

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:以南京市江北工业区为例 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区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,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季 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)

某典型石油化工园区冬季大气中 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)

上海地区住宅儿童卧室室内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,林骠骑,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)

研究报告

北京市 PM_{2.5} 时空分布特征及其与 PM₁₀ 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 CH₄ 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,周徽(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)

三峡库区兰陵溪小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,刘泽璐,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聚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,王隽,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,关宏伟,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,鲁垠涛,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 迟菘琳,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)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799, 908, 934)

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*

(环境保护部华南环境科学研究所, 国家环境保护环境污染健康风险评估重点实验室, 广州 510655)

摘要: 高浓度水平的重金属、持久性有机污染物(POPs)等的环境暴露对电子垃圾拆解工人健康的影响, 近年来已引起了人们的广泛关注。以电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况为研究对象, 通过比较电子垃圾拆解工人和对照组人群血液中肝功能和肾功能指标的情况, 同时结合性别、年龄、职业暴露时间等因素的相关分析, 分析电子垃圾拆解工人肝、肾功能的健康状况及影响因素, 研究肝肾功能指标对环境污染造成健康损害的敏感程度。结果表明, 广东清远龙塘镇电子垃圾拆解工人肝功能指标谷草转氨酶/谷丙转氨酶(AST/ALT)及直接胆红素(DBIL)显著低于对照组, 但肝功能与肾功能的异常率与对照组均无显著差异; 男性工人肝功能、肾功能指标的异常率较女性工人高; 电子垃圾拆解工人肝功能指标 AST/ALT 和肾功能指标尿素氮(BUN)与年龄呈正相关, 肌酐(CREA)指标与电子垃圾拆解从业时间呈正相关; 肝功能 ALT、AST/ALT 指标及肾功能 BUN、CREA 指标作为评价有机污染物造成的肝、肾功能损伤具有较好敏感性, 肝功能 DBIL 指标作为评价多种污染物共同作用造成的肝功能损伤具有较好敏感性。

关键词: 重金属; 持久性有机污染物(POPs); 肝功能; 肾功能; 电子垃圾拆解工人

中图分类号: X171.5; R994.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0953-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201708101

Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors

YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, XU Rong-fa, ZHENG Jing, REN Ming-zhong*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China)

Abstract: High levels of exposure to heavy metals and persistent organic pollutants (POPs) by e-waste dismantling workers has attracted increasing attention, but the health conditions of the workers are seldom reported. The liver and kidney functions of the workers were studied by comparing the blood indicators of the worker group with those of the control group. Moreover, factors affecting the liver and kidney functions, such as the sexuality, age, and working time, were identified using correlation analysis. The ratio of aspartate transaminase and alanine aminotransferase (AST/ALT) and the direct bilirubin (DBIL) of the workers were significantly lower than the control group but the abnormal rate of liver and kidney remained the same in both groups. The abnormal rates of liver and kidney were higher in men than in women. ALT, AST/ALT, and urea nitrogen (BUN) increased with age while creatinine (CREA) increased with working time. The factors of liver and kidney damage caused by POPs and DBIL can be used as the indicators of the damage caused by multi-factors.

Key words: heavy metal; persistent organic pollutants(POPs); liver function; kidney function; e-waste dismantling worker

电子垃圾含有多种重金属和有机污染物, 这些污染物随着拆解过程释放到环境中, 现有研究在电子垃圾拆解地区的环境(包括大气、水、土壤和室内灰尘等)以及生物样品中均检出了高浓度的重金属和持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)^[1-3]。环境中的该类污染物难以降解, 并能通过呼吸、饮食摄入及表皮接触进入人体, 对人体神经系统, 内分泌系统, 肝脏等造成伤害, 同时还能造成基因损伤、染色体畸变等, 破坏细胞的遗传物质进而升高患癌症等疾病的风险。

电子垃圾拆解工人长期暴露在重金属及各类 POPs 污染的环境中, 体内的该类污染物含量均显

著高于普通对照区人群的水平^[4]。Zheng 等^[5]对贵屿镇儿童的调查显示, 贵屿镇儿童血铅和血铬同样含量显著高于非暴露区儿童, 且该现象与电子垃圾回收活动相关。多项研究显示电子垃圾拆解工人血清中 PBDEs、DPs 含量显著高于对照组^[6-8]。本课题组对广东清远龙塘镇电子垃圾拆解工人的前期研究显示, 龙塘镇电子垃圾拆解工人头发中 Cd、Pb、

收稿日期: 2017-08-13; 修订日期: 2017-10-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (PM-zx703-201701-040, PM-zx703-201701-039)

作者简介: 严晓(1986~), 女, 博士, 主要研究方向为环境持久性有机物, E-mail: yanxiao@scies.org

* 通信作者, E-mail: renmingzhong@scies.org

Cu 等重金属及得克隆 (DPs)、多氯联苯 (PCB)、多溴联苯醚 (PBDE)、十溴二苯乙烷 (DBDPE) 等有机污染物含量均显著高于对照组, 且工人头发中高含量的重金属及有机污染物与电子垃圾拆解活动有关^[9-12].

肝脏、肾脏在重金属、有机污染物的蓄积、解毒和排泄过程中具有重要作用, 是重金属及有机污染物毒性作用的重要靶器官. 重金属、有机污染物对人体肝脏、肾脏的功能具有多种危害性. 如 Pb 能引起肾近曲小管细胞膜对 K^+ 通透性的改变, 显著降低细胞存活率^[13]. 对大鼠实验证明 Cd 可损伤肝细胞, 破坏肝细胞的氧化平衡状态, 产生氧化应激并导致脂质过氧化^[14]. 体外实验表明, Cd 对肾近曲小管上皮细胞具有明显的毒性作用^[15]. Wang 等^[16] 的研究表明 Cr 诱导肝细胞损伤, 破坏肝细胞中 Ca^{2+} 离子平衡, 导致肝细胞内钙离子超载. 长时间、高剂量的 Ni^{2+} 暴露能抑制小鼠肝细胞抗氧化酶的活性, 影响肝细胞的正常生理功能, 导致肝细胞活性下降甚至凋亡, 并造成肝细胞 DNA 损伤^[17]. Cu^{2+} 在肝脏中的积累将抑制肝细胞的增殖, 并引起肝细胞的凋亡^[18-20]. 谭志刚等^[21] 的研究显示, 高浓度的 Cu 摄入导致小鼠肾淤血, 肾小管上皮细胞颗粒变性, 肾小管管腔缩小, 部分肾小管上皮细胞坏死, 甚至导致小鼠死亡.

PCBs 可引起大多数哺乳动物及鱼类肝脏病变或损伤^[22-23], 并能诱导大鼠等哺乳动物肝癌的发生^[24,25]. 1978 年, 台湾发生因食用被 PCBs 污染的米糠油导致的中毒事件, 事发后 3 a 内中毒者因肝病引起的死亡率明显上升^[26]. 随后 24 a 的跟踪研究发现, 早期男性慢性肝疾病和肝硬化死亡率有所增加^[27]. 高水平的 PCBs 暴露能诱导小鼠肾脏细胞凋亡相关基因的表达, 加速肾组织细胞的凋亡, 引起肾功能损伤^[28]. PBDEs 的肝脏毒性表现为肝微粒体酶活性诱导、肝肿大、退行性组织病理学改变和肝癌^[29]. 动物实验显示, PBDE-209 可引起小鼠肝脏氧化-抗氧化机制失衡, 导致肝脏功能、组织病理结构和肝细胞超微细胞结构的异变^[30]. 体外实验显示, PBDE-47、99、206 能抑制人肝细胞的增殖^[31]. DPs 可导致斑马鱼胚胎畸形, 影响斑马鱼体内氧化还原平衡并导致细胞凋亡^[32].

目前, 动物及体外实验研究已证明重金属及有机污染物对肝功能、肾功能会造成不良影响, 但关于电子垃圾拆解工人肝功能、肾功能健康状况的研

究较少, 且该类污染物环境暴露对人体造成的健康损害尚无公认的特异性指标, 因此, 开展关于电子垃圾拆解对工人肝功能、肾功能影响的影响因素研究有重要意义. 本研究通过健康检查, 获得电子垃圾拆解工人和对照人群的肝功能和肾功能指标数据, 分析多种环境污染物暴露对肾功能、肝功能的影响, 通过筛选出适用于评价多种环境污染物暴露对肝功能、肾功能的损害的敏感性、特异性指标, 以期为该类地区人群健康和环境管理提供基础科学数据.

1 材料与方法

1.1 采样区域和研究人群

(1) 采样区域

本研究的采样地均位于广东省, 分别为清远市电子垃圾回收处置污染典型区域清远市龙塘镇、以农业为主要产业的清远市源潭镇以及特大型城市广州市. 清远市是国内最大的电子垃圾拆解处理基地之一, 从事电子垃圾回收处置活动已有 20 多年历史, 电子垃圾回收活动主要集中的龙塘镇和临近的石角镇, 拥有超过 1 300 个回收车间和 8 万名工人, 每年拆解的电子垃圾总量超过 170 万 t. 源潭镇位于龙塘镇的东北方, 历来以传统农业生产为主, 不存在电子垃圾拆解回收行业.

(2) 研究人群

本研究以自愿为原则, 共征集了 106 位志愿者, 包括龙塘镇电子垃圾从业人员 80 人、源潭镇某皮革厂工人 13 人、广州市居民 13 人. 龙塘镇电子垃圾拆解工人作为职业暴露组, 年龄在 20 岁和 59 岁之间, 性别组成为男性 37 人、女性 33 人. 源潭镇和广州市不存在电子垃圾回收活动, 居民生活区域和生活区域周围也没有相关污染源. 源潭镇居民为某皮革加工厂工人, 广州市居民为大学老师和学生, 作为对照组, 工作和生活中均无已知的重金属和有机污染物等相关污染源, 年龄区间分别为 18 ~ 52 岁和 24 ~ 46 岁, 性别组成均为男性 14 人, 女性 12 人.

1.2 样品采集与分析

志愿者在研究人员的指引下分批前往合作医院的体检科进行血液的采集, 每位志愿者采集 8 ~ 10 mL 血液于无抗凝的真空采血管中, 血液采集后放入冰盒中保持低温避光, 即时运回实验室, 然后对无抗凝的真空采血管离心分离血清, -80°C 保存.

血清使用贝克曼库尔特公司库尔特 DXC600 生

化分析仪进行分析, 试剂均购自北京中生北控生物科技股份有限公司. 其中肝功能(总胆红素 TBIL、直接胆红素 DBIL 和间接胆红素 IBIL)、肾功能(尿素氮 BUN、肌酐 CREA、尿酸 UA)、采用比色法, 肝功能中的酶类(谷丙转氨酶 ALT、谷草转氨酶 AST、谷氨酰转肽酶 GGT)采用速率法.

1.3 统计分析

健康指标采用平均值 \pm 标准差(范围)表示, 异常情况采用异常人数(异常率)表示. 本研究使用 SPSS 19.0 软件来进行数据分析. 各健康指标经对数转换后, 用 Shapiro-Wilk test 检验, 数据符合正态分布. 各组间健康指标采用单因素方差分析(One-Way Anova)检验差异显著性, 相关性采用 Pearson 相关分析, 对于健康检测异常率等定性资料的比较使用卡方检验.

2 结果与讨论

2.1 肝功能检查结果分析与讨论

(1) 电子垃圾拆解工人与对照人群肝功能各项指标及异常情况对比

AST 是肝功能的一项重要指标, 肝脏受损时 AST 水平会有所升高, 但 AST 不是肝脏损伤的特异性指标, 许多药物和疾病都能引起水平变化. ALT 是肝功能损伤最常用的敏感指标, 任何原因引起的肝细胞受损均可导致 ALT 增高. AST/ALT 比值是临床上用来反映肝细胞损害情况的指标, 正常人的 ALT 水平比 AST 高, 当肝细胞线粒体受到严重损伤时, 会导致 AST 明显增高^[33].

由表 1 可知, 在本次研究中, 除 ALT 外, 职业暴露组肝功能其他指标均低于对照组, 其中暴露组 AST/ALT 指标及 DBIL 指标显著低于对照组($P < 0.05$). Khan 等^[34]对铅暴露儿童的研究得到了相似的结果, 暴露组 TBIL 水平低于对照组但差异不显著($P > 0.05$), ALT 水平极显著提高($P < 0.01$). 但部分动物实验的结果与本研究的结果有所差异, 申云帅^[35]使用 Pb、Cd 处理大鼠, Pb 处理组 AST/ALT 水平极显著提高($P < 0.05$), Cd 处理组 AST 水平显著提高($P < 0.05$). 史智勇等^[36]使用 PCB 对大鼠进行处理, 大鼠肝细胞发生病变、坏死, PCB 处理组 TBIL、DBIL、AST、ALT 均显著高于对照组($P < 0.05$). 本研究并未观察到 ALT、AST 的显著变化, 但血清中的肝脏酶类仅是反应肝细胞损伤的标志物, 其未发生变化并不代表肝脏没有遭到损害. 如有毒物质氯乙烯已知具有肝脏毒性, 但大

多数研究结果认为不论短期或长期接触均不会引起肝功能指标的升高^[37].

对单一污染物暴露的人群肝功能情况研究发现, Cd 污染地区人群肝脏 ALT、AST、ALP 水平均与血液 Cd 水平呈显著正相关^[38], 而使用 Pb + Cd、Cd + As、Pb + Cd + As 对大鼠进行联合染毒试验发现, 肝功能 AST/ALT 水平降低^[39], 本研究结果与大鼠联合染毒试验结果较为相似. 电子垃圾拆解工人长期暴露于电子垃圾拆解所释放的污染物中, 体内多种污染物含量均较高, 本研究测得的结果可能是各种污染物综合作用的效应.

(2) 电子垃圾拆解工人性别对肝功能各项指标及异常率的影响

本研究结果见表 2 和表 3, 男性工人 ALT 指标极显著高于女性工人($P < 0.01$), AST/ALT 指标极显著低于女性工人($P < 0.01$), DBIL 指标显著高于女性工人($P < 0.05$), GGT 指标极显著高于女性工人($P < 0.01$), 同时男性工人 GGT 指标异常率极显著高于女性工人($P < 0.01$), 显示男性工人肝功能受损情况比女性工人更严重, 而本团队前期工作表明, 电子垃圾拆解工人血清中重金属及有机污染物含量均未显示出性别差异, 因此, 该结果可能与女性吸烟习惯少于男性的现象有关^[40].

(3) 电子垃圾拆解工人年龄与电子垃圾拆解从业时间对肝功能各项指标的影响

通过 Pearson 相关分析, 电子垃圾拆解暴露组肝功能 ALT 指标与工人年龄呈负相关($P < 0.01$), AST/ALT 与工人年龄呈正相关($P < 0.05$). 此外, 肝功能其他指标与年龄、电子垃圾拆解从业时间均无显著相关性($P > 0.05$). 实验同时发现, 对照组肝功能指标与年龄无显著相关性($P > 0.05$).

Ikedo 等^[41]对 Cd 污染地区女性的研究显示, ALT、AST 水平均与年龄呈显著正相关($P < 0.05$), 而本课题组前期研究显示, 电子垃圾拆解工人血液中部分有机污染物的含量与年龄和(或)从业时间呈正相关, 但未观察到血液中重金属含量与年龄或从业时间的相关性. 该结果可能说明有机污染物在人体中的富集能力高于重金属, 同时, 肝功能 ALT、AST/ALT 指标对有机污染物造成的影响可能更具敏感性, 而 DBIL 指标对于评价肝功能在多种污染物影响下的受损程度具有较好的敏感性. 关于电子垃圾拆解对肝功能的影响, 以及评价肝功能在多种污染物影响下损伤程度的敏感性、特异性指标, 有待进一步研究.

表 1 暴露组(电子垃圾拆解工人)和对照组肝功能检查结果及肝功能异常情况¹⁾

Table 1 Liver function examination results and abnormal results for occupational exposure group (e-waste recycling worker) and control group

项目	ALT/IU·L ⁻¹	AST/IU·L ⁻¹	AST/ALT	TBIL/μmol·L ⁻¹
暴露组(n=70)	24.30±14.40(9.00~88.00)	27.50±8.98(14.00~66.00)	1.32±0.53(0.55~3.18)*	9.66±8.25(3.20~68.00)
对照组(n=26)	23.50±19.20(8.00~83.00)	33.30±20.80(11.00~101.00)	1.66±0.85(0.56~4.32)	10.40±3.85(3.60~17.10)
项目	DBIL/μmol·L ⁻¹	IBIL/μmol·L ⁻¹	GGT/IU·L ⁻¹	异常人数(比例)/%
暴露组(n=70)	1.96±1.43(0.10~7.50)*	6.84±3.08(1.00~18.80)	21.00±20.50(3.50~105.00)	7(24.3)
对照组(n=26)	3.04±1.57(0.40~6.00)	7.32±2.54(3.20~11.70)	24.00±25.20(8.00~139.00)	4(16.7)

1) *表示差异显著($P < 0.05$);反映各项功能的指标中有一项或一项以上异常则归为该项功能异常,各项指标的正常范围由医院提供

表 2 暴露组(电子垃圾拆解工人)与对照组男性与女性肝功能各项指标的性别对比¹⁾

Table 2 Gender contrast of liver function examination results for male and female in occupational exposure group (e-waste recycling worker) and control group

类型	项目	ALT/IU·L ⁻¹	AST/IU·L ⁻¹	AST/ALT	TBIL/μmol·L ⁻¹	DBIL/μmol·L ⁻¹	IBIL/μmol·L ⁻¹	GGT/IU·L ⁻¹
暴露组	男(n=33)	28.64±14.60 (10.00~88.00)**	29.00±10.06 (14.00~66.00)	1.12±0.39 (0.69~2.20)**	11.63±11.23 (3.20~68.00)	2.36±1.61 (0.20~7.50)*	7.44±3.35 (3.00~18.80)	30.41±25.28 (3.50~105.00)**
	女(n=37)	20.38±13.32 (9.00~73.00)	26.14±7.80 (15.00~50.00)	1.50±0.58 (0.55~3.18)	7.91±3.40 (3.40~16.40)	1.60±1.16 (0.10~5.60)	6.31±2.75 (1.00~12.70)	12.66±9.30 (3.60~46.00)
对照组	男(n=14)	30.00±22.79 (14.00~83.00)	36.64±23.18 (17.00~101.00)	1.34±0.49 (0.68~2.67)	11.14±3.97 (5.90~17.10)	3.25±1.60 (1.10~6.00)	7.89±2.68 (4.10~11.70)	49.07±89.19 (9.00~46.00)
	女(n=12)	15.83±7.44 (8.00~32.00)	29.50±16.35 (11.00~70.00)	2.04±1.02 (1.16~4.12)	9.44±3.46 (3.60~15.60)	2.79±1.48 (0.70~4.90)	6.65±2.16 (3.20~10.80)	13.92±5.63 (8.00~26.00)

1) *表示差异显著($P < 0.05$);**表示差异极显著($P < 0.01$)

表 3 男性与女性电子垃圾拆解工人肝功能各项指标异常情况对比¹⁾

Table 3 Abnormal liver function examination results of male and female e-waste dismantling workers

项目	ALT/IU·L ⁻¹	AST/IU·L ⁻¹	AST/ALT	TBIL/μmol·L ⁻¹	DBIL/μmol·L ⁻¹	IBIL/μmol·L ⁻¹	GGT/IU·L ⁻¹
男(n=33)	4(12.1%)	5(15.2%)	16(48.5%)	2(6.1%)	1(0.3%)	1(3.0%)	8(24.2%)*
女(n=37)	2(5.4%)	1(2.7%)	26(70.3%)	0	0	1(2.7%)	1(2.7%)

1) 数值表示人数(比例);*表示差异显著($P < 0.05$)

2.2 肾功能检查结果分析与讨论

2.2.1 电子垃圾拆解工人与对照人群肾功能各项指标及异常情况对比

电子垃圾拆解工人和对照人群肾功能检查各项指标及异常情况如表 4 所示,暴露组中反映肾功能的指标 BUN、CREA、UA 与对照组相比均无显著差异($P > 0.05$)。电子垃圾拆解工人肾功能异常率高于对照组人群,但卡方检验没有显著性差异($P > 0.05$)。这可能是因为肾脏具有较大的储存能力,部分肾小球受损时,剩余的肾单位仍可进行有效的功能代偿,超过 50% 的肾单位被破坏后才会出现肾功能不全的临床表现^[42]。

BUN 和 CREA 是医学上用来评价肾功能的两个主要指标,当肾功能受损时,BUN 和 CREA 会明显升高^[43]。UA 是嘌呤代谢的终产物,现有研究显示环境污染物与尿酸升高有关^[44]。有研究认为 BUN 和 CREA 水平能够反映慢性肾衰进展,肾衰竭大鼠 BUN、CREA 水平均极显著高于对照组^[45]。对

Pb 暴露人群的研究表明,暴露人群 CREA 水平显著高于对照组,且与环境中 Pb 浓度呈正相关^[46,47]。

此外,结论为肾功能各指标与对照组有显著差异的研究,对象均为单一污染暴露人群,但亦有研究表明多种污染物暴露对肾功能的影响会产生相加或抑制效应,洪峰^[48]的研究发现 Cd、无机 As(职业接触)对肾功能的联合毒性表现为相加或协同效应,而有机 As(环境接触)对 Cd 的肾毒性有一定抑制作用。电子垃圾拆解工人体内多种污染物含量均较高。本研究检测的 BUN、CREA、UA 指标虽然没有显著差异,但肾功能指标异常的比例(11.4%)高于对照组(4.2%),这可能是多种污染物共同作用的结果。因此 BUN、CREA、UA 用于评价多种污染物共同作用下的肾功能损伤不够敏感。Mason 等^[49]对职业 Cu、Cd 暴露工人的研究显示,工人 β_2 -MG、NAG 水平均显著高于对照组。因此,选用 NAG、 β_2 -MG 等具特异性和敏感性的指标可能更有助于研究的开展。

表 4 电子废物拆解职业暴露组(电子垃圾拆解工人)和对照组肾功能检查结果及肾功能异常情况

Table 4 Renal function examination results and abnormal results for occupational exposure group (e-waste recycling worker) and control group

项目	BUN/mm \cdot L $^{-1}$	CREA/ μ mol \cdot L $^{-1}$	UA/ μ mol \cdot L $^{-1}$	超标情况 [人数(比例/%)]
暴露组($n=70$)	4.95 \pm 1.37(2.45 ~ 8.35)	72.90 \pm 25.70(39.00 ~ 236.00)	284.00 \pm 115.00(76.00 ~ 696.00)	8(11.4)
对照组($n=26$)	4.50 \pm 1.16(2.53 ~ 6.80)	72.60 \pm 17.20(49.00 ~ 97.00)	306.00 \pm 68.60(163.00 ~ 484.00)	1(4.2)

2.2.2 电子垃圾拆解工人性别对肾功能各项指标及异常率的影响

从表 5 可见, 电子垃圾拆解工人肾功能指标中, 男性工人 BUN 指标显著高于女性工人($P < 0.05$), CREA 指标及 UA 指标极显著高于女性工人($P < 0.01$), 对照组中男女性肾功能各指标无显著差异性($P > 0.05$). 从表 6 可见, 电子垃圾拆解工人肾功能指标异常情况中, 男性工人 UA 指标异常率显著高于女性工人($P < 0.05$), 以外的其他指标没有显著差异($P > 0.05$), 说明男性工人肾功能受

损情况较女性工人严重.

2.2.3 电子垃圾拆解工人年龄与电子垃圾拆解从业时间对肾功能各项指标的影响

通过相关分析, 暴露组肾功能 BUN 指标与工人年龄呈正相关($P < 0.01$), CREA 指标与工人电子垃圾拆解从业时间呈正相关($P < 0.05$). 此外, 肾功能其他指标与年龄、电子垃圾拆解从业时间均无显著相关性($P > 0.05$). 同时, 对照组中各肾功能指标与年龄无显著相关性($P > 0.05$).

由以上研究结果可见, 电子拆解对电子拆解工

表 5 暴露组(电子垃圾拆解工人)与对照组肾功能各项指标的性别对比¹⁾

Table 5 Gender contrast of renal function examination results in occupational exposure group (e-wasterecycling worker) and control group

类型	性别	BUN/mm \cdot L $^{-1}$	CREA/ μ mol \cdot L $^{-1}$	UA/ μ mol \cdot L $^{-1}$
暴露组	男($n=33$)	5.31 \pm 1.44(8.35 ~ 2.83) *	87.48 \pm 29.25(236.00 ~ 51.00) **	365.09 \pm 111.31(696.00 ~ 172.00) **
	女($n=37$)	4.64 \pm 1.25(8.13 ~ 2.45)	59.97 \pm 11.74(102.00 ~ 39.00)	227.03 \pm 52.75(372.00 ~ 142.00)
对照组	男($n=14$)	4.76 \pm 1.13(3.00 ~ 6.80)	86.57 \pm 8.05(72.00 ~ 97.00)	340.86 \pm 63.70(224.00 ~ 484.00)
	女($n=12$)	4.20 \pm 1.13(2.53 ~ 6.60)	56.33 \pm 5.13(49.00 ~ 63.00)	264.75 \pm 46.22(163.00 ~ 327.00)

1) * 表示差异显著($P < 0.05$); ** 表示差异极显著($P < 0.01$)

表 6 男性与女性电子垃圾拆解工人肾功能各项指标异常情况对比¹⁾

Table 6 Abnormal renal function examination results of male and female e-waste dismantling workers

性别	BUN/mm \cdot L $^{-1}$	CREA/ μ mol \cdot L $^{-1}$	UA/ μ mol \cdot L $^{-1}$
男($n=33$)	5(15.2%)	1(3.0%)	8(32.0%) *
女($n=37$)	2(5.4%)	1(2.7%)	1(2.8%)

1) 数值表示人数(比例); * 表示差异显著($P < 0.05$)

人的健康造成了一定的影响, 这与其他研究的结果是一致的. 如 Wang 等^[50]在台州市 236 个电子拆解工人(对照组 89 人)的研究中发现, 电子拆解工人的 TSH 含量显著低于对照组. 另一项对电子废物回收区域孕妇血清中 TSH、甲状腺素 T3 和 T4 的研究显示^[51], 暴露组 TSH 和 T4 都显著低于对照组. Li 等^[52]对新生儿的研究显示, 贵屿组的新生儿脐带血淋巴细胞 DNA 损伤程度显著高于对照组, 而脐带血血铬含量与脐带血淋巴细胞 DNA 损坏程度成正相关, 表明电子废物关联污染物可能导致 DNA 损伤并且威胁新生儿健康. Liu 等发现^[53], 天津市

静海县电子废物回收处理区域居民的外周血淋巴细胞染色体畸变率、微核率和 DNA 损伤程度都显著高于对照区居民, 其中染色体畸变率是对照区居民的 20 倍, 显示电子废物回收活动产生的污染物会损伤人体遗传物质, 破坏基因组稳定性. 这些研究均发现电子废物处理活动对人群健康产生了影响, 但其影响机制仍需进一步研究.

3 结论

(1) 电子垃圾拆解工人反映肝功能的指标 AST/ALT 及 DBIL 显著低于对照组, 反映肾功能的指标 BUN、CREA、UA 与对照组相比均无显著差异.

(2) 电子垃圾拆解工人肝功能指标中, 男性工人 ALT、GGT 及 DBIL 指标显著高于女性工人, AST/ALT 指标显著低于女性工人. 电子废物拆解工人肾功能指标中, 男性工人 BUN、CREA 及 UA 指标均显著高于女性工人. 说明男性工人肝功能及肾功能受损情况均较女性严重.

(3) 电子垃圾拆解工人肝功能 ALT 指标与工人年龄呈负相关($P < 0.01$), AST/ALT 与工人年龄呈正相关($P < 0.05$). 肾功能 BUN 指标与工人年龄呈正相关($P < 0.01$), CREA 指标与电子垃圾拆解从业时间呈正相关($P < 0.05$), 说明这些指标对有机污染物造成的肝、肾功能损伤具有较好敏感性.

参考文献:

- [1] 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.
Zhu Z C, Chen S J, Ding N, *et al.* Polychlorinated biphenyls in house dust at an E-waste site and urban site in the Pearl River Delta, southern China: sources and human exposure and health risks[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3066-3072.
- [2] 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.
- [3] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3151-3159.
Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in an e-waste dismantling area and their distribution characteristics[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- [4] 袁剑刚, 郑晶, 陈森林, 等. 中国电子废物处理处置典型地区污染调查及环境、生态和健康风险研究进展[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(4): 473-486.
Yuan J G, Zheng J, Chen S L, *et al.* Advances in the research on pollution investigations and environmental, ecological and health risks from e-waste recycling activities in China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(4): 473-486.
- [5] 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.
- [6] 梁思. 典型电子废物拆解区溴代阻燃剂和重金属人体负荷研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [7] Bi X H, Thomas G O, Jones K C, *et al.* Exposure of electronics dismantling workers to polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in South China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(16): 5647-5653.
- [8] Ren G F, Yu Z Q, Ma S T, *et al.* Determination of dechlorane plus in serum from electronics dismantling workers in South China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9453-9457.
- [9] Zheng J, Luo X J, Yuan J G, *et al.* Heavy metals in hair of residents in an e-waste recycling area, South China: contents and assessment of bodily state[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **61**(4): 696-703.
- [10] Zheng J, Wang J, Luo X J, *et al.* Dechlorane plus in human hair from an e-waste recycling area in south China: comparison with dust[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(24): 9298-9303.
- [11] Zheng J, Luo X J, Yuan J G, *et al.* Levels and sources of brominated flame retardants in human hair from urban, e-waste, and rural areas in South China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(12): 3706-3713.
- [12] Zheng J, Chen K H, Yan X, *et al.* Heavy metals in food, house dust, and water from an e-waste recycling area in South China and the potential risk to human health[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **96**: 205-212.
- [13] 陈卫平, 刘世杰. 铅的肾细胞毒性及锌的保护作用[J]. 卫生毒理学杂志, 1992, **9**(2): 73-76.
Chen W P, Liu S J. The toxicity of lead to kidney tubules and the Protective effects of Zinc[J]. *Journal of Health Toxicology*, 1995, **9**(2): 73-76.
- [14] 汪纪仓, 裔传卉, 刘学忠, 等. 醋酸镉对大鼠原代肝细胞氧化应激的影响[J]. 中国兽医科学, 2009, **39**(11): 1010-1013.
Wang J C, Yi C H, Liu X Z, *et al.* Effects of cadmium acetate on oxidative stress in primary cultured rat hepatocytes[J]. *Chinese Veterinary Science*, 2009, **39**(11): 1010-1013.
- [15] 马静, 易建华, 李鑫, 等. 镉致人肾近曲小管上皮细胞氧化损伤及凋亡的实验研究[J]. 现代预防医学, 2010, **37**(1): 96-98.
Ma J, Yi J H, Li X, *et al.* Experimental study on the effect of cadmium on lipid peroxidation damage and cell apoptosis in human renal proximal tubular epithelial cells[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2010, **37**(1): 96-98.
- [16] 王莎莎, 陈龙, 夏树开, 等. 镉诱发肝细胞毒性和胞内 Ca²⁺ 变化及硒的保护作用研究[J]. 分子细胞生物学报, 2006, **39**(4): 350-356.
Wang S S, Chen L, Xia S K, *et al.* Cadmium-induced cytotoxicity and intracellular Ca²⁺ alteration in hepatocytes and protection by selenium[J]. *Journal of Molecular Cell Biology*, 2006, **39**(4): 350-356.
- [17] 李雅婷. 镍离子对原代小鼠肝细胞毒性作用机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [18] Aston N S, Watt N, Morton I E, *et al.* Copper toxicity affects proliferation and viability of human hepatoma cells (HepG2 line)[J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2000, **19**(6): 367-376.
- [19] 李毓雯, 万小华, 宁琴, 等. 铜过量负荷导致肝细胞凋亡及其对 Bax Bcl-2 基因表达的影响[J]. 中国当代儿科杂志, 2008, **10**(1): 42-46.
Li Y W, Wan X H, Ning Q, *et al.* Excessive copper induces hepatocyte apoptosis and affects Bax and Bcl-2 expression in rat liver[J]. *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*, 2008, **10**(1): 42-46.
- [20] 贺绍君, 刘德义, 李静, 等. 高剂量铜摄入对小鼠肝肾组织形态及抗氧化功能的影响[J]. 营养学报, 2014, **36**(3): 253-257.
He S J, Liu D Y, Li J, *et al.* Effects of high copper dose on morphology and antioxidant function of liver and kidney in mice[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2014, **36**(3): 253-257.
- [21] 谭志刚, 王墙, 林滋, 等. 铜过载对小鼠肝肾的损伤[J]. 畜牧与兽医, 2015, **47**(7): 88-90.

- [22] Sonne C, Wolkers H, Leifsson P S, *et al.* Organochlorine-induced histopathology in kidney and liver tissue from Arctic fox (*Vulpes lagopus*) [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(7): 1214-1224.
- [23] Wlostowski T, Krasowska A, Bonda E. Joint effects of dietary cadmium and polychlorinated biphenyls on metallothionein induction, lipid peroxidation and histopathology in the kidneys and liver of bank voles [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**(3): 403-410.
- [24] Silberhorn E M, Glauert H P, Robertson L W. Critical reviews in: carcinogenicity of polyhalogenated biphenyls: PCBs and PBBs [J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 1990, **20**(6): 440-496.
- [25] Mayes B A, McConnell E E, Neal B H, *et al.* Comparative carcinogenicity in Sprague-Dawley rats of the polychlorinated biphenyl mixtures Aroclors 1016, 1242, 1254, and 1260 [J]. *Toxicological Sciences*, 1998, **41**(1): 62-76.
- [26] Hsieh S F, Yen Y Y, Lan S J, *et al.* A cohort study on mortality and exposure to polychlorinated biphenyls [J]. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 1996, **51**(6): 417-424.
- [27] Tsai P C, Ko Y C, Huang W Y, *et al.* Increased liver and lupus mortalities in 24-year follow-up of the Taiwanese people highly exposed to polychlorinated biphenyls and dibenzofurans [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **374**(2-3): 216-222.
- [28] 周焕发, 赵红斌, 杨银书, 等. 多氯联苯对大鼠肾脏 c-fos、c-Myc 和 β -catenin 表达影响的研究 [J]. *癌变·畸变·突变*, 2010, **22**(6): 448-451.
Zhou H F, Zhao H B, Yang Y S, *et al.* Effects of polychlorinated biphenyl on c-fos, c-Myc and β -catenin expressions in rat kidneys [J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis*, 2010, **22**(6): 448-451.
- [29] 叶细标, 傅华. 多溴联苯醚的环境暴露及健康危害 [J]. *环境与职业医学*, 2007, **24**(1): 95-101.
Ye X B, Fu H. Environmental exposure and health risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2007, **24**(1): 95-101.
- [30] 王兴华, 张照祥, 丁书姝, 等. PBDE-209 致小鼠肝脏病理学改变及其氧化应激机制研究 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2012, **16**(3): 187-190.
Wang X H, Zhang Z X, Ding S S, *et al.* Study on pathological changes in mice liver induced by PBDE-209 and the mechanism of oxidative stress [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2012, **16**(3): 187-190.
- [31] 那广水, 孙丽娟, 张雯, 等. 溴阻燃剂对肝细胞的毒性 [J]. *生态毒理学报*, 2012, **7**(5): 570-573.
Na G S, Sun L J, Zhang W W. Hepatotoxicity of brominated flame retardants [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, **7**(5): 570-573.
- [32] 刘阳. 得克隆对斑马鱼毒性效应的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [33] Luo X J, Zhang X L, Liu J, *et al.* Persistent halogenated compounds in waterbirds from an e-waste recycling region in South China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(2): 306-311.
- [34] Khan D A, Qayyum S, Saleem S, *et al.* Lead exposure and its adverse health effects among occupational worker's children [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2010, **26**(8): 497-504.
- [35] 申云帅. 铅镉砷对大鼠肝肾的联合毒性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [36] 史智勇, 董菊子, 马慧, 等. 多氯联苯对大鼠肝脏结构及功能的影响 [J]. *癌变·畸变·突变*, 2008, **20**(3): 224-226.
Shi Z Y, Dong J Z, Ma H, *et al.* Effects of polychlorinated biphenyl on structure and function of rat liver [J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis*, 2008, **20**(3): 224-226.
- [37] 冀芳. 氯乙烯作业工人遗传损伤及其易感性研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [38] Kang M Y, Cho S H, Lim Y H, *et al.* Effects of environmental cadmium exposure on liver function in adults [J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 2013, **70**(4): 268-273.
- [39] 王茂. 长期重金属污染对人群健康效应的研究 [D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [40] Chen A M, Dietrich K N, Huo X, *et al.* Developmental neurotoxicants in e-waste: an emerging health concern [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(4): 431-438.
- [41] Ikeda M, Zhang Z W, Moon C S, *et al.* Normal liver function in women in the general Japanese population subjected to environmental exposure to cadmium at various levels [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2000, **73**(2): 86-90.
- [42] Wang W, Huang H M, Zhu D M, *et al.* Modified ultrafiltration in paediatric cardiopulmonary bypass [J]. *Perfusion*, 1998, **13**(5): 304-310.
- [43] 王敏, 俞诗源, 刘小媛, 等. X 射线辐射对小鼠肾组织结构和血清肌酐与尿素氮含量的影响 [J]. *动物学杂志*, 2014, **49**(4): 476-428.
Wang M, Yu S Y, Liu X Y, *et al.* Effects of X-ray radiation on kidney histological structure and serum creatinine and urea nitrogen contents [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, **49**(4): 476-428.
- [44] Dioka C E, Orisakwe O E, Adeniyi F A A, *et al.* Liver and renal function tests in artisans occupationally exposed to lead in mechanic village in Nnewi, Nigeria [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2004, **1**(1): 21-25.
- [45] 刘学文, 杨卫彬, 荆志伟. 益肾化浊颗粒对腺嘌呤饲喂法所致慢性肾衰大鼠血清中 Bun, Crea 含量的影响 [J]. *世界中医药*, 2013, **8**(12): 1474-1477.
Liu X W, Yang W B, Jing Z W. Effects of Yishenhuaizhuo granules on bun and crea in serum of adenine feeding method induced chronic renal failure rats [J]. *World Chinese Medicine*, 2013, **8**(12): 1474-1477.
- [46] Alasia D D, Emem-Chioma P C, Wokoma F S. Association of lead exposure, serum uric acid and parameters of renal function in Nigerian lead-exposed workers [J]. *The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2010, **1**(4): 182-190.
- [47] 蒋云生, 胡益群, 夏运成, 等. 空气铅浓度与铅接触人员肾功能改变的多元分析 [J]. *中南大学学报(医学版)*, 2004, **29**(2): 154-156.
Jiang Y S, Hu Y Q, Xia Y C, *et al.* Multiple analysis of lead concentration in the air and renal function of lead exposure

- workers [J]. *Journal of Central South University (Medical Sciences)*, 2004, **29**(2): 154-156.
- [48] 洪峰. 镉、砷对肾脏的联合毒性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2003.
- [49] Mason H J, Davison A G, Wright A L, *et al.* Relations between liver cadmium, cumulative exposure, and renal function in cadmium alloy workers [J]. *British Journal of Industrial Medicine*, 1988, **45**(12): 793-802.
- [50] Wang H M, Zhang Y, Liu Q, *et al.* Examining the relationship between brominated flame retardants (BFR) exposure and changes of thyroid hormone levels around e-waste dismantling sites [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2010, **213**(5): 369-380.
- [51] Zhang J Q, Jiang Y S, Zhou J, *et al.* Elevated body burdens of PBDEs, dioxins, and PCBs on thyroid hormone homeostasis at an electronic waste recycling site in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(10): 3956-3962.
- [52] 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.
- [53] Liu Q, Cao J, Li K Q, *et al.* Chromosomal aberrations and DNA damage in human populations exposed to the processing of electronics waste [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, **16**(3): 329-338.

环 境 科 学

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/GAC 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)