

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价

张金莲^{1,2,3}, 丁疆峰³, 卢桂宁^{1,2*}, 党志^{1,2}, 易筱筠^{1,2}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 3. 广西大学环境学院, 南宁 530004)

摘要: 简单粗放的电子垃圾回收活动给周边环境带来了一系列污染问题, 污染物通过食物链的累积最终将对人体健康产生危害. 为了解广东省清远市电子垃圾拆解地周边农田土壤重金属污染现状, 在该市龙塘镇和石角镇电子垃圾拆解区域内采集22个农田土壤样品, 并分析了土样中重金属的含量水平、空间分布特征和化学形态. 结果表明, 与广东省土壤背景值相比, 农田表层0~20 cm土壤中Pb、Cu、Cd、Zn、Ni和Cr元素含量表现出不同程度的富集. 从单项污染指数来看, 72.7%的表层土壤样品存在一种或几种重金属超标, 以Cd、Cu、Pb和Zn污染为主, 其中Cd污染比例最高, 其次是Cu, 最后是污染比例相当的Pb和Zn. 内梅罗综合污染指数分析发现68.2%的土壤样品受到重金属污染, 其中更有53.3%为重污染等级. 大部分重金属之间具有良好的相关性, 简单粗放的回收活动成为电子垃圾拆解地周边农田重金属污染的重要来源. Cd、Pb、Zn和Cu在表层土壤中含量较高, 深层土部分(20~100 cm)并未表现出随深度增加而显著降低的趋势. Cr和Ni元素在整个采样剖面中含量基本一致, 无统计学意义上的差别. 重金属化学形态分析结果显示Pb、Cu和Cd的活性形态比例范围分别为36.9%~90.6%、39.6%~93.9%和43.7%~99.6%, 平均值分别为61.3%、65.3%和80.7%, 绝大多数土壤样品中3种重金属活性形态在总量中的比例占到一半以上, 具有极大的生态风险.

关键词: 电子垃圾; 农田土壤; 重金属; BCR法; 单项污染指数; 综合污染指数

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)07-2633-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2015.07.041

Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China

ZHANG Jin-lian^{1,2,3}, DING Jiang-feng³, LU Gui-ning^{1,2*}, DANG Zhi^{1,2}, YI Xiao-yun^{1,2}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. The Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 3. School of the Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Crude e-waste dismantling activities have caused a series of environmental pollution problems, and the pollutants released from the dismantling activities would finally pose high risks to human health by means of the accumulation through food chains. To explore the contamination status of heavy metals to the surrounding farmland soils in Longtang and Shijiao Town, Qingyuan, Guangdong, China, 22 farmland soil samples were collected and analyzed for the contents, spatial distributions and chemical forms of 6 heavy metals (Pb, Cu, Cd, Zn, Cr and Ni). The results showed that the 6 heavy metals exhibited obvious accumulations when compared to the corresponding background values in Guangdong Province. According to farmland environmental quality evaluation standard for edible agricultural products HJ 332-2006, the pollution severity of heavy metals was evaluated by monomial pollution index and Nemerow synthetic pollution index methods, the results indicated that 72.7% of the soil samples contained one or more kinds of heavy metals with higher concentrations than the corresponding standard values, Cd, Cu, Pb and Zn were the main metals in the polluted soils, and for the proportion of contaminated soil samples in all the 22 samples, Cd was the highest, followed by Cu, and finally Pb and Zn. Nemerow synthetic pollution index further revealed that 68.2% of soil samples were contaminated, and among them 53.3% of samples were heavily contaminated. Most of the heavy metals were well correlated with each other at the 0.05 or 0.01 level, which indicated that primitive e-waste recycling activities were an important source of the heavy metal contamination in Longtang and Shijiao Town. The contents of Cd, Pb, Cu and Zn in surface soils were higher than those of other soil layers, and the contents of these 4 metals in deep soils (20-100 cm) did not show significant decreases with the increasing depths. The contents of Cr and Ni maintained constant, and exhibited no statistical differences with the sampling depths. Sequential leaching tests showed that the active fractions of Pb, Cu and Cd ranged from 36.9% to 90.6%, 39.6% to 93.9% and 43.7% to 99.6%, with mean values of 61.3%, 65.3% and 80.7%, respectively. The active fractions of these three metals in most samples accounted for more than half of their own total contents, which would cause a high ecological risk.

收稿日期: 2014-12-12; **修订日期:** 2015-03-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA06A203); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0199); 广东省教育厅科技创新项目(2013KJ CX0015)

作者简介: 张金莲(1979~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: zhangjinlian1023@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lutao@scut.edu.cn

Key words: e-waste; farmland soil; heavy metal; BCR method; monomial pollution index; synthetic pollution index

电子垃圾已成为工业垃圾中增长最快的部分^[1],中国不仅是电子垃圾生产大国,同时也是发达国家电子垃圾的主要接收地之一,正面临着由于采用简单粗放方式回收电子垃圾所带来的严重污染问题。电子垃圾回收过程中产生的破碎颗粒、焚烧残渣、飞灰、酸洗废水在雨水径流、大气沉降等作用下直接污染当地生态环境。拆解作坊周边农田土壤则是首先受到影响的区域,污染的土壤又作为二次污染源,进一步导致农畜产品的污染乃至危害人体健康^[2]。目前对电子垃圾污染的研究主要集中在人体、动植物、土壤、河流沉积物、排放烟尘等环境介质,调查不同介质中污染物含量,并对其污染程度做出描述^[3-11],研究结果只能体现出电子垃圾不当拆解对环境的影响概况。然而,电子垃圾原始拆解产生的污染和危害是一个长期累积的过程,对重金属而言,其迁移、转化、积累和生物利用性随重金属形态的不同发生变化^[12]。因此,在对电子垃圾回收活动中产生的重金属污染进行评价时,除重金属总量外,有必要对其化学形态进行研究。

清远市位于广东省中部,该市龙塘镇和石角镇从 90 年代开始处理电子垃圾,早期大型露天焚烧处理场和一些拆解作坊在环境保护部门的监督下关闭,现在仍然有部分拆解工厂正在作业,并且以家庭式作坊为主。本文以龙塘和石角镇电子垃圾拆解区域农田土壤为研究对象,对长期暴露在拆解区农田土壤中重金属(Pb、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Ni)的含量水平、空间分布特征和化学形态等内容进行研究,以期当地农业管理和电子垃圾污染区域的后续治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

清远市属亚热带季风气候区,温暖湿润,一年四季均可耕作,农田主要种植水稻、玉米、红薯、花生、蔬菜等农作物。2013 年 11 月水稻秋收后,在清远市龙塘镇和石角镇电子垃圾拆解作坊周边采集 22 个农田耕层土壤样品(0~20 cm),并对其中 5 个位点进行垂直分层采样,采样深度为 1 m,分为 6 层,即 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。采样点的分布情况如图 1 所示,采用 Garmin eTrex 30 手持 GPS 进行采样点定位。每个样品由 3 个点混合组成,去除杂物后采集 1.5~2 kg。

土壤样品自然阴干后用玛瑙棒研磨过 100 目尼龙筛,以供 pH 和重金属分析使用。所有过筛土样放入干燥器中保存备用。

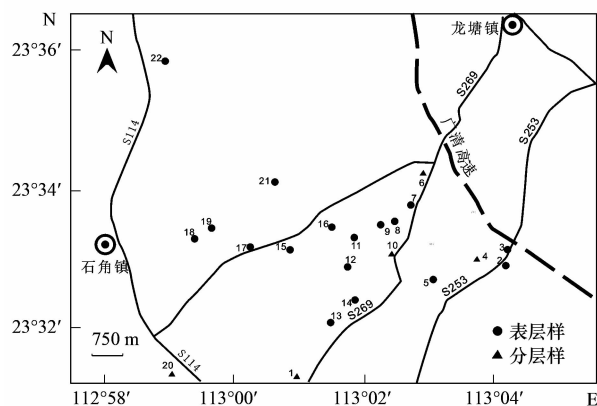


图 1 电子垃圾拆解区农田土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in the e-waste disassembling area

1.2 土壤重金属总量及形态分析

土壤样品经氢氟酸-硝酸-高氯酸微波消解后(微波消解系统为 Milestone ETHOS1 型微波消解仪)采用 Hitachi Z-2300 型原子吸收光谱仪分别测定土样中 Pb、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Ni 这 6 种重金属元素含量。为研究农田土壤中重金属的生物有效性,采用改进 BCR 连续提取法^[13]分析重金属化学形态变化。该方法将重金属分为弱酸可提取态、可还原态、可氧化态、残渣态这 4 种形态,分别采用 0.11 mol·L⁻¹乙酸、0.5 mol·L⁻¹盐酸羟胺(1 L 溶液中含 25 mL 2 mol·L⁻¹ HNO₃)、30% 过氧化氢(pH 值在 2~3 之间)+1.0 mol·L⁻¹ 乙酸铵(加入浓 HNO₃ 调节 pH 值为 2)、氢氟酸-硝酸-高氯酸进行连续提取。分析过程中所有用到的玻璃和塑料器皿均用 5% 硝酸溶液浸泡过夜,再用去离子水洗净后使用。

1.3 土壤重金属污染指数评价

采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价农田土壤重金属污染程度^[14]。

单项指数法评价公式如(1)所示。

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

式中, P_i 为 i 污染物的单项污染指数; C_i 是污染物实测值; S_i 是污染物评价标准,本研究以《食用农产品产地环境质量评价标准 HJ 332-2006》^[15] 为评价标准,在土壤 pH < 6.5 时 Pb、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Ni

的限值分别为 80、50、0.3、200、150 和 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 当 $P_i \leq 1$ 时,表示土壤未受污染; $P_i > 1$ 时,表示土壤受到污染,且 P_i 值越大,则污染越严重.

内梅罗综合污染指数法,兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,突出了较重污染物对环境质量的影响,其评价公式如式(2)所示.

$$P = \sqrt{\frac{(P_{i,\max})^2 + (P_{i,\text{aver}})^2}{2}}$$

(2)

式中, $P_{i,\max}$ 为土壤污染物中污染指数最大值; $P_{i,\text{aver}}$ 为土壤各污染指数平均值,其计算公式如式(3)所示.

$$P_{i,\text{aver}} = \frac{\sum (w_i P_i)}{\sum w_i}$$

(3)

式中, w_i 为重金属权重,Pb、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Ni 的权重分别为 3、3、3、3、2、2^[14].

根据综合污染指数值,按照农业行业标准^[16]的分级方法将土壤污染划分 5 个等级,见表 1.

1.4 质量控制和数据分析

重金属消解过程中每批 19 个样品中带一个空白样,每个土样 3 个平行,标准质控样为 GBW07430 (GSS-16). 采用统计软件 SPSS 19.0 对数据进行处理和分析.

表 1 土壤环境质量污染指数分级标准
Table 1 Grading standard for polluted index of soil environmental quality

等级	综合污染指数值	污染程度污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全(清洁)
2	$0.7 < P \leq 1$	警戒限(尚清洁)
3	$1 < P \leq 2$	轻污染(土壤污染物超过标准值,视作轻污染,作物开始污染)
4	$2 < P \leq 3$	中污染(土壤、作物均受到中度污染)
5	$P > 3$	重污染(土壤、作物受污染已相当严重)

2 结果与讨论

2.1 农田土壤重金属含量及污染评价

对农田表层 0 ~ 20 cm 土样中重金属含量进行描述性分析,得出各项统计指标,结果如表 2 所示. 土壤中 Pb、Cu、Cd、Zn 和 Ni 元素含量平均值均高于广东省土壤背景值,特别是 Cu 和 Cd,22 个样品含量测定值均超过背景值,表现出明显的富集. 虽然 Cr 元素含量平均值低于广东省土壤背景值,但部分样品中的 Cr 含量测定值远在背景值之上. 以上结果说明这些重金属元素在土壤中的累积主要来自外部非自然条件. 从最小值和最大值的分布上看,各元素含量的极差很大,且变异系数较高,尤其是 Cu、Cd 和 Zn,高的变异系数和高累积量意味着研究区内局部地区的土壤重金属由人为活动引入,并

表 2 土壤重金属含量统计分析

Table 2 Summary statistics of heavy metal contents in surface soils

重金属元素	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	背景值 ^[17] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准 ^[15] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Pb	17.26	147.70	51.47	64.10	38.48	0.60	29.8	80
Cu	12.42	354.56	39.01	70.01	80.64	1.15	10.5	50
Cd	0.05	5.96	1.00	1.40	1.61	1.15	0.041	0.3
Zn	33.82	595.07	84.01	168.50	161.56	0.96	36.6	200
Cr	10.06	67.15	19.70	23.57	12.23	0.52	35.6	150
Ni	4.11	27.57	8.56	11.19	6.98	0.62	9.6	40

且可能与当地电子垃圾回收活动有关. 总的来说,Pb、Cu、Cd、Zn、Cr 和 Ni 含量均在不同程度上受到人为活动影响.

根据食用农产品产地环境质量评价标准计算各重金属的单因子污染指数(P_i),结果如图 2 所示. 22 个表层 0 ~ 20 cm 土壤样品中,16 个样品存在一种或几种重金属超标,超标率为 72.7%. 其中,4 种金属超标的样品有 6 个,3 种金属超标的样品有 2 个,2 种金属超标的样品有 3 个,其余为 1 种金属超标. 土壤样品主要以 Cd、Cu、Pb、Zn 污染为主,其中 Cd 污染比例最高(72.7%),其次是 Cu

(40.9%),最后是 Pb 和 Zn(污染比例均为 36.4%). Cd 是最普遍也是污染最严重的重金属,最大单项污染指数出现 12 号采样点,该点土样中 Cd 含量超过食用农产品产地环境质量评价标准限值高达 18.87 倍. 究其原因,一方面可能跟当地拆解的电子垃圾类型有关,电子电气产品及设备种类繁多,如集成电路、铜合金、锌镀层等零部件或材料中均含有 Cd^[18]. 此外,较强的迁移能力可能是电子垃圾拆解区农田土壤 Cd 污染严重的又一重要原因. 当然,土壤 Cd 污染不仅是电子垃圾拆解地区^[7],而且是全国其他地区^[19,20]土壤所面临的问题.

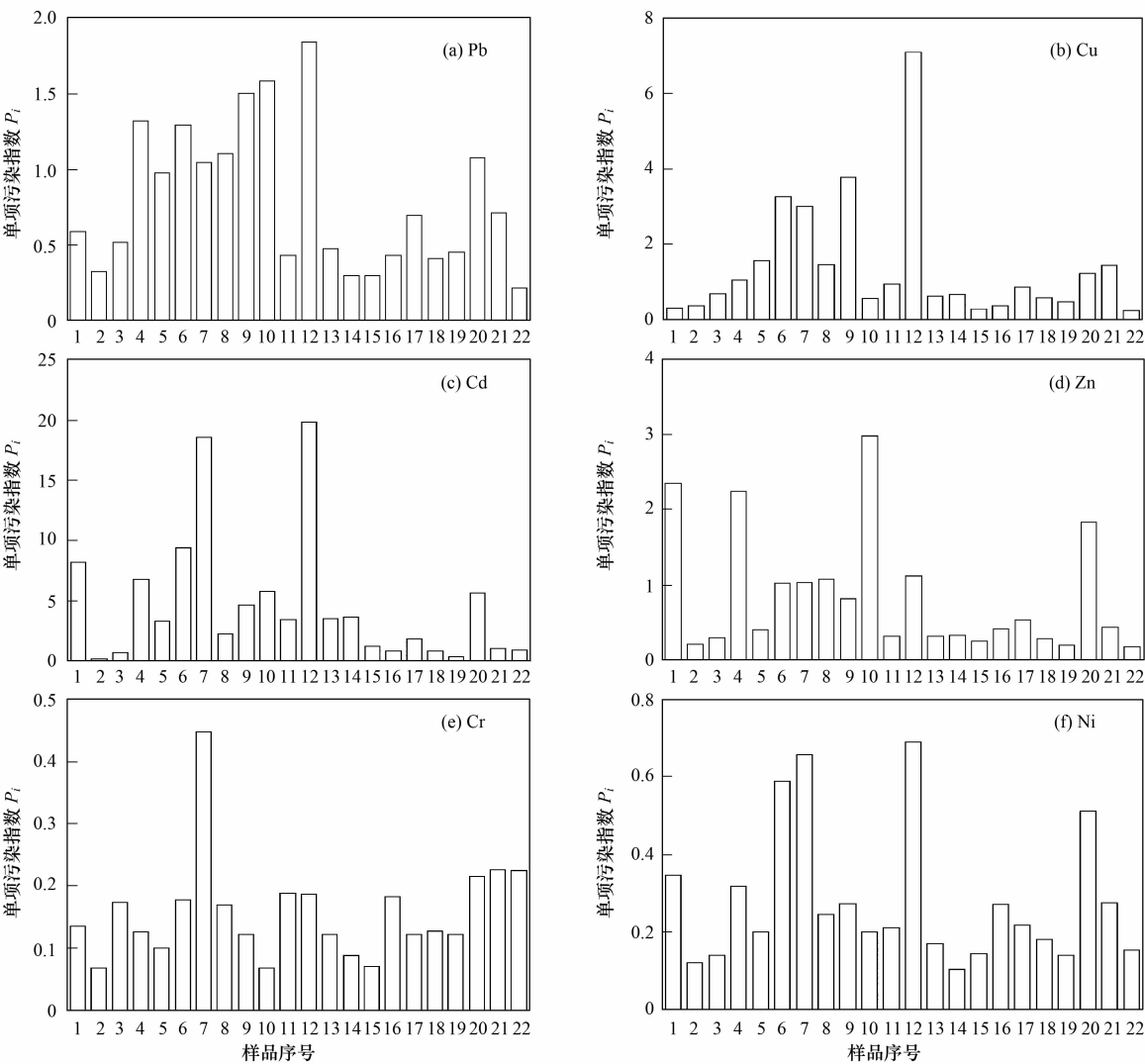


图 2 土壤重金属污染单因子评价

Fig. 2 Monomial evaluation index of heavy metals in surface soils

题,应引起相关部门的重视. Cr 和 Ni 未超标,虽然其在部分样品中的含量分别高于相应的背景值,但因测定值要远远低于食用农产品产地环境质量标准值,所以这 2 种元素对于农业生产来说暂时是安全的.

土壤重金属污染综合评价结果如图 3 所示,所测土样内梅罗综合污染指数(P)在 0.30 ~ 14.61 之间,平均值为 3.50. 土壤综合污染指数越高,如 7 号和 12 号,对土壤环境质量的危害也更大. 22 个土壤样品中有 6 个处于安全等级,1 个处于警戒等级,其余 15 个受到不同程度的污染,占样品总数的 68.2%. 受污染样品中重度污染占 53.3%,中度污染占 26.7%,轻度污染占 20.0%. 造成拆解区域内土壤呈现不同污染程度的原因,一方面可能与采样点距离拆解作坊的远近有关,离拆解作坊较近的采

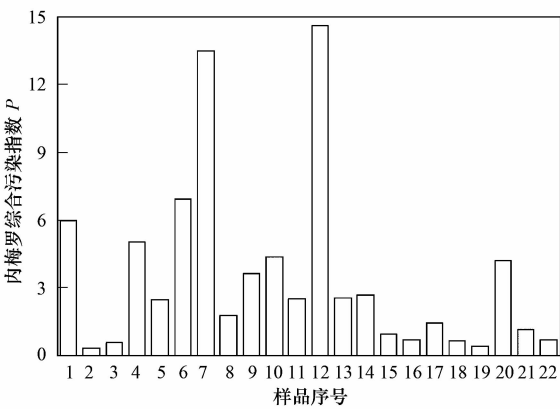


图 3 土壤重金属污染综合评价

Fig. 3 Nemerow synthetic evaluation index of heavy metals in surface soils

样点,直接受到所排放酸洗废水、作坊飞尘以及倾倒残渣等的影响,其污染程度要比离拆解作坊远的

采样点污染程度高. 另一方面,不同金属从作坊向农田迁移过程中其迁移能力存在着一定差异,各金属在土壤中的本底含量也不一样,进而导致各采样点污染程度不同.

2.2 土壤重金属相关性研究

对表层土壤中 6 种重金属含量进行皮尔逊相关分析,结果见表 3. Pb、Cu 和 Cd 这 3 种重金属相互之间在 0.01 水平上显著相关,Ni 与 Pb、Cu、Cd、Cr 之间,Zn 与 Pb、Cd 之间,Cr 与 Cd 之间均存在显著的

相关性. 电子垃圾品种多样,同类垃圾通常包含一种或多种相同的重金属. 大部分重金属之间具有良好的相关性说明这些元素具有相似的来源,与电子垃圾回收产生的“三废”中同时富含 Pb、Cu、Cd、Ni、Zn 等多种重金属是相符的. 这或许进一步证实电子垃圾拆解后形成的废物是龙塘镇和石角镇农田土壤重金属污染的重要来源. 此外,在农田大量施用携带 Cd 的磷肥、含 Cu 农药以及长期过量施用含 Zn 量较高的猪粪和鸡粪等也是土壤重金属污染的来源之一.

表 3 农田土壤重金属皮尔逊相关性分析¹⁾ (n = 22)

	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Ni
Pb	1					
Cu	0.744 **	1				
Cd	0.658 **	0.779 **	1			
Zn	0.637 **	0.113	0.434 *	1		
Cr	0.127	0.325	0.533 **	-0.008	1	
Ni	0.657 **	0.759 **	0.882 **	0.397	0.635 **	1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.3 农田土壤重金属空间分布特征

为了解电子垃圾拆解区农田土壤重金属纵向分布情况,选取 1、4、6、10、20 共 5 个样点进行垂直分层采样,结果如图 4 所示. 所有 30 个分层土样均受到重金属污染,Cd、Pb、Zn、Cu 中有一种或几种含量超标,超标金属以表层(≤20 cm)土壤含量最高,深层土壤(20~100 cm)并未表现出随深度增加而显著降低的趋势. Cr 和 Ni 元素在整个采样剖面中含量基本一致,无统计学意义上的差别. 以上结果可能与清远当地的气象条件和耕作习惯有关,清远市一年四季均可以耕作,土壤底层经常被扰动,加上通常采用水旱轮种方式,导致深层土中 Cd、Pb、Zn、Cu 以及整个采样剖面深度的 Cr 和 Ni 元素含量相差不大. 造成土壤各层重金属含量趋于接近的原因可能还与重金属本身的性质有关,同时在土壤重金属向下迁移的效果可能还与土壤中重金属形态变化、土壤理化性质、淋失速率、土壤微生物等有关^[21]. 值得注意的是,5 个剖面点位中有 4 个点在 80~100 cm 土层中仍然检测到 Cd 含量超标,说明长期的电子垃圾回收活动不仅导致耕层土壤的污染,重金属的纵向迁移对深层土壤也构成危害.

2.4 农田土壤重金属的化学形态分析

重金属总量测定可以提供土壤受污染状况,而形态分析有助于了解重金属的迁移规律、变化形式和生物有效性等信息^[22]. 本研究分析 16 个农田土壤样品中主要污染重金属 Pb、Cu 和 Cd 的化学形

态,结果如图 5 所示.

在 4 种重金属形态中,弱酸可提取态迁移性最高,可还原态具有中度迁移性,可氧化态释放过程较缓慢,非残渣态总量可以认为是重金属活性形态. 活性形态在一般条件下较容易被释放出来,转化为其他形态或为生物所利用,毒性较强. 然而,残渣态与土壤的结合比较牢固,活性小,基本难以被生物利用,毒性较小. 由图 5 可知,Pb、Cu 和 Cd 的活性形态比例范围分别为 36.9%~90.6%、39.6%~93.9%和 43.7%~99.6%,平均值分别为 61.3%、65.3%和 80.7%. 绝大多数土壤样品中 3 种重金属活性形态在总量中的比例占到一半以上,具有极大的生态风险. Pb 和 Cu 的活性形态中大部分是以可还原态的形式存在,并非最高活性形态,但是在还原性环境中,这些重金属还是很容易被释放出来,对植物具有一定的潜在毒害作用^[23,24]. Cd 在大多数样品中的最高活性形态为弱酸可提取态,平均值占 51.1%,说明 Cd 比 Pb 和 Cu 具有更高的生物有效性和迁移性. 李瑛等^[25]研究结果发现在根系土壤中 Cd 主要以弱酸可提取态存在,并且更易在植物茎、叶内积累,最终进入人类的食物链中. 重金属各形态含量受重金属总量和土壤理化性质等因素的影响^[26],值得一提的是,本研究中电子垃圾拆解区农田土壤 pH 值较低(表层 0~20 cm 土壤 pH 值范围为 4.63~6.40),属酸性土壤,为土壤中重金属的释放提供了有利条件.

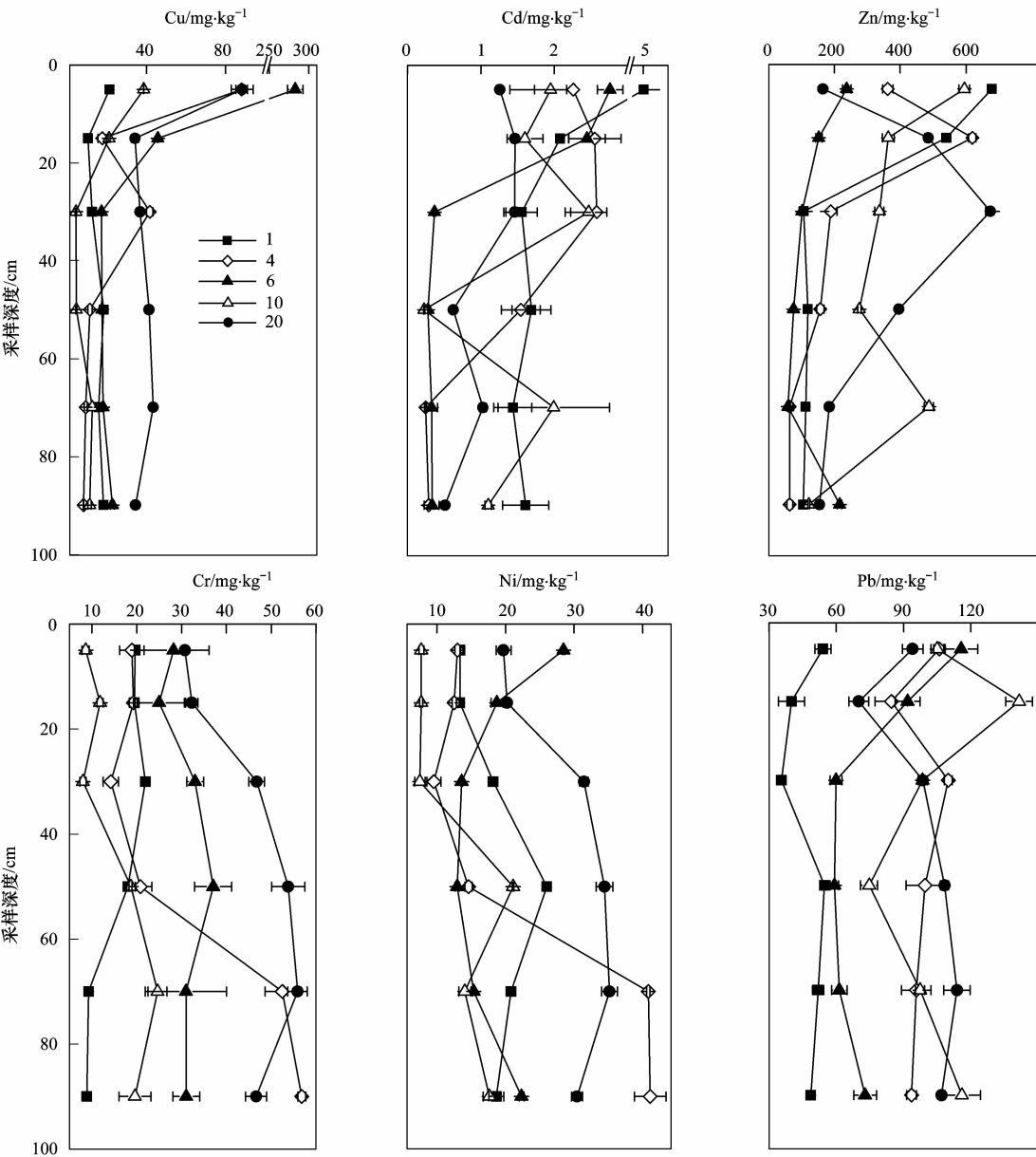


图 4 重金属含量空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of heavy metal contents of soil samples

3 结论

(1)与广东省土壤背景值相比,清远市龙塘镇和石角镇电子垃圾拆解区附近农田表层 0 ~ 20 cm 土壤中 Pb、Cu、Cd、Zn、Ni 和 Cr 元素含量表现出不同程度的富集. 72.7% 的表层土壤样品存在一种或几种重金属超过食用农产品产地环境质量评价标准,以 Cd、Cu、Pb、Zn 污染为主,其中 Cd 是最普遍也是污染最严重的重金属. 土壤样品综合污染指数在 0.30 ~ 14.61 之间,68.2% 的土壤样品受到重金属污染,其中更有 53.3% 为重污染等级.

(2)大部分重金属相互之间具有良好的相关性,简单粗放的电子垃圾回收活动是周边农田土壤重金属污染的重要来源.

(3)Cd、Pb、Zn 和 Cu 在表层土壤中含量较高,深层土部分(20 ~ 100 cm)含量相差不显著. Cr 和 Ni 元素在整个采样剖面含量基本一致,无统计学意义上的差别.

(4)绝大多数土壤样品中 Pb、Cu 和 Cd 活性形态在总量中的比例占到一半以上,特别是 Cd,普遍以活性形态存在,容易发生迁移,具有极大的生态风险.

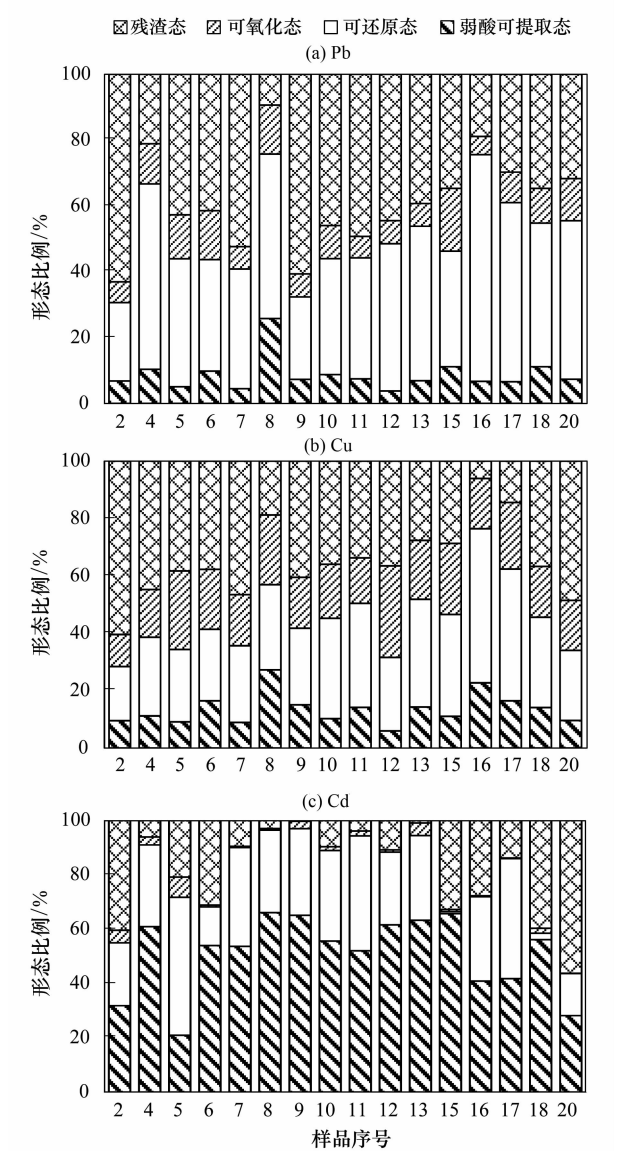


图5 土壤样品中Pb、Cu和Cd化学形态分布

Fig. 5 Sequential chemical distributions of Pb, Cu and Cd in the soil samples

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] Dong D M, Zhao X M, Hua X Y, *et al.* Investigation of the potential mobility of Pb, Cd and Cr (VI) from moderately contaminated farmland soil to groundwater in Northeast, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162** (2-3): 1261-1268.

[3] 郭勇勇. 电子垃圾拆解区重金属及多环芳烃宫内暴露对胎儿生长发育的影响[D]. 汕头：汕头大学, 2010.

[4] 唐斌, 罗孝俊, 曾艳红, 等. 电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险[J]. *环境科学*, 2014, **35** (12): 4655-4662.

[5] 王瑾丰, 宋小飞, 牛晓君, 等. 电子垃圾拆解区土壤上空心菜的毒理响应[J]. *生态环境学报*, 2014, **23** (10): 1664-1670.

[6] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *环境科学*, 2009, **30** (11): 3262-3268.

[7] 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.

[8] 邵科, 尹文华, 朱国华, 等. 电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平[J]. *环境科学*, 2013, **34** (11): 4434-4439.

[9] 任照芳, 黄渤, 刘明, 等. 典型线路板回收过程排放颗粒物的主要成分和特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32** (8): 1447-1451.

[10] 朱智成, 陈社军, 丁南, 等. 珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险[J]. *环境科学*, 2014, **35** (8): 3066-3072.

[11] Tang X J, Shen C F, Shi D Z, *et al.* Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling; an emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173** (1-3): 653-660.

[12] Violante A, Cozzolino V, Perelomov L, *et al.* Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, **10** (3): 268-292.

[13] Pueyo M, Rauret G, Lück D, *et al.* Certification of the extractable contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in a freshwater sediment following a collaboratively tested and optimised three-step sequential extraction procedure[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, **3** (2): 243-250.

[14] 周广柱, 杨锋杰, 程建光, 等. 土壤环境质量综合评价方法探讨[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2005, **24** (4): 113-115.

[15] HJ 332-2006, 食用农产品产地环境质量评价标准[S].

[16] NY/T 395-2000, 农田土壤环境质量监测技术规范[S].

[17] 张朝阳, 彭平安, 刘承师, 等. 华南电子垃圾回收区农田土壤重金属污染及其化学形态分布[J]. *生态环境学报*, 2012, **21** (10): 1742-1748.

[18] 矫旭东, 陆泗进, 王业耀, 等. 电子垃圾拆解场地污染特征及土壤监测评估的研究概况[J]. *土壤通报*, 2014, **45** (5): 1265-1272.

[19] 杨娟, 王昌全, 李冰, 等. 基于BP神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测——以成都平原土壤Cd为例[J]. *土壤学报*, 2007, **44** (3): 430-436.

[20] 胡克林, 张凤荣, 吕怡忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2004, **24** (3): 463-468.

[21] Blaha U, Appel E, Stanjek H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156** (2): 278-289.

[22] 徐圣友, 叶琳琳, 朱燕, 等. 巢湖沉积物中重金属的BCR形

态分析[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(9): 20-23.

[23] Mertens J, Vervaeke P, Schrijver A D, *et al.* Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation [J]. Science of the Total Environment, 2004, **326** (1-3): 209-215.

[24] 李永华, 姬艳芳, 杨林生, 等. 采选矿活动对铅锌矿区水体中重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 103-107.

[25] 李瑛, 张桂银, 李洪军, 等. 根际土壤中 Cd、Pb 形态转化及其植物效应[J]. 生态环境, 2004, **13**(3): 316-319.

[26] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1266-1273.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	LI Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> -tert-Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel: 010-62941102 , 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , 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 电 话 : 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 (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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行