等<sup>[27]</sup>调查了山东某地西葫芦 (茄瓜) 中 4 种 PAEs (包括 DMP、DEP、DBP、DEHP) 的总浓度,仅为  $0.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远远低于珠三角中茄瓜中 PAEs 的含量。目前,我国尚未制定有关食品尤其是农产品中 PAEs 的限量标准,对 PAEs 等毒性有机污染物的污染水平和等级很难划分。根据欧洲经济共同体食品科学委员会警告<sup>[28]</sup>,人体每日对 PAEs 化合物的摄入总量不得超过  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  体质量。EPA 指出<sup>[29]</sup>,人体经口摄入的 DBP 最大参考剂量为每日  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  体质量。美国环境健康危害评估办公室 (OEHHA) 则建议,人体每日允许的 DEHP 最大摄入量为 (以体质量计)  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。若按成人体重  $60 \text{ kg}$  计算,每人每天摄入农产品  $0.5 \text{ kg}$  (干重),则珠海市所采集的生菜、东莞市采集芥兰的 PAEs 总量和珠海市所采集生菜、油麦菜的 DEHP 含量均超过美国和欧洲的建议标准,存在潜在的健康风险。

本调查结果表明,珠三角地区典型区域内农产品中 PAEs 以 DBP、DEHP 和 DnOP 为主。这与农用

薄膜中 DEHP 和 DBP 是增塑剂的主要成分有关。崔明明等<sup>[30]</sup>研究证实 DEHP 和 DBP 是土壤和花生籽粒中主要的污染物,并且在覆膜种植模式下土壤和花生籽粒中的  $\sum$  PAEs 显著高于露地种植模式。李米等<sup>[31]</sup>调查也证实了 6 种 PAEs 化合物中,蔬菜样品中以 DEHP 的含量最高,占  $\sum$  PAEs 的  $95\% \sim 99\%$ 。DBP、DEHP 和 DnOP 在作物中的吸收运移特征与化合物的理化性质如相对分子质量、辛醇-水分配系数 ( $K_{ow}$ ) 和挥发性等相关<sup>[25]</sup>。DBP 的相对分子质量和  $K_{ow}$  较小,DBP 比 DEHP 更易从残留的农用薄膜中挥发出来,进而被作物茎叶吸收累积。此外,由于 DnOP 和 DEHP 的相对分子质量较大,水溶性较低,辛醇-水分配系数 ( $\lg K_{ow}$ ) 较大,易被土壤吸附,活性较差,也有更多的机会被作物根系吸收运移<sup>[18,19]</sup>。黄慧娟等<sup>[32]</sup>认为土壤中的 PAEs 会被蔬菜根系吸收并向地上部运移,而且 DBP 和 DEHP 较难被植物体降解或代谢而会在植物体内累积,有较强的生物富集性。而 DMP、DEP 等短链 PAEs 化合物的水溶性较高,辛醇-水分配系数较小,易被生物降解,难以在作物体内存留,因而在土壤和农产品中的含量较低。

## 3 结论

(1) 珠江三角洲 131 个农业区域农产品样品中 6 种  $\sum$  PAEs 总含量在  $\text{nd} \sim 79.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $2.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,检出率为  $98.5\%$ ;其中以 DBP、DEHP 和 DnOP 为主,应成为重点的污染控制对象;不同地区农产品中  $\sum$  PAEs 的平均含量顺序: 珠海 > 东莞 > 惠州 > 中山,其中珠海与中山市农产品中  $\sum$  PAEs 的含量有显著差异;整个珠三角区域农产品样品中,在珠海市所采集的生菜、东莞市采集的芥兰中  $\sum$  PAEs 总量和珠海市所采集的生菜、油麦菜中 DEHP 含量均超过美国和欧洲的建议标准,存在潜在的健康风险。

(2) 比较各类农产品样品中  $\sum$  PAEs 的平均含量顺序,其中蔬菜 > 水稻 > 水果; 14 种不同蔬菜种类中 6 种 PAEs 的含量差异很大,芥兰、生菜等叶菜类的  $\sum$  PAEs 含量最高,而蒲瓜是  $\sum$  PAEs 含量最高的茄果类蔬菜,其中菜心和苋菜两类的  $\sum$  PAEs 含量最低。蔬菜品种间生长结构特征和生长环境 (大气和土壤) 的差异是影响其对 PAEs 吸收

及在体内累积的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] Collins C, Fryer M, Grosso A. Plant uptake of non-ionic organic chemicals[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40** (1): 45-52.
- [2] Zeng F, Cui K Y, Xie Z Y, *et al.* Phthalate esters (PAEs): emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China[J]. Environmental Pollution, 2008, **156**(2): 425-434.
- [3] Sinnich S L, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. Environmental Science & Technology, 1995, **29** (12): 2905-2914.
- [4] Kang Y, Man Y B, Cheung K C, *et al.* Risk assessment of human exposure to bioaccessible phthalate esters via indoor dust around the Pearl River Delta[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(15): 8422-8430.
- [5] Heudorf U, Mersch-Sundermann V, Angerer J. Phthalates: toxicology and exposure[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2007, **210**(5): 623-634.
- [6] Kong S F, Ji Y Q, Liu L L, *et al.* Diversities of phthalate esters in suburban agricultural soils and wasteland soil appeared with urbanization in China[J]. Environmental Pollution, 2012, **170**: 161-168.
- [7] Wang J, Luo Y M, Teng Y, *et al.* Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. Environmental Pollution, 2013, **180**: 265-273.
- [8] Wang W X, Zhang Y L, Wang S L, *et al.* Distributions of phthalic esters carried by total suspended particulates in Nanjing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(11): 6789-6798.
- [9] Liu X W, Shi J H, Bo T, *et al.* Occurrence of phthalic acid esters in source waters: a nationwide survey in China during the period of 2009-2012[J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 262-270.
- [10] Wang J, Bo L J, Li L N, *et al.* Occurrence of phthalate esters in river sediments in areas with different land use patterns[J]. Science of the Total Environment, 2014, **500-501**: 113-119.
- [11] Liu H, Cui K Y, Zeng F, *et al.* Occurrence and distribution of phthalate esters in riverine sediments from the Pearl River Delta region, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **83** (1): 358-365.
- [12] Wu Z Y, Zhang X L, Wu X L, *et al.* Uptake of di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) by the plant *benincasa hispida* and its use for lowering DEHP content of intercropped vegetables[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2013, **61**(22): 5220-5225.
- [13] Wang J, Chen G C, Christie P, *et al.* Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in vegetables and soils of suburban plastic film greenhouses[J]. Science of the Total Environment, 2015, **523**: 129-137.
- [14] Sakhi A K, Lillegaard I T L, Voorspoels S, *et al.* Concentrations of phthalates and bisphenol A in Norwegian foods and beverages and estimated dietary exposure in adults[J]. Environment International, 2014, **73**: 259-269.
- [15] 蔡全英, 莫测辉, 曾巧云, 等. 邻苯二甲酸酯在不同品种通菜-土壤系统中的累积效应研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1455-1458.
- [16] 安琼, 靳伟, 李勇, 等. 酞酸酯类增塑剂对土壤-作物系统的影响[J]. 土壤学报, 1999, **36**(1): 118-126.
- [17] 李彬, 吴山, 梁金明, 等. 中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2283-2291.
- [18] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 广东省典型区域农业土壤中邻苯二甲酸酯含量的分布特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2308-2312.
- [19] 蔡全英, 莫测辉, 李云辉, 等. 广州、深圳地区蔬菜生产基地土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)研究[J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 283-288.
- [20] 赵胜利, 杨国义, 张天彬, 等. 珠三角城市群典型城市土壤邻苯二甲酸酯污染特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(1): 128-133.
- [21] 刘庆, 杨红军, 史衍玺, 等. 环境中邻苯二甲酸酯类(PAEs)污染物研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(8): 968-975.
- [22] Schmitzer J L, Seheunert I, Korte F. Fate of bis(2-ethylhexyl) [14C]phthalate in laboratory and outdoor soil-plant systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1988, **36**(1): 210-215.
- [23] 宋广宇, 代静玉, 胡锋. 邻苯二甲酸酯在不同类型土壤-植物系统中的累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (8): 1502-1508.
- [24] 王家文, 杜琪珍, 宋英琦. 塑料工业区附近农田蔬菜 DEHP 的浓度水平及评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2450-2455.
- [25] 曾巧云, 莫测辉, 蔡全英, 等. 萝卜对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收累积特征及途径的初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(1): 10-16.
- [26] 张茂生, 李明阳, 王纪阳, 等. 东莞市蔬菜基地邻苯二甲酸酯(PAEs)的污染特征研究[J]. 广东农业科学, 2009, (6): 172-176.
- [27] 王丽霞, 寇立娟, 潘峰云, 等. 基质固相分散-液相色谱-质谱法测定蔬菜中的邻苯二甲酸酯[J]. 分析化学, 2007, **35** (11): 1559-1564.
- [28] Balafas D, Shaw K J, Whitfield F B. Phthalate and adipate esters in Australian packaging materials[J]. Food Chemistry, 1999, **65**(3): 279-287.
- [29] 曹国洲, 肖道清, 朱晓艳. 食品接触制品中邻苯二甲酸酯类增塑剂的风险评估[J]. 食品科学, 2010, **31**(5): 325-327.
- [30] 崔明明, 王凯荣, 王琳琳, 等. 山东省花生主产区土壤和花生籽粒中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24** (12): 3523-3530.
- [31] 李米, 蔡全英, 曾巧云, 等. 绿色食品和有机食品蔬菜基地土壤和蔬菜中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(19): 10189-10191.
- [32] 黄慧娟, 蔡全英, 吕辉雄, 等. 土壤-蔬菜系统中邻苯二甲酸酯的研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, (9): 50-53.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                      |                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....                                                                                                 | BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )        |
| Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....                                                              | LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )                  |
| Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....                               | ..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )           |
| Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....                                     | SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )            |
| Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....                                | ..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )     |
| Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....                                                               | LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )             |
| Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....                                                                        | MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )                    |
| A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....                                                         | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )               |
| Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....                                                                                 | WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )                   |
| Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....                                                                                                                      | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )       |
| Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....                                                             | FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )         |
| Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....                                                                                               | WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )                    |
| Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....                                                                                                      | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )           |
| Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....                                                                                  | YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )            |
| Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....                                                                                        | WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )            |
| Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....                                                                | LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )              |
| Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....                         | ..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )            |
| Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....                                                                   | HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )           |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....                                                                     | YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )            |
| Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....                                                                                | FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )          |
| Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....                                                                  | WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> ( 156 )          |
| Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....                                                              | HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )                          |
| Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir ..... | ..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )            |
| Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....                                                                                        | WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )      |
| Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....                                                                                                 | WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )             |
| Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....                                                                                                       | XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )               |
| Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....                                                                                               | DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )            |
| Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....                                                            | LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )            |
| Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....                                                               | ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )       |
| Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....                                                               | ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )             |
| Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....                                                                                | GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )                |
| Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....                                                      | ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )             |
| Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....                                                                  | LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )                   |
| Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....                                                                                             | XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )                                   |
| Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....                                                     | LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )            |
| Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....                                                                                      | WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )            |
| Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....                                                                                                | ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )                             |
| Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....                                                                           | AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )                 |
| Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....                                               | ..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 ) |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....                                                                    | WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )                  |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....                                    | ..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )            |
| Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....                                                                | WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )              |
| Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....                                           | ..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )     |
| Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....                                                                                   | LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )           |
| Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....                                                        | YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )               |
| Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....                                                                                               | DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )           |
| Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....                                                                           | QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )               |
| Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....                                                                                                   | CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )              |
| Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....                                                                                                                 | WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )      |
| Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....                                                                      | LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )             |
| Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....                                                                     | LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )         |

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行