

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                           |                                                                          |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O <sub>3</sub> 来源识别 .....         | 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华( 1 ) |
| 厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 .....                             | 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊( 11 )                                                   |
| 近10年海南岛大气NO <sub>2</sub> 的时空变化及污染物来源解析 .....              | 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔( 18 )                                                  |
| 稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 .....                               | 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹( 25 )                              |
| 气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H <sub>2</sub> )浓度 ..... | 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根( 34 )                                              |
| 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO <sub>2</sub> 特征及扩散通量 .....        | 张永领, 杨小林, 张东( 40 )                                                       |
| 夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 .....                            | 李江萍, 张洪海, 杨桂朋( 49 )                                                      |
| 基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 .....                          | 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠( 56 )                                         |
| 温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 .....                              | 马小雪, 王腊春, 廖玲玲( 64 )                                                      |
| 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 .....                         | 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞( 72 )                                              |
| 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 .....                             | 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇( 80 )                                               |
| 鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 .....                         | 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞( 87 )                                                 |
| 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 .....                            | 李艳利, 李艳粉, 徐宗学( 94 )                                                      |
| 水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 .....                              | 刁晓君, 李一葳, 王曙光( 107 )                                                     |
| 蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 .....                                   | 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹( 114 )                                            |
| 汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 .....                                  | 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅( 121 )                                                  |
| 三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 .....                               | 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟( 130 )                                             |
| 三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征 .....                               | 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇( 136 )                                                  |
| 环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 .....                | 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法( 143 )                                             |
| 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 .....                      | 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮( 151 )                               |
| 舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 .....                       | 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇( 163 )                                            |
| 太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 .....                     | 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮( 172 )                                   |
| 厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 .....                            | 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋( 179 )                                        |
| 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 .....                     | 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真( 186 )                                                 |
| 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 .....                               | 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光( 194 )                              |
| 铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 .....                             | 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军( 202 )                           |
| 铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 .....                              | 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华( 209 )                                        |
| 一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 .....                                | 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊( 215 )                                                |
| 磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 .....                                 | 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷( 221 )                                                  |
| 腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 .....                             | 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧( 227 )                                                     |
| 降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 .....                     | 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋( 237 )                              |
| FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 .....                      | 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江( 244 )                                                 |
| 微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 .....                         | 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜( 252 )                                   |
| 微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 .....                               | 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全( 259 )                                             |
| 舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 .....                           | 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉( 266 )                             |
| 四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 .....                             | 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静( 274 )                                   |
| 铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 .....                                | 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维( 280 )                                                 |
| 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 .....                               | 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体( 286 )                         |
| 厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 .....                                   | 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲( 295 )                                      |
| 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 .....                          | 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚( 301 )                               |
| 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 .....                               | 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超( 309 )                                      |
| 畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 .....                  | 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯( 314 )                                                  |
| 华南某市生活垃圾组成特征分析 .....                                      | 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德( 325 )                                           |
| 生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 .....                               | 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印( 333 )                                       |
| 基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 .....                           | 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌( 338 )                                                |
| 一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 .....                         | 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国( 343 )                                                 |
| 典型黄土区油松树干液流变化特征分析 .....                                   | 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩( 349 )                                         |
| 利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究 .....                                 | 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲( 357 )                                 |
| 人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 .....                             | 李曼璐, 姜玥璐( 365 )                                                          |
| 《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)    |                                                                          |

# 华南某市生活垃圾组成特征分析

张海龙<sup>1</sup>, 李祥平<sup>2</sup>, 齐剑英<sup>1\*</sup>, 陈永亨<sup>2</sup>, 方建德<sup>1</sup>

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 广州大学化学化工学院, 广州 510006)

**摘要:** 依据城市生活垃圾采样分析方法对华南某市 20 个街镇生活垃圾的物理性质和物理组成进行历时一年的研究。结果表明, 研究区域垃圾平均容重为  $0.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 垃圾三组分(水分、灰分和可燃物)所占比例分别为 55.0% ~ 66.9%、18.6% ~ 30.3%、69.7% ~ 81.4%, 有机质含量比例为 50.1% ~ 58.0%, 各研究区镇垃圾热值范围为 6 570 ~ 9 652  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均热值为 8 272  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于世界银行推荐的垃圾焚烧所需最低热值(7 000  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。其它物理组分所占比例分别如下: 厨余类为 39.8% ~ 53.3%, 橡塑类为 16.5% ~ 33.4%, 纸类为 5.61% ~ 7.95%, 纺织类为 1.14% ~ 5.16%, 竹类为 2.49% ~ 5.12%, 玻璃类为 1.10% ~ 1.47%, 混合类 5.86% ~ 7.57%, 灰土类 2.46% ~ 6.73%, 金属 0.1% ~ 0.32%, 陶瓷 0.4% ~ 0.69%。相关分析和主成分分析结果表明纺织类、橡塑类、纸类、可燃物比重对焚烧有促进作用, 厨余类、玻璃类、容重、灰分、含水率、灰土等则对焚烧有一定的负影响。

**关键词:** 城市生活垃圾; 组成; 热值; 因子分析

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0325-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.043

## Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China

ZHANG Hai-long<sup>1</sup>, LI Xiang-ping<sup>2</sup>, QI Jian-ying<sup>1\*</sup>, CHEN Yong-heng<sup>2</sup>, FANG Jian-de<sup>1</sup>

(1. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Using the MSW (municipal solid waste) sampling and analysis methods, the composition characteristics of MSW in south China were investigated. The results showed that: the average MSW bulk density was  $0.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , the percentages of water, ash and combustible were 55.0% - 66.9%, 18.6% - 30.3% and 69.7% - 81.4%, respectively. The organic contents were 50.1% - 58.0%. The waste low caloric value (wet base) ranged 6 570 - 9 652  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and the average of waste low caloric value (wet base) was 8 272  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which was higher than the recommended value of World Bank (7 000  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The percentage composition of MSW was: 39.8% - 53.3% kitchen waste garbage, 16.5% - 33.4% rubber and plastics, 5.61% - 7.95% paper, 1.14% - 5.16% textile products, 2.49% - 5.12% bamboo products, 1.10% - 1.47% glass, 5.86% - 7.57% mixed materials, 2.46% - 6.73% dust, 0.1% - 0.32% metal, and 0.4% - 0.69% ceramic. The correlation analysis and factor analysis showed that: the high proportions of textile, rubber and plastics, paper, and combustible materials had a positive effect on the MSW incineration, while the high proportions of kitchen waste garbage, glass, MSW bulk density, ash, water content and dust had a negative effect on the MSW incineration.

**Key words:** municipal solid waste (MSW); composition; caloric value; factor analysis

随着我国经济发展, 城市生活垃圾产量逐年增加。本研究城市为珠三角地区重要城市, 其垃圾产生量以每年近 5% 的速度增加, 目前该市生活垃圾处理仍然以填埋为主, 按照目前其垃圾产生量和人口增长量计算, 若继续采用以填埋为主的垃圾处理方式, 该市每年需增加填埋土地面积为 24  $\text{hm}^2$ , 这对该市土地资源日益紧缺而言无疑是巨大挑战<sup>[1]</sup>。垃圾焚烧由于具有减容减重比大、处理速度快、占地面积小、可回收利用热能等优点在国际广泛应用<sup>[2]</sup>。而一个地区选择何种垃圾处理方式, 除了跟该区域经济发展水平有关外, 也跟垃圾基本组成及特性有关。

目前有不少学者对我国的垃圾理化性质进行了研究, 但由于自然环境、气候条件、城市规模、居民

生活习俗、食品结构、燃料结构和经济发展水平等不同, 不同地区垃圾的理化性质差别很大, 研究结果可参考性也参差不齐。以生活垃圾的热值为例: 如西安杨凌示范区城市生活垃圾的热值(平均)为 7 734  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[3]</sup>, 厦门地区垃圾的热值(平均)为 4 965  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>, 天津市生活垃圾的平均热值为 5 541  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[5]</sup>, 重庆主城区生活垃圾的热值(平均)仅为 3 728  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[6]</sup>, 云贵高原地区生活垃圾热值为 7 615  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203061); 环境保护公益性行业科研专项(201109001)

作者简介: 张海龙(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为健康风险评估和固废处理, E-mail: zhanghailonghaha@126.com  
\* 通讯联系人, E-mail: qijianying@scies.org

因此,本研究以华南某市为例,研究我国城市经济发达地区的生活垃圾的物理参数,包括垃圾热值、物理组成、容重、含水量、有机质、可燃物比例、灰分等基本参数,并梳理经济发达城市生活垃圾的可利用性,在此基础上提出该区域垃圾处理对策,以期为地方政府选择合理的垃圾处理方式提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域地处广东省中南部,全区户籍人口 80.6 万人,外来人口 113 万人。采样时间为 2011 年 4 月~2012 年 3 月,采样期间气候特点为:年初气温偏低,夏季持续高温,汛期降雨量偏少,当年平均气温 22.7℃,年内最高气温 37.7℃,出现在 8 月底,最低气温 3.2℃,出现在 1 月初,该年共出现暴雨 2

次,分别为 9 月末和 10 月中旬(降雨量 164 mm,为历年最高),全年平均日照总数 1 578 h,全年降水 pH 范围为 3.82~6.22,加权平均值为 5.06。

### 1.2 样品采集

垃圾采样方法依据《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313-2009),整个采样过程持续 1 a,春、秋、冬每季节采样两次,夏季 3 次。总共采样次数为 9 次,每次采样量为 1.5~2 t,取样时间为每月的第二与第三周,每天取两个采样点垃圾样。本次分析共搜集 180 份生活垃圾样。垃圾从居民区到终端处理流程如图 1 所示:垃圾从居民区收集到小区的垃圾桶或者垃圾池内,然后环卫工人将其运送至垃圾中转站,在中转站进行压缩处理,然后被垃圾运输车运送到填埋场或者焚烧场,而在填埋或者焚烧之前,这些垃圾将被存放于料仓处。

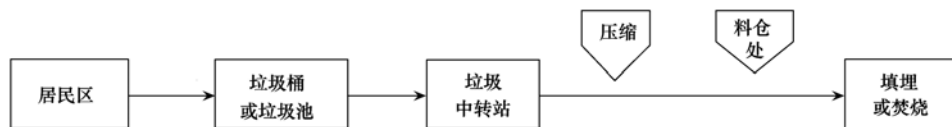


图 1 垃圾处理过程

Fig. 1 MSW disposal process

由于研究区域各个街镇生活垃圾较为分散,为使采集样品具有代表性,结合垃圾实际处理情况,将垃圾采样放到料仓处进行。具体的取样过程如图 2 所示,由采样人员确定需采集垃圾的街镇,然后确定该街镇垃圾中转站运输车辆基本信息,在料仓处看到相

应车辆后,判断该垃圾是否有代表性,然后用爪斗分次取样共计 2 t 左右,将此样品运输至垃圾分析车间,将其充分混合,然后随机铲取部分垃圾装入两个 240 L 的标准生活垃圾桶中,并依据《生活垃圾采样和分析方法》计算垃圾容重,同时人工对其进行分类。

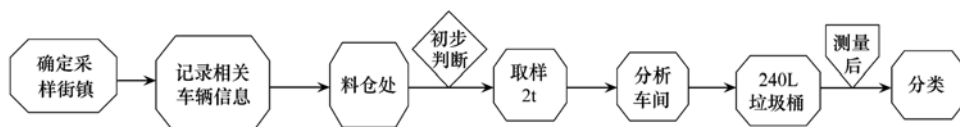


图 2 采样过程

Fig. 2 Sampling process

## 2 结果与讨论

### 2.1 物理特性分析

垃圾的物理特性如容重、含水量、有机质及可燃物比例、灰分等随居民生活习惯、生活水平、燃料种类以及所处地理环境等有很大关系,而且其值的大小直接影响后续处理方法选择和处理效果。

容重:通常指单位体积内生活垃圾的重量。容重是评价垃圾焚烧性能的重要指标之一,一般而言,容重在  $(0.1 \sim 0.2) \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,认为是优质垃圾,在  $(0.2 \sim 0.3) \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  为普通垃圾,在  $(0.3 \sim 0.4) \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,则为劣质垃圾<sup>[6]</sup>。本

研究选用 240 L 标准生活垃圾桶计算其容重,结果如图 3 所示,可以发现,整个研究区域垃圾容重变化不大,在  $(0.20 \sim 0.25) \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,整个研究区域,平均容重为  $0.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中在 7 号和 9 号街镇容重最大,为  $0.25 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,5、11、13、19 号街镇最低,为  $0.20 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。综上可知,本研究区域垃圾从容重的角度讲,属普通垃圾,比较适合焚烧。

图 3 也展示了垃圾三组分(水分、灰分、可燃物)以及有机质的含量在各街镇的变化情况。可以发现,本研究区域垃圾可燃物所占比例非常高,但各个街镇间变化不大(69.7%~81.4%),整个区域均值为



77.2%。各街镇有机质含量差别也不大,变化范围为: 50.1% ~ 57.1%,均值为 54.1%。一个比较有意思的现象是有机质含量比例与可燃物的比例在整个研究区域变化趋势一致。整个研究区域各个街区灰分的含量比较低,范围为: 18.6% ~ 30.3% (均值

22.9%),整个研究区域含水率的变化范围为 55% ~ 66.9%,其在整个范围的平均值为 62.2%,综上所述,该研究区域生活垃圾的有机质与可燃物含量均比较高,灰分的含量比较低。一般而言,经济越发达地区,垃圾中有机质比例越高,而灰分的比例则越低。

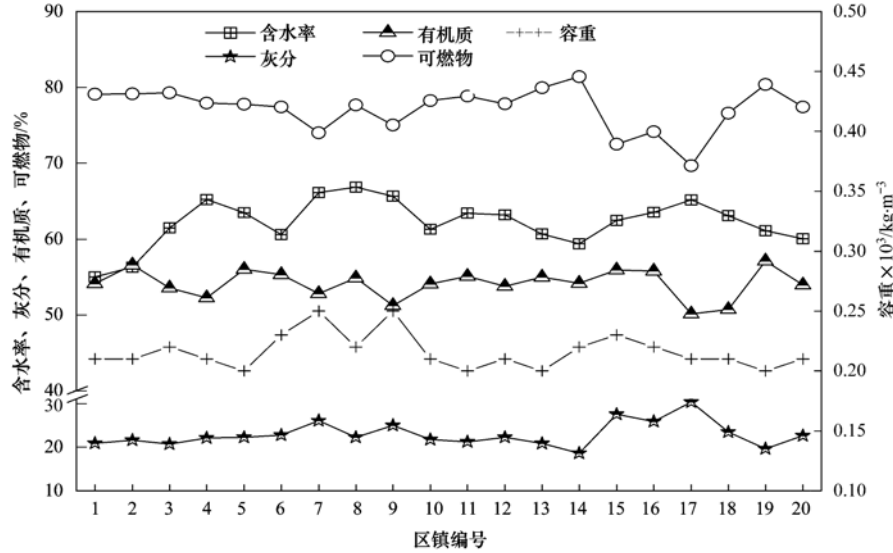


图3 各研究街区垃圾容重、垃圾三组分、有机质百分比

Fig. 3 MSW bulk density, three components and organic content of the study areas

季节变化也是影响垃圾组成的重要因素之一,本研究分析了这 20 个街区一年来这些特征随季节变化的基本规律。结果如图 4 所示: 垃圾容重在一年中,不同月份,容重差别相对于街区之间差别则比较大,整个区域容重范围为  $(0.18 \sim 0.24) \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,均值为  $0.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中最大值出现在 3、8、9、12 月为  $0.24 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最小值为  $0.18 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,分别出现在 7 和 10 月。影响垃圾容重的主要组分是厨余类和橡塑类的比例,这两个组分占垃圾总比重的 70% 以上。7 月和 10 月垃圾组分中厨余类所占比例均比较低,分别为 37.7% 和 39.7%,而橡塑类比例为 30.2% 和 34.7%。3、8、9、12 月的厨余类所占比例均较高,如 3 月厨余类垃圾比例高达 52.32%,远远高于 7 月和 10 月的,而橡塑类比例则比较低,从而导致垃圾容重在 7 月和 10 月比较低。容重在一年中变化为春、冬季最高为  $0.23 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,夏季为  $0.2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,秋季为  $0.21 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可燃物比例在冬季最高为: 79.2%,其次为春季(78.4%),夏秋季节均较低分别为: 76.9% 和 74.4%。有机质在春冬季节的比例较高分别为: 61.7% 和 54.1%,而在夏秋季节较低,分别为 51.3% 和 50.9%。含水率在夏秋均较高,为 64.5% 和 62.5%。春冬则较低,分别为

60.4% 和 61.7%,含水率受气象条件影响比较明显,以上半年为例: 该区 6 月的含水率最高为 66.2%,6 月的降雨量为 249 mm,为上半年最高,且日照时数仅为 85.6 h。3 月的降雨量为 42.1 mm(日照时数为 86.9 h)。灰分在夏秋季节比较高,分别为 23.2% 和 25.6%。春冬则比价低,分别为: 21.7% 和 20.9%。综上分析可知,可燃物、有机质、容重均在春冬季节较高,在夏秋季节较低。而含水率、灰分等对燃烧不利的因素均在夏秋较高。

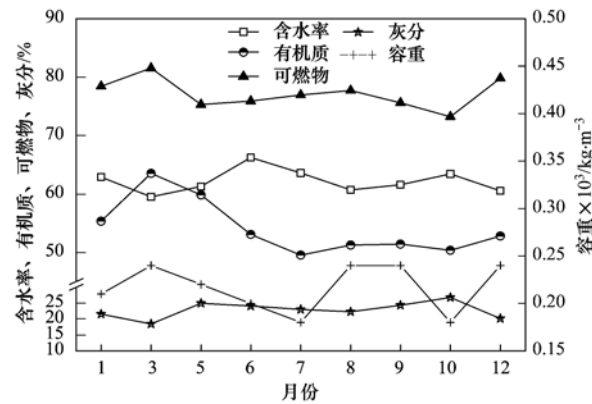


图4 各研究街区垃圾容重、垃圾三组分、有机质随时间变化

Fig. 4 Variation of MSW bulk density, three components and organic content over time

垃圾热值的高低是影响垃圾焚烧效果的重要因素,根据世界银行报告,欲满足垃圾持续燃烧,则其平均湿基低位热值应达到 $7\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且任何一个季节其热值均不能小于 $6\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,否则便会影响焚烧的经济效益<sup>[8]</sup>. 因此,本研究分析了该区域生活垃圾热值的变化情况,热值计算参考《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313-2009). 结果如图5所示,可以发现:上半年中,垃圾热值最高点出现在3月,为 $9\,669\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最低值为5月的热值,为 $6\,013\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 全年最高值出现在7月,为 $10\,055\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其次为9月,为 $9\,722\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 3月与9月的含量比较接近,为 $9\,669\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,整年平均值为: $8\,243\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 而且,四季中,夏秋热值较高,分别为 $8\,586\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $8\,903\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,春冬季节较低,分别为 $7\,841\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7\,473\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均高于世界银行推荐最低热值,因此,本研究区域垃圾从热值角度而言,适于焚烧.

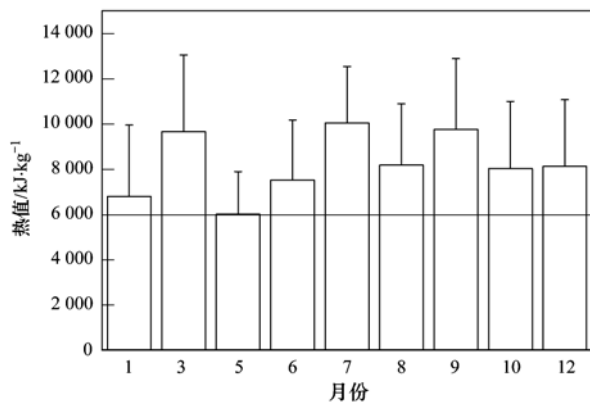


图5 各个月份垃圾湿基低位热值

Fig. 5 Change of low calorific value(wet base) over time

图6为各个镇街一年的湿基低位垃圾热值,所有街道垃圾热值均大于 $6\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最低值为15街镇,其热值为 $6\,570.89\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最高值在14街镇,热值为 $9\,652\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,区域平均热值为 $8\,272\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

## 2.2 垃圾物理组成分析

本研究同时分析了研究区域垃圾物理组成,分类依据(CJ/T 313-2009),分析结果如图7所示,将物理成分按照比值多少再分类:可分为主要类、次主要类、少量类. 主要类通常所占总成分比例超过15%,且对垃圾的热值和容重等有决定性影响,如本研究中的厨余类. 次主要类所占比例为1%~15%,通常对垃圾热值等性质有一定影响,但影响较小,如木竹类等. 少量类所占比例为<1%,通常对垃圾焚

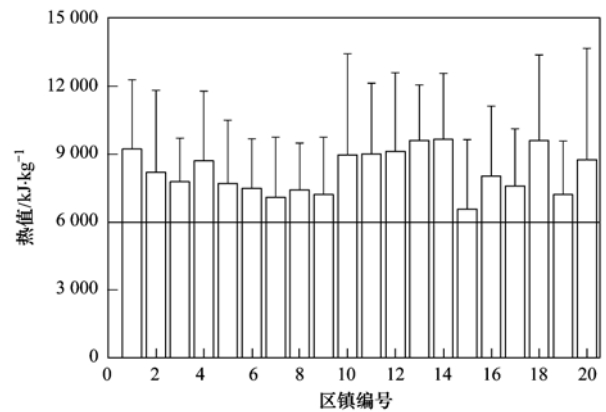


图6 各镇街生活垃圾湿基低位热值分析结果

Fig. 6 Variety of low calorific value(wet base) in the study areas

烧性质几乎无影响,如金属类. 本研究中的主要类所占比例68.64%~76.53%,其中厨余类所占比例为39.76%~53.3%,橡塑类所占比例为16.5%~33.4%. 次主要类所占比例为22.78%~29.78%,其中,纸类所占比例为5.61%~7.95%,纺织类所占比例为1.14%~5.16%,竹类所占比例为2.49%~5.12%,玻璃类所占比例为1.1%~1.47%,混合类所占比例为5.86%~7.57%,灰土类所占比例为2.46%~6.73%. 少量类所占比例仅为:0.51%~1.12%,其中金属类所占比例为0.1%~0.32%,陶瓷类所占比例为0.4%~0.69%. 厨余类和橡塑类在整个研究区域各个街镇之间变化较大,其中,厨余类在8、9、11、15、16、17所占比例较大,而在1、4、10等区域所占比例则较低. 事实上,厨余类所占比例高的街镇人均GDP也高,而厨余类比例低的区域对应街镇的人均GDP也较低. 橡塑类在1号街镇最高,在16号最低,分布没有明显规律.

图8为研究区域各街镇生活垃圾物理成分随时间变化情况,整个研究区域厨余类垃圾在1、3、5月较高分别为50.62%、52.32%和52.43%. 而在6、7、10月则较低为44.39%、37.74%和39.69%. 8、9月分别为46.23%和47.03%. 从季节角度讨论:夏秋季节厨余类比例较低,分别为40.85%和44.29%,而春冬季节则较高,分别为:45.90%和45.67%,可以看到,季节变化对厨余类垃圾影响并不是特别明显. 其他成分由于所占比例较低,对焚烧影响不大,故此处不做讨论.

本研究与国内外其他研究结果也进行了对比,结果如表1所示:本研究将从时间、区域(南方、北方)、经济发展水平(发达国家、发展中国家)等方面逐次展开讨论. 从时间上可以看出,20世纪90年

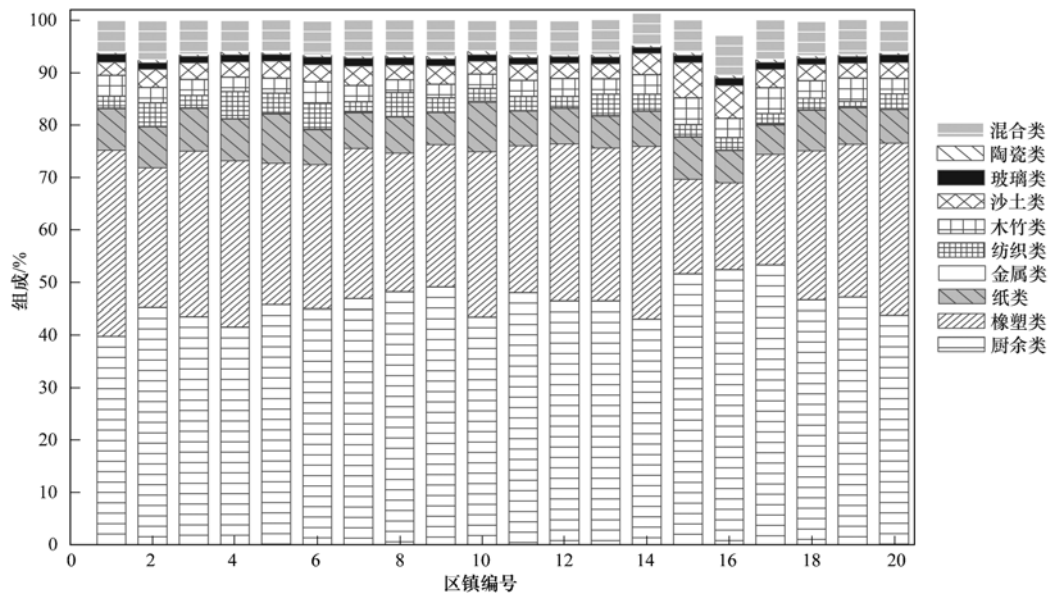


图7 研究区域各街镇生活垃圾物理组成

Fig. 7 Physical composition of MSW in the study areas

代,佛山、广州垃圾的主要成分是混合类(其原文说法是无机物),主要是不可燃烧的物质,例如顺德的沙土类(煤灰渣、砖瓦石)的比例高达30%,而厨余类所占比例则比较低,广州在90年代厨余类所占比例为39.4%,佛山为30%,目前本研究区域垃圾成分以厨余类垃圾为主(46.4%),橡塑类比例显著上升达到28%,而混合类和沙土类之和所占比例则明显下降。而对于本研究跟90年代比纸类比例变化不明显,这跟国外类似研究结果不太一致(国外相关研究表明<sup>[9]</sup>,随着经济发展,纸类所占比重会不断增大),可能跟我国废纸回收以及环卫工人等在垃圾收集过程中会提前将垃圾中纸类回收处理有关;从区域上看,南方降水较多,因此垃圾的含水率会偏高,但是本研究结果显示华南区域垃圾含水率跟北京垃圾(全年平均)含水率差别不大(北京地区垃圾含水率为62.21%,本研究62.20%),周传斌等研究北京某社区厨余垃圾发现,其含水率高达85.4%<sup>[10]</sup>,因此厨余类垃圾比例增加,可能对垃圾含水率增加有很大影响。北京市垃圾组分中橡塑类比例也低于本研究结果,仅为15.3%,远低于本研究的28%,这是其湿基低位热值低于本研究结果的一个重要原因;而不同经济发展水平下,垃圾组成成分差别也比较大,芬兰垃圾组成成分中,可燃物比例均比较高,如纸类为14.9%(本研究为7.2%),橡塑类相比于本研究稍低为21.4%,而木竹类为11.9%(本研究为3.4%),纺织类为9.5%(本研究为3%),另外其厨余类所占比例也低于本研究结

果,为23.9%,因此其湿基低位热值达到了15 000  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远高于本研究的8 272  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而美国垃圾组成跟本研究的一个显著差别也是可燃物所占比重较高,如其橡塑类和纺织类比例为21.4%,而纸类所占比例更是达到了27.4%,于此同时,其厨余类垃圾仅占14.5%。表1同时也列出了吉隆坡不同经济收入水平下垃圾组成成分,可以发现本研究结果跟其经济低收入区组成比较接近。

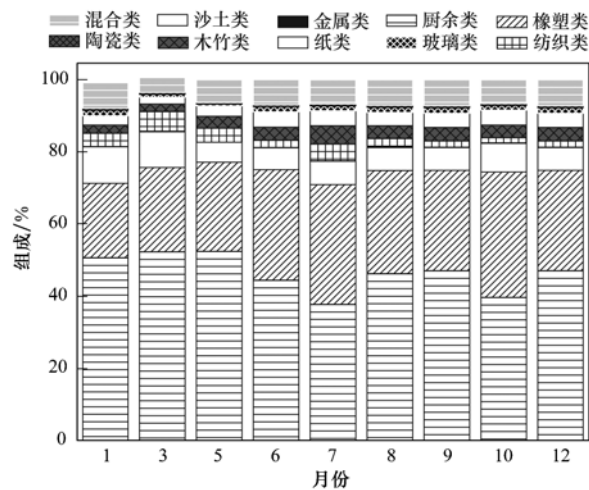


图8 研究区域生活垃圾物理组成随时间变化

Fig. 8 Variation of physical composition of MSW over time

总之,随着本研究区域经济不断发展,无机不可燃烧类(沙土类、混合类)比例不断下降,而厨余类垃圾比例有一定的上升(但上升比例不大),而橡塑

表 1 不同时间不同地区垃圾组成和性质比较

| Table 1 Composition and properties of MSW generated from various sources and at different time |                               |                                    |                               |                                 |                                 |                                 |                             |      |      |             |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------|------|-------------|-------|
| 成分                                                                                             | 佛山 <sup>[12]</sup><br>(1992年) | 广州 <sup>[12]</sup><br>(1989~1990年) | 顺德 <sup>[13]</sup><br>(1993年) | 北京均值 <sup>[14]</sup><br>(2009年) | 芬兰均值 <sup>[15]</sup><br>(2010年) | 美国均值 <sup>[16]</sup><br>(2011年) | 吉隆坡 <sup>[17]</sup> (2001年) |      | 本研究  |             |       |
|                                                                                                | 范围                            | 均值                                 | 范围                            | 均值                              | (2010年)                         | (2011年)                         | 高收入区                        | 中收入区 | 低收入区 | 范围          | 均值    |
| 容重 $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                                                | 0.6                           | 0.3~0.7                            | 0.4                           | 0.3~0.4                         | 0.3                             |                                 | 0.20~0.3                    |      | 0.2  |             |       |
| 含水率/%                                                                                          | 51.7                          | 17.4~77.5                          | 43.2                          | 50.2~61.6                       | 57.7                            |                                 |                             |      |      | 55~66.9     | 62.2  |
| 纸类/%                                                                                           | 8.1                           | 0.1~4.9                            | 1.4                           | 2.0~4.3                         | 3.1                             | 27.4                            | 17.2                        | 17.1 | 11.6 | 5.6~9.4     | 7.2   |
| 金属类/%                                                                                          | 0.7                           | 0~4.7                              | 0.7                           | 0.4~0.8                         | 0.6                             | 8.9                             | 2.5                         | 3.1  | 2.8  | 0.1~0.3     | 0.1   |
| 橡塑类/%                                                                                          | 7.1                           | 0.1~8.6                            | 1.8                           | 5.1~8.0                         | 6.1                             | 21.4                            | 33.2                        | 31.2 | 23   | 16.5~35.4   | 28    |
| 纺织类/%                                                                                          | 4.8                           | 0.1~4.6                            | 1.3                           | 0.9~2.3                         | 1.6                             | 9.5                             | 1.4                         | 3.6  | 5.5  | 1.1~5.2     | 3.0   |
| 厨余类/%                                                                                          | 30.0                          | 4.0~86.3                           | 39.4                          | 48.0~64.7                       | 57.2                            | 23.9                            | 30.8                        | 38.4 | 54.0 | 39.8~53.3   | 46.4  |
| 木竹类/%                                                                                          | 3.3                           |                                    |                               |                                 | 3.21                            | 11.9                            | 5.8                         | 1.4  | 0.9  | 2.5~5.1     | 3.4   |
| 沙土类/%                                                                                          | 4.4                           |                                    |                               | 19~40                           | 30                              | 13.5                            | 6.1                         | 1.1  | 2.0  | 2.5~6.7     | 3.5   |
| 玻璃类/%                                                                                          | 1.3                           | 0~4.7                              | 1.4                           | 0.95~2.35                       | 1.67                            | 4.6                             | 2.8                         | 4.1  | 1.3  | 1.1~1.5     | 1.3   |
| 陶瓷类/%                                                                                          | 5.5                           |                                    |                               |                                 | 5.2                             |                                 |                             |      |      | 0.4~0.8     | 0.6   |
| 混合类/%                                                                                          | 34.6                          | 13.9~92.5                          | 54.5                          | 0.4                             | 0.4                             | 3.4                             | 0.2                         | 1.2  | 2.8  | 5.9~7.7     | 6.6   |
| 热值 <sup>1)</sup> / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$                                            | 2 264                         | 126~4 647                          | 1 900                         |                                 | 15 000                          |                                 |                             |      |      | 6 571~9 652 | 8 272 |

1) 湿基低位热值

表 2 生活垃圾性质、物理组成相关性分析<sup>1)</sup>

| Table 2 Correlation analysis between the characteristics and physical composition of MSW |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         |        |        |          |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------|----------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|
| 可燃物                                                                                      | 有机质 | 含水率    | 灰分       | 容重     | 热值     | 厨余类      | 橡塑类      | 木竹类    | 纺织类    | 纸类      | 陶瓷类    | 金属类    | 沙土类      | 玻璃类    |
| 可燃物                                                                                      | 1   | 0.445* | -0.997** | -0.440 | 0.534* | -0.730** | 0.718**  | -0.420 | 0.254  | 0.278   | -0.381 | 0.043  | -0.510*  | -0.403 |
| 有机质                                                                                      |     | 1      | -0.429   | -0.294 | -0.160 | -0.055   | -0.129   | 0.069  | 0.169  | 0.230   | -0.261 | -0.064 | 0.234    | -0.004 |
| 含水率                                                                                      |     |        | 1        | 0.501* | 0.343  | 0.549*   | -0.399   | -0.180 | -0.010 | -0.228  | 0.344  | -0.103 | 0.128    | 0.002  |
| 灰分                                                                                       |     |        |          | 1      | 0.429  | -0.525*  | -0.732** | 0.415  | -0.227 | -0.292  | 0.398  | -0.053 | 0.512*   | 0.397  |
| 容重                                                                                       |     |        |          |        | 1      | 0.211    | -0.206   | 0.010  | -0.050 | -0.232  | 0.153  | -0.122 | 0.362    | 0.323  |
| 热值                                                                                       |     |        |          |        |        | -0.511*  | 0.552*   | -0.293 | 0.074  | 0.037   | -0.088 | 0.219  | -0.407   | -0.346 |
| 厨余类                                                                                      |     |        |          |        |        | 1        | -0.902** | 0.387  | -0.286 | -0.474* | 0.277  | -0.272 | 0.606**  | -0.004 |
| 橡塑类                                                                                      |     |        |          |        |        |          | 1        | -0.420 | 0.078  | 0.249   | -0.330 | 0.246  | -0.788** | -0.116 |
| 木竹类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          | 1      | -0.419 | -0.229  | -0.212 | -0.274 | 0.478*   | 0.170  |
| 纺织类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        | 1      | 0.111   | 0.256  | -0.046 | -0.163   | 0.087  |
| 纸类                                                                                       |     |        |          |        |        |          |          |        |        | 1       | 0.080  | 0.355  | -0.145   | -0.178 |
| 陶瓷类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         | 1      | 0.494* | 0.086    | 0.003  |
| 金属类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         |        | 1      | -0.221   | 0.022  |
| 沙土类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         |        |        | 1        | 0.133  |
| 玻璃类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         |        |        |          | 1      |
| 混合类                                                                                      |     |        |          |        |        |          |          |        |        |         |        |        |          | 0.030  |

1) \* 表示在 00.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

类的比例则有显著的提高,这与一次性餐厨用具大量使用有关,从而使得焚烧热值不断提高;气候(主要指降水)对不同区域垃圾含水率的影响小于垃圾成分本身对其含水率的影响,该结果跟沈金健<sup>[11]</sup>的研究结果一致;经济发达国家和地区其垃圾成分组成跟本研究区域垃圾成分有显著差异,其可燃物组分所占比例远高于本研究区域。因此可以推断,随着中国经济的不断发展,垃圾中可燃物比重将有所上升,而厨余类所占比重将会有所下降,这对于选择焚烧方式处理垃圾是十分有益的。

### 2.3 垃圾物理特性和物理组成与热值的相关分析

本研究探讨了可燃物、有机质、含水率、灰分、容重以及其它物理成分跟湿基低位热值间关系。Pearson 相关分析结果如表 2 所示,热值跟可燃物在  $r=0.05$  水平上有显著相关性(0.534),而热值跟灰分(-0.525)以及容重(-0.534)均在  $r=0.05$  水平上有显著的负相关性。而对于垃圾的物理组成,则发现热值跟橡塑类在  $r=0.05$  水平上也有显著相关性(0.552),而厨余类跟热值在  $r=0.05$  水平上则有显著的负相关(-0.551)。通过对整个相关分析结果研究发现:若将跟热值正相关的因素(如可燃物、橡塑类)分为一类,而将跟热值负相关(如灰分、容重、厨余类)的因素作为另一类,则发现可燃物跟有机质[0.445( $r=0.05$ )]、橡塑类[0.718( $r=0.01$ )]有显著正相关性,而跟含水率[-0.526( $r=0.05$ )]、灰分[-0.997( $r=0.01$ )]、厨余类[-0.730( $r=0.01$ )]、沙土类[-0.510( $r=0.05$ )]则有负相关性。

### 2.4 垃圾物理性质和物理组成统计分析

对上述垃圾的可燃物、有机质、含水率、灰分、容重以及物理成分数据依据相关分析结果进行分组(同一组内相关性高),每一组定义为一个因子,再利用主成分分析法提取公因子,然后利用方差极大法旋转(使得数据更方便解释,但不损害数据质量)因子轴,并通过方差贡献大小选择特征值大于 1 的因子(整个过程通过 SPSS 20.0 完成)。

图 9 展示了旋转后因子载荷图,可以看出,橡塑类、纸类、可燃物纺织类等对热值有促进作用的组分均聚在一起,而热值的负轴所对应的则是厨余垃圾、容重、灰分、玻璃类、含水率、混合类和木竹类等对热值有负影响的因素。因此,统计分析结果再次证明纺织类、橡塑类、纸类、可燃物对垃圾热值有促进作用,而厨余垃圾、玻璃、容重、灰分、含水率、沙土类则对热值有负的作用。

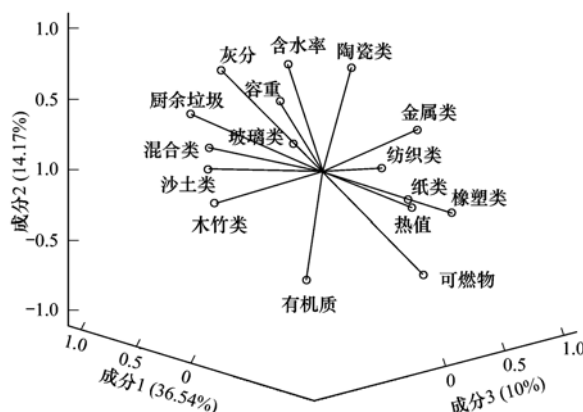


图9 生活垃圾性质、物理组成旋转后载荷

Fig. 9 Rotated load chart of characteristics and physical composition of MSW

## 3 结论

(1) 我国经济发达地区的生活垃圾组成与国外发达地区例如美国、芬兰的生活垃圾组成有显著性差别,与中低收入国家地区如马来西亚的吉隆坡生活垃圾组成比较接近类似;我国厨余类垃圾所占比例远高于国外发达地区,可燃物所占比例远低于同等经济水平的国外地区,但橡塑类所占比例却高于例如美国,橡塑类所占比例偏高,焚烧所产生的二噁英的可能性就会急剧增加,焚烧所带来的生态风险加大。

(2) 研究区域垃圾平均容重  $0.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为普通垃圾;垃圾平均热值为  $8243 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,高于世界银行推荐生活垃圾焚烧所需的  $7000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  下限标准要求,稍高于国内其它区域城市的生活垃圾热值,该区域垃圾适于焚烧。

(3) 气候(主要指降水)对不同区域垃圾含水率的影响小于垃圾成分本身对其含水率的影响。

### 参考文献:

- [1] 郭艳华,阮晓波,周晓津. 广州生活垃圾处理的思路与对策[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(6): 6-10, 13.
- [2] 张海龙,李祥平,林必桂,等. 珠三角某垃圾焚烧厂周边环境空气重金属分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1833-1839.
- [3] 唐次来,张增强,张永涛,等. 杨凌示范区城市生活垃圾的理化性质及处理对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1365-1370.
- [4] 陈家钦,刘德红. 厦门市生活垃圾热值监测及其影响因素分析[J]. 环境卫生工程, 2010, 18(6): 14-15, 18.
- [5] 唐莹. 天津市城市生活垃圾热值测定分析[J]. 环境卫生工程, 2013, 21(3): 26-27.
- [6] 黄本生,李晓红,王里奥,等. 重庆市主城区生活垃圾理化性质分析及处理技术[J]. 重庆大学学报(自然科学版),



- 2003, **26**(9): 9-13.
- [ 7 ] 韩智勇, 梅自力, 税云会, 等. 云贵高原农村地区生活垃圾特性与管理分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(12): 2495-2501.
- [ 8 ] Liu Z Q, Liu Z H, Li X L. Status and prospect of the application of municipal solid waste incineration in China [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26**(11-12): 1193-1197.
- [ 9 ] Troschinetz A M, Mihelcic J R. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries [J]. *Waste Management*, 2009, **29**(2): 915-923.
- [ 10 ] 周传斌, 刘晶茹, 王如松, 等. 城市社区生活垃圾减量化的集成技术研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2768-2773.
- [ 11 ] 沈金键, 陈勇, 张衍国, 等. 两种垃圾焚烧炉灰渣的重金属成分与放射性检测[J]. 安全与环境学报, 2005, **5**(3): 29-32.
- [ 12 ] 陈鲁言, 钟姗姗, 潘智生, 等. 香港、广州、佛山和北京市政垃圾的成分比较及处理策略[J]. 环境科学, 1997, **18**(2): 58-61, 95.
- [ 13 ] 邢益和, 余载礼, 李丽桃, 等. 顺德市 4 镇生活垃圾现状调查和处置方法的研究[J]. 环境卫生工程, 1994, (3): 15-16.
- [ 14 ] 刘波. 煤与城市固体废弃物共热解资源化研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011. 2-3.
- [ 15 ] Hortalainen M, Teiravuo N, Kapustina V, *et al.* The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland[J]. *Waste Management*, 2013, **33**(12): 2680-2686.
- [ 16 ] US EPA. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2012[R]. United States Environmental Protection Agency Solid Waste and Emergency Response (5306P) Washington, DC 20460, 2014. 14.
- [ 17 ] Kathirvale S, Yunus M N M, Sopian K, *et al.* Energy potential from municipal solid waste in Malaysia[J]. *Renewable Energy*, 2004, **29**(4): 559-567.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                             |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta .....                                            | LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 1 )                       |
| Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen .....                                                                                | XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> ( 11 )                 |
| Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO <sub>2</sub> over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years .....                                                   | FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> ( 18 )              |
| Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning .....                                                                                           | HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> ( 25 )                   |
| Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H <sub>2</sub> ) in the Atmosphere .....                                        | LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> ( 34 )         |
| Partial Pressure of CO <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir .....                                         | ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong ( 40 )                     |
| Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer .....                                                            | LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng ( 49 )                   |
| Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data .....                                                                       | ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> ( 56 )            |
| Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed .....                                                                            | MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling ( 64 )                      |
| Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin .....                                                 | YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> ( 72 )                 |
| Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake .....                                                                             | WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> ( 80 )              |
| Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship .....                                                           | SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> ( 87 )     |
| Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin .....                                                          | LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue ( 94 )                             |
| Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake .....                                                                   | DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang ( 107 )                      |
| Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth .....                                                                                                       | WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> ( 114 )        |
| Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir .....                                                                                                      | CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> ( 121 )          |
| Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....                                                               | WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> ( 130 )               |
| Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area .....                                               | ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> ( 136 )               |
| Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water .....        | SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> ( 143 )         |
| Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region ..... | GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> ( 151 )                   |
| Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC) .....         | ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> ( 163 )          |
| Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....          | LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> ( 172 )       |
| Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen .....                                                      | CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> ( 179 )        |
| Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain .....                                                             | WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> ( 186 )         |
| Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China .....                                                                  | ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> ( 194 )          |
| Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake .....                                                                                       | CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> ( 202 )           |
| Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide .....                                                                                                      | CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> ( 209 )             |
| Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon .....                                                                                                                      | WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> ( 215 )             |
| Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives .....                                                                                                                | ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> ( 221 )           |
| Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene .....                                                                                              | ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui ( 227 )                        |
| Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process .....                                                                                | ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> ( 237 )             |
| Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study .....                                                                                                       | CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 244 )         |
| Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i> .....                                                                                | DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 252 )           |
| Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions .....                                                                                     | ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> ( 259 )           |
| Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China .....                                                | ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> ( 266 )       |
| Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province .....                                                                   | ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> ( 274 )                |
| Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm .....                                                                                                 | XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> ( 280 )            |
| Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber( <i>Cucumis sativus</i> L. ) .....                                                                   | XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 286 )           |
| Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen .....                                                                                                           | HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> ( 295 )        |
| Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China .....                                                      | SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> ( 301 )         |
| Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil .....                                                                                                        | WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> ( 309 )       |
| Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures .....                             | SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> ( 314 )              |
| Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China .....                                                                                                       | ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> ( 325 )    |
| Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation .....                                                                                                         | LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> ( 333 ) |
| Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor .....                                                                                                    | XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 338 )     |
| A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide .....                                                                                                            | LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> ( 343 )             |
| Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China .....                                                                                     | ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> ( 349 )           |
| Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i> .....                                                                                          | ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> ( 357 )      |
| Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton .....                                                                                     | LI Man-lu, JIANG Yue-lu ( 365 )                                       |

# 《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                     |                 |    |                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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

国内外公开发刊