

# 某电子废弃物拆卸区土壤、水和农作物中砷含量状况研究

姚春霞, 尹雪斌, 宋静, 李晨曦, 钱薇, 赵其国, 骆永明\*

(中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 为研究电子废弃物拆卸、废旧金属冶炼等是否对周围环境造成砷积累和污染, 选取浙江省台州路桥区为调查对象, 通过测定在该区采集的水、沉积物、土壤以及稻米和蔬菜中的砷, 以了解该地区环境中砷的含量特征和潜在风险, 并对土壤-水稻系统砷的分布和吸收转运规律进行了初步分析. 结果表明, 地表水和地下水砷含量平均值分别为 8.26  $\mu\text{g/L}$  和 18.52  $\mu\text{g/L}$ , 部分地下水超过 WHO 推荐的饮用水标准(10  $\mu\text{g/L}$ ), 但没有超过我国相关环境标准Ⅲ级限值(50  $\mu\text{g/L}$ ). 沉积物砷含量平均值为 9.62 mg/kg. 水田土壤和菜地砷含量平均值分别为 7.11 mg/kg 和 6.17 mg/kg, 均在一级标准范围内, 该区农田土壤总体上未受砷的污染. 糙米和蔬菜中的砷平均值分别为 165.1  $\mu\text{g/kg}$  和 144.2  $\mu\text{g/kg}$ , 均未超过我国规定的食品卫生标准. 土壤-米糠-糙米中砷含量之间相关性显著. 冶炼源周围的土壤和米糠中砷含量较其他源高, 可能已经对周围土壤-水稻砷积累产生影响.

**关键词:** 砷; 水; 沉积物; 土壤; 糙米; 米糠; 蔬菜

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1713-06

## Arsenic Contents in Soil, Water, and Crops in an E-waste Disposal Area

YAO Chun-xia, YIN Xue-bin, SONG Jing, LI Chen-xi, QIAN Wei, ZHAO Qi-guo, LUO Yong-ming

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In order to study whether disposing electronic wastes and secondary metal smelting could cause an arsenic pollution in the environment or not, Luqiao town, Taizhou City, Zhejiang Province was selected as a study area. The main purpose of this paper was to characterize arsenic contents in the local environment, including waters, sediments, soils and rice, and to assess the potential risk to humans. Additionally, the arsenic spatial distribution property and arsenic uptake-translocation rule in soil-rice system were also studied. The results showed that the average arsenic levels in the surface water and the groundwater were 8.26  $\mu\text{g/L}$  and 18.52  $\mu\text{g/L}$ , respectively, which did not exceed the limiting value of Chinese Environment Standards class III. Whereas, some groundwater exceeded the recommended standard by the WHO for drinking water (10  $\mu\text{g/L}$ ). The arsenic (on average 7.11 mg/kg) in paddy soils and arsenic (on average 6.17 mg/kg) in the vegetable garden soils were lower than the value recommended by the National Standard (level I). The average arsenic contents in brown rice and husks were 165.1  $\mu\text{g/kg}$  and 144.2  $\mu\text{g/kg}$ , which was also lower than the Chinese Foods Quality Standard. The arsenic contents between the corresponding soils-rice and husks-brown rice showed significantly positive correlations. By comparison, the arsenic contents of soils and husks collected around electroplating were relatively higher than most of other pollutant sources, indicating the electroplating may lead accumulation of arsenic in the paddy soil-rice system.

**Key words:** arsenic; water; sediment; soil; brown rice; rice husks; vegetable

砷是一种常见的危害人类健康的致癌污染物之一, 其造成的污染已经逐渐成为一个世界性的环境问题<sup>[1~3]</sup>. 世界上曾发生多起砷中毒的事件, 全球大约有数十万个砷污染点, 据统计, 目前世界上有 19 个国家发生较大区域的砷污染<sup>[4]</sup>. 土壤中 As 的本底主要来源于成土母质, 其浓度大小和分布由成土过程的环境因素所决定, 虽然相对于成土母质有了明显的富集, 但一般不会超过 15 mg/kg (除一些特殊的富 As 地区外)<sup>[5,6]</sup>. 环境中砷的污染主要来自人为因素, 尤其工业三废造成的. 一是含砷金属矿石的开采、焙烧以及冶炼过程中排放的含砷烟尘、废水、废气、废渣和矿渣造成的污染, 二是用含砷农药防治病

虫害, 造成对水源、大气、土壤、水果、蔬菜的污染.

电子废弃物拆解可以给当地带来廉价的原材料和丰厚的财富, 但是手机电路板、电脑元器件等电子废弃物中含有金属镉、砷、锑、铍、铅、镍、锌等多种有毒有害物质, 若处置不当, 随意丢弃、焚烧、掩埋、酸泡, 将会严重污染环境<sup>[7~9]</sup>. 浙江台州地区是中国主要电子废弃物集散处理地, 拆解企业发展有近 20 年

收稿日期: 2007-06-25; 修订日期: 2007-10-10  
基金项目: 中-荷战略科技联盟计划项目(2004CB720403); 国家自然科学基金重点项目(40432005); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410810); 江苏省博士后科研计划项目  
作者简介: 姚春霞(1976~), 女, 博士, 主要研究方向为土壤重金属污染与食品安全风险评估, E-mail: chunxia.yao@163.com  
\* 通讯联系人, E-mail: ymluo@issas.ac.cn

的历史,目前有关台州电子废弃物拆解行业带来的环境危害越来越得到人们的关注<sup>[10]</sup>.有相关调查显示,该地区主要河流椒江入海口处水中 PCBs 主要来源于废旧电器拆解业污染物的排放迁移<sup>[11]</sup>.该地区重金属污染尤为严重,对台州个别村镇的研究表明土壤中 Cu、Pb 的含量已经超过国家相关标准,Zn、Mn、Ni 的含量高于浙江省土壤平均背景值,部分地区稻米中重金属严重超标<sup>[12,13]</sup>.目前有关该地区环境中水-土壤-作物的砷含量情况还没有系统的研究,作为电子废弃物污染场地,浙江台州地区废弃的电器元件中所含的砷元素可能通过各种途径进入土壤环境、水环境中,从而进入生物食物链,威胁人体健康和生态安全.本研究通过分析该地区地表水和地下水、河流沉积物、土壤、植物样品的砷含量,对该地区的砷含量现状进行调查和评价,以期为该地区环境治理与保护提供科学依据.

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域概况

采样区位于浙江省台州市路桥区.路桥,浙江省台州市主体城区之一,全区陆域面积 274 km<sup>2</sup>,辖 10 个镇(街道),总人口 42.1 万.路桥位于浙江沿海中部,中国黄金海岸中段.全区背山面海,丘陵与平原相间;河道纵横,水网密布,介于北纬 28°27′~28°38′和东经 121°13′~121°40′之间.因成陆时间和耕作历史不同,导致土壤脱盐脱钙程度不同,土壤类型复杂多样,形成了不同土系<sup>[14]</sup>.年降水量为 1 441.9 mm,年平均气温为 16.1℃,冬夏盛行风向分别为西北风和东南风,属亚热带季风气候型.

台州自 20 世纪 80 年代开始进行接受国内外废弃电子物品进行拆解,提炼其中能二次利用的铜、金等金属.但当时拆解工艺落后,绝大多数属小工厂作坊,废弃电子物品就地露天堆放,工艺环境简陋.电子废弃物中众多有毒元素也随之进入环境,使当地环境形势不容乐观.路桥区 1998 年成为浙江省首个新农村县,农业产业结构不断调整优化,金属再生园等特色工业园区建设明显加快,经济运行质量稳步提高.但在工、农业迅速发展的过程中,也突显了环境问题,近百家以手工作坊形式经营的废旧机电、电器和工程设备拆解回收金属点广泛分布于区内,个别企业和个别地方的露天焚烧,对土壤和水体环境造成破坏.峰江镇是大量该类企业集中分布区.

## 1.2 样品采集

水样和沉积物样:地下水水样采集地点为峰江

镇的施加村,亭屿村、新民村.地表水水样采集点为施加村水塘、下陶村水塘、变压器拆卸地邻近水塘、西兰花基地河水等地,同时采集了部分对应的底泥样品.共采集地下水样 3 个,地表水样 23 个,沉积物样 20 个.

农田土壤样:按照拆卸区的情况先选定了 5 个预先设定的污染源.以这 5 个不同污染源为中心,沿不同方向距离在污染源周围由近及远采样,进行土壤砷污染调查,以期了解砷的含量特征,揭示砷的空间分布规律.5 个污染源及采集的样品数为:酸洗污染源(20 个)、废弃物品拆卸场(10 个)、焚烧源(15 个)、冶炼厂(21 个)、变压器拆卸地(7 个).采集 0~15 cm 的表层土壤 5 个点,将土样混合均匀,四分法取 1 kg 土样,作为这一采样点的最终样品.采样时以农田土壤为主,包括水田、菜地.为研究水田-水稻砷的传输规律,在水田布设的样点处采集整株水稻,选取 5 个采样点混合作为最终样品.在路桥区峰江镇和蓬街镇 27 个村共采集了对应的水田土壤-稻米 73 对,菜地土壤-蔬菜 13 对.采样的同时用 GPS 定位采样点坐标.

## 1.3 样品的分析

### 1.3.1 样品预处理

(1)水样及沉积物 水样采集后用玻璃瓶密封好,静置沉淀,除去水中悬浮颗粒杂质,防止对测定产生干扰,取上清液,置入 4℃冷库中冷藏保存,并尽快进行测定实验.沉积物处理方法同土样.

(2)土样 风干,取风干样品 100~200 g,使土样全部通过 2 mm 孔径(10 目)的标准尼龙筛,将土样混匀储于广口瓶内.四分法取一部分已过 2 mm 筛的土样,用玛瑙研钵继续研细,使其全部通过 100 目筛.研磨过筛后的样品混匀、装瓶,并贴上相应的标签,封存备用.

(3)糙米及米糠 在采集区域内随机选取几株水稻,剪取收集成熟的稻穗,每个水稻样品为 5 个以上稻穗混合,水稻样 35℃烘干后,脱壳,糙米和米糠分别用植物粉碎机进行磨碎,过 100 目尼龙筛,装袋、记录封存,待测.

### 1.3.2 样品测定

准确称取每个样品 0.2 g(精确至 0.000 1 g)置于干净三角瓶中,每个样品加 4 mL 浓 HNO<sub>3</sub> 和 2 mL 浓 HClO<sub>4</sub>,冷硝化过夜,次日在电炉上 120℃消煮 3 h,然后升温至 220℃消煮 2 h.冷却,加入 5 mL 盐酸酸化 3 h,定容至 25 mL.加入硫脲-维生素 C 还原剂稳定 0.5 h 以上测定.实验过程中使用的玻璃器

皿均经过超声波清洗、浓度比为 1:3 HNO<sub>3</sub> 溶液浸泡过夜,并用 18.3 MΩ·cm 去离子水冲洗,使用的试剂均为优级纯.砷的检测采用 AFS-930 双道原子荧光光度计,机器检出限 DLAs≤0.02 μg/L;相对标准偏差 RSD≤5%.按照样品 10% 插入国家标准土壤样品进行数据的质量控制.

2 结果与分析

2.1 水体及沉积物中砷的含量

水样和沉积物样中砷的含量统计见表 1.

表 1 水样和沉积物样中砷含量( n = 46)

| Table 1 Arsenic contents in water and the sediments( n = 46) |     |              |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------|-----|--------------|-------|-------|-------|
| 样品                                                           | 样品数 | 范围           | 平均值   | 中值    | 标准偏差  |
| 地下水/μg·kg <sup>-1</sup>                                      | 3   | 4.45 ~ 29.63 | 18.52 | 21.48 | 12.85 |
| 地表水/μg·kg <sup>-1</sup>                                      | 23  | 2.46 ~ 21.35 | 8.26  | 6.63  | 4.88  |
| 沉积物样/mg·kg <sup>-1</sup>                                     | 20  | 3.09 ~ 19.97 | 9.62  | 9.36  | 4.3   |

当地地表水均作为生产用水,不作饮用水源,根据国家地表水质量标准(GB 3838-2002)中规定的砷标准,适用国家地表水质量标准规定的Ⅲ级(50 μg/L)至Ⅴ级标准限值(100 μg/L),没有超过环境标准限值.作为当地居民饮用水源的地下水中,砷含量比地表水中偏高,参照国家地下水质量标准(GB/T 14848-93)中关于地下饮用水砷含量标准限值,测得 3 个采样点的地下水未超过国家地下水环境质量Ⅲ级标准(50 μg/L),但大大超过Ⅰ级(5 μg/L)和Ⅱ级标准(10 μg/L).王敬华<sup>[15]</sup>通过对山西山阴与应县水环境研究发现,长期饮用含砷量在 50 ~ 200 μg/L 水,会对人体产生轻型砷中毒的症状.在孟加拉国许多地区,地下水中的砷含量是这个上限的 6 倍,是全世界砷污染最严重的国家之一<sup>[16]</sup>.鉴于砷在体内积累会带来严重的影响,美国环境保护署从 2002-02-22 起将饮用水中砷最高允许含量降至 10 μg/L<sup>[17]</sup>,该标准得到世界卫生组织的推荐.虽然在台州路桥区采集的地下饮用水样中砷的含量均未超过 50 μg/L,依照世界卫生组织推荐饮用水中砷最高允许含量标准,采样地区地下水样 3 个样品中只有 1 个符合该标准,超标的 2 个样品砷含量分别为该标准的 1 ~ 2 倍.

4 个相同地点沉积物上部分与下部分样品中砷含量统计见表 2.从表 2 可以看出沉积物下部分砷含量要明显高于上部分,原因有可能是砷在水中长时间的沉积行为.底泥中的砷的在环境发生变化,pH 或 Eh 发生改变,可能导致沉积物中可溶态砷的释放,带来水体砷浓度的增加.乔永民等<sup>[18]</sup>对广东

表 2 相同采样点沉积物上部与下部砷含量/mg·kg<sup>-1</sup>

| Table 2 As contents of top and subsurface layers of the sediment/mg·kg <sup>-1</sup> |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 部分                                                                                   | 采样点 1 | 采样点 2 | 采样点 3 | 采样点 4 |
| 上部                                                                                   | 3.46  | 5.91  | 10.61 | 3.09  |
| 下部                                                                                   | 9.26  | 15.68 | 12.33 | 8.01  |

东部拓林湾淡水和近海海水表层沉积物中砷进行研究,认为水体沉积物中砷的浓度高于周围水体,其中铁的氢氧化物和水合氧化铁是控制砷在水域沉积物中砷分布的重要因子,并认为环境的变化可能会导致沉积物中的砷向周围水体释放.王剑影等<sup>[19]</sup>对海河流域漳卫南运河沿岸的 25 个沉积物样品进行了砷含量的测定,测得沉积物中砷含量范围为 1.16 ~ 20.25 mg/kg,认为研究流域水中沉积物砷含量不高.沈学优等<sup>[20]</sup>对金华化工厂附近的西湖塘采集的 4 个底泥砷总量范围为 193 ~ 492 mg/kg,其含量均大大超过国家农用污泥控制标准(砷 < 75 mg/kg, GB 4284-84).通过对底泥中砷含量测定,参考上述的研究区域,认为台州路桥区采样点的水中沉积物砷含量较低.

2.2 土壤中砷的含量

2.2.1 水田和菜地的砷含量

如图 1 所示,水田砷含量范围为 2.77 ~ 12.47 mg/kg(平均值 7.11 mg/kg ± 1.98 mg/kg, n = 73),中值 6.75 mg/kg.菜地的砷含量范围为 5.43 ~ 7.47 mg/kg(平均值 6.17 mg/kg ± 0.64 mg/kg, n = 13),中值 6.23 mg/kg.低于浙江省土壤砷含量平均背景值(10.2 mg/kg)<sup>[21]</sup>,也低于全国土壤的砷含量平均背景值(11.2 mg/kg)<sup>[22]</sup>.根据土壤 As 的环境质量标准(GB 15618-1995),采集的水田和菜地土样中砷的含量均在一级标准范围内.总体来说,该区农田土壤未受砷污染.

2.2.2 不同污染源周围水田土壤的砷含量

由于菜地采集样本比较少,这里只对水田土壤砷含量进行源分析.根据采样污染源划定的区域计算各污染源周围土壤砷的含量(表 3).从表 3 可以看出,冶炼厂对周围土壤中砷含量的影响最大,其周围土壤中砷含量平均值达 9.66 mg/kg,最大值已经超过浙江省土壤砷含量平均背景值(10.2 mg/kg),而酸洗污染源、废弃物品拆卸场、焚烧源、变压器拆卸地周围土壤砷的平均含量范围在 5.12 ~ 7.10 mg/kg.

土壤 As 含量的平均值高低依次为冶炼源、酸洗源、废弃物品拆卸源、变压器拆卸源、焚烧源.冶炼厂对周围土壤中 As 含量的影响最大.经均值多重比较的统计检验,冶炼厂和酸洗源显著高于废弃物品拆

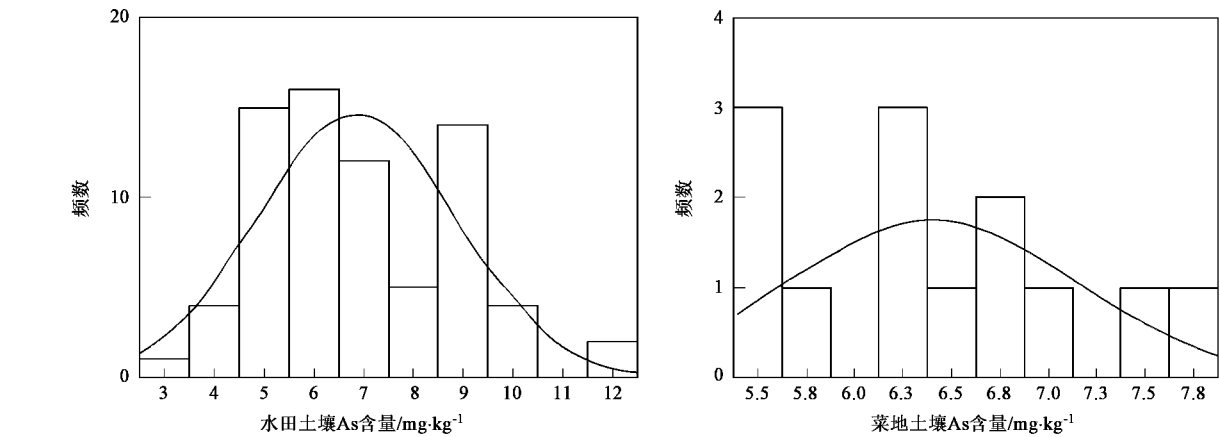


图 1 水田和菜地的砷含量频数分布

Fig.1 Frequency histogram of As contents in paddy soils and vegetable soils

表 3 不同污染源周边土壤中砷含量 (n = 73)/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Soil As contents in the vicinity of different pollutant sources (n = 73)/mg·kg<sup>-1</sup>

| 项目   | 酸洗源    | 废弃物品<br>拆卸源 | 焚烧源    | 冶炼源    | 变压器<br>拆卸源 |
|------|--------|-------------|--------|--------|------------|
| 最小值  | 5.89   | 4.69        | 2.77   | 8.19   | 4.78       |
| 最大值  | 8.35   | 6.86        | 6.21   | 12.47  | 8.99       |
| 平均值  | 7.10   | 6.73        | 5.12   | 9.66   | 5.84       |
| 中值   | 7.22   | 5.95        | 5.40   | 9.38   | 5.41       |
| 标准偏差 | 0.68 c | 0.93 b      | 0.89 b | 2.02 a | 0.51 b     |

卸源、变压器拆卸源、焚烧源对周围土壤 As 含量的影响 ( $p < 0.05$ ). 冶炼厂周围土壤 As 含量也显著高于酸洗源周围土壤 As 含量 ( $p < 0.05$ ), 废弃物品拆卸源、变压器拆卸源、焚烧源周围土壤 As 含量各组均值没有显著性差异. 在各污染源的不同方向上, 没有发现土壤中砷含量与距离污染源的远近表现出一定的趋势. 潘虹梅等<sup>[12]</sup>等对路桥区下谷岙村的焚烧源与拆解源主导风向方向土壤中砷含量研究也发

现, 随着样点至污染源距离的增加, 砷含量变化并不明显.

2.3 糙米-米糠和蔬菜中砷的含量分析

2.3.1 糙米-米糠和蔬菜的砷含量

糙米-米糠的砷含量频数分布如图 2 所示. 糙米砷含量范围为 63.6 ~ 378.0  $\mu\text{g/kg}$  (平均值 165.1  $\mu\text{g/kg} \pm 67.8 \mu\text{g/kg}$ ,  $n = 73$ ), 中值 158.0  $\mu\text{g/kg}$ . 米糠砷含量范围为 113.4 ~ 925.3  $\mu\text{g/kg}$  (平均值 349.3  $\mu\text{g/kg} \pm 191.6 \mu\text{g/kg}$ ,  $n = 73$ ), 中值 291.7  $\mu\text{g/kg}$ .

在 73 个糙米样品中有 60 个砷的含量高于全国水稻籽粒砷含量的背景值 (0.1 mg/kg)<sup>[23]</sup>, 超过背景值得样品数占总样品数的 82.19%, 米糠砷的含量要明显高于糙米, 高出范围为 1.02 ~ 5.59 倍, 平均高出 2.29 倍. 蔬菜砷含量范围为 24.9 ~ 294.7  $\mu\text{g/kg}$ , (平均值 144.2  $\mu\text{g/kg} \pm 80.4 \mu\text{g/kg}$ ,  $n = 13$ ), 中值 141.6  $\mu\text{g/kg}$ . 以我国食品卫生标准评价, 糙米和蔬菜中砷含量均低于国家食品中水稻 As 允许标准

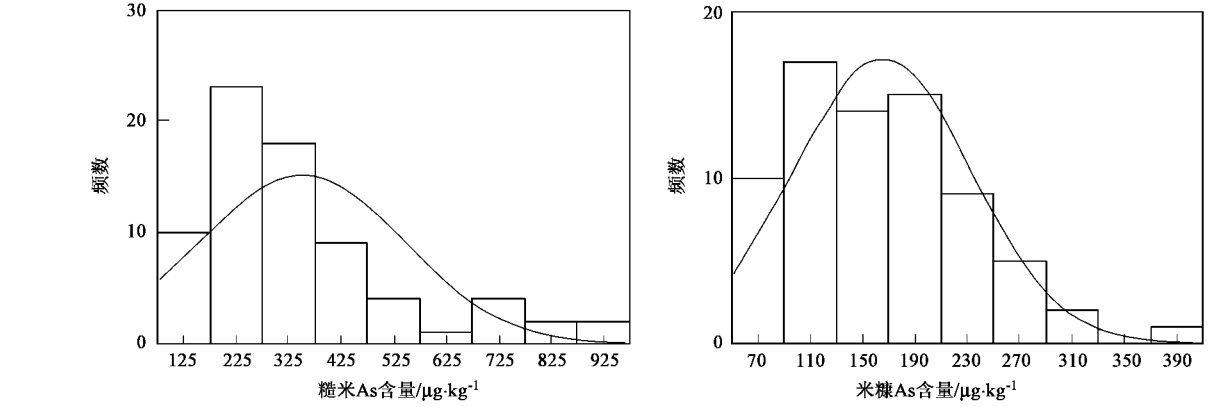


图 2 糙米-米糠的砷含量频数分布

Fig.2 Frequency histogram of As concentrations in brown rice and husks

(糙米: 700  $\mu\text{g/kg}$ , GB 2715-81; 蔬菜: 500  $\mu\text{g/kg}$ , GB 2715-81). 王世纪等<sup>[13]</sup>在研究了台州 3 个重金属重度污染区和 2 个污染区外的水稻颗粒中的砷含量, 测得污染区外内水稻籽粒中平均砷含量为 0.36  $\text{mg/kg}$ , 污染区内则为 0.4  $\text{mg/kg}$ , 相差 0.04  $\text{mg/kg}$ . 均超过了全国水稻籽粒的平均背景值, 也高于本实验采样点测得的糙米中砷含量. 米糠中的砷含量较高, 砷不仅来源于水稻从土壤中的吸收, 来源于大气中含砷尘粒的沉降也可能引起米糠中测得的砷含量要

高于糙米中的砷含量, 由于米糠可以作为饲料喂养家畜, 米糠砷通过食物链也可能进入附近居民的体内积累.

2.3.2 糙米和米糠的砷含量源分析

糙米和米糠的砷含量统计分析见图 3. 其中, 上下 2 条线分别表示含量的第 75 和 25 百分位数, 中间的“+”表示第 50 百分位数, 上截止线是含量最大值, 下截止线是含量最小值, 带相同字母的同一类用地平均值表示不同用地类型间差异不显著.

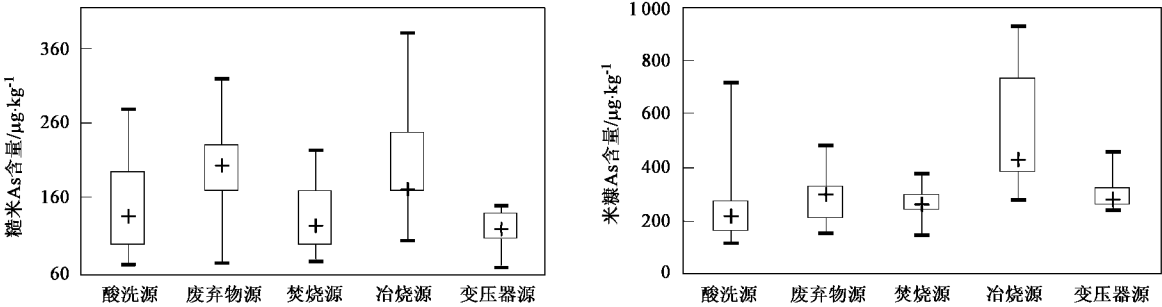


图 3 不同污染源周围糙米和米糠的砷含量  
Fig.3 As contents of brown rice and husks of different polluted sources

从不同源区域的糙米和米糠样品中砷含量分析来看, 米糠与采样区域测得的土壤砷含量数据相对应, 冶炼厂周围米糠中砷含量同样要明显高于其它污染源周围区域, 而不同源周围采集的糙米砷含量没有显著差异. 冶炼厂可能对土壤和水稻中砷含量的增加有较大的影响. 糙米与米糠中砷含量同土壤中含砷量不同方向上统计结果一样, 并不能明显看出砷含量高低与假定源距离之间的趋势关系. 分析出现这种情况的原因可能是农作物中砷的含量存在其他的影响因素, 比如耕作、施肥、喷撒农药等农田人为处理方式不同, 以及种植的水稻品种不同, 都会对上述的分析产生影响.

2.4 土壤-作物中砷的吸收转运规律分析

如图 4 所示, 米糠与土壤中砷含量的相关系数 ( $r$ ) 为 0.538 ( $p < 0.01$ ,  $n = 73$ ), 呈显著正相关. 糙米与土壤中砷含量呈显著相关, 相关系数为 0.350 ( $p < 0.01$ ,  $n = 73$ ). 王世纪等<sup>[13]</sup>研究了台州地区 5 个采样点水稻籽粒与土壤中砷含量的相关关系, 结果表明水稻样品于相应的土壤中砷含量呈正相关. 谢正苗等<sup>[24]</sup>做过水稻的盆栽培养试验, 显示出土壤的总砷、 $\text{HCl-As}$  和  $\text{H}_2\text{O-As}$  的含量上与水稻含砷量有很好的相关性. 韦朝阳等<sup>[25]</sup>也得到同样的结论. 米糠与土壤中砷相关性要好于糙米与土壤中砷含量的

相关性. 米与米糠中的砷呈显著相关性, 相关系数为 0.587 ( $p < 0.01$ ,  $n = 73$ ), 这与文献<sup>[26]</sup>在浙江富阳地区采样研究测得米糠-糙米中砷含量的关系类似, 而富阳地区糙米和米糠中砷含量比台州地区采集的糙米和米糠平均砷含量要高 2 倍, 富阳金属冶炼带来的砷污染相对台州要严重些. 土壤-蔬菜中砷没有显著相关关系.

富集系数是衡量植物对重金属积累能力大小的一个重要指标. 稻米对土壤中砷的富集系数范围为 0.01 ~ 0.07, 平均值 0.025, 米糠对土壤中砷的富集系数, 范围为 0.02 ~ 0.12, 平均值 0.05, 米糠对土壤中砷的富集系数是糙米的 2 倍, 米糠更容易富集土壤中的砷. 黄均等<sup>[27]</sup>通过对重庆市采集土壤-水稻样品分析, 表明水稻对土壤中砷的富集系数平均为 0.04, 高于台州的平均值.

3 结论

- (1) 浙江省台州路桥区地表水、地下水和河流沉积物中砷含量不高, 水砷含量没有超过中国水环境标准限值, 说明水质受电子废弃物污染场地排放砷的影响不是很大, 但是存在部分地下水样砷含量超过 WHO 推荐的饮用水标准 (10  $\mu\text{g/L}$ ).
- (2) 水田和菜地土壤中砷的含量在中国土壤环境标准限值范围内, 没有受到砷污染, 但冶炼厂周围

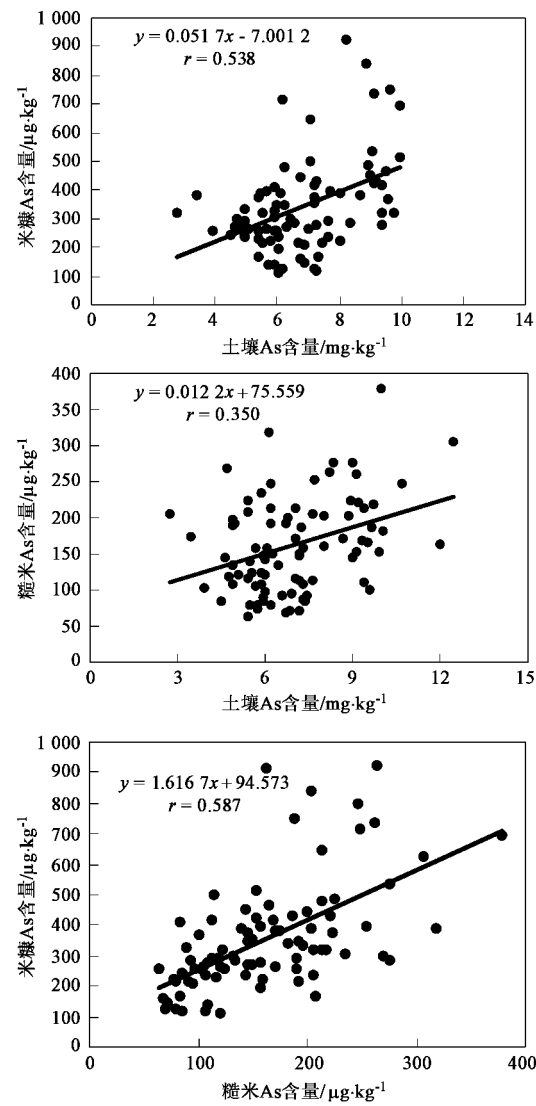


图4 土壤-米糠-糙米中砷含量的相关关系( $n = 73$ )

Fig.4 Correlations of As contents soils-husks-brown rice

土壤较其它污染源周围的土壤砷含量有更多积累。

(3) 糙米和蔬菜的砷含量低于国家相应的砷允许值标准.冶炼厂周围米糠砷含量比其它源周围采集的样品砷含量高,可能冶炼厂对周围的水稻土-水稻系统砷积累已经有轻微的影响。

致谢: 谨对南京农业大学实习生隋少坤、白晓娟,中国科学院南京土壤所章海波、滕应、刘五星、毕德等多位老师和同学在采样和分析中给与的支持表示感谢。

参考文献:

[ 1 ] Hingston J A, Collins C D, Murphy R J. Leaching of chromated copper arsenate wood preservatives: a review [J]. Environment Pollution, 2001, **111**(1): 53-66.  
[ 2 ] Kirk D N. Worldwide occurrences of arsenic in ground water[J]. Science, 2002, **296**: 2143-2145.

[ 3 ] Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al.* Soil As contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, Southern China[J]. Environ Int, 2005, **31**(6): 791-798.  
[ 4 ] Xie Z M, Huang C Y. Control of arsenic toxicity in rice plants grown on an arsenic-polluted paddy soil[J]. Commu Soil Sci Plant Anal, 1998, **29**(15-16): 2471-2477.  
[ 5 ] 谢正苗, 黄昌勇, 何振立. 土壤中砷的化学平衡[J], 环境科学进展, 1998, **6**(1): 22-37.  
[ 6 ] 翁焕新, 张宵宇, 邹乐君, 等. 中国土壤中砷的自然存在状况及其成因分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, **34**(1): 88-92.  
[ 7 ] 王小雷, 贺军. 探讨电子废弃物的处置与管理[J]. 环境科学与管理, 2006, **31**(2): 19-21.  
[ 8 ] 杜欢政, 王怡云. 固体废弃物拆解业对环境影响评估及整治[J]. 中国资源综合利用, 2002, (6): 34-46.  
[ 9 ] 吴南翔, 杨寅娟, 俞苏霞, 等. 旧电器拆解业对职业人群及普通居民的健康影响[J]. 环境与健康杂志, 2001, **18**(2): 97-99.  
[ 10 ] 赖芸. 浙江台州电子废物再生调研报告[J]. 中国资源综合利用, 2004, (8): 7-8.  
[ 11 ] 江锦花, 朱利中, 张明. 椒江口水体和生物体中典型有机污染物的浓度水平及来源初探[J]. 环境化学, 2006, **25**(5): 547-549.  
[ 12 ] 潘虹梅, 李凤全, 叶玮, 等. 电子废弃物拆解业对周边土壤环境的影响——以台州路桥下谷岙村为例[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2007, **30**(1): 103-108.  
[ 13 ] 王世纪, 简中华, 罗杰. 浙江省台州市路桥区土壤重金属污染特征及防治对策[J]. 地球与环境, 2006, **34**(1): 35-43.  
[ 14 ] 章明奎, 魏孝孚, 厉仁安. 浙江省土系概论[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 1-9.  
[ 15 ] 王敬华. 山阴与应县地区高砷高氟水的形成环境研究[J]. 内蒙古预防医学, 1997, **22**(4): 145-147.  
[ 16 ] Mazumder B K, Chowdhury T R, Samanta G, *et al.* Arsenic in groundwater in seven districts of West Bengal, India-the biggest arsenic calamity in the world [J]. Curr Sci India, 1996, **70**: 976-986.  
[ 17 ] 李玲, 杜磊, 张华云. 海南标准化信息简报[R]. 海南省标准化协会, 2005, (4): 6-7.  
[ 18 ] 乔永民, 黄长江, 林潮平, 等. 粤东拓林湾表层沉积物的汞和砷研究[J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(3): 28-35.  
[ 19 ] 王剑影, 周怀东, 郝红, 等. 沉积物中砷、汞测定新方法的实验条件分析与研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, **1**(4): 281-285.  
[ 20 ] 沈学优, 吴康跃, 陈苏晓, 等. 金华西湖塘及其灌区砷污染现状研究[J]. 环境污染与防治, 1995, **17**(3): 19-22.  
[ 21 ] 程街亮, 史舟, 朱有为, 等. 浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(1): 103-107.  
[ 22 ] 邢光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 48-49.  
[ 23 ] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
[ 24 ] 谢正苗, 黄昌勇. 土壤-水稻系统中砷污染表征与相关性校验[J]. 广东微量元素科学, 1996, **3**(7): 49-52.  
[ 25 ] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, **7**: 1196-1203.  
[ 26 ] 姚春霞, 尹雪斌, 张长波, 等. 浙江富阳金属冶炼厂周围水田土壤-水稻系统中 As、Se 含量特征[J]. 土壤, 2006, **38**(5): 534-538.  
[ 27 ] 黄均, 刘光德, 李其林, 等. 农产品对土壤中重金属的富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2004, **26**(6): 285-289.