

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例

徐美娟¹, 童桂华², 孙丹³, 李建新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. 慈溪市环境保护局, 慈溪 315300; 3. 慈溪市环境保护监测站, 慈溪 315300)

摘要: 在宁波市工业区和商业区地表水中采集了 85 个水样, 检测了 6 种重金属 (Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn) 的含量水平, 分析了它们的空间分布特征; 结合区域特征和计算重金属间的皮尔森相关系数推测了主要污染源; 通过计算重金属的健康风险指数和致癌风险指数评价了潜在生态危害。结果表明, 宁波市工业区和商业区地表水中重金属污染都比较严重, 但存在差异。在工业区, 重金属平均浓度的大小顺序为: $Zn \gg Ni > Pb > Cr > Cu > Cd$, 而超标的严重顺序为: $Cd > Pb > Cr \gg Zn$, 主要污染源为工业生产排放物。在商业区, 平均浓度的大小顺序为: $Cr > Pb \gg Zn > Ni > Cd > Cu$, 超标的严重顺序为: $Cd > Pb \gg Cr$, 主要来自公路源污染。2 个区所有采样点的地表水均存在一定的潜在健康风险和很高的致癌风险, 在工业区和商业区潜在健康风险最大的重金属均是 Cd、Cr 和 Pb; 潜在致癌风险最大的重金属均是 Cr, 且商业区是工业区的 1.7 倍, 相关部门应当足够重视。

关键词: 地表水; 水污染; 重金属; 健康风险评价; 宁波

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3218-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701086

Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas: A Case Study of Ningbo

XU Mei-juan¹, TONG Gui-hua², SUN Dan³, LI Jian-xin¹, YU Xiao-yi^{1*}

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 2. Cixi Environment Protection Bureau, Cixi 315300, China; 3. Cixi Environmental Protection Monitoring Station, Cixi 315300, China)

Abstract: From industrial and commercial areas of Ningbo City, China, 85 surface water samples were collected. The concentrations of six heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) in the samples were measured, and the characteristics of the spatial distributions of those metals were analyzed. Through a combination of regional characteristics and Pearson correlation coefficients of the different heavy metals, the main pollution sources of the two areas were analyzed. The potential ecological risks of these heavy metals were evaluated by considering health risk and cancer risk indices. The results indicate that the heavy metal pollution of surface waters was serious in both the industrial and commercial areas. Furthermore, the differences between the two areas were also observed. In the industrial area, the average concentrations of the six heavy metals were, from highest to lowest, in the order: $Zn \gg Ni > Pb > Cr > Cu > Cd$, and the main sources were industrial emissions. Four heavy metal concentrations exceeded the national environmental standard, which, from highest to lowest, were in the order: $Cd > Pb > Cr \gg Zn$. In the commercial area, the average concentrations, from highest to lowest, were in the order: $Cr > Pb \gg Zn > Ni > Cd > Cu$, and the main sources were road pollutants. Three heavy metal concentrations exceeded the national standard, and the order, from highest to lowest, was $Cd > Pb \gg Cr$, with Cd and Pb having the most potential health risk. In both the industrial and commercial areas, there were some potential health risks and high carcinogenic risks. Cd, Cr, and Pb have the highest potential health risks, whereas Cr is the major potentially carcinogenic metal. The commercial area had 1.7 times the potential carcinogenic risk as that of the industrial area. The government should pay more attention to heavy metal pollution of surface waters in Ningbo City, China.

Key words: surface water; water pollution; heavy metals; health risk assessment; Ningbo

重金属因其不降解、持续性和生物富集性^[1,2], 对人体健康存在潜在的危害, 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^[3,4]和神经系统^[5,6], Cd 和 Cr 等一些重金属还具有致癌性^[7], 是一类危害重大的水污染物。

宁波市位临我国东部沿海, 是华东地区重要的港口工业城市, 也是重要的水产养殖基地, 近几十年宁波经济快速发展, 与此同时地表水也遭到了严重

污染。有研究表明, 宁波市地表水中 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 和高锰酸盐指数总体属劣 V 类, 多处水体富营养化严重, 绿藻暴发, 发黑发臭^[8~10], 所有地表水汇流后都会流入东海。近几年东海近岸的重金属污染也

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51406180)

作者简介: 徐美娟(1980~), 女, 副教授, 博士, 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

在不断加重^[11],给近岸水质和水产养殖带来不利影响,这间接说明东部沿海城市地表水重金属污染也在不断加剧,然而,现有研究对宁波市地表水重金属污染却鲜见报道。本文以宁波市 2 个典型的工业区和商业区为研究对象,考察比较了 2 个区地表水中 6 种重金属(Cd、Cr、Pb、Zn、Cu 和 Ni)的污染现状,分析了主要污染源,评价了健康风险和致癌风险,以期为政府部门的决策和地表水重金属污染控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域特征和采样点布置

镇海区(ZH)和海曙区(HS)是宁波城区的 2 个行政区。镇海区位于长江三角洲南翼,东海沿岸,南接北仑港,北濒杭州湾,工业发达,区内有化学工业区、再生金属资源加工园区、北欧工业园区、宁波市机电工业园区等十多个工业园区,是典型的港口工业区。

海曙区位于宁波中心城区,商业盛行,以商场、居民小区和学校为主,几乎没有工业。区内有著名的三江口(奉化江和余姚江汇流到甬江,最终流入东海),河流纵横交错,通车水马龙,是交通流分布的重心,平均高峰路段机动车车流量达 3 000 ~ 4 000 辆·h⁻¹,局部路段超过 5 000 辆·h⁻¹。核心区主干道饱和度超过 0.85,干路和干路交叉口饱和度超过 0.9^[12,13]。

结合城市河流分布情况和区域面积,在镇海区(工业区)和海曙区(商业区)地表水上分别设置 52 和 33 个采样点(如图 1),进行广谱式采样。



图 1 宁波城区和采样点示意

Fig. 1 Ningbo City and the geographical locations of the sampling sites

1.2 样品采集和分析

所有样品均在 2015 年 12 月完成采样,样品采集后,立即用 0.45 μm 的玻璃纤维膜进行过滤,过滤后的样品存放在 4℃ 的冰箱内,并在 1 周内完成

检测。

水样中的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 这 6 种重金属采用原子吸收分光光度计进行检测,并采用空白试验消除系统误差。标准溶液分别采用浓度为 1 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的国家标准试剂 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 配置。

对测量结果采用 Origin 软件进行高斯模式统计分析,采用 Pearson 函数分析同一区域重金属之间的相关性。

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,美国环境保护局(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_i)这 2 个模型进行评估。其中, HQ 的计算公式如下^[14]:

$$\text{HQ} = \text{CDI}/\text{RfD} \quad (1)$$

式中, RfD 为口服毒性物质的剂量, 6 种重金属的 RfD 分别为^[15]: Cd 0.000 5 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, Cr 0.001 5 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, Cu 0.037 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, Ni 0.02 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, Pb 0.003 6 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, Zn 0.3 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。

CDI 为慢性日均暴露量,计算公式如下^[16]:

$$\text{CDI} = c \times \text{DI}/\text{BW} \quad (2)$$

式中, c 为重金属的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DI 为每日的摄入量, $2 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[15]; BW 为平均体重, 60 kg。

HQ 的健康风险等级分为四级^[17]: ① $\text{HQ} \leq 1$, 不存在风险; ② $1 < \text{HQ} \leq 5$, 存在低风险; ③ $5 < \text{HQ} \leq 10$, 存在中等风险; ④ $\text{HQ} > 10$, 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^[18]:

$$\text{Risk}_i = \text{CDI}/\text{SF} \quad (3)$$

式中, SF 为癌症斜率因子, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。

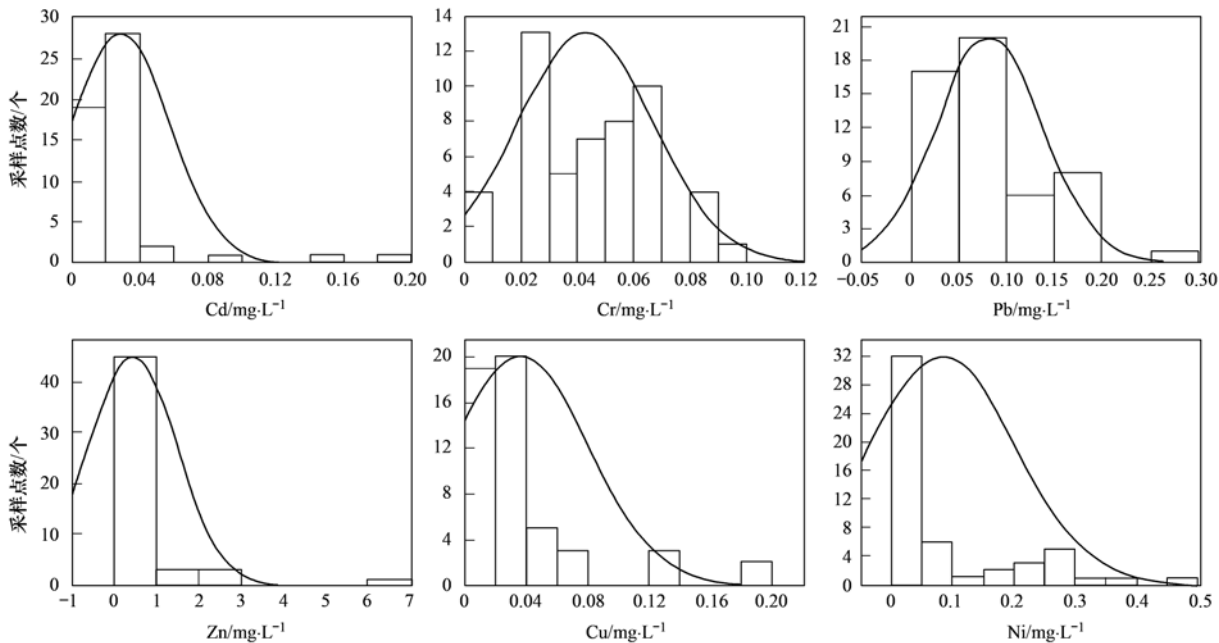
在本研究的 6 种重金属中, Cd 和 Cr 被国际癌症研究机构认定为致癌物质^[19], 它们的 SF 分别为 0.5 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 15 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。USEPA 认为, 当 Risk_i 在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 范围时, 不存在致癌风险; 大于 1×10^{-4} 时存在致癌风险^[20]。

2 结果与讨论

2.1 工业区重金属的分布情况

对工业区 52 个采样点的重金属分布情况采用高斯模式进行统计分析,工业区地表水执行地表水环境质量标准 GB 3838-2002 IV 类标准,结果见图 2. 从中可知,在所有采样点中,有 98% 的采样点 Cd 超标,其中 54% 的采样点为限值的 2 ~ 4 倍,还有

10% 的采样点超过限值 4 倍以上; 44% 的采样点 Cr 超标; 67% 的采样点 Pb 超标,其中 25% 的采样点为限值的 2 ~ 4 倍,2% 的采样点为限值的 5 ~ 6 倍; 8% 的采样点 Zn 超标; 所有采样点 Cu 均为超标; Ni 无对应标准, 62% 的采样点在 0.00 ~ 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 可见,宁波市工业区地表水重金属污染严重,几种重金属超标的严重顺序为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cr} \gg \text{Zn}$.



地表水环境质量标准 GB 3838-2002 规定 IV 类标准主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区, 6 种重金属的限制如下: $\text{Cd} \leq 0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cr} \leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Pb} \leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Zn} \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cu} \leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ni 无对应要求

图 2 宁波市工业区地表水中重金属的高斯分布

Fig. 2 Gauss distributions of heavy metals in surface water of the industrial district of Ningbo City

结合工业区的工业分布情况发现, 4 种高浓度重金属采样点有如下特征: Cd 主要分布在电镀厂周边, Pb 主要分布在电镀厂、化工厂和机械加工厂周边, Cr 主要分布在机械加工厂、化工厂和电子制造

厂周边, Zn 主要分布在化工厂周边 (见表 1), 这些工业生产排放物正好含有对应高浓度重金属. 因此, 可以推测, 这些工业生产排放物是对应高浓度重金属的主要污染源.

表 1 工业区高浓度重金属采样点的周边工业和主要污染源

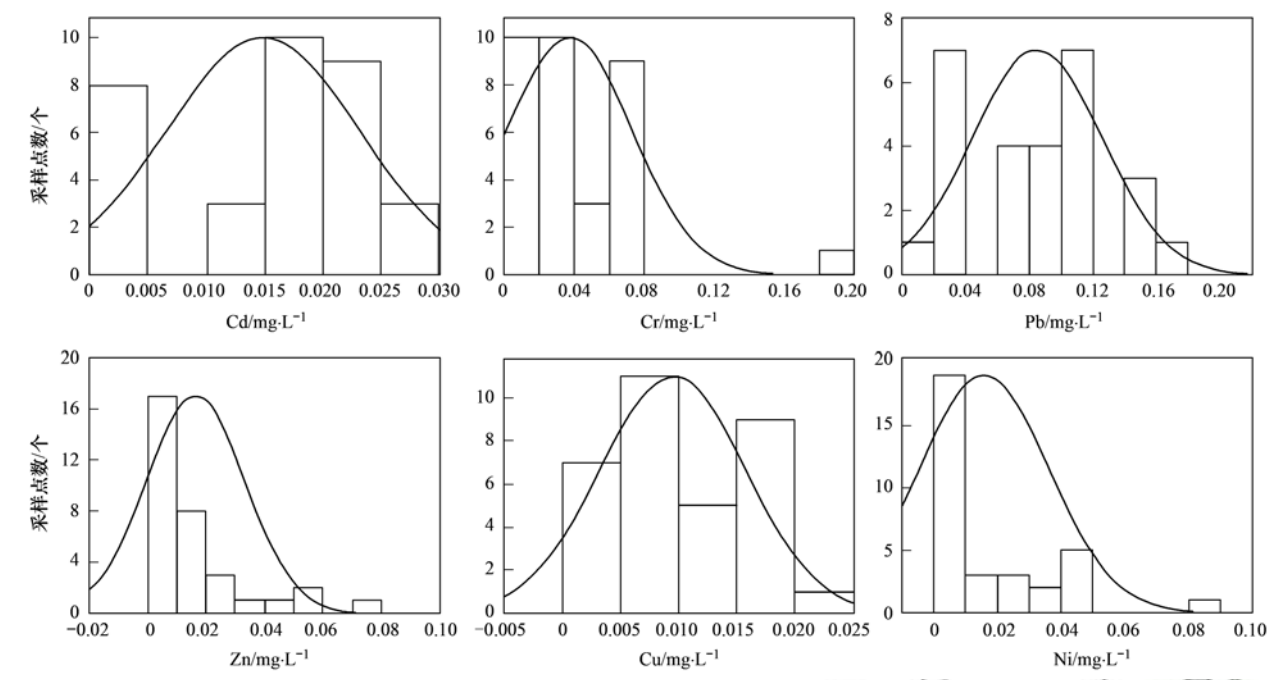
Table 1 Surrounding plants and main pollution sources of the sampling site with high heavy metals content in the industrial area

重金属	高浓度采样点周边工业	主要污染源
Cd	电镀厂	电镀废水
Pb	电镀厂、化工厂、机械加工厂	电镀废水、化工废水、机械加工废弃物
Cr	机械加工厂、化工厂、电子制造厂	机械加工废弃物、化工厂废水、电子制造废弃物
Zn	化工厂	化工废水

2.2 商业区重金属的分布情况

商业区重金属的分布情况见图 3, 地表水执行国家地表水环境质量标准 GB 3838-2002 V 类标准. 由图 3 数据统计分析可知, 宁波市商业区地表水中 76% 的采样点 Cd 超标, 最高浓度达 0.030 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

为标准限制的 3 倍; 3% 的采样点 Cr 超标, 33% 的采样点 Pb 超标; 所有采样点 Zn 和 Cu 均未超标. 对于 Ni, 58% 的采样点浓度 $\leq 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 40% 的采样点在 0.01 ~ 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 可见, 宁波市商业区重金属污染比较严重, 3 种重金属严重超标的



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, 6 种重金属的限制如下: $\text{Cd} \leq 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Cr} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Pb} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Zn} \leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Cu} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ni 无对应要求

图3 宁波市商业区地表水中重金属的高斯分布

Fig. 3 Gauss distributions of heavy metals in surface water of the commercial district of Ningbo City

顺序为: $\text{Cd} > \text{Pb} \gg \text{Cr}$.

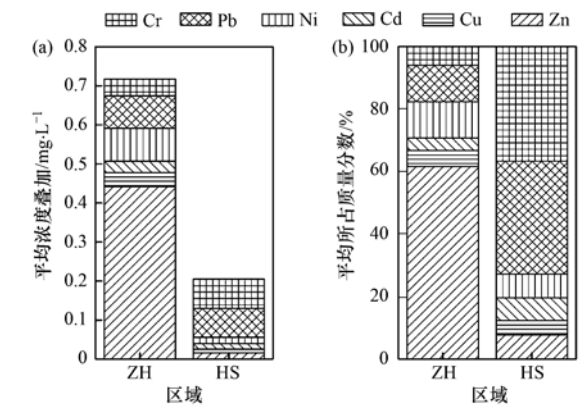
结合商业区的城市布局发现, 3 种高浓度重金属采样点有如下特征: Cd 主要分布在居民小区和交叉路口周边, Pb 主要分布在居民小区和学校周边, Cr 主要分布在居民小区和学校周边(见表 2). 由于居民小区和学校都不会用到含重金属的物质, 而汽车轮胎磨损和排放尾气中则含有 Cd、Pb 和 Cr 等重金属, 在河流和道路纵横交错、雨水充沛的城市, 这些气固中的污染物极易通过干湿沉降转移到城市地表水中. 因此, 可以推测, 商业区地表水重金属的主要污染源为公路源污染物. 有研究表明, 近几年随着私家车的急剧增加, 城区地表水中的重金属浓度也呈不断上升趋势^[21].

表 2 商业区高浓度重金属采样点周边城市布局 and 主要污染源		
Table 2 Urban layout and main pollution sources of the sampling site with high heavy metals content in commercial area		
重金属	高浓度采样点周边布局	主要污染源
Cd	居民小区、交叉路口	电镀废水
Pb	居民小区、学校	电镀废水、化工废水、机械加工废弃物
Cr	居民小区、学校	机械加工废弃物、化工厂废水、电子制造废弃物

2.3 工业区和商业区重金属的分布情况比较

为更好地比较 2 个区重金属污染情况, 通过数

据处理, 分析了每个区 6 种重金属平均浓度叠加和平均浓度占比, 结果见图 4. 从图 4(a) 可以看出, 工业区重金属平均浓度大小顺序为: $\text{Zn} \gg \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$, 商业区为: $\text{Cr} > \text{Pb} \gg \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Cu}$. 工业区重金属的平均浓度之和达到了 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为商业区 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 3.4 倍, 工业区大部分重金属的平均浓度均比商业区高, 特别是 Zn 高出了 27.5 倍, Ni、Cu 和 Cd 也分别高出 5.3、3.8 和 1.9 倍; 然而, 2 个区的 Pb 平均浓度非常相近, 而且工业区的 Cr 平均浓度只有商业区的一半左右. 从



(a) 平均浓度叠加, (b) 平均质量分数

图4 重金属平均浓度叠加和百分占比

Fig. 4 Average concentrations and percentages of the six heavy metals

图 4(b)可以看出,工业区平均浓度最高的重金属是 Zn,其次是 Pb 和 Ni;商业区平均浓度最高的重金属是 Cr 和 Pb.

从表 1 和表 2 对污染源的分析结果来看,工业区地表水重金属的主要污染源为化工厂、电镀厂、机械加工厂和电子制造厂排放的污染物,具有明显的工业源特征.而商业区的污染源主要来自公路源污染物,特别是在私家车流动量比较大的小区和学校周边地表水重金属的污染更为严重.

2.4 工业区和商业区重金属的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

源或类似的迁移转化过程^[22].表 3 采用 Pearson 相关性分析了区域内重金属之间的相关性.从中可以看出,在工业区,仅 Zn 和 Cu 的相关性(0.731)大于 0.5,这说明 Zn 和 Cu 之间有很好的相关性,它们可能有共同的污染源.在商业区,Cu、Pb 和 Cr 两两之间均具有很好的相关性,特别是 Cu 和 Cr 的相关性最大,达到了 0.835,这说明这 3 种重金属可能具有共同的污染源.结合采样点周边工业分布和区域特征分析,可以推测,工业区地表水中 Zn 和 Cu 的污染主要来源于化工厂排放污染物,商业区地表水中 Cu、Pb 和 Cr 的污染主要来自公路源污染物,这也验证了前面的推测.

表 3 宁波地表水中 6 种重金属之间的相关性

Table 3 Correlation analysis of the six heavy metals in surface water of Ningbo City

区域		相关性					
		Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Cr
工业区	Zn	1					
	Cu	0.731	1				
	Cd	-0.022	-0.011	1			
	Ni	0.363	0.386	-0.045	1		
	Pb	-0.129	-0.028	0.251	-0.021	1	
	Cr	-0.292	-0.115	-0.061	-0.119	0.490	1
商业区	Zn	1					
	Cu	0.033	1				
	Cd	-0.094	0.860	1			
	Ni	0.331	0.376	0.477	1		
	Pb	-0.288	0.540	0.751	0.282	1	
	Cr	-0.054	0.835	0.856	0.497	0.618	1

2.5 重金属的健康风险评价

重金属对人体健康有很大的危害,Cd 和 Cr 还有致癌性,表 4 列出了 6 种重金属的危害商数指数(HQ)和致癌风险指数(Risk_i).从中可以看出,Cd 和 Cr 的 Risk_i 均远大于 1×10^{-4} ,且 2 个区主要的致癌重金属都是 Cr.工业区和商业区 Cd 和 Cr 的平均 Risk_i 之和分别为 2.04 和 3.42,为致癌风险临界值的 20 400 和 34 200 倍,可见,宁波市工业区和商业区

地表水均存在很高的致癌风险,且商业区的致癌风险约为工业区的 1.7 倍.

此外,还可以看出,Zn、Cu 和 Ni 单个金属的 HQ 均小于 1,这说明 Zn、Cu 和 Ni 单个金属存在的潜在健康风险很小.然而,6 种重金属的平均 HQ 之和均大于 1,有不少采样点 Cd、Pb 和 Cr 单个金属的 HQ 就大于 1,特别是 Cd,有些采样点的 HQ 大于 5,甚至大于 10.

表 4 宁波地表水中重金属的危害商数指数(HQ)和致癌风险指数(Risk_i)

Table 4 Hazard quotient (HQ) and carcinogenic risk (Risk_i) indices of heavy metals in surface water of Ningbo City

区域	项目	HQ						Risk _i			
		Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Cr	SUM	Cd	Cr	SUM
工业区	Min	7.78E-04	3.60E-03	5.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	0.00E+00		3.56E-02	0.00E+00	
	Max	6.67E-01	1.79E-01	1.20E+01	7.88E-01	2.47E+00	2.18E+00		8.00E-01	4.36E+00	
	Mean	4.92E-02	3.26E-02	1.91E+00	1.40E-01	7.67E-01	9.55E-01	3.85E+00	1.27E-01	1.91E+00	2.04E+00
商业区	Min	2.22E-04	3.60E-03	1.33E-01	0.00E+00	5.56E-02	2.00E-01		8.89E-03	4.00E-01	
	Max	8.11E-03	2.07E-02	1.67E+00	1.37E-01	1.50E+00	4.62E+00		1.11E-01	9.24E+00	
	Mean	1.79E-03	8.54E-03	9.90E-01	2.63E-02	6.88E-01	1.68E+00	3.39E+00	6.60E-02	3.35E+00	3.42E+00

将 HQ 大于 1 的采样点数占采样点总数的百分比绘于图 5.从中可以看出,在工业区,Cd 潜在的健

康风险最大,有 1.92% 和 3.85% 采样点 Cd 的 HQ 分别大于 10 和介于 5~10 之间,另有 21.15% 的采

样点大于 1; 其次是 Cr, 有 44.23% 采样点的 HQ 介于 1~5 之间; 再次是 Pb, 有 28.85% 采样点的 HQ 介于 1~5 之间. 在商业区, 单个金属的 HQ 均未超过 5, 但分别有 66.67%、39.39% 和 24.24% 采样点 Cd、Cr 和 Pb 的 HQ 介于 1~5 之间. 可见, 宁波市地表水中 Cd、Cr 和 Pb 均存在一定的潜在健康风险, 且工业区高于商业区.

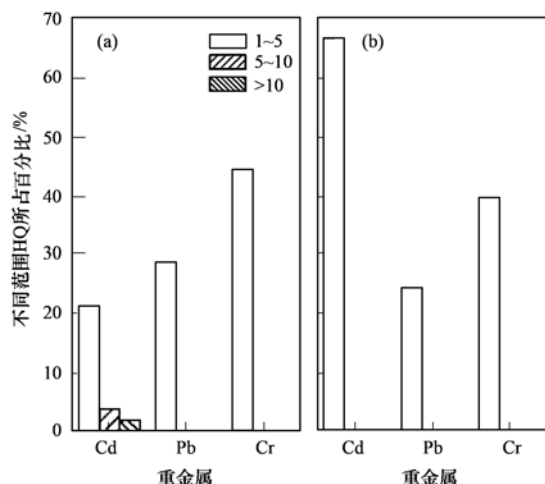


图 5 工业区和商业区地表水重金属不同范围 HQ 百分占比

Fig. 5 Percentage of different range HQ of heavy metals in surface water of the industrial and commercial areas

3 结论

(1) 宁波市工业区地表水重金属污染严重, 和国家地表水Ⅳ级标准相比, 超标最严重几种重金属及其顺序为: $Cd > Pb > Cr \gg Zn$, 其中, 98% 的采样点 Cd 超标, 50% 的采样点 Cr、Pb 超标, Cd、Pb 和 Cr 是潜在健康风险最大的重金属, 主要污染源为工业生产排放物.

(2) 宁波市商业区地表水重金属污染严重, 和国家地表水Ⅴ级标准相比, 超标最严重几种重金属及其顺序为: $Cd > Pb \gg Cr$, 超标采样点数均占 50% 以上, 它们同时也是潜在健康风险最大的重金属, 主要来自公路源污染.

(3) 宁波市工业区和商业区地表水重金属污染严重, 所有检测采样点均存在一定的潜在健康风险和很高的致癌风险, Cr 是主要的潜在致癌重金属, 且商业区的致癌风险是工业区的 1.7 倍, Cd、Cr 和 Pb 是潜在健康风险最大的 3 种重金属.

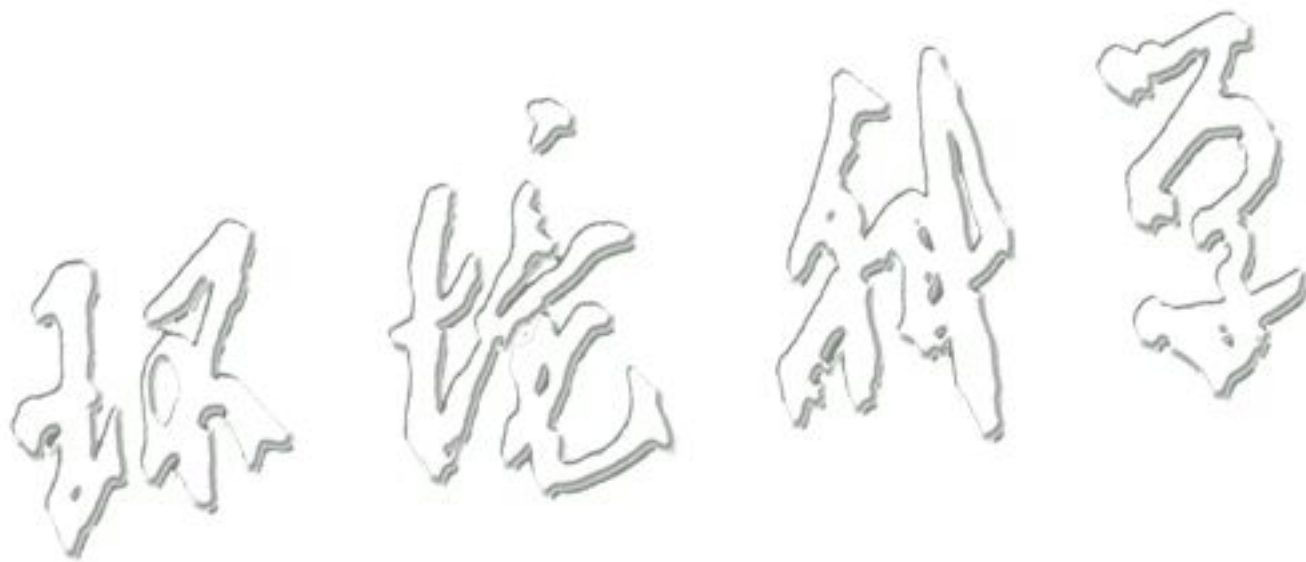
参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 121-128.
- Zhang Y, Li F D, Ouyang Z, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the irrigation district of the lower reaches of Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 121-128.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑琦宏, 沈浩, 李立山, 等. 宁波市城区内河水水质与沉积物污染特征研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2012, **25**(3): 109-113.
- Zheng Q H, Shen H, Li L S, *et al.* Research on the pollution characteristics of water quality and sediments in inner rivers of Ningbo[J]. *Journal of Ningbo University (NSSE)*, 2012, **25**(3): 109-113.
- [9] 董小芳, 陈启宇, 邵少东. 宁波内河治理 2010[N]. *宁波日报*, 2010-03-17.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 乐晓妍. 城市道路噪声特性研究及噪声地图信息系统构建[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 23-27.
- [13] 数字宁波[J]. *宁波通讯*, 2016, (7): 13.
- [14] US EPA. Guidance for performing aggregate exposure and risk assessments[S]. Washington, DC: U. S. EPA Office of Pesticide Programs, 1999.
- [15] US EPA. EPA/630/P-03/001F, Guidelines for carcinogen risk assessment[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 2005.

- [16] US EPA. EPA/600/Z- 92/001, Guidelines for exposure assessment[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 1992.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans [M]. Lyon, France: World Health Organization, IARC Press, 2012.
- [20] 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.
- [21] 全致琦. 公路源重金属对路域环境的影响及其迁移规律——以 G310 开封段和 S337 息县段为例[D]. 开封: 河南大学, 2013. 117-120.
- [22] Zhang L, Shi Z, Zhang J P, *et al.* Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the east and west Guangdong coastal waters, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **95**(1): 419-426.



CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)