

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)
南京工业源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)
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)
巢湖水体可溶性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,刘泽珩,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降解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)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价

徐美娟¹, 鲍波², 陈春燕², 王永川¹, 高夫燕¹, 虞效益^{1*}

(1. 浙江大学宁波理工学院机电与能源工程学院, 宁波 315100; 2. 慈溪市环境保护监测站, 慈溪 315300)

摘要: 为评价中国华东沿海城市地表水重金属的污染现状和潜在生态风险, 以宁波为例, 在城区地表水中采集了 255 个水样, 检测了 6 种重金属 (Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn) 的含量水平, 计算了重金属的健康风险指数和致癌风险指数。结果表明, 宁波市地表水中重金属平均浓度的大小顺序为: Zn > Pb > Cr > Ni > Cd > Cu; 有 3 种重金属超过国标 GB 3838-2002 中的 V 类限值, 且严重顺序为 Cd > Pb > Cr, 电镀废水、金属加工废弃物、交通污染物、染料和涂料废物是主要污染源。70% 以上的地表水存在健康风险, 镇海区和海曙区风险最高, 3 种潜在风险最大的重金属及顺序为: Cd > Cr > Pb。地表水对成年人和未成年人的致癌风险指数平均值分别达到临界值的 17 600 倍和 24 800 倍, 且 95% 以上因 Cr 引起, 人口密集的商业区致癌风险指数接近全市平均水平的 2 倍。宁波市地表水重金属污染严重, 相关部门应当足够重视。

关键词: 地表水; 重金属; 健康风险; 致癌风险; 华东沿海城市; 宁波

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0729-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201705251

Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China

XU Mei-juan¹, BAO Bo², CHEN Chun-yan², WANG Yong-chuan¹, GAO Fu-yan¹, YU Xiao-yi^{1*}

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 2. Cixi Environmental Protection Monitoring Station, Cixi 315300, China)

Abstract: In order to evaluate the present situation and the potential ecological risk of heavy metal pollution in the surface waters of eastern Chinese coastal cities, the city of Ningbo was used as an example. From surface waters in Ningbo, 255 water samples were collected. The concentrations of six heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) were measured for the samples. The potential ecological risk of these heavy metals was evaluated by calculating health risk and cancer risk indices. The results indicate that, in the surface waters of Ningbo, the average concentrations of the six heavy metals were in the increasing order of Zn > Pb > Cr > Ni > Cd > Cu. Three of the heavy metal concentrations exceeded the national environmental quality standards for surface water (GB 3838-2002, grade V), and the order of exceeding the standard: Cd > Pb > Cr. Electroplating wastewater, metal waste produced, traffic pollutant, dyes, and coatings waste were the main pollutant sources. There were some potential health risks in over 70 percent of the surface waters in Ningbo, and the surface waters of the Zhenhai and Haishu districts had the highest potential health risk. There were three major potential health risk heavy metals, and their order of increasing risk was Cd > Cr > Pb. For adults and juveniles, the average carcinogenic risk indices were 17 600 and 24 800 times the critical values, respectively. Moreover, over 95 percent of the risks were attributed to Cr. The potential carcinogenic risk index of commercial areas with dense population was nearly 2 times that of the city average. The results indicated that the state of heavy metal pollution in the surface waters of Ningbo was very serious, thus the government should pay more attention to this issue.

Key words: surface water; heavy metals; health risk; carcinogenic risk; eastern Chinese coastal city; Ningbo

工业经济迅猛发展, 城市人口不断增长, 城市化进程快速推进, 是当今社会的普遍现象^[1]。然而, 在社会快速发展的同时, 高负荷的城市内河也遭到了严重污染。宁波是典型的沿海港口城市, 华东地区重要的工业经济中心, 也是重要的水产养殖基地, 近几十年, 在经济快速发展的同时地表水也遭到了严重污染, 市内各河流汇入东海, 对东海近岸水质和水产养殖影响严重, 水中污染物通过直接接触或食物链富集到人体, 危害人体健康, 制约城市的可持续发展。有研究表明^[2-4], 宁波市内地表水总体属劣 V 类, 多处水体富营养化严重、绿藻暴发、发黑发臭, 严重影响到居民的正常生活和工

作; 然而现有的研究仅对 TN、NH₄⁺-N、TP 和高锰酸盐指数污染进行调查和分析, 并未对重金属进行检测和评价。

重金属因不降解、持续性和生物积累性^[5-7], 对人体健康存在潜在危害, 可通过直接接触或食物链富集到人体, 严重损害肝、肾、消化系统和神经系统^[8-11], Cd 和 Cr 等一些重金属还有致癌

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-08-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51406180); 浙江省自然科学基金项目 (LY17E060003); 浙江省自然科学基金项目 (LQ15E060002)

作者简介: 徐美娟 (1980 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: xmj80@126.com

* 通信作者, E-mail: yuxiaoyi@nit.zju.edu.cn

性^[12~15], 是一类危害重大的水污染物. 本文以宁波为例, 对我国华东沿海城市地表水中 6 种重金属 (Cd、Cr、Pb、Zn、Cu 和 Ni) 的污染现状开展了广谱性调研和分析, 评价了 6 种重金属的健康风险和 Cd、Cr 的致癌风险, 以期为华东沿海城市地表水和东海近岸海域重金属污染的治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 城市特征和采样断面布置

宁波地处长江三角洲南翼, 交通便捷、经济发达, 是典型的华东沿海城市. 市内设有镇海(ZH)、北仑(BL)、江北(JB)、江东(JD)、海曙(HS)和鄞州(YZ)这 6 个行政区 (如图 1), 每个区功能各异, 特征明显. 镇海区是重工业区, 区内有大型炼油厂和与其配套的化工园区、金属加工厂等; 北仑区是港口工业区, 区内有世界第一大港口(北仑港), 还有大型的热电厂、电镀厂等; 江北和江东区是工业和商业混合区, 也是老城区, 工业类型混杂, 人口较多; 海曙区是中心城区, 商业盛行、工业极少, 交通繁忙、人口密集, 三大主干河流也在此区汇合; 鄞州区是新兴工业和人文混合区, 区内产业类型较多, 人口密度较小.

宁波也是典型的江南水乡, 市内有大小河道 173 条, 总长约 187 km, 水域面积约 400 万 m², 其中以县(市)区命名的三大主干河流: 姚江、奉化江和甬江横穿整个城市, 各大小河流均汇入这三大河流, 姚江和奉化江在海曙汇合后流入甬江, 最后流入东海.

姚江、奉化江均起源于大山, 源头水库均为饮用水源, 水质良好, 也是宁波市各大小河流的母亲河. 宁波市各城区的功能和工业类型有着显著的区别, 河流在流经不同城区时会受到不同工业的污染, 水质类型差异较大, 地表水污染区域特征显著. 本文结合河流、工业分布情况和区域大小, 在 6 个城区分别设置 52、33、31、41、33 和 65 个采样断面, 进行广谱式采样.

1.2 样品采集、分析和质量控制

为了调查宁波市不同功能区地表水的重金属污染特征, 所有样品均在 2015 年 12 月~2016 年 1 月枯水期完成采样. 为确保不同城区所采集样品的可比性, 课题组调动 12 名采样人员, 分成 6 组, 对 6 个城区同时进行连续采样, 以保证在最短的时间内完成所有样品采集. 如果采样期间遇下雨, 在雨停一周后继续进行.



图 1 宁波城区和采样点示意

Fig. 1 Ningbo and geographical location of the sampling sites

对于宽小于 5 m 的小河, 在采样断面的主流线上设一条采样垂线; 对于宽 5 m 以上的大河, 在河岸线两侧 1/3 水面宽处和主流线上设 3 条采样垂线; 采样点设在距水面以下 0.5 m, 且距河底不小于 0.3 m 处, 每个断面取一个混合水样. 装水样的聚乙烯塑料瓶使用前用 30% 浓度的硝酸浸泡 48 h, 并用去离子水洗净、烘干后使用. 水样采集后, 立即用硝酸酸化至 pH 值小于 2, 装满一整瓶, 带回实验室, 用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤后, 存放在 4℃ 的冰箱内, 在 1 周内完成重金属的测定.

水样中的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 6 种重金属采用北京普析通用仪器有限责任公司生产的 TAS-990 原子吸收分光光度计进行测定, 每天在样品分析前采用国家标准物质研究中心生产的标准试剂进行标准曲线的制定, 并用去离子水做空白消除系统误差. 6 种重金属标准试剂的浓度均为 1 mg·mL⁻¹, 编号分别为: GSB 04-1721-2004、GSB 04-1723-2004 (a)、GSB 04-1725-2004、GSB 04-1740-2004、GSB 04-1742-2004 和 GSB 04-1761-2004, 3 次重复检测得到的检出限分别为: Cd 0.004 μg·L⁻¹, Cr 0.030 μg·L⁻¹, Pb 0.004 μg·L⁻¹, Ni 0.435 μg·L⁻¹, Cu 0.143 μg·L⁻¹, Zn 0.042 μg·L⁻¹.

1.3 健康风险评价

健康风险评价是以风险度作为指标, 定量描述环境污染对人体健康存在的潜在风险. 美国是较早研究并应用环境风险评价的国家, 美国环境保护署 (USEPA) 在健康风险评价方面的研究成果丰硕, 建立了不同类型污染物的风险评价模型, 笔者选择 USEPA 推荐、应用较为广泛的危害商数指数 (hazard quotient indices, HQ) 和致癌风险指数 (carcinogenic risk indices, Risk_c) 这 2 个模型进行评估. 其中, HQ 的计算公式如下^[16]:

$$HQ = CDI/RfD \quad (1)$$

式中, RfD 为口服毒性物质的剂量, 6 种重金属的

RfD 分别为^[17]：Cd 0.000 5 mg·(kg·d)⁻¹，Cr 0.001 5 mg·(kg·d)⁻¹，Cu 0.037 mg·(kg·d)⁻¹，Ni 0.02 mg·(kg·d)⁻¹，Pb 0.003 6 mg·(kg·d)⁻¹，Zn 0.3 mg·(kg·d)⁻¹。

CDI 为慢性日均暴露量，计算公式如下^[18]：

$$CDI = c \times DI / BW \tag{2}$$

式中，*c* 为重金属的浓度，mg·L⁻¹；DI 为每日的摄入量，成年人的摄入量为 2 L·d⁻¹^[17]，未成年人为成年人的 1/3^[19]；BW 为平均体重，浙江省成年人约 60 kg^[20]，未成年人约 14.2 kg^[21]。

HQ 的健康风险等级分为四级^[22]：① HQ ≤ 1，不存在风险；② 1 < HQ ≤ 5，存在低风险；③ 5 < HQ ≤ 10，存在中等风险；④ HQ > 10，存在高风险。

致癌物质的健康风险评价指数 Risk_i 表示个体

在一生中暴露于致癌物质得癌症的概率，按照公式 (3) 计算^[23]：

$$Risk_i = CDI / SF \tag{3}$$

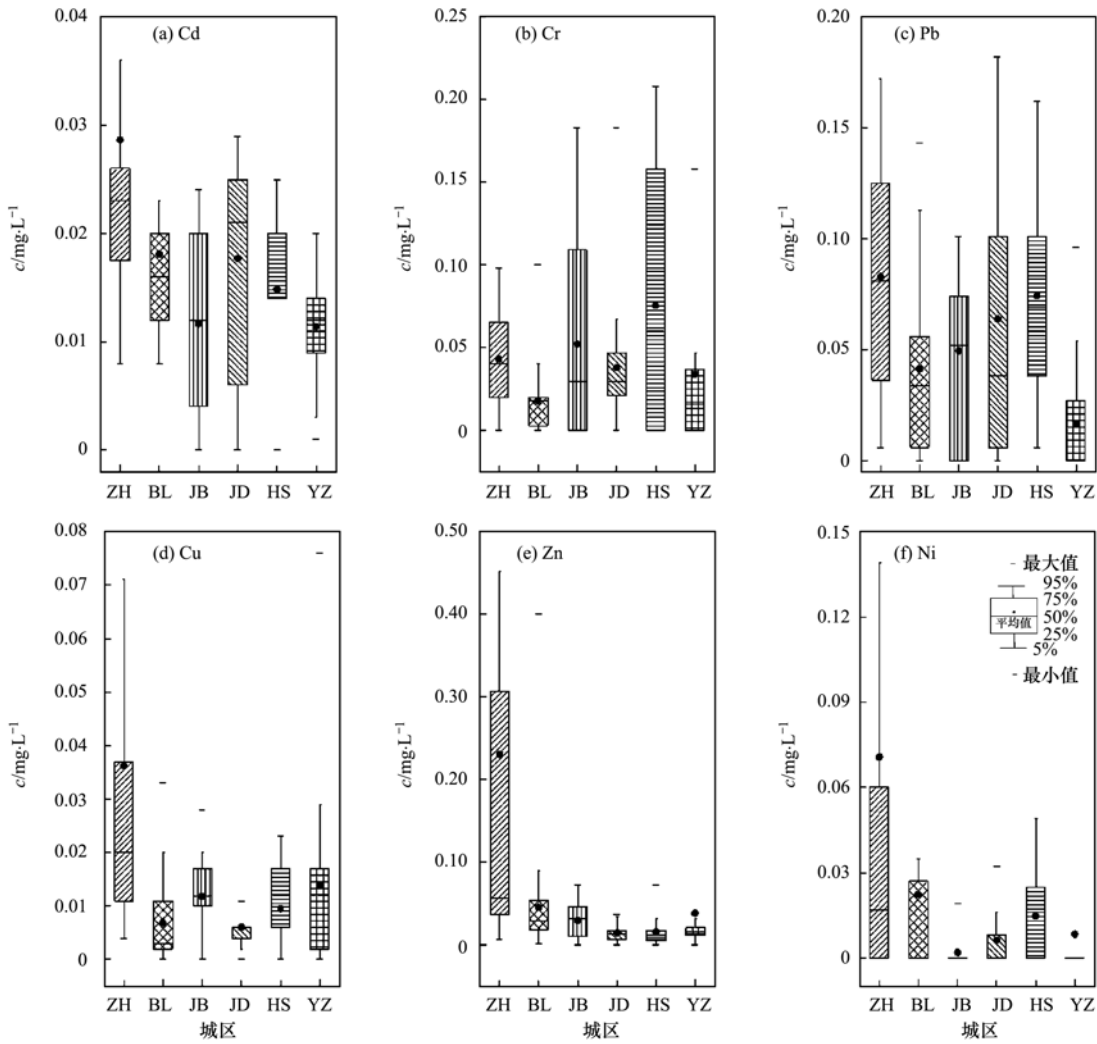
式中，SF 为癌症斜率因子，mg·(kg·d)⁻¹。

在本文研究的 6 种重金属中，Cd 和 Cr 被国际癌症研究机构认定为致癌物质^[24]，它们的 SF 分别为 0.5 mg·(kg·d)⁻¹ 和 15 mg·(kg·d)⁻¹。USEPA 认为，当 Risk_i 在 1 × 10⁻⁶ ~ 1 × 10⁻⁴ 范围时，不存在致癌风险；大于 1 × 10⁻⁴ 时存在致癌风险^[25]。

2 结果与讨论

2.1 宁波市城区内河中重金属的污染现状

宁波市城区内河中重金属的分布情况绘于图 2，6 个城区 6 种重金属的平均浓度叠加绘于图 3。



地表水环境质量标准 GB 3838-2002 规定 V 类标准主要适用于农业用水区及一般景观要求水域，几种重金属的限制如下：Cd ≤ 0.01 mg·L⁻¹，Cr ≤ 0.1 mg·L⁻¹，Pb ≤ 0.1 mg·L⁻¹，Cu ≤ 1.0 mg·L⁻¹，Zn ≤ 2.0 mg·L⁻¹，Ni 无对应要求

图 2 宁波市不同城区地表水重金属的变化

Fig. 2 Heavy metal variations in the surface waters of different districts in Ningbo

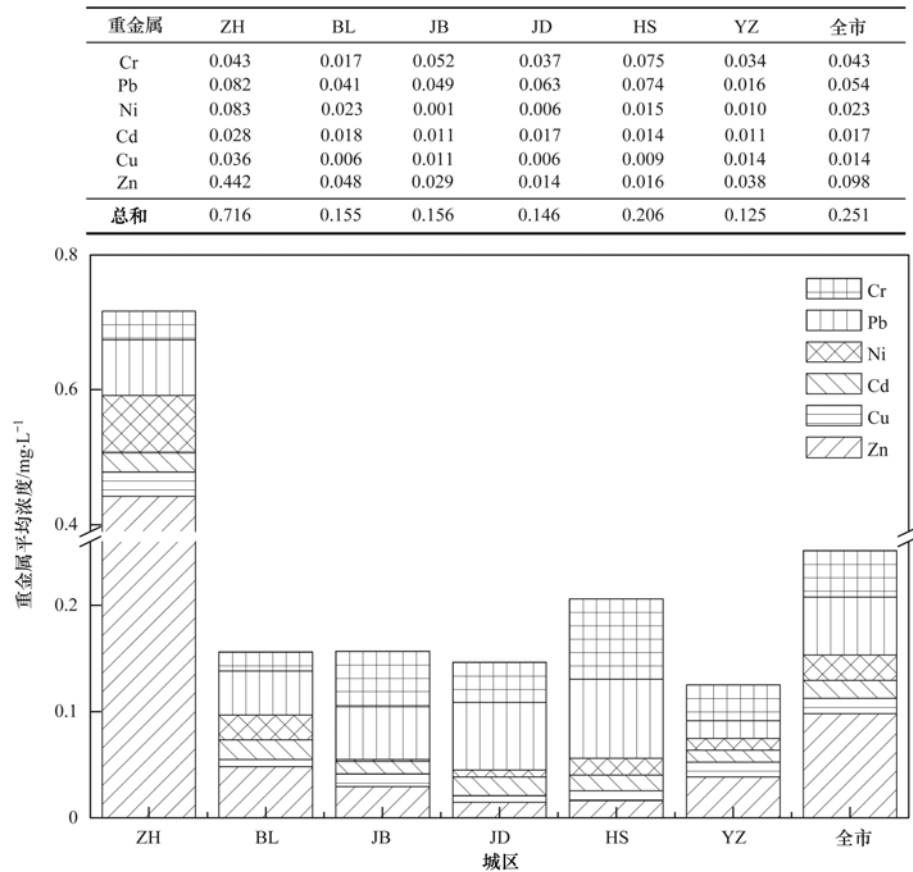


图3 宁波市不同城区地表水重金属的平均浓度

Fig. 3 Average concentrations of heavy metals in the surface water of different districts in Ningbo

从中可知, 6 种重金属平均浓度的大小顺序为: $Zn > Pb > Cr > Ni > Cd > Cu$, 对照地表水环境质量标准 GB 3838-2002 中的 V 类限值, 重金属超标的严重顺序为: $Cd > Pb > Cr$, 从全市范围来看, 这 3 种超标重金属分别有 77%、18% 和 6% 的断面超标. 从不同区域来看, 对于 Cd, 6 个城区平均值均超标, 镇海、北仑、海曙和鄞州区有 75% 以上的断面超标. 对于 Pb, 镇海区有 33% 的断面超标, 江东区和海曙区约有 25% 的断面超标, 其他区域有个别断面超标. 对于 Cr, 海曙区污染最严重, 约有 35% 的断面超标, 江东区有 27% 左右的断面超标, 其他区域个别断面超标. 相对其他区域, 镇海区地表水的 Cu、Zn 和 Ni 浓度普遍较高, 但所有断面的 Cu 和 Zn 指标都未超标, Ni 无对应标准.

从图 3 还可以看出, 不同城区地表水重金属平均浓度之和的大小顺序为: $ZH > HS > JB > BL > JD > YZ$. 镇海区 6 种重金属的平均浓度之和最大, 达 $0.7168 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为其他城区的 3~6 倍, 其中 Zn 占了 62%; 在超标严重的重金属中, 镇海区的 Cd 和 Pb 的平均浓度分别为 $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.082

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为全市最大. 其次是海曙区, 重金属平均浓度之和为 $0.2060 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 Cr 和 Pb “贡献”最大, 分别占该区总和的 37% 和 36%, Cr 的平均浓度 ($0.075 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为全市最大. 江北、江东和北仑这 3 个区重金属的总体污染水平比较接近, 江北和江东区的主要污染重金属是 Cr 和 Pb, 2 种重金属分别约占区总和的 33% 和 31%、25% 和 46%; 北仑区 2 种浓度最大的重金属是 Pb 和 Zn, 分别占总和的 11% 和 62% 左右. 鄞州区地表水重金属污染程度最轻, 占比最大的 2 种重金属是 Cr 和 Zn, 分别约占总和的 27% 和 30%.

综合可见, 宁波市城区地表水重金属污染严重, 几种重金属的超标顺序为: $Cd > Pb > Cr$, 镇海区和海曙区是重金属污染最严重的区域, 在人口密集、商业发达的海曙区, Cr 和 Pb 污染比较严重, 在工业发达的镇海区 Cd、Pb 和 Zn 污染比较严重.

2.2 重金属相关性和污染源分析

重金属之间的相关性可以反映重金属的起源和迁移特性, 相关性高的重金属之间具有相似的污染源或类似的迁移特性, 表 1 采用 Pearson 函数分析

了区域内重金属之间的相关性. 从中可以看出, Zn 和 Cu、Zn 和 Ni、Cu 和 Ni、Pb 和 Cr 之间的 Pearson 相关系数较高, 这说明它们之间可能具有共同的污染源, 结合采样图, 对高浓度重金属采样点周边工业的特征进行分析(见表 2)可以推测, 这几种高相关性重金属的共同污染源分别是: 化工废水、金属加工废弃物、(含铜)金属加工废弃物、金属加工废弃物和交通污染物及染料和涂料废物. 其中, 居民小区周边的主要污染源被认为是交通污染源, 这是因为在居民小区附近没有企业排污口, 但宁波市私家车的人均拥有量较高, 汽车轮胎磨损和排放尾气

中含有 Cd、Pb 和 Cr 等重金属, 这些污染物易通过干湿沉降转移到地表水中.

通过对高浓度重金属采样断面周边企业进行分析, 可以得出几种高污染重金属的污染源如下: Cd 主要来自电镀废水、金属加工废弃物和交通污染物, Pb 主要来自电镀废水、金属加工废弃物、化工废水、交通污染物和染料和涂料废物, Cr 主要来自交通污染物、纺织废水、染料和涂料废物和金属加工废弃物. 可见, 引起宁波市地表水重金属超标的主要污染源是: 电镀废水、金属加工废弃物、交通污染物、染料和涂料废物.

表 1 宁波地表水中 6 种重金属之间的相关性

重金属	相关性					
	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Cr
Zn	1					
Cu	0.351	1				
Cd	0.255	0.153	1			
Ni	0.380	0.425	0.207	1		
Pb	0.007	0.107	0.230	0.108	1	
Cr	-0.039	0.026	0.017	-0.010	0.398	1

表 2 高浓度重金属采样断面的周边工业和主要污染源

重金属	高浓度采样断面周边工业	主要污染源
Zn	化工厂、金属加工厂	化工废水、金属加工废弃物
Cu	化工厂、印刷厂、金属加工厂	化工废水、印刷废弃物、(含铜)金属加工废弃物
Cd	电镀厂、金属加工厂、居民小区	电镀废水、金属加工废弃物、交通污染物
Ni	金属加工厂	金属加工废弃物
Pb	电镀厂、金属加工厂、化工厂、居民小区、染料加工厂	电镀废水、金属加工废弃物、化工厂废水、交通污染物、染料和涂料废物
Cr	居民小区、纺织厂、染料加工和使用企业、金属加工厂	交通污染物、纺织废水、染料和涂料废物、金属加工废弃物

2.3 重金属的健康风险评价(HQ)

重金属对人类健康存在潜在危害, HQ 可用来评价其慢性健康风险, 图 4 列出了宁波市地表水中 6 种重金属对成年人和未成年人的 HQ 分布情

况, 表 3 统计了宁波市不同城区地表水重金属 HQ 的最大值、最小值和平均值. 结合图 4 和表 3 可以看出, 6 种重金属 HQ 平均值的大小顺序均为: Cd > Cr > Pb > Ni > Cu > Zn. 对于成年人, 6 种重

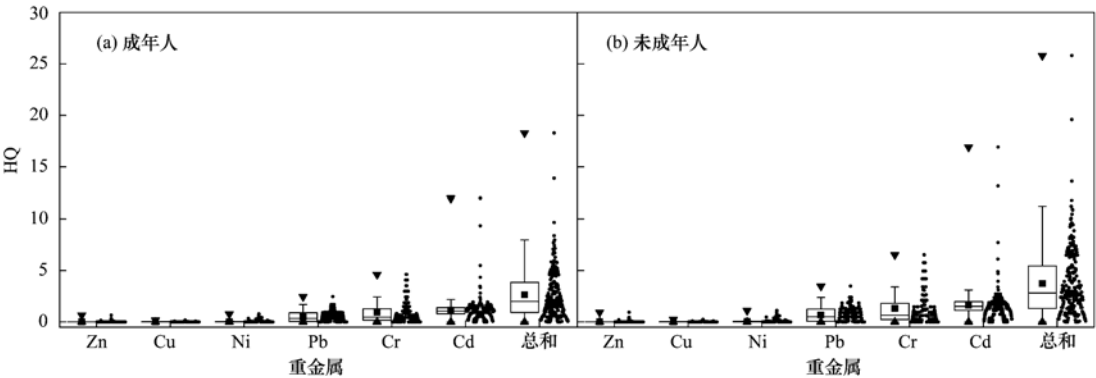


图 4 宁波市地表水中重金属 HQ 的分布情况

Fig. 4 Distribution of hazard quotient indices (HQ) of heavy metals in the surface water in Ningbo

表 3 宁波市不同城区地表水重金属的危害商数指数 (HQ)

Table 3 Hazard quotient indices (HQ) of heavy metals in the surface water of different districts in Ningbo															
区域	类型	成年人					HQ								
		Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Cr	总和	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Cr	总和
ZH	min	7.78E-04	3.60E-03	5.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	0.00E+00		1.10E-03	5.08E-03	7.52E-01	0.00E+00	7.83E-02	0.00E+00	
	max	6.67E-01	1.79E-01	1.20E+01	7.88E-01	2.47E+00	2.18E+00		9.40E-01	2.53E-01	1.69E+01	1.11E+00	3.49E+00	3.07E+00	
	mean	4.92E-02	3.26E-02	1.91E+00	1.40E-01	7.67E-01	9.55E-01	3.85E+00	6.93E-02	4.59E-02	2.69E+00	1.97E-01	1.08E+00	1.35E+00	5.43E+00
BL	min	2.22E-04	1.80E-03	5.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	6.67E-02		3.13E-04	2.54E-03	7.52E-01	0.00E+00	7.83E-02	9.40E-02	
	max	4.44E-02	2.97E-02	4.33E+00	4.22E-01	1.32E+00	2.22E+00		6.27E-02	4.19E-02	6.11E+00	5.95E-01	1.87E+00	3.13E+00	
	mean	5.36E-03	6.22E-03	1.20E+00	3.94E-02	3.81E-01	3.96E-01	2.03E+00	7.56E-03	8.76E-03	1.70E+00	5.55E-02	5.38E-01	5.59E-01	2.87E+00
JB	min	2.22E-04	3.60E-03	1.33E-01	0.00E+00	2.87E-01	2.00E-01		3.13E-04	5.08E-03	1.88E-01	0.00E+00	4.05E-01	2.82E-01	
	max	8.00E-03	2.52E-02	1.60E+00	3.17E-02	9.35E-01	4.07E+00		1.13E-02	3.56E-02	2.26E+00	4.47E-02	1.32E+00	5.73E+00	
	mean	3.29E-03	1.06E-02	7.78E-01	3.17E-03	4.58E-01	1.16E+00	2.41E+00	4.63E-03	1.50E-02	1.10E+00	4.47E-03	6.46E-01	1.63E+00	3.40E+00
JD	min	1.11E-04	1.80E-03	1.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	2.00E-01		1.57E-04	2.54E-03	1.88E-01	0.00E+00	7.83E-02	2.82E-01	
	max	4.11E-03	9.91E-03	1.93E+00	5.33E-02	1.69E+00	4.07E+00		5.80E-03	1.40E-02	2.73E+00	7.52E-02	2.38E+00	5.73E+00	
	mean	1.64E-03	5.45E-03	1.18E+00	1.05E-02	5.91E-01	8.41E-01	2.63E+00	2.32E-03	7.68E-03	1.66E+00	1.48E-02	8.33E-01	1.19E+00	3.71E+00
HS	min	2.22E-04	3.60E-03	1.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	2.00E-01		3.13E-04	5.08E-03	1.88E-01	0.00E+00	7.83E-02	2.82E-01	
	max	8.11E-03	2.07E-02	1.67E+00	1.37E-01	1.50E+00	4.62E+00		1.14E-02	2.92E-02	2.35E+00	1.93E-01	2.12E+00	6.52E+00	
	mean	1.79E-03	8.54E-03	9.90E-01	2.63E-02	6.88E-01	1.68E+00	3.39E+00	2.52E-03	1.20E-02	1.40E+00	3.71E-02	9.70E-01	2.36E+00	4.78E+00
YZ	min	1.11E-04	1.80E-03	6.67E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.78E-01		1.57E-04	2.54E-03	9.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	2.51E-01	
	max	1.49E-01	6.85E-02	1.33E+00	3.37E-01	8.89E-01	3.51E+00		2.10E-01	9.65E-02	1.88E+00	4.75E-01	1.25E+00	4.95E+00	
	mean	4.27E-03	1.26E-02	7.60E-01	1.82E-02	1.54E-01	7.56E-01	1.70E+00	6.02E-03	1.78E-02	1.07E+00	2.56E-02	2.17E-01	1.07E+00	2.40E+00
全市	mean	1.09E-02	1.27E-02	1.14E+00	3.96E-02	5.07E-01	9.65E-01	2.67E+00	1.54E-02	1.79E-02	1.60E+00	5.57E-02	7.14E-01	1.36E+00	3.77E+00

金属 HQ 之和的平均值为 2.67, 最大值为 18.30, 分别有 0.79%、11.86% 和 56.13% 的断面存在高、中和低风险. 对于未成年人, 6 种重金属 HQ 之和的平均值为 3.77, 最大值为 25.80, 分别有 3.56%、25.69% 和 49.01% 的断面存在高、中和低风险.

从不同重金属来看, Cd 对人类存在的健康风险最大, 特别是在镇海区, 98% 以上的断面对于未成年人存在健康风险, 甚至存在高风险和中等风险的断面; 在北仑、江东和海曙区, 50% 的断面均存在低风险. 其次是 Cr, 对于成年人, 镇海、江北、江东和海曙区有 40% 左右的断面存在低健康风险; 对于未成年人, 海曙区约有 24% 的断面存在中等风险, 镇海区有 67% 以上的断面存在低健康风险. 再次是 Pb, 对于成年人, 镇海、江东和海曙区有 20% 以上的断面存在低健康风险, 对成年人的影响较小. Ni 仅在镇海区有个别断面存在低健康风险, 单个的 Zn 和 Cu 均不存在健康风险的断面.

从不同区域来看, 6 个城区 6 种重金属 HQ 平均值之和的大小顺序均为: ZH > HS > JD > JB > BL > YZ, 对于成年人, 各个城区 HQ 平均值之和均超过 1; 对于未成年人, 各个城区 HQ 平均值之和为最低风险限值的 2~6 倍.

结合表 3 还可以得出, 不管对成年人还是未成

年人, 不同城区重金属 HQ 平均值之和的大小顺序均为: ZH > HS > JD > JB > BL > YZ; 对于成年人 6 个城区的平均值均超过了 1, 而对未成年人的健康风险平均值为最低风险限值的 2 倍多.

综合可见, 宁波城区 70% 以上地表水中的重金属污染对人类存在潜在健康风险, 风险指数最大的 3 种重金属及顺序为: Cd > Cr > Pb, 风险最高的区域为镇海区 and 海曙区, 地表水重金属对未成年人的健康风险高于成年人.

2.4 重金属的致癌风险指数(Risk_i)

在所检测的 6 种重金属中, Cd 和 Cr 具有致癌效应, 图 5 为重金属对成年人和未成年人的 Risk_i, 表 4 列出了宁波市不同城区地表水重金属 Risk_i 的最大值、最小值和平均值. 从中可以看出, 不管是对成年人还是未成年人, 所有断面 Risk_i 均远大于癌症风险临界值 1×10^{-4} . 对于成年人和未成年人, Cd 和 Cr 者之和的 Risk_i 平均值分别为 1.76 和 2.48, 分别达临界值的 17 600 倍和 24 800 倍, 且 95% 以上的致癌风险均因 Cr 引起.

从表 4 还可以看出, 宁波市 6 个城区 Risk_i 平均值的大小顺序为: HS > JB > ZH > JD > BL > YZ, 每个区的平均值均远远超过临界值, 且海曙区的致癌风险最大, 接近全市平均值的 2 倍, 这主要是因为海曙区 Cr 污染最严重.

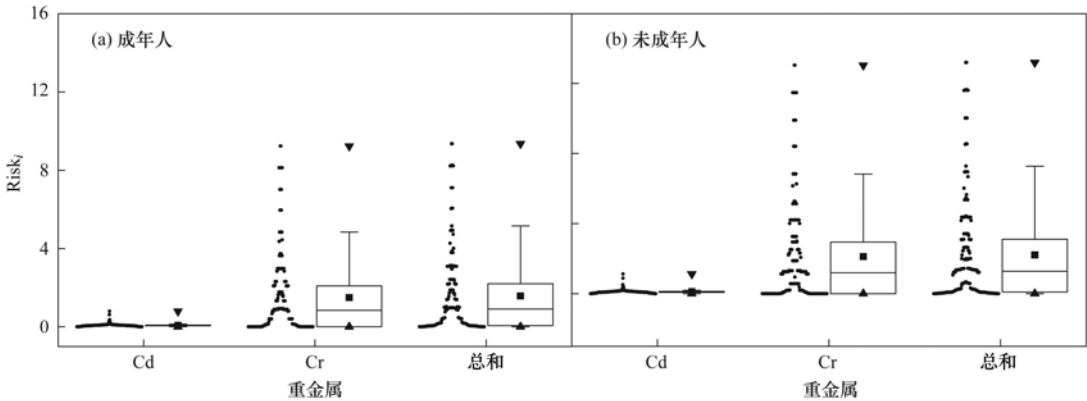


图 5 宁波市地表水中 Cd 和 Cr 的 Risk_i 分布情况

Fig. 5 Distribution of carcinogenic risk indices (Risk_i) of Cd and Cr in the surface water in Ningbo

3 结论

(1) 宁波市城区地表水中 6 种重金属平均浓度的大小顺序为: Zn > Pb > Cr > Ni > Cd > Cu, 和国家地表水 V 类标准相比, 超标最严重 3 种重金属及其顺序为: Cd > Pb > Cr, 镇海、北仑、海曙和鄞州区 75% 以上的断面 Cd 超标, 海曙区和江东区 30% 左

右的断面 Cr 超标, 镇海区和江东区 30% 左右的断面 Pb 超标. 6 个城区重金属平均浓度之和的大小顺序为: ZH > HS > JB > BL > JD > YZ, 镇海区平均浓度之和远超其他区域, 主要是因为 Zn 浓度很高. 超标重金属的主要污染源为: 电镀废水、金属加工废弃物、交通污染物和染料和涂料废物.

(2) 宁波城区 70% 以上地表水的重金属污染对

表 4 宁波市不同城区地表水中 Cd 和 Cr 的致癌风险指数 (Risk_i)

Table 4 Carcinogenic risk indices (Risk _i) of Cd and Cr in the surface water of different districts in Ningbo							
区域	类型	Risk _i					
		成年人			未成年人		
		Cd	Cr	总和	Cd	Cr	总和
ZH	min	3.56E-02	0.00E+00		5.01E-02	0.00E+00	
	max	8.00E-01	4.36E+00		1.13E+00	6.14E+00	
	mean	1.27E-01	1.91E+00	2.04E+00	1.79E-01	2.69E+00	2.87E+00
BL	min	3.56E-02	1.33E-01		5.01E-02	1.88E-01	
	max	2.89E-01	4.44E+00		4.07E-01	6.27E+00	
	mean	8.03E-02	7.93E-01	8.73E-01	1.13E-01	1.12E+00	1.23E+00
JB	min	8.89E-03	4.00E-01		1.25E-02	5.64E-01	
	max	1.07E-01	8.13E+00		1.50E-01	1.15E+01	
	mean	5.19E-02	2.32E+00	2.37E+00	7.32E-02	3.27E+00	3.34E+00
JD	min	8.89E-03	4.00E-01		1.25E-02	5.64E-01	
	max	1.29E-01	8.13E+00		1.82E-01	1.15E+01	
	mean	7.86E-02	1.68E+00	1.76E+00	1.11E-01	2.37E+00	2.48E+00
HS	min	8.89E-03	4.00E-01		1.25E-02	5.64E-01	
	max	1.11E-01	9.24E+00		1.57E-01	1.30E+01	
	mean	6.60E-02	3.35E+00	3.42E+00	9.31E-02	4.73E+00	4.82E+00
YZ	min	4.44E-03	1.00E-02		6.27E-03	1.41E-02	
	max	8.89E-02	6.73E-01		1.25E-01	9.49E-01	
	mean	5.07E-02	3.64E-02	8.70E-02	7.14E-02	5.13E-02	1.23E-01
全市	mean	7.58E-02	1.68E+00	1.76E+00	1.07E-01	2.37E+00	2.48E+00

人类存在潜在健康风险,风险最高的区域为镇海区和海曙区,对于成年人和未成年人的 HQ 平均值分别为临界值的 2.7 倍和 3.8 倍,潜在健康风险最大的 3 种重金属及顺序为: Cd > Cr > Pb.

(3)宁波市城区地表水存在很高的致癌风险,且 95% 以上的致癌风险均因 Cr 引起,对于成年人和未成年人的 Risk_i 平均值分别为临界值的 17 600 倍和 24 800 倍. 6 个城区 Risk_i 平均值的大小顺序为: HS > JB > ZH > JD > BL > YZ, 每个区的平均值均远超过临界值,且海曙区的致癌风险接近全市平均值的 2 倍.

参考文献:

[1] Zhang Z Y, Li J Y, Mamat Z, *et al.* Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **126**: 94-101.

[2] 董小芳,陈启宇,邵少东. 宁波内河治理 2010[N]. 宁波日报, 2010-03-17(B2).

[3] 袁旭强. 宁波市水资源环境现状及其保护对策的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 21-23.

[4] Li Y L, Liu Y G, Liu J L, *et al.* Effects of EDTA on lead uptake by *Typha orientalis Presl*: a new lead-accumulating species in southern China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **81**(1): 36-41.

[5] Zhang L, Shi Z, Jiang Z J, *et al.* Distribution and bioaccumulation of heavy metals in marine organisms in east and West Guangdong coastal regions, South China [J]. *Marine*

Pollution Bulletin, 2015, **101**(2): 930-937.

[6] 齐鹏,余树全,张超,等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4486-4493.

Qi P, Yu S Q, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4486-4493.

[7] Yi Y J, Tang C H, Yi T C, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **145**: 295-302.

[8] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.

[9] Cao S Z, Duan X L, Ma Y Q, *et al.* Health benefit from decreasing exposure to heavy metals and metalloid after strict pollution control measures near a typical river basin area in China [J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 866-878.

[10] Karri V, Schuhmacher M, Kumar V. Heavy metals (Pb, Cd, As and MeHg) as risk factors for cognitive dysfunction: a general review of metal mixture mechanism in brain[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2016, **48**: 203-213.

[11] Singh U K, Kumar B. Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India[J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 183-199.

[12] 王若师,许秋瑾,张炯,等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9):

- 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River basin[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [13] 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价[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.
- [14] Yin S, Feng C H, Li Y Y, *et al.* Heavy metal pollution in the surface water of the Yangtze Estuary: a 5-year follow-up study [J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 718-725.
- [15] Li C H, Sun L, Jia J X, *et al.* Risk assessment of water pollution sources based on an integrated *k*-means clustering and set pair analysis method in the region of Shiyao, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 307-316.
- [16] US EPA. Guidance for performing aggregate exposure and risk assessment[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 1999.
- [17] US EPA. EPA/630/P-03/001F, Guidelines for carcinogen risk assessment[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 2005.
- [18] US EPA. EPA/600/Z- 92/001, Guidelines for exposure assessment[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 1992.
- [19] Pande B, Suthar S, Singh V. Accumulation and health risk of heavy metals in sugarcane irrigated with industrial effluent in some rural areas of Uttarakhand, India[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, **102**: 655-666.
- [20] 国家卫生计生委. 中国居民营养与慢性病状况报告(2015年)[R]. 北京: 国家卫生计生委疾病预防控制局, 2015.
- [21] 李辉, 季成叶, 宗心南, 等. 中国 0 ~ 18 岁儿童、青少年身高、体重的标准化生长曲线[J]. *中华儿科杂志*, 2009, **47**(7): 487-492.
- Li H, Ji C Y, Zong X N, *et al.* Height and weight standardized growth charts for Chinese children and adolescents aged 0 to 18 years[J]. *Chinese Journal of Pediatrics*, 2009, **47**(7): 487-492.
- [22] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, *et al.* Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(3): 686-692.
- [23] Zhang L E, Mo Z Y, Qin J, *et al.* Change of water sources reduces health risks from heavy metals via ingestion of water, soil, and rice in a riverine area, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 163-170.
- [24] IARC. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans [M]. Lyon, France: World Health Organisation, IARC Press, 2011.
- [25] Hopkins J. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC monographs volumes 1 to 42. Supplement 7. IARC, Lyon, 1987. pp. 440. Sw. fr 65.00. ISBN 92-833-1411-0[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1989, **27**(8): 549-550.

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)