

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽珺,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价

尹伊梦¹, 赵委托^{2*}, 黄庭¹, 程胜高^{1*}, 赵珍丽¹, 余葱葱¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 核工业二〇三研究所环境工程与评价中心, 咸阳 712000)

摘要: 选取广东省贵屿镇为研究区域, 测定土壤中 15 种金属(As、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Mn、Ni、Sb、Sn、Pb、V 和 Zn)的含量, 并确定研究区域大米中重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn)的含量; 运用多元统计分析法和人体健康风险评价模型研究土壤-水稻系统重金属分布特征和健康风险。结果表明, 电子垃圾拆解区周边表层土壤中 Hg、Sb、Sn 具有明显的积累效应, Cd、Hg 的平均含量超过了《土壤环境质量标准》(GB 156182-1995) II 级标准限值, 贵屿镇相较于陈店镇、司马浦镇污染较严重。多元统计分析表明, Cu、Sb、Ni、Zn、Sn、Pb、Hg 来源于周边电子垃圾拆解活动, Cd、Be 来源于其他人为污染源, V、Li、Cr、Co、As、Mn 来源于自然源。土壤-水稻系统重金属迁移积累于稻米中的重金属评价富集量符合国家食品卫生标准, 富集能力 $Cd > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Hg > Pb$ 。土壤重金属健康风险评估结果显示儿童更易受到重金属污染威胁, 经手-口摄入是土壤暴露风险的主要途径, 且各镇土壤重金属的非致癌风险和致癌风险均在可接受范围。贵屿镇通过摄取稻米途径所引起健康风险主要来自 As、Cr、Cu、Ni 元素。

关键词: 电子垃圾拆解区; 土壤污染; 稻米; 重金属; 健康风险评价

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0916-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201704122

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area

YIN Yi-meng¹, ZHAO Wei-tuo^{2*}, HUANG Ting¹, CHENG Sheng-gao^{1*}, ZHAO Zhen-li¹, YU Cong-cong¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. The Center of Environmental Engineering and Assessment, No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

Abstract: This study selected Guiyu Town, Guangdong Province as the research area, the content of 15 kinds of metals (As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, Sb, Sn, Pb, V, and Zn) in the soil was determined, and the content of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) in the rice of this research area was identified. Multivariate statistical analysis and a human health risk assessment model were used to investigate the distribution characteristics and health risk of heavy metals in a soil-rice system. The results showed that Hg, Sb, and Sn in the surface soil surrounding the electronic waste dismantling area have obvious accumulation effect. The average content of Cd and Hg exceeds the II standard limit of the "Environmental Quality Standard for Soil" (GB 156182-1995), and that Guiyu Town is more seriously polluted than Chendian Town and Simapu Town. The multivariate statistical analysis showed that Cu, Sb, Ni, Zn, Sn, Pb, and Hg originated from the surrounding electronic waste dismantling activities, Cd and Be originated from other man-made sources of pollution, and V, Li, Cr, Co, As, and Mn originated from natural sources. Heavy metal evaluation concentration in the soil-rice system by heavy metal migration accumulated in rice are in compliance with national food hygiene standards, and the enrichment ability is $Cd > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Hg > Pb$. Soil heavy metal health risk assessment results showed that children are more susceptible to heavy metal pollution, and handling-oral ingestion is the main way of soil exposure risk. The non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of heavy metals in the soil of each town are acceptable. The health risk in Guiyu Town through ingestion of rice is mainly from the elements that include As, Cr, Cu, and Ni.

Key words: electronic waste dismantling area; soil contamination; rice; heavy metals; health risk assessment

电子垃圾的初步回收(包括手动拆卸、焙烧、酸浸和露天燃烧等)对环境和人类健康造成的潜在有害影响已引起世界各地的广泛关注,特别是在快速工业化和城市化的发展中国家,如中国、印度、越南和加纳^[1~4]。先前研究发现,在电子垃圾拆解区内的空气、水域、土壤和沉积物中经常检测到金属、多溴二苯醚(PBDE)、多氯联苯(PCB)、多环芳烃(PAH)和其他持久性有毒物质^[5~10]。特别地,土

壤环境中的重金属污染由于其毒性、持久性和生物累积性引起了公众注意。龙塘镇电子垃圾拆解区 Cu 浓度分别比土壤 II 级标准高 3 倍左右^[11], 倾倒、

收稿日期: 2017-04-12; 修订日期: 2017-08-17

基金项目: 中央高校青年教师科研启动基金项目(CUGW140908); 国家自然科学基金项目(41072023, 41402312)

作者简介: 尹伊梦(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境风险评价与管理, E-mail: yym_2017@126.com

* 通信作者, E-mail: weituo2006@126.com; chengsg@cug.edu.cn

焚烧和酸浸场所的 Cu 浓度分别比 II 级标准高 10 倍、40 倍和 60 倍^[12]。此外, 贵屿儿童和新生儿的血铅、镉和胎粪铅含量高于临镇^[13~17]。因此, 有必要对电子垃圾拆解区进行健康风险评估。

贵屿, 位于中国广东省东南部汕头市的一个小镇, 是中国南方最大的电子垃圾拆除场所。由于缺乏有效的执法, 非法电子垃圾回收活动仍普遍存在, 使当地环境受到重金属的严重污染。在过去的几十年中, 已经对贵屿进行了许多研究, 以此确定土壤中金属元素的浓度、来源、分布和健康风险。但这些研究仅集中在电子垃圾拆解区表土中的某些主要金属污染物(例如 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn), 很少关注土壤环境中的类金属(例如 Be、Sn 和 Sb)。此外, 关于贵屿电子垃圾拆解区的水^[18]、沉积物^[19]、土壤^[20]、血液^[21]和人体毛发^[22]等多种基质中重金属的来源分布研究日益增多, 但关于贵屿电子垃圾拆解区种植的水稻中重金属的生物累积和生物放大的问题尚未得到处理。大多数未受控制的电子废物处理场所距离种植蔬菜和水稻的农田 500 m 或 500 m 以内, 由这些土壤生产的食物主要由当地居民消费, 因此, 对在电子垃圾拆解区种植的水稻中的重金属潜在健康风险的调查

应得到重视。

基于此, 本文选取广东省贵屿镇为研究区域, 以相邻两镇作为对照组, 测定电子垃圾拆解区周边 31 个土样中 15 种金属(As、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Mn、Ni、Sb、Sn、Pb、V 和 Zn)的含量, 以及贵屿镇电子垃圾拆解区稻米中重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn)的含量; 运用多元统计分析法和人体健康风险评价模型研究电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征和健康风险。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点

研究地点位于中国广东省汕头市贵屿镇及其周边的陈店镇、司马浦镇。将贵屿镇选做电子垃圾拆解的研究区, 另外相邻两镇被选作对照组。贵屿镇电子垃圾具有分片处理加工的特点, 因此贵屿境内土壤样点布设在受电子垃圾影响的几个代表性拆解区域, 陈店镇、司马浦镇境内土壤样点也布设在电子垃圾拆解区周边。图 1 为采样点分布图, 取样点包括贵屿镇境内 14 个取样点, 以及临近贵屿的陈店镇和司马浦镇 17 个取样点, 陈店镇位于贵屿镇西南 9 km 处, 司马浦镇位于贵屿镇东南 10 km 处。

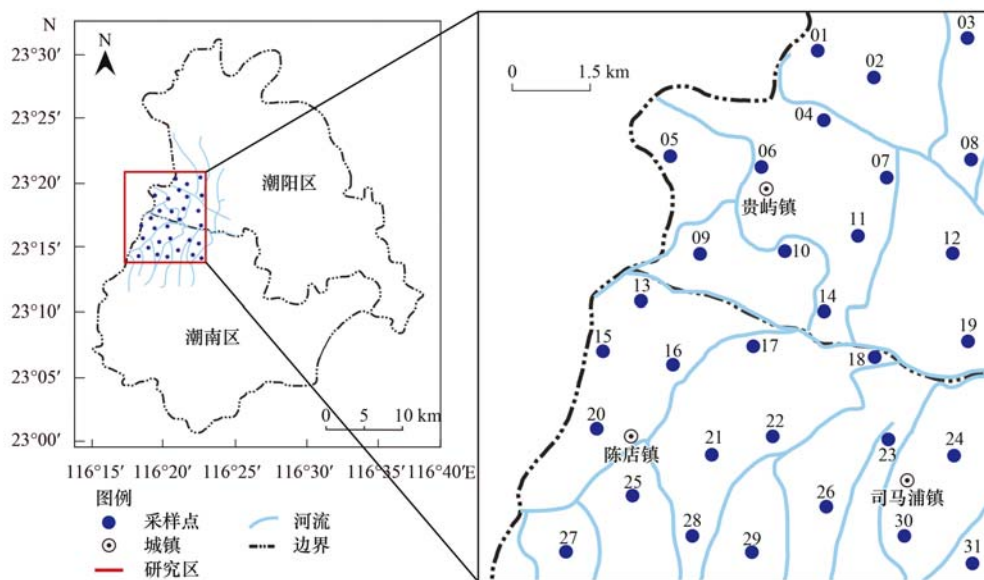


图 1 研究区位置及采样点分布示意

Fig. 1 Location of studied area and distribution map of sampling sites

1.2 样品制备与分析

土壤采集采用多点采样混合法, 即每个样品由在 4 个角落和面积约 10 m × 10 m 的中心收集的 5 个子样品的混合物组成。每个样品分别用铝箔包装并置于聚乙烯袋中, 转移至实验室, 在室温下风

干, 除去植物残体之后用木棒研磨, 通过 2 mm 尼龙筛过筛, 土样分别装入棕色样品瓶中, 于 -20℃ 储存, 供分析使用。此外, 从表土采样点(贵屿)中随机收集了约 200 g 稻米的 7 个水稻样品。每个单独的水稻样品由取自同一稻田的至少 5 个亚样品组

成. 使用无菌检查手套分离异物后, 将谷物样品彻底洗涤并在去离子蒸馏水中漂洗, 去皮, 在室内自然风干. 将脱壳的谷物放在 105℃ 的烘箱中 3 h, 冷却后, 在干净的研钵中研磨 5 min, 然后转移到干净的 HDPE 瓶中. 所有样品 (包括米和土壤样品) 在 -52℃ 和 0.05 bar (0.05 × 10⁵ Pa) 的条件下干燥 48 h, 之后研磨成细粉并密封在聚乙烯瓶中.

样品消解宜选择运用高温溶解样品 (HNO₃-HF-HClO₄) 来完成, Be、Cd、Co、Cr、Cu、Li、Mn、Ni、Sb、Sn、Pb、V 和 Zn 的浓度检测采用 USA 生产的 ICP-MS (电感耦合等离子体质谱仪, Agilent 7700X) 测定. As 和 Hg 浓度通过原子荧光光谱法 (AFS-2202a) 测定. 在分析时采用国家标准土壤样品 (GBW07406)、大米粉成分分析标准物质 (GBW08502) 和大米粉中汞成分分析标准物质 (GBW08508) 进行质量控制.

1.3 研究方法

1.3.1 土壤重金属污染评价方法

(1) 单因子评价法

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为污染物 i 的污染指数, C_i 为污染物 i 的实测浓度, S_i 为污染物 i 的评价标准值. 本研究采用国家土壤环境质量 II 级标准值^[23] (表 4) 评价. 当 $P_i \leq 1$ 时, 表示土壤未受污染, 当 $P_i > 1$ 时, 表示土壤受到污染.

(2) 内梅罗综合指数法

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 为污染物 i 的综合污染指数, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为单项质量指数的平均值, $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为单项质量指数的最大值. 以《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004) 的相关指标为依据来分级评价结果, 如表 1 所示.

表 1 土壤环境质量分级标准

环境质量	土壤单项或综合质量指数	等级名称
1	≤0.7	清洁
2	0.7~1.0	预警
3	1.0~2.0	轻度污染
4	2.0~3.0	中度污染
5	≥3.0	重度污染

1.3.2 健康风险评价模型

(1) 暴露量的计算

摄入、皮肤接触和吸入等途径对人的致癌和非

致癌风险的量化, 一般选择土壤重金属污染健康风险评估完成^[24~26]. 用于健康风险评估的方法基于美国环境保护局的指南和暴露因子手册^[27, 28]. 通过公式 (3) ~ (5) 计算致癌 (成人) 和非致癌 (成人和儿童) 重金属不同暴露途径的日平均暴露量.

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PET} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

$$ADD_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 、 ADD_{derm} 分别为经手-口摄入、呼吸吸入、皮肤接触途径的日平均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; C 为土壤重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

儿童致癌重金属 3 种途径的日平均暴露量按 (6) ~ (8) 计算.

$$\text{LADD}_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{AT}} \times \left(\frac{\text{IngR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{IngR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{PET} \times \text{AT}} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (7)$$

$$\text{LADD}_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{SL} \times \text{ABS}}{\text{AT}} \times \left(\frac{\text{SA}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{SA}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中, LADD_{ing} 、 LADD_{inh} 、 $\text{LADD}_{\text{derm}}$ 分别为致癌重金属经手-口摄入、呼吸吸入、皮肤接触途径日平均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

公式 (3) ~ (8) 相关参数的含义、取值见表 2^[27~29].

(2) 非致癌风险的计算方法

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (9)$$

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i \quad (10)$$

式中, HQ 为非致癌风险; RfD 为毒性参考剂量, 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

$\text{HI} > 10$ 、 $\text{HI} > 1$ 、 $\text{HI} \leq 1$ 分别表示有严重慢性风险、人体极有可能受到危害、人体不会受到明显伤害.

(3) 致癌风险的计算方法

$$\text{Risk}_i = \text{ADD} \times \text{SF} \tag{11}$$

$$\text{Risk}_{\text{total}} = \sum \text{Risk}_i \tag{12}$$

式中，Risk 为致癌风险；SF 为致癌强度系数，单位为 $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

导则的风险基准为 10^{-6} ，但据有关专家研究表

明，致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 也是可以接受的^[30]。

本研究测定 15 种元素，从中选取重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 和类金属 As 进行健康风险计算，它们的毒性参考剂量与致癌强度系数的取值见表 3。

表 2 重金属暴露参数

Table 2 Exposure parameters for the heavy metals

参数符号	单位	参数含义	参数取值	
			儿童	成人
IngR, IngR _{child} , IngR _{adult}	mg·d ⁻¹	摄入土壤的频率，儿童摄入土壤的频率，成人摄入土壤的频率	200	100
InhR, InhR _{child} , InhR _{adult}	mg·m ⁻³	呼吸频率，儿童呼吸频率，成人呼吸频率	7.5	14.5
BW, BW _{child} , BW _{adult}	kg	平均体重，儿童平均体重，成人平均体重	15.9	56.8
SA, SA _{child} , SA _{adult}	cm ²	暴露皮肤表面积	2 247.56	5 074.98
ED	a	暴露年限	6	24
PET	m ³ ·kg ⁻¹	灰尘排放因子	1.36E+09	1.36E+09
SL	mg·(cm ² ·d) ⁻¹	皮肤黏着度	0.2	0.07
ABS	无量纲	皮肤吸收因子	0.001	0.001
EF	d·a ⁻¹	暴露频率	350	350
AT	d	平均暴露时间	2 190(非致癌物)	26 280(致癌物)

表 3 重金属毒理学特性参数

Table 3 Toxicology characteristic parameters for the heavy metals

元素	SF/(kg·d)·mg ⁻¹			RfD/mg·(kg·d) ⁻¹		
	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
As	1.50E+00	1.50E+00	1.68E+01	3.00E-04	3.00E-04	3.83E-06
Cd	—	—	7.05E+00	1.00E-03	2.50E-05	2.55E-06
Cr	5.00E-01	2.0E+01	3.29E+02	3.00E-03	7.50E-05	2.55E-05
Cu	—	—	—	4.00E-02	4.00E-02	—
Hg	—	—	—	3.00E-04	2.10E-05	7.66E-05
Ni	—	—	1.02E+00	2.00E-02	8.00E-04	2.30E-05
Pb	—	—	—	3.50E-03	5.30E-04	3.50E-03
Zn	—	—	—	3.00E-01	3.00E-01	—

2 结果与讨论

2.1 电子垃圾拆解区周边土壤重金属污染特征

2.1.1 电子垃圾拆解区周边土壤重金属污染水平

根据电子垃圾拆解区周边的表层土重金属数据(见表 4)，参照广东省土壤背景值^[31]，可以得出除 As 外，其他金属都有不同程度的超标。贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤中重金属 Co、Cr、Mn、Pb、V 含量的平均值超出背景值 1 倍有余，Ni、Zn 含量的平均值超出背景值 2 倍有余，Cu、Hg、Sb、Sn 的平均含量远高于相应元素的背景值，分别是背景值的 4.61 倍、6.3 倍、10.26 倍和 7.05 倍，表明贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤 Cu、Hg、Sb、Sn 中具有明显的积累效应。陈店镇电子垃圾拆解区周边土壤

中重金属 V 的含量平均值低于背景值，Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Sb、Pb 含量的平均值均超出背景值 1 倍有余，Hg、Sn、Zn 含量的平均值分别是背景值的 4 倍、6.22 倍、2.26 倍，表明陈店镇电子垃圾拆解区周边土壤 Hg、Sn、Zn 中具有明显的积累效应。和背景值相比，司马浦镇电子垃圾拆解区周边土壤中重金属 V 平均含量未超标，Co、Cr、Mn、Ni 含量的平均值均超出背景值 1 倍有余，Cu、Pb、Zn 含量的平均值超出背景值 2 倍有余，Hg、Sb、Sn 含量的平均值分别是背景值的 7.06 倍、4.49 倍、8.25 倍，表明司马浦镇电子垃圾拆解区周边土壤 Hg、Sb、Sn 中具有明显的积累效应。

与同为电子垃圾拆解中心的清远龙塘镇相比^[11, 32]，贵屿镇的污染程度较为严重^[33]。

表 4 研究区土壤和水稻中金属的描述性统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Descriptive statistics for metals in soils and rice in the study area/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	金属	平均值 $\pm$ 标准差	中值	最小值	最大值	变异系数/%	背景值 ^[31]	标准值 ^[23]
贵屿 土壤 $N=14$	As	5.56 $\pm$ 2.04	5.7	2.05	8.87	36.7	8.9	30.0
	Be	3.32 $\pm$ 0.41	3.35	2.48	4.03	12.3	1.61	— ¹⁾
	Cd	0.277 $\pm$ 0.22	0.182	0.050	0.830	79.4	0.056	0.300
	Co	9.7 $\pm$ 2.27	9.3	7.5	15.9	23.4	7.0	—
	Cr	60.2 $\pm$ 12.89	60.3	37.7	89.8	21.4	50.5	200
	Cu	78.4 $\pm$ 110.38	45.75	18.1	453.1	140.8	17.0	100
	Hg	0.492 $\pm$ 0.22	0.576	0.039	0.814	44.7	0.078	0.500
	Li	42.2 $\pm$ 13.41	40.3	23.3	69.0	31.8	18.4	—
	Mn	356.8 $\pm$ 84.60	333.15	265.2	554.5	23.7	279	—
	Ni	37.8 $\pm$ 55.55	22.05	15.4	229.6	147.0	14.4	50.0
	Sb	5.542 $\pm$ 7.00	1.97	0.412	25.800	126.3	0.54	—
	Sn	40.9 $\pm$ 22.91	36.9	6.1	94.0	56.0	5.8	—
	Pb	69.9 $\pm$ 22.37	70.8	36.3	127.3	32.0	36.0	300
	V	74.8 $\pm$ 19.13	75.9	45.9	117.1	25.6	65.3	—
	Zn	111.9 $\pm$ 33.69	105	83.0	213.0	30.1	47.3	250
陈店 土壤 $N=9$	As	4.96 $\pm$ 2.84	5.37	1.27	10.60	57.3	8.9	30.0
	Be	3.52 $\pm$ 0.65	3.51	2.38	4.65	18.5	1.61	—
	Cd	0.855 $\pm$ 1.61	0.139	0.024	4.940	188.3	0.056	0.300
	Co	7.8 $\pm$ 1.23	7.9	5.3	9.4	15.8	7.0	—
	Cr	51.1 $\pm$ 12.29	48.6	42.3	82.7	24.1	50.5	200
	Cu	30.5 $\pm$ 24.01	26	9.6	92.0	78.7	17.0	100
	Hg	0.312 $\pm$ 0.20	0.274	0.037	0.666	64.1	0.078	0.500
	Li	29.3 $\pm$ 11.31	29	16.0	52.5	38.6	18.4	—
	Mn	330.7 $\pm$ 128.03	292.1	165.7	572.4	38.7	279	—
	Ni	18.4 $\pm$ 4.32	19.2	11.9	24.4	23.5	14.4	50.0
	Sb	0.981 $\pm$ 0.55	0.856	0.212	1.980	56.1	0.54	—
	Sn	36.1 $\pm$ 27.46	37.1	5.9	100.0	76.1	5.8	—
	Pb	62.6 $\pm$ 15.27	67.2	41.8	82.9	24.4	36.0	300
	V	58.0 $\pm$ 19.37	58.3	33.3	100.8	33.4	65.3	—
	Zn	107.2 $\pm$ 36.79	95	64.7	186.6	34.3	47.3	250
司马浦 土壤 $N=8$	As	3.53 $\pm$ 1.46	3.15	1.64	5.70	41.4	8.9	30.0
	Be	3.10 $\pm$ 0.59	2.845	2.46	4.06	19.0	1.61	—
	Cd	0.177 $\pm$ 0.09	0.156	0.029	0.305	50.8	0.056	0.300
	Co	8.4 $\pm$ 1.08	8.45	6.9	10.3	12.9	7.0	—
	Cr	55.8 $\pm$ 14.23	52.8	40.9	85.4	25.5	50.5	200
	Cu	50.4 $\pm$ 60.95	26.85	11.2	195.4	120.9	17.0	100
	Hg	0.551 $\pm$ 0.39	0.445	0.042	1.394	70.8	0.078	0.500
	Li	29.5 $\pm$ 8.13	30.2	17.4	38.6	27.6	18.4	—
	Mn	339.9 $\pm$ 63.37	335.9	263.0	448.1	18.6	279	—
	Ni	27.5 $\pm$ 31.28	17.1	11.5	104.3	113.7	14.4	50.0
	Sb	2.422 $\pm$ 2.97	1.27	0.248	9.240	122.6	0.54	—
	Sn	47.9 $\pm$ 23.11	47.55	5.6	76.9	48.2	5.8	—
	Pb	79.1 $\pm$ 49.14	63.15	41.9	195.1	62.1	36.0	300
	V	59.0 $\pm$ 11.27	59.65	40.1	76.3	19.1	65.3	—
	Zn	117.7 $\pm$ 40.54	106.45	64.2	185.1	34.4	47.3	250
贵屿 大米 $N=7$	As	0.07 $\pm$ 0.02	0.06	0.04	0.10	28.6	—	—
	Cd	0.066 $\pm$ 0.05	0.044	0.021	0.136	75.8	—	0.2
	Cr	0.21 $\pm$ 0.05	0.19	0.18	0.29	23.8	—	1.0
	Cu	3.01 $\pm$ 0.43	3.06	2.36	3.56	14.3	—	10.0
	Hg	0.0011 $\pm$ 0.0005	0.0009	0.0006	0.0019	45.5	—	0.02
	Ni	1.37 $\pm$ 1.30	0.71	0.30	3.92	94.9	—	—
	Pb	0.13 $\pm$ 0.08	0.14	0.04	0.25	61.5	—	0.2
	Zn	17.32 $\pm$ 2.87	16.19	13.80	21.58	16.6	—	50.0

1) “—”表示相应标准中没有数值

2.1.2 电子垃圾拆解区周边土壤重金属环境质量评价

评价标准为Ⅱ级土壤环境标准^[23]。根据单因子评价法结果, 贵屿镇土样中各项重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的平均环境质量指数如下: 0.19 ± 0.07 、 0.92 ± 0.74 、 0.30 ± 0.06 、 0.78 ± 1.1 、 0.98 ± 0.45 、 0.76 ± 1.11 、 0.23 ± 0.07 、 0.45 ± 0.13 , 由此可得贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤受到Cd、Cu、Hg、Ni的污染; 陈店镇土样中各项重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的平均环境质量指数如下: 0.16 ± 0.09 、 2.85 ± 5.35 、 0.25 ± 0.06 、 0.30 ± 0.24 、 0.62 ± 0.41 、 0.37 ± 0.09 、 0.21 ± 0.05 、 0.43 ± 0.15 , 由此可得陈店镇电子垃圾拆解区周边土壤受到Cd、Hg污染; 司马浦镇土样中各项重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的平均环境质量指数如下: 0.12 ± 0.05 、 0.59 ± 0.30 、 0.28 ± 0.07 、 0.50 ± 0.61 、 1.10 ± 0.79 、 0.55 ± 0.63 、 0.26 ± 0.16 、 0.47 ± 0.16 , 说明司马浦镇电子垃圾拆解区周边土壤受到Cu、Hg、Ni的污染。

通过内梅罗综合指数法计算, 在贵屿镇土样中重金属元素 P_N 值: $Ni(3.29) > Cu(3.25) > Cd(2.06) > Hg(1.35) > Zn(0.51) > Pb(0.34) > As(0.25) > Cr(0.21)$, 由此可知贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤中Ni、Cu已达重度污染级别, Cd已达中度污染级别, Hg已达轻度污染级别, Zn、Pb、As、Cr为无污染级别; 陈店镇土样中重金属元素 P_N 值: $Cd(3.69) > Hg(1.04) > Cu(0.69) > Zn(0.61) > Ni(0.43) > Cr(0.34) > As(0.28) > Pb(0.24)$, 说明陈店镇电子垃圾拆解区周边土壤中Cd已达重度污染级别, Hg已达轻度污染级别, Cu、Zn、Ni、Cr、As、Pb为无污染级别; 司马浦镇土样中重金属元素 P_N 值: $Hg(2.12) > Ni(1.53) > Cu(1.43) > Cd(0.83) > Zn(0.62) > Pb(0.50) > Cr(0.36) > As(0.16)$, 说明司马浦镇电子垃圾拆解区周边土壤中Hg已达中度污染级别, Ni和Cu已达轻度污染级别, Cd已达轻预警级别, Zn、Pb、Cr和As为无污染级别。

总体来看, 各镇电子垃圾拆解区周边土壤均未受到As、Cr、Pb、Zn的污染, 而电子垃圾拆解活动较多的贵屿镇相较于其他两镇较严重。

2.1.3 多元统计分析

对31个采样点的15个金属元素进行相关性分析得到表5, 从中可知As、Be、Co、Cr、Li和V之间呈极显著相关, Cu、Ni、Sb、Sn、Pb、Zn之间呈

极显著相关, Hg、Sn之间呈极显著相关, Be、Cd和V之间呈显著相关, Co与Sn之间呈显著相关, Cu与Hg之间呈显著相关, Hg、Ni、Sb、Zn之间呈显著相关。其中Cu~Ni的相关系数为0.971, 说明Cu和Ni关系最为密切; Hg仅与Sn之间极显著相关性, 而Hg还与Ni、Sb、Zn显著相关性, Hg与Cu显著相关性。由此判断, As、Be、Co、Cr、Li和V具有一定同源性, Cu、Ni、Sb、Sn、Pb和Zn具有一定同源性, Hg一部分来源可能与Sn相同, 一部分来源可能与Ni、Sb、Zn相同, 另一部分来源可能与Cu相同。

运用SPSS 22.0软件对表层土壤中15种金属进行主成分分析, KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验表明, 统计量为0.547, 大于0.5说明数据适合主成分分析, Bartlett的球形检验显著性水平为0.00, 表明分析结果具有统计学意义。提取累积方差为79.29%的4个成分作为主成分(表6), 主成分1包括V、Li、Cr、Co、As, 贡献率分别为97.3%、95.4%、89.7%、89.1%、79.6%, 主要来源于当地的地质背景; 主成分2包括Cu、Sb、Ni、Zn、Sn、Pb、Hg, 贡献率分别为94.2%、89.1%、87.3%、87.2%、72.9%、68%、51.7%, 这一组合是典型的电子垃圾处理和回收污染源的重金属特征组合; 主成分3包括Cd、Be, 贡献率分别为79.6%、75.8%, Cd是典型的与制造业有关的污染元素, 为与主成分1来源不同的人为污染源; 主成分4包括Mn, 贡献率91.5%, 主要来源于当地的地质背景。

结果显示Cu、Sb、Ni、Zn、Sn、Pb、Hg具有相同来源, Ni、Cu、Cd、Hg在贵屿镇的污染水平较高, 主要是由于贵屿镇含有较多电子垃圾拆解厂, 而Cu、Ni、Pb、Zn和Cr等重金属元素来源与周边金属表面处理、电镀等企业的生产活动有直接的关系^[34, 35], 因此可认为主成分2来源于周边电子垃圾拆解区。主成分分析的结果与罗杰^[36]在贵屿镇的研究结果一致。

聚类分析结果如图2所示, 将元素分为四类: 第一类为Co、Cr、Li、V、As, 第二类为Cu、Sb、Ni、Pb、Zn、Hg、Sn, 第三类为Be、Cd, 第四类为Mn。这与相关性分析、主成分分析的结果基本一致。

2.2 土壤-水稻系统重金属迁移积累特征

2.2.1 稻米重金属富集量与污染评价

从表4可以看出, 土壤-水稻系统中, 贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤生产的稻米迁移累积各种重金属含量分别如下: As介于 $0.04 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd

表 5 表层土壤重金属皮尔逊相关系数¹⁾

Table 5 Pearson correlation coefficients for heavy metals in topsoil														
	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Li	Mn	Ni	Sb	Sn	Pb	V
Be	0.458 **													
Cd	−0.010	0.430 *												
Co	0.563 **	0.379 *	−0.077											
Cr	0.650 **	0.256	−0.171	0.764 **										
Cu	0.147	−0.043	0.052	0.029	0.094									
Hg	−0.138	0.057	0.047	−0.211	−0.249	0.406 *								
Li	0.743 **	0.483 **	−0.062	0.843 **	0.807 **	0.096	−0.073							
Mn	−0.202	−0.086	−0.066	0.109	−0.093	−0.087	−0.208	−0.144						
Ni	0.167	−0.011	0.037	0.125	0.163	0.971 **	0.360 *	0.149	−0.126					
Sb	0.120	−0.044	0.021	0.091	0.128	0.902 **	0.384 *	0.187	0.021	0.859 **				
Sn	−0.023	−0.042	0.201	−0.360 *	−0.243	0.583 **	0.465 **	−0.217	−0.048	0.442 *	0.499 **			
Pb	0.172	0.202	0.101	0.005	0.215	0.484 **	0.297	0.000	0.054	0.387 *	0.467 **	0.518 **		
V	0.759 **	0.404 *	−0.133	0.839 **	0.857 **	0.005	−0.222	0.962 **	−0.142	0.080	0.061	−0.328	−0.087	
Zn	0.195	0.169	0.279	0.014	0.125	0.728 **	0.419 *	0.017	0.108	0.636 **	0.643 **	0.734 **	0.763 **	−0.092

1) * * 和 * 分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双尾)上显著相关

表 6 研究区表层土壤重金属元素旋转主成分矩阵¹⁾

Table 6 Rotated component matrix for principal component analysis				
loadings for heavy metals in surface soils from the study area				
元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
V	0.973	-0.089	-0.031	-0.086
Li	0.954	0.030	0.055	-0.117
Cr	0.897	0.073	-0.072	0.092
Co	0.891	-0.029	-0.013	0.186
As	0.796	0.114	0.204	-0.120
Cu	0.080	0.942	-0.129	-0.117
Sb	0.131	0.891	-0.167	-0.026
Ni	0.161	0.873	-0.176	-0.160
Zn	0.017	0.872	0.334	0.178
Sn	-0.319	0.729	0.246	-0.067
Pb	0.045	0.680	0.323	0.243
Hg	-0.239	0.517	0.123	-0.428
Cd	-0.126	0.073	0.796	0.050
Be	0.449	-0.024	0.758	-0.071
Mn	-0.097	0.007	-0.055	0.915
特征值	4.53	4.50	1.63	1.24
方差/%	30.17	29.99	10.86	8.28
累积方差/%	30.17	60.16	71.01	79.29

1) 超过 0.5 的加载标记为粗体

介于 0.021 ~ 0.136 mg·kg⁻¹、Cr 介于 0.18 ~ 0.29 mg·kg⁻¹、Cu 介于 2.36 ~ 3.56 mg·kg⁻¹、Hg 介于 0.0006 ~ 0.0019 mg·kg⁻¹、Ni 介于 0.3 ~ 3.92 mg·kg⁻¹、Pb 介于 0.04 ~ 0.25 mg·kg⁻¹、Zn 介于 13.8 ~ 21.58 mg·kg⁻¹，富集量 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 分别为(0.07 ± 0.02)、(0.066 ± 0.05)、(0.21 ± 0.05)、(3.01 ± 0.43)、(0.0011 ± 0.0005)、(1.37 ± 1.30)、(0.13 ± 0.08)和(17.32 ± 2.87)mg·kg⁻¹，Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > As > Cd

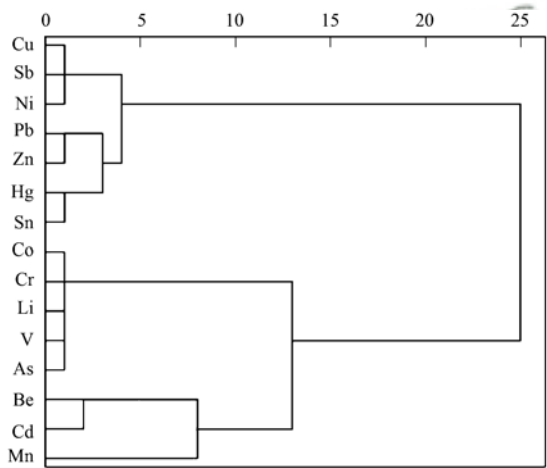


图 2 研究区土壤元素聚类分析

Fig. 2 Dendrogram of the trace element concentrations from the study area

> Hg. 对比国家颁布实施的食品内污染物含量标准^[37]，其贵屿镇稻米中前述各类重金属含量富集均值全部达标。而在 7 个稻米测试样本中，有 14.3% 的样品 Pb 富集超标(1 个)。分析发现(表 4)，稻米重金属富集量的变异系数除 Ni 高达 94.9%、属较大变异强度外，Cd、Pb、Hg 的变异系数分别为 75.8%、61.5% 和 45.5%，均为中等变异强度，表明 Ni 可能存在异常富集。

2.2.2 稻米对土壤中重金属的富集能力

作物富集系数(plant uptake factor, PUF)可较好地反映稻米对土壤重金属的富集能力和重金属从土壤向稻米的迁移积累强度^[38]。一般定义为重金属富集于农作物可食部分中的总量、同类重金属在生产农作物的土壤中的含量之比。

经过计算,研究区稻米对土壤中各项重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的平均富集系数如下:0.012 6、0.238 3、0.003 5、0.038 4、0.002 2、0.036 2、0.001 9和0.154 8,其富集能力Cd>Zn>Cu>Ni>As>Cr>Hg>Pb. 其中Cd的富集能力分别是Cu、Ni和Cr的6.2倍、6.4倍和128.1倍.证实:迁移能力最小的是Pb、Cu和Zn,土壤内的这3种重金属极难被稻米吸收富集;迁移能力最强的是Cd^[39],其极易为稻米吸收富集.所以,土壤导致的环境污染方面,稻米食用安全的威胁主要来自Cd污染.

2.3 电子垃圾拆解区周边土壤-水稻系统重金属健康风险评价

2.3.1 电子垃圾拆解区周边土壤重金属健康风险评价

在健康风险评价参数、评价模型基础上,以表2~4的数据为参照,样本城镇电子垃圾拆解区周边土壤内的重金属经由手-口摄入、皮肤接触、呼吸吸入这3种途径导致的非致癌风险(表7)和致癌风

险(表8)即可计算出来.

非致癌风险评价结果表明,针对同一元素不同暴露途径的非致癌风险,除As外,土壤重金属非致癌风险均为经手-口摄入风险>皮肤接触风险>呼吸吸入风险,由此可见,经手-口摄入是土壤暴露风险的主要途径.针对不同元素3种途径的非致癌风险,8种重金属的HQ在3个采样城镇均小于1,这种统计结果证实:单一重金属导致的健康风险不会威胁到样本城镇居民.不同金属的HQ有较大的差异,表现为,贵屿:Cr>Pb>As>Ni>Cu>Hg>Zn>Cd;陈店:Cr>Pb>As>Cu>Hg>Ni>Cd>Zn;司马浦:Pb>Cr>As>Hg>Ni>Cu>Zn>Cd.这说明Cr、Pb和As是研究区表层土壤中主要的非致癌因子.

各镇非致癌风险关系为:贵屿>司马浦>陈店,且儿童的非致癌风险大于成人的非致癌风险,表明贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤的非致癌风险大于陈店镇、司马浦镇,且儿童健康受危害的可能性大.

表7 3个采样城镇儿童和成人的非致癌风险

Table 7 Hazard quotient (HQ) and hazard index (HI) for children and adults in the three sampled towns							
项目	暴露途径	儿童			成人		
		贵屿	陈店	司马浦	贵屿	陈店	司马浦
As	手-口摄入	2.24E-01	1.99E-01	1.42E-01	1.25E-01	1.12E-01	7.95E-02
	皮肤接触	5.02E-04	4.48E-04	3.19E-04	4.45E-04	3.97E-04	2.82E-04
	呼吸吸入	4.83E-04	4.31E-04	3.07E-04	1.05E-03	9.32E-04	6.64E-04
Cd	手-口摄入	3.34E-03	1.03E-02	2.13E-03	1.87E-03	5.77E-03	1.20E-03
	皮肤接触	3.00E-04	9.27E-04	1.92E-04	2.66E-04	8.20E-04	1.70E-04
	呼吸吸入	3.61E-05	1.12E-04	2.31E-05	7.82E-05	2.41E-04	5.00E-05
Cr	手-口摄入	2.42E-01	2.05E-01	2.24E-01	1.36E-01	1.15E-01	1.26E-01
	皮肤接触	2.18E-02	1.85E-02	2.02E-02	1.93E-02	1.63E-02	1.78E-02
	呼吸吸入	7.85E-04	6.66E-04	7.28E-04	1.70E-03	1.44E-03	1.58E-03
Cu	手-口摄入	2.36E-02	2.36E-02	1.52E-02	1.32E-02	5.15E-03	8.51E-03
	皮肤接触	5.31E-05	2.07E-05	3.42E-05	4.70E-05	1.83E-05	3.02E-05
	呼吸吸入	—	—	—	—	—	—
Hg	手-口摄入	1.98E-02	1.25E-02	2.22E-02	1.11E-02	7.02E-03	1.24E-02
	皮肤接触	6.35E-04	4.03E-04	7.11E-04	5.62E-04	3.56E-04	6.29E-04
	呼吸吸入	2.14E-06	1.35E-06	2.39E-06	4.62E-06	2.93E-06	5.18E-06
Ni	手-口摄入	2.28E-02	1.11E-02	1.66E-02	1.28E-02	6.21E-03	9.29E-03
	皮肤接触	1.28E-03	6.24E-04	9.32E-04	1.13E-03	5.52E-04	8.25E-04
	呼吸吸入	5.47E-04	2.66E-04	3.98E-04	1.18E-03	5.76E-04	8.61E-04
Pb	手-口摄入	2.41E-01	2.16E-01	2.73E-01	1.35E-01	1.21E-01	1.53E-01
	皮肤接触	3.58E-03	3.20E-03	4.05E-03	3.16E-03	2.83E-03	3.58E-03
	呼吸吸入	6.64E-06	5.95E-06	7.52E-06	1.44E-05	1.29E-05	1.63E-05
Zn	手-口摄入	4.50E-03	4.31E-03	4.73E-03	2.52E-03	2.41E-03	2.65E-03
	皮肤接触	1.01E-05	9.69E-06	1.06E-05	8.95E-06	8.57E-06	9.41E-06
	呼吸吸入	—	—	—	—	—	—
HI		8.11E-01	7.08E-01	7.28E-01	4.66E-01	3.99E-01	4.18E-01

表 8 3 个采样城镇成人和儿童的重金属致癌风险和总致癌风险

Table 8 Cancer risk for each heavy metal and total cancer risk for adults and children in the three sampled towns

项目	暴露途径	儿童			成人		
		贵屿	陈店	司马浦	贵屿	陈店	司马浦
As	手-口摄入	1.31E-05	1.17E-05	8.30E-06	9.39E-06	8.37E-06	5.96E-06
	皮肤接触	6.65E-08	5.93E-08	4.22E-08	1.67E-08	1.49E-08	1.06E-08
	呼吸吸入	8.19E-09	7.31E-09	5.20E-09	5.60E-09	5.00E-09	3.56E-09
Cd	手-口摄入	—	—	—	—	—	—
	皮肤接触	—	—	—	—	—	—
	呼吸吸入	1.71E-10	5.29E-10	1.09E-10	1.17E-10	3.62E-10	7.49E-11
Cr	手-口摄入	4.72E-05	4.01E-05	4.37E-05	3.39E-05	2.88E-05	3.14E-05
	皮肤接触	9.60E-06	8.15E-06	8.90E-06	2.41E-06	2.04E-06	2.23E-06
	呼吸吸入	1.74E-06	1.47E-06	1.61E-06	1.19E-06	1.01E-06	1.10E-06
Ni	手-口摄入	—	—	—	—	—	—
	皮肤接触	—	—	—	—	—	—
	呼吸吸入	3.38E-09	1.65E-09	2.46E-09	2.31E-09	1.13E-09	1.68E-09
Risk _{total}		7.17E-05	6.14E-05	6.26E-05	4.69E-05	4.02E-05	4.07E-05

致癌风险评价结果表明,不同金属的致癌风险有较大的差异,表现为 Cr > As > Ni > Cd. 这说明 Cr 是研究区表层土壤中主要的致癌因子,应作为重点风险管理对象.

重金属的致癌总风险值在 3 个采样城镇均处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 说明其引起的致癌总风险尚可接受^[31]. 综合各金属健康风险的 Risk 值, 得出各镇致癌风险关系为: 贵屿 > 司马浦 > 陈店, 且儿童的非致癌风险大于成人的非致癌风险, 因此, 贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤重金属元素致癌风险较为严重, 且儿童健康受危害的可能性大.

2.3.2 电子垃圾拆解区周边稻米重金属健康风险评价

土壤中的重金属可被种植其上的稻米吸收, 通过食物链进入人体, 并在人体富集, 从而对人体健康造成危害, 根据 USEPA 暴露因子手册和实地调查, 选取成人稻米摄入量为 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 儿童稻米摄入量为 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$. 贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤内的重金属经由“土壤-水稻-食物”系统导致的非致癌风险和致癌风险如表 9 所示.

经摄取稻米重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对成人和儿童健康风险评价表明: As、Cr、Cu、Ni 是引起稻米重金属风险的主要污染物, 且贵屿镇儿童摄取电子垃圾拆解区周边土壤生产稻米的健康风险大于成人摄取电子垃圾拆解区周边土壤生产稻米的健康风险. 其中贵屿镇儿童和成人的 HQ 值都大于 1, 说明通过稻米摄入途径所造成的健康风险不容忽视, 应高度重视.

表 9 贵屿镇成人和儿童稻米摄取途径的致癌风险和非致癌风险

Table 9 Non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of rice intake pathway for adults and children in Guiyu Town

项目	儿童		成人	
	HQ	Risk _{total}	HQ	Risk _{total}
As	2.11E+00	7.92E-05	3.94E+00	1.48E-04
Cd	5.97E-01	—	1.11E+00	—
Cr	6.33E-01	7.92E-05	1.18E+00	1.48E-04
Cu	6.81E-01	—	1.27E+00	—
Hg	3.32E-02	—	6.19E-02	—
Ni	6.20E-01	—	1.16E+00	—
Pb	3.36E-01	—	6.27E-01	—
Zn	5.22E-01	—	9.75E-01	—
总风险	5.53E+00	1.58E-04	1.03E+01	2.95E-04

3 结论

(1) 贵屿镇、陈店镇和司马浦镇电子垃圾拆解区周边的表层土壤中, 除 As 外其他金属的平均值均高于广东省土壤背景值. 电子垃圾拆解区周边表层土壤中 Hg、Sb、Sn 具有明显的积累效应, Cd、Hg 的平均含量超过了《土壤环境质量标准》(GB 156182-1995) II 级标准限值. 总体来看, 电子垃圾拆解场较多的贵屿镇相较于其他两镇污染较严重.

(2) 多元统计分析结果表明, Cu、Sb、Ni、Zn、Sn、Pb、Hg 来源于周边电子垃圾拆解活动, Cd、Be 来源于其他人为污染源, V、Li、Cr、Co、As、Mn 来源于自然源.

(3) 在土壤-水稻系统中, 土壤-水稻系统重金属迁移积累于稻米中的重金属评价富集量符合国家食品卫生标准, 富集能力 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Hg} > \text{Pb}$, 因此, 土壤导致的环境污染方面, 稻

米食用安全的威胁主要来自 Cd 污染。

(4) 土壤重金属健康风险评估结果显示儿童更易受到重金属污染威胁, 经手-口摄入是土壤暴露风险的主要途径。非致癌风险评价结果表明, 贵屿镇电子垃圾拆解区周边土壤的非致癌风险大于陈店镇、司马浦镇。致癌风险评价结果表明, 重金属的致癌总风险值在 3 个采样城镇均处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 说明其引起的致癌总风险尚可接受。综合各金属健康风险的致癌风险值, 得出各镇电子垃圾拆解区周边土壤致癌风险关系为: 贵屿 > 司马浦 > 陈店。

(5) 经摄取稻米重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对成人和儿童健康风险评价表明: As、Cr、Cu、Ni 是引起稻米重金属风险的主要污染物, 且贵屿镇儿童摄取电子垃圾拆解区周边土壤生产稻米的健康风险大于成人。

参考文献:

- [1] Wong M H, Wu S C, Deng W J, *et al.* Export of toxic chemicals-a review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **149**(2): 131-140.
- [2] Pradhan J K, Kumar S. Informal e-waste recycling: environmental risk assessment of heavy metal contamination in Mandoli industrial area, Delhi, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(13): 7913-7928.
- [3] Eguchi A, Nomiya K, Minh Tue N, *et al.* Residue profiles of organohalogen compounds in human serum from e-waste recycling sites in North Vietnam; association with thyroid hormone levels [J]. *Environmental Research*, 2015, **137**: 440-449.
- [4] Itai T, Otsuka M, Asante K A, *et al.* Variation and distribution of metals and metalloids in soil/ash mixtures from Agbogbloshie e-waste recycling site in Accra, Ghana[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **470-471**: 707-716.
- [5] Zhang Q, Ye J J, Chen J Y, *et al.* Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **185**: 258-265.
- [6] Niu X J, Liu C, Song X F. Simulation research on the natural degradation process of PBDEs in soil polluted by e-waste under increased concentrations of atmospheric O_3 [J]. *Chemosphere*, 2015, **118**: 373-382.
- [7] Wang S R, Wang Y, Lei W R, *et al.* Simultaneous enhanced removal of Cu, PCBs, and PBDEs by corn from e-waste-contaminated soil using the biodegradable chelant EDDS [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(22): 18203-18210.
- [8] Luo P, Bao L J, Li S M, *et al.* Size-dependent distribution and inhalation cancer risk of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons at a typical e-waste recycling and an urban site[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **200**: 10-15.
- [9] Wang J X, Liu L L, Wang J F, *et al.* Distribution of metals and brominated flame retardants (BFRs) in sediments, soils and plants from an informal e-waste dismantling site, South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(2): 1020-1033.
- [10] 叶景甲, 王静花, 季晨阳, 等. 台州某电子垃圾拆解区土壤 PCBs 的污染特征研究 [J]. *浙江工业大学学报*, 2015, **43**(1): 87-93.
- Ye J J, Wang J H, Ji C Y, *et al.* Research on pollution characteristic of polychlorinated biphenyl in soils from an e-waste dismantling area in Taizhou [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2015, **43**(1): 87-93.
- [11] 黄华伟, 朱崇岭, 任源. 龙塘镇电子垃圾拆解区土壤和河流底泥重金属赋存形态及生态风险 [J]. *环境化学*, 2015, **34**(2): 254-261.
- Huang H W, Zhu C L, Ren Y. Speciation and potential ecological risk of heavy metals in the soils and river sediments of the E-waste recycling region of Longtang Town [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(2): 254-261.
- [12] Wu Q H, Leung J Y S, Geng X H, *et al.* Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: implications for dissemination of heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **506-507**: 217-225.
- [13] Huo X, Peng L, Xu X J, *et al.* Elevated blood lead levels of children in Guiyu, an electronic waste recycling town in China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, **115**(7): 1113-1117.
- [14] Li Y, Xu X J, Liu J X, *et al.* The hazard of chromium exposure to neonates in Guiyu of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **403**(1-3): 99-104.
- [15] Zheng L K, Wu K S, Li Y, *et al.* Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China [J]. *Environmental Research*, 2008, **108**(1): 15-20.
- [16] Guo Y Y, Huo X, Li Y, *et al.* Monitoring of lead, cadmium, chromium and nickel in placenta from an e-waste recycling town in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3113-3117.
- [17] Yang H, Huo X, Yekeen T A, *et al.* Effects of lead and cadmium exposure from electronic waste on child physical growth [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(7): 4441-4447.
- [18] Wong C S C, Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, *et al.* Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **148**(1): 62-72.
- [19] Wong C S C, Wu S C, Duzgoren-Aydin N S, *et al.* Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(2): 434-442.
- [20] Li J H, Duan H B, Shi P X. Heavy metal contamination of surface soil in electronic waste dismantling area: site investigation and source-apportionment analysis [J]. *Waste Management & Research*, 2011, **29**(7): 727-738.
- [21] Huo X, Peng L, Qiu B, *et al.* ALAD genotypes and blood lead levels of neonates and children from e-waste exposure in Guiyu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(10): 6744-6750.
- [22] Ni W Q, Chen Y W, Huang Y, *et al.* Hair mercury

- concentrations and associated factors in an electronic waste recycling area, Guiyu, China [J]. *Environmental Research*, 2014, **128**: 84-91.
- [23] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [24] Avigliano E, Schenone N F. Human health risk assessment and environmental distribution of trace elements, glyphosate, fecal coliform and total coliform in Atlantic Rainforest mountain rivers (South America) [J]. *Microchemical Journal*, 2015, **122**: 149-158.
- [25] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [26] Wu S, Peng S Q, Zhang X X, *et al.* Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **148**: 71-78.
- [27] USEPA. Highlights of the child-specific exposure factors handbook (Final Report) [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [28] USEPA. Regional screening levels (RSL) for Chemical contaminants at superfund sites [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2013.
- [29] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
HJ 25.3-2014, Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S].
- [30] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- [31] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [32] 张金莲, 丁疆峰, 卢桂宁, 等. 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2633-2640.
Zhang J L, Ding J F, Lu G N, *et al.* Heavy metal contamination in farmland soils at an E-waste disassembling site in Qingyuan, Guangdong, South China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2633-2640.
- [33] 朱崇岭. 珠三角主要电子垃圾拆解地底泥、土壤中重金属的分布及源解析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Zhu C L. Distribution and source apportionment of heavy metals in sediment, soil of PRD major electronic waste dismantling ground [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [34] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
Li J H, Weng S, Fang J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining Electroplating Industrial Park [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [35] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 993-1001.
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 993-1001.
- [36] 罗杰. 广东省韩江三角洲土壤污染物源辨析及其环境承载力[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
Luo J. Source apportionment and environment capacity of pollutants in soil of Hanjiang River Delta, Guangdong Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [37] GB 2762-2012, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
GB 2762-2012, National standard food safety pollutant limit for food[S].
- [38] 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 天门市土壤—水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(1): 221-226.
Shen T Z, Zhu M X, Xiao J. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of Tianmen and its health risk assessment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(1): 221-226.
- [39] 张美剑. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及风险评估研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/CAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)