

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区镉元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价

徐美娟¹, 杨佳², 任晓景³, 赵红燕³, 高夫燕¹, 蒋跃军^{4*}

(1. 浙江大学宁波理工学院机电与能源工程分院, 宁波 315100; 2. 宁海县环保科技学会, 宁海 315600; 3. 宁波市生态环境局余姚分局, 余姚 315400; 4. 浙江万里学院数字产业研究院, 宁波 315100)

摘要: 分别在丰水期和枯水期,从宁波市工业区和商业区地表水中采集了120个水样,检测了6种重金属(Cd、Cr、Ni、Pb、Zn和Fe)的浓度水平,分析了它们的时空分布特征,计算了重金属间的斯皮尔曼相关系数;结合时空特征和斯皮尔曼相关系数推测了主要污染源;通过计算健康风险指数和致癌风险指数评价了地表水中重金属对暴露人群存在的风险.结果表明,宁波市工业区和商业区不同季节地表水重金属的污染特性有很大的差异.工业区丰水期和枯水期重金属浓度平均值的大小顺序分别为:Fe > Zn > Ni > Pb > Cr > Cd 和 Fe > Zn > Cr > Ni > Pb > Cd,超标的严重性顺序分别为:Cr > Cd > Pb 和 Pb > Cr = Cd,含重金属工业废水是工业区地表水重金属的主要污染源之一.商业区丰水期和枯水期重金属浓度平均值的大小顺序分别为:Fe > Pb > Ni > Zn > Cd > Cr 和 Fe > Pb > Ni > Zn > Cr = Cd,丰水期超标的严重性顺序为:Cr > Pb;枯水期仅有Pb超标,超标率60%,公路源污染物是商业区地表水重金属污染的主要来源,地表径流和降水是重金属输入的重要途径.两个区地表水中的重金属对暴露人群均存在很大的致癌风险,且商业区高于工业区,主要的致癌物质都是Cr.和2015年采样的研究结果相比,两个区重金属的污染程度均减轻了很多,但今后仍需注意宁波市地表水重金属污染的防控.

关键词: 地表水; 重金属; 时空分布; 污染评估; 健康风险; 宁波

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1407-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202195

Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo

XU Mei-juan¹, YANG Jia², REN Xiao-jing³, ZHAO Hong-yan³, GAO Fu-yan¹, JIANG Yue-jun^{4*}

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, NingboTech University, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 2. Ninghai Society of Environmental Science and Technology, Ninghai 315600, China; 3. Yuyao Branch, Ningbo Ecological Environment Bureau, Yuyao 315400, China; 4. Institute of Data Industry, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: A total of 120 surface water samples were collected from industrial and commercial districts of Ningbo, China in the wet and dry seasons. The concentrations of six heavy metals (Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, and Fe) in the samples were measured, the temporal-spatial distribution characteristics of the six heavy metals were analyzed, and Pearson correlation coefficients of the six heavy metals were calculated. Combined with the temporal-spatial distribution characteristics and Pearson correlation coefficients of the six heavy metals, the main pollution sources of the two districts were analyzed, respectively. The risk of heavy metals in surface water to the exposed population was evaluated by calculating the health risk index and carcinogenic risk index. The results showed that the pollution characteristics of heavy metals in the surface water of Ningbo industrial district and commercial district differed greatly in different seasons. In the industrial district, the orders of the average concentration of heavy metals in the wet season and dry season were Fe > Zn > Ni > Pb > Cr > Cd and Fe > Zn > Cr > Ni > Pb > Cd, respectively. The concentrations of Cr, Cd, and Pb in the wet and dry seasons exceeded the class IV recommended values, following the degrees of Cr > Cd > Pb and Pb > Cr = Cd, respectively. Sewage containing heavy metals was one of the major pollution sources. In the commercial district, the average concentrations of heavy metals in the wet season and dry season were in the order of Fe > Pb > Ni > Zn > Cd > Cr and Fe > Pb > Ni > Zn > Cr = Cd, respectively. The concentrations of Cd and Pb in the wet season exceeded the corresponding levels (class IV), and the degree followed Cd > Pb. Only Pb exceeded the standard in the dry season, with the exceeding standard rate of 60%. Road pollution containing heavy metals was the major pollution source, and heavy metals entered surface water mostly with surface runoff and precipitation. The carcinogenic risk posed by heavy metals in the surface water of the Ningbo industrial district and commercial district was very high, and the carcinogenic risk in the commercial district was much higher than that in the industrial district. The main carcinogen was Cr. Compared to the research results of the research group in 2015, the pollution degree of heavy metals has been greatly reduced. In the future, we still need to give adequate attention to the prevention and control of heavy metal pollution in surface water in Ningbo.

Key words: surface water; heavy metals; temporal-spatial distribution; pollution assessments; health risk; Ningbo

地表水中的重金属易通过直接接触或食物链富集到人群中^[1,2],当达到一定积累后会对人群的肝^[3~5]、肾^[6~8]、消化系统^[9~11]和神经系统^[12~16]造成严重损害,甚至导致突变^[17,18]、畸形^[19~21]和癌症^[22,23]等致命性伤害.

近几年来,宁波市机动车保有量不断增加,其中2016~2018年期间年均增幅24.5万辆,至2021年2月1日宁波市汽车保有量达到300万辆,居浙江

省首位^[24].与此同时,宁波市汽车尾气、刹车及轮胎磨损污染物也不断增加,在地表土壤和空中粉尘中都检测了多种重金属^[25].另一方面,2021年宁波

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-06-23

基金项目: 宁波市自然科学基金项目(202003N4312); 宁波市自然科学基金项目(202003N4315); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ21E060002)

作者简介: 徐美娟(1980~),女,博士,副教授,主要研究方向为地表水重金属污染控制, E-mail: xmj80@126.com

* 通信作者, E-mail: jiangyuejun@126.com

GDP 增量达2 186.3亿元,创下历史新高,增量位居浙江省和全国同类城市前列,全国排名进位至第10位^[26]。可见,近年来宁波经济发展迅猛,与此同时企业在生产过程产生的污染物也会增多,这些污染物易通过各种途径输入地表水,造成水体污染,威胁人民的生命财产安全,特别是重金属对暴露人群的危害极大。有研究表明,城市化进程会加重城市地表水重金属污染^[27~30],宁波城区的地表水重金属污染显著较郊区严重^[31],不同城市功能区重金属污染特性不同,污染源和污染路径也可能不同,不管是工业区还是商业区地表水中的重金属对暴露人群均存在潜在的健康风险和很强的致癌风险^[32,33]。为进一步考察宁波市地表水重金属污染的特性,寻找更加准确的污染源和污染途径,本文以宁波市两个典型工业区(镇海区)和商业区(老海曙区)为研究对象,比较了丰水期和枯水期地表水中6种重金属(Cd、Cr、Ni、Pb、Zn和Fe)的污染特性和健康风险,结合时空分布特点分析了主要污染源和污染途径,以期为政府部门的决策和地表水重金属污染的防范和控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 区域特征和采样点布置

宁波是典型的江南水乡,市内大小河道173条,河道总长约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,市内各大小河流均汇入这三大河流,姚江和奉化江在海曙三江口汇合后流入甬江,最后流入东海^[34,35]。

宁波也是典型的沿海城市,比邻东海,海洋性气候明显,全年平均气温为15~23℃,冬天也极少有冰雪天气。地处华东沿海,长江三角洲南翼,与上海一衣带水,交通便捷且工业发达。市内设有镇海、北仑、江北、江东、海曙和鄞州这6个行政区(如图1),每个区都有独特的特点,其中镇海区工业发达,区内有化学工业区、再生金属加工园区、电镀工业园区、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^[36]。老海曙区位于宁波中心城区,河流纵横交错,道路错综复杂,区内几乎没有工业,但商业贸易盛行,车流密集,平均高峰路段机动车车流量达3 000~4 000辆·h⁻¹,局部路段高峰期车流量超过5 000辆·h⁻¹,核心区主干道的饱和度均超过0.85,干路和干路相交的交叉口的饱和度超过0.9^[37,38]。镇海区和老海曙区是典型的工业区和商业区,也是本文的研究对象。

结合区域河流分布情况和区域面积,在镇海区

(工业区)和老海曙区(商业区)内河采样点上分别设置40和20个采样点(如图1),分别在同年的丰水期(2021年6月)和枯水期(2021年12月)进行广谱式采样。由于城市基建、企业管制等原因,2015年的一些采样点地表水消失或企业管制等原因无法采样,所以不能完全复制2015年的采样点。也由于宁波92%以上为私营企业^[39],企业的生产产品和工艺受市场因素变动很快,特别是近几年的新冠疫情对企业生产影响很大,因此本论文的检测数据不可能完全重复2015年的结果,且差异必然存在,但课题组可以保证实验数据的真实性。



图1 采样地示意

Fig. 1 Geological locations of sampling

1.2 样品采集和分析

根据高德地图上定位的采样点位置,分别于2021年6月和2021年12月完成所有样品采集。样品使用传统采样器采集,采样前先后用自来水和去离子水冲洗3遍,采样时用采集点的河水冲洗3遍,采样位置设置在河中水面以下0.5 m处,每个断面多点采集,混合均匀后部分立即用0.45 μm的玻璃纤维膜过滤,然后用优级纯HNO₃酸化到pH<2,密封保存于棕色聚乙烯瓶中,12 h内放入4℃冰箱保存,48 h内完成检测。剩余水样采用HACH便携式pH计测量pH值。

水样中的重金属(Cd、Cr、Ni、Pb、Zn和Fe)采用原子吸收分光光度计进行检测,每个样品设3次重复,每批次检测均加3组空白和2种不同浓度的标准液对照。标准液采用国家标准试剂GSB04-1721-2004、GSB04-1723-2004(a)、GSB04-1740-2004、GSB04-1742-2004、GSB04-1761-2004和GSB04-1726-2004配置。

检测结果采用Excell 2019计算标准偏差、变异系数、峰度和偏度,并用峰度和偏度验证是否满足正态分布,采用Origin 2017软件绘制箱线图(Box chart),采用SPSS 25软件分析同一区域同一季节地表水金属之间的斯皮尔曼(Spearman)相关性。

1.3 健康风险评价

借鉴美国环境保护署(USEPA)的评价方法,采

用危害商数指数 (hazard quotient indices, HQ) 和致癌风险指数 (carcinogenic risk indices, Risk_i) 这 2 个模型评价地表水中重金属的健康风险。

HQ 的计算公式如下^[40]：

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

式中, RfD 为身体直接或间接吸入毒性物质的剂量, 6 种重金属的 RfD [mg·(kg·d)⁻¹] 分别为^[41]: Cd 0.000 5、Cr 0.001 5、Fe 0.3、Ni 0.02、Pb 0.003 6 和 Zn 0.3。

CDI 为慢性日均暴露量, 计算公式如下^[42]：

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

式中, c 为重金属的浓度, mg·L⁻¹; DI 为每日的摄入量, 2 L·d⁻¹^[41]; BW 为平均体重, 60 kg。

HQ 的风险等级分为四级^[43]: 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。

致癌物质的致癌风险评价指数 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^[44]：

$$Risk_i = CDI/SF \quad (3)$$

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, Cr 和 Cd 被国际

癌症研究机构认定为致癌物质^[45], 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^[46]。

2 结果与讨论

2.1 工业区丰水期和枯水期地表水重金属污染特性

对工业区丰水期和枯水期采集的 80 个样品, 6 个检测指标, 共 480 个重金属浓度数据进行分类计算分析和箱线图分析, 结果见表 1 和图 2。可以看出, 工业区丰水期地表水重金属浓度平均值的大小顺序为: Fe > Zn > Ni > Pb > Cr > Cd, 枯水期的大小顺序为: Fe > Zn > Cr > Ni > Pb > Cd, 两个采样季节 pH 范围分别为 6.52 ~ 8.31 和 7.05 ~ 8.66, 可见 pH 并不是影响地表水重金属浓度的主要因素。丰水期 ρ(Cd) 和 ρ(Fe) 平均值分别为 0.003 mg·L⁻¹ 和 0.580 mg·L⁻¹, 为枯水期的 3 倍左右, 但枯水期 Cd 的变异系数为 6.32%, 远大于丰水期的 1.66%。可以推测, 降水和地表径流是工业区丰水期地表水 Cd 和 Fe 污染的主要来源之一, 在枯水期含 Cd 污水的流入是引起局部地表水域 Cd 污染的重要原因。

表 1 工业区丰水期和枯水期地表水重金属的统计分析¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in the surface water of industrial district during wet season and dry season		重金属					
季节		Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	Fe
丰水期	范围/mg·L ⁻¹	0.000 ~ 0.017	0.000 ~ 0.103	0.000 ~ 0.367	0.000 ~ 0.152	0.001 ~ 0.391	0.259 ~ 1.307
	平均值/mg·L ⁻¹	0.003	0.007	0.035	0.012	0.039	0.580
	标准偏差/mg·L ⁻¹	0.005	0.019	0.061	0.032	0.061	0.097
	变异系数/%	1.66	2.71	1.76	2.71	1.56	0.51
	超标采样点/%	30	45	—	7.5	0	—
	pH	6.52 ~ 8.31					
枯水期	范围/mg·L ⁻¹	0.000 ~ 0.056	0.024 ~ 0.106	0.000 ~ 0.493	0.000 ~ 0.102	0.000 ~ 0.862	0.102 ~ 0.442
	平均值/mg·L ⁻¹	0.001	0.045	0.037	0.010	0.060	0.210
	标准偏差/mg·L ⁻¹	0.009	0.015	0.094	0.020	0.176	0.077
	变异系数/%	6.32	0.34	2.57	2.00	2.94	0.37
	超标采样点/%	2.5	2.5	—	7.5	0	—
	pH	7.05 ~ 8.66					
GB 3838-2002 (IV)	浓度/mg·L ⁻¹	0.005	0.05	—	0.05	2.0	—

1) GB 3838-2002 未对 Ni 和 Fe 制定标准限定值, 二者无对应超标采样点

ρ(Ni) 和 ρ(Pb) 在两个采样期的平均值都比较接近, 分别在 0.035 mg·L⁻¹ 和 0.010 mg·L⁻¹ 左右, 但 Ni 浓度值在丰水期的波动范围较枯水期大, 而 Pb 在枯水期的波动范围较大。可以推测, 降水和地表径流是丰水期地表水 Ni 和 Pb 污染的主要来源之一, 含 Pb 和 Ni 污水的流入是枯水期的另一污染源。

ρ(Cr) 和 ρ(Zn) 在枯水期的平均值分别为 0.045 mg·L⁻¹ 和 0.060 mg·L⁻¹, 分别是丰水期的 6 倍和 2 倍左右, 枯水期的浓度值波动范围均较丰水

期大。可以推测, 含 Cr、Zn 污水的流入是工业区地表水 Cr 和 Zn 污染的主要来源, 降水和地表径流并不是主要污染源。

对照国家地表水环境质量标准 GB 3838-2002 中的 IV 类限制, 工业区丰水期采样点超标的严重性顺序为: Cr > Cd >> Pb, 枯水期的大小顺序为: Pb > Cr = Cd。两个采样期相比, Cr 和 Cd 在丰水期超标更严重, Pb 两个采样期超标情况接近, Zn 和 Ni 在枯水期的浓度较高, 这与文献 [1] 得出的珠江河口悬浮物

中重金属时空分布特性正好相反. 与 2015 年的研究对比发现^[32,33], 宁波市工业区地表水的重金属污染显著减小了, 含重金属污水的流入依旧是引起地表

水 Cd、Pb、Ni、Cr 和 Zn 污染的重要原因, 另外降水和地表径流也是工业区丰水期地表水 Cd、Fe、Pb 和 Ni 污染的主要污染源.

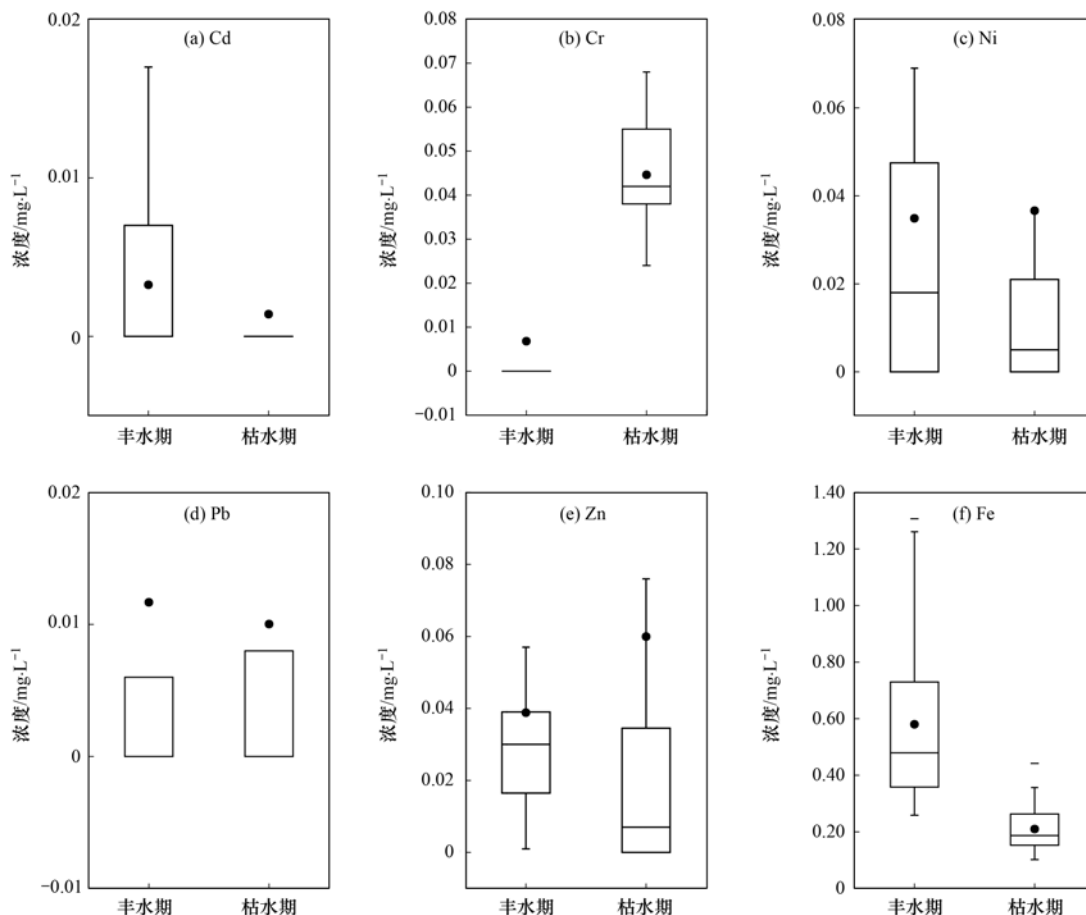


图 2 工业区丰水期和枯水期地表水的重金属浓度分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal concentration values in the surface water of industrial district during wet season and dry season

2.2 商业区丰水期和枯水期地表水污染调查和分析

商业区采样点重金属的检测结果见表 2 和图 3, 可以看出, 商业区丰水期重金属浓度平均值的大小顺序为: Fe > Pb > Ni > Zn > Cd > Cr, 枯水期的大小顺序为: Fe > Pb > Ni > Zn > Cr = Cd, 两个采样季节 pH 范围分别为 6.84 ~ 8.31 和 7.29 ~ 8.48, 可见 pH 并不是影响地表水重金属浓度的主要因素. 对照两个不同的采样季节, 丰水期 $\rho(\text{Cd})$ 、 $\rho(\text{Cr})$ 、 $\rho(\text{Ni})$ 和 $\rho(\text{Zn})$ 平均值分别 0.006、0.002、0.023 和 0.021 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均大于枯水期, 且后三者是枯水期的 2 倍左右, Cd 和 Ni 在丰水期的浓度值波动范围较枯水期大. 可以推测, 降水和地表径流是商业区地表水 Cd、Cr、Ni 和 Zn 污染的主要来源之一, 特别是局部区域的地表径流是引起丰水期地表水 Cd 和 Ni 污染的主要原因. $\rho(\text{Pb})$ 和 $\rho(\text{Fe})$ 在枯水期的平均值分别为 0.070 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.467 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均大于丰水期, 且它们在枯水期的浓度值波动范围均较丰水

期大. 可以推测, 含 Pb 和 Fe 污染物的直接输入是引起商业区枯水期地表水 Pb 和 Fe 污染的主要原因.

对照国家地表水环境质量标准 GB 3838-2002 中的 IV 类限制, 丰水期采样点超标的严重性顺序为: Cd > Pb, 枯水期仅有 Pb 超标, 超标率为 60%. 两个采样期相比, Cd 在丰水期超标更严重, Pb 在枯水期超标更严重, Zn、Cr 和 Ni 在枯水期的浓度普遍较高, 这与文献[1]的研究结论有一定差异. 与 2015 年的研究对比发现^[32,33], 宁波市商业区地表水的重金属污染减小了很多. 降水和地表径流是商业区丰水期地表水 Cd、Cr、Ni 和 Zn 污染的主要污染源, 含重金属污染物的直接输入是引起地表水 Pb 和 Fe 污染的重要原因.

2.3 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同样可以很好地反映重金属的起源和迁移特性^[47~49], 特别是同区域相同采样点不同季节污染指标的对标分析更容易发现主要污

染源和污染物的迁移途径. 经峰度和偏度验证, 本文研究的不少重金属浓度数列并不满足正态分布, 因此选用斯皮尔曼相关性分析了重金属之间的相关性系数, 探索其主要污染源和迁移特性, 结果见表 3 (工业区) 和表 4 (商业区), 图 4 为地表水重金属的浓度平均值.

表 2 商业区丰水期和枯水期地表水重金属的统计分析¹⁾

季节		重金属					
		Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	Fe
丰水期	范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.000 ~ 0.014	0.000 ~ 0.035	0.000 ~ 0.055	0.000 ~ 0.119	0.001 ~ 0.086	0.259 ~ 0.593
	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.006	0.002	0.023	0.048	0.021	0.396
	标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.006	0.008	0.018	0.040	0.020	0.082
	变异系数/%	1.08	3.30	0.81	0.84	0.92	0.25
	超标采样点/%	50	0	—	40	0	—
	pH	6.84 ~ 8.31					
枯水期	范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.000 ~ 0.000	0.000 ~ 0.007	0.000 ~ 0.060	0.000 ~ 0.132	0.000 ~ 0.032	0.170.000 ~ 0.628
	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.000	0.000	0.014	0.070	0.011	0.467
	标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.000	0.002	0.014	0.058	0.010	0.075
	变异系数/%	4.47	4.47	1.04	0.83	0.92	0.31
	超标采样点/%	0	0	—	60	0	—
	pH	7.29 ~ 8.48					
GB 3838-2002 IV 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		0.005	0.05	—	0.05	2.0	—

1) GB 3838-2002 未对 Ni 和 Fe 制定标准限值, 二者无对应超标采样点

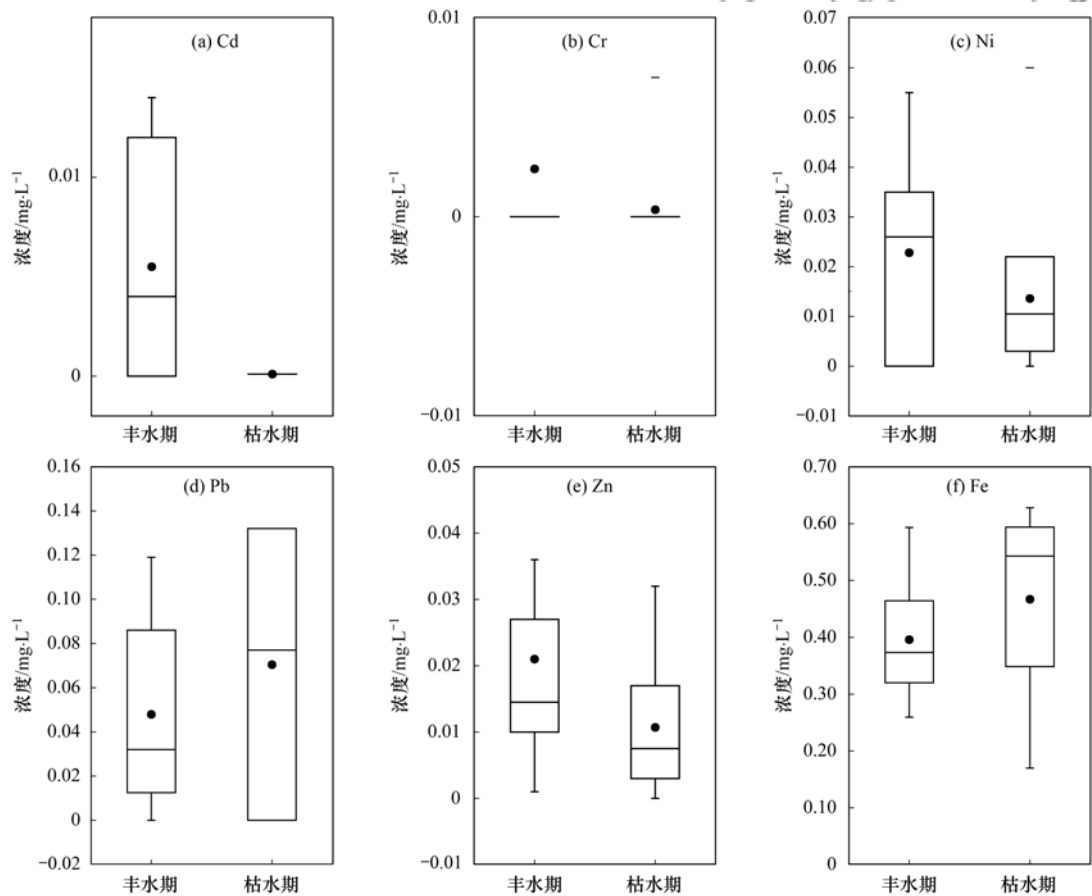


图 3 商业区丰水期和枯水期地表水重金属的浓度值分布

Fig. 3 Distribution of heavy metal concentration values in the surface water of commercial district during wet season and dry season

从表 3 可以看出, 在工业区丰水期 Ni 与 Cd、Pb 之间的斯皮尔曼相关系数分别为 0.578 和 0.491, 枯水期 Ni 与 Cr 之间斯皮尔曼相关系数为 0.560, 它们之间存在极其显著的相关性, 存在共同的污染源. 从图 4 也可以看出, 工业区地表水 Cr、Ni 和 Zn 的浓度平均值显著高于商业区, 具有显著的工业区污染特征. 结合 2.1 节的分析结果和采样点空间分布, 可以推测, 含重金属污水的直

接流入和附载有重金属的污染物通过干湿沉降、地表径流入河都是工业区丰水期地表水 Cd、Pb 和 Ni 污染的共同途径,含重金属污水也是工业区枯水期地表水 Cr 和 Ni 的共同污染源,而重金属污水主要源于金属加工园区和电镀厂,这再一次证实了之前的研究结论^[32,33].

表 3 工业区重金属之间的斯皮尔曼相关系数¹⁾

Table 3 Spearman correlation coefficient of five heavy metals in the surface water of industrial district								
季节	重金属	相关性						结论
		Zn	Cd	Ni	Pb	Cr	Fe	
丰水期	Zn	1						Ni 与 Cd、Ni 与 Pb 之间存在极其显著的相关性
	Cd	0.295	1					
	Ni	0.217	0.578 **	1				
	Pb	-0.111	0.209	0.491 **	1			
	Cr	0.042	0.060	0.020	-0.016	1		
	Fe	0.158	-0.004	-0.028	-0.177	0.222	1	
枯水期	Zn	1						Ni 与 Cr 之间存在极其显著的相关性
	Cd	0.233	1					
	Ni	0.220	0.251	1				
	Pb	0.271	0.236	0.234	1			
	Cr	0.178	0.275	0.560 **	-0.177	1		
	Fe	-0.271	-0.119	-0.040	-0.034	-0.078	1	

1) ** 为 $P < 0.01$

表 4 是商业区重金属之间的斯皮尔曼相关系数,结果表明,在丰水期,Ni、Cd 和 Pb 三者之间,及 Pb 与 Cr 之间存在极其显著的相关性,Zn 与 Fe 之间存在显著的相关性,它们有共同的污染源;在枯水期,Zn、Pb 和 Fe 三者之间存在极其显著的相关性,它们存在共同的污染源.从图 4 也可以看出,Pb 在商业区的浓度平均值是工业区的 5~7 倍左右,具有显著的商业区污染特征.结合 2.2 节的分析结果和采样点空间分布,可以推测公路源污染是商业区地表水重金属污染的共同污染源,在小学和生活小区周边的采样点,地表水重金属污染的特征尤为显著.汽车排放尾气、刹车及轮胎磨损污染物中含有 Pb、Cd、Ni、Zn、Cr 和 Fe 等多种污染物^[50],人们在接送孩子和进出生活小区的时候,车辆怠速、停止和启动降低了发动机的燃烧效率,加

大了油耗,增加了尾气排放、轮胎和刹车片的磨损,含重金属的污染物大量产生,漂浮在空中或沉降于地面.在丰水期它们很容易通过地面径流和降水进入河流,在枯水期也会通过少量的降水和干沉降进入地表水,从而导致地表水重金属浓度

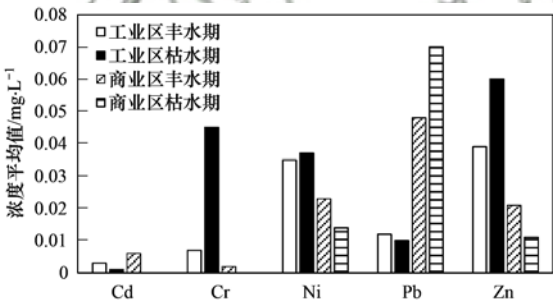


图 4 工业区和商业区地表水重金属浓度平均值

Fig. 4 Average concentrations of heavy metals in surface water of industrial and commercial district

表 4 商业区重金属之间的斯皮尔曼相关系数¹⁾

Table 4 Spearman correlation coefficient of five heavy metals in the surface water of commercial district								
季节	重金属	相关性						结论
		Zn	Cd	Ni	Pb	Cr	Fe	
丰水期	Zn	1						Ni、Cd 和 Pb 三者之间及 Pb 与 Cr 之间存在极其显著的相关性,Zn 与 Fe 之间存在显著的相关性
	Cd	0.165	1					
	Ni	0.195	0.939 **	1				
	Pb	0.196	0.794 **	0.692 **	1			
	Cr	-0.113	-0.391	-0.155	-0.626 **	1		
	Fe	-0.483 *	0.057	0.090	-0.031	0.214	1	
枯水期	Zn	1						Zn、Fe 和 Pb 三者之间存在极其显著的相关性
	Cd	0.276	1					
	Ni	0.019	-0.173	1				
	Pb	0.651 **	0.335	0.330	1			
	Cr	0.140	-0.187	-0.102	0.000	1		
	Fe	0.748 **	0.178	-0.044	0.706 **	0.300	1	

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

升高.可见,商业区控制好车流量和疏通雨水管网、加强雨污引流和杜绝污水未经处理直接流入地表水是控制好商业区地表水重金属污染最有效的办法.

2.4 重金属的健康风险评价

重金属对暴露人群的健康存在很大的风险,Cd 和 Cr 更是致癌物质,表 5 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).从表 5 可以看出,工业区地表水枯水期的 HQ 为 1.269,大于 1,对暴露人群存在较低的危害风险.但枯水期地表水 Cd 和 Cr 的平均 Risk_i之和是致癌临界风险值 1×10⁻⁴的 30 倍左右,丰水期为临界值的

4.6 倍,枯水期的风险大于丰水期,对暴露人群存在致癌风险,主要的致癌风险重金属都是 Cr.

对于商业区,丰水期和枯水期 6 种重金属的平均 HQ 之和均小于 1,均在安全范围之内.但丰水期和枯水期 Cd 和 Cr 的平均 Risk_i之和分别是临界值的1 310倍和 158 倍,丰水期的风险大于枯水期,且均较工业区大很多,对暴露人群存在很大致癌风险,Cr 也是主要的致癌重金属.但与 2015 年的研究结果相比^[32,33],对暴露人群的健康风险都小了很多,这说明,近几年宁波市政府实施污染物防治政策取得了很好的成效.

表 5 工业区和商业区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 5 Hazard quotient indices (HQ) and carcinogenic risk indices (Risk_i) of heavy metals
in the surface water of industrial district and commercial district

区域	季节		HQ						Risk _i			
			Zn	Cd	Ni	Pb	Cr	Fe	总和	Cd	Cr	总和
工业 区	丰水期	最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029		0.00E+00	0.00E+00	
		最大值	0.043	1.133	0.612	1.407	2.289	0.145		3.78E-05	6.87E-03	
		平均值	0.004	0.217	0.058	0.108	0.152	0.064	0.603	7.22E-06	4.55E-04	4.62E-04
	枯水期	最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.533	0.011		0.00E+00	1.60E-03	
		最大值	0.096	3.733	0.822	0.944	2.356	0.049		1.24E-04	7.07E-03	
		平均值	0.007	0.093	0.061	0.093	0.992	0.023	1.269	3.11E-06	2.98E-03	2.98E-03
商业 区	丰水期	最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029		0.00E+00	0.00E+00	
		最大值	0.010	0.933	0.092	1.102	0.778	0.066		6.22E-02	1.56E+00	
		平均值	0.002	0.367	0.038	0.444	0.053	0.044	0.904	2.44E-02	1.07E-01	1.31E-01
	枯水期	最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019		0.00E+00	0.00E+00	
		最大值	0.004	0.067	0.100	1.222	0.156	0.070		4.44E-03	3.11E-01	
		平均值	0.001	0.003	0.023	0.652	0.008	0.052	0.687	2.22E-04	1.56E-02	1.58E-02

3 结论

(1)对于工业区,丰水期地表水重金属浓度平均值的大小顺序为:Fe>Zn>Ni>Pb>Cr>Cd,采样点超标的严重性顺序为:Cr>Cd>Pb;枯水期重金属浓度平均值的大小顺序为:Fe>Zn>Cr>Ni>Pb>Cd,采样点超标的严重性顺序为:Pb>Cr=Cd.两个采样期相比,Cr 和 Cd 在丰水期超标更严重,Pb 在两个采样期的超标情况接近,Zn 和 Ni 在枯水期的浓度较高.含重金属污水的流入是引起地表水 Cd、Pb、Cr、Zn 和 Ni 污染的重要原因,另外降水和地表径流也是工业区丰水期地表水 Cd、Fe、Pb 和 Ni 污染的主要污染源.

(2)对于商业区,丰水期重金属浓度平均值的大小顺序为:Fe>Pb>Ni>Zn>Cd>Cr,采样点超标的严重性顺序为:Cd>Pb;商业区枯水期重金属浓度平均值的大小顺序为:Fe>Pb>Ni>Zn>Cr=Cd,在所有重金属中,仅有 Pb 超标 60%.两个采样期相比,Cd 在丰水期超标更严重,Pb 在枯水期超标更严重,Zn、Cr 和 Ni 在枯水期的浓度普遍较高.公路源污染物是商业区地表水重金属污染的重要来

源,地表径流和干湿沉降都是重金属入河的重要途径.

(3)工业区和商业区地表水对暴露人群均存在很大的致癌风险,且商业区远大于工业区,主要的致癌重金属都是 Cr.加强雨污分流,杜绝污水未经处理直接流入地表水,工业区控制重金属污水的输入,商业区控制好车流量,是控制宁波市地表水重金属污染的有效方法.

参考文献:

[1] 王磊,汪文东,刘懂,等.象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析[J].环境科学,2020,41(7):3194-3203.
Wang L, Wang W D, Liu D, et al. Risk assessment and source analysis of heavy metals in the river of a typical bay watershed [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3194-3203.
[2] 刘意章,肖唐付,熊燕,等.西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J].环境科学,2019,40(6):2877-2884.
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2877-2884.
[3] Rai P K, Lee S S, Zhang M, et al. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, 125: 365-385.

- [4] Dehghani M H, Tajik S, Panahi A, *et al.* Adsorptive removal of noxious cadmium from aqueous solutions using poly urea-formaldehyde: a novel polymer adsorbent[J]. *MethodsX*, 2018, **5**: 1148-1155.
- [5] Sadeghi H, Fazlzadeh M, Zarei A, *et al.* Spatial distribution and contamination of heavy metals in surface water, groundwater and topsoil surrounding Moghan's tannery site in Ardabil, Iran[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, **102**(5): 1049-1059.
- [6] Bineshpour M, Payandeh K, Nazarpour A, *et al.* Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: arak city, Iran[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(12): 4939-4958.
- [7] Karaouzas I, Kapetanaki N, Mentzafou A, *et al.* Heavy metal contamination status in Greek surface waters: a review with application and evaluation of pollution indices [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128192.
- [8] Mukherjee I, Singh U K, Singh R P, *et al.* Characterization of heavy metal pollution in an anthropogenically and geologically influenced semi-arid region of east India and assessment of ecological and human health risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135801.
- [9] Wang P C, Xue J H, Zhu Z M. Comparison of heavy metal bioaccessibility between street dust and beach sediment: Particle size effect and environmental magnetism response[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146081.
- [10] 严晓, 李淑圆, 王美欢, 等. 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[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 953-960.
Yan X, Li S Y, Wang M H, *et al.* Liver and kidney function of e-waste dismantling workers and potential influencing Factors [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 953-960.
- [11] Fu Z S, Xi S H. The effects of heavy metals on human metabolism[J]. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 2020, **30**(3): 167-176.
- [12] Zhu F, Zheng Y M, Zhang B G, *et al.* A critical review on the electrospun nanofibrous membranes for the adsorption of heavy metals in water treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123608.
- [13] 刘昭, 周宏, 曹文佳, 等. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 175-183.
Liu Z, Zhou H, Cao W J, *et al.* Seasonal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of Qingjiang River [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 175-183.
- [14] Vellingiri B, Suriyanarayanan A, Selvaraj P, *et al.* Role of heavy metals (copper (Cu), arsenic (As), cadmium (Cd), iron (Fe) and lithium (Li)) induced neurotoxicity [J]. *Chemosphere*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134625.
- [15] Nguyen H D, Kim M S. Exposure to a mixture of heavy metals induces cognitive impairment: genes and microRNAs involved [J]. *Toxicology*, 2022, **471**, doi: 10.1016/j.tox.2022.153164.
- [16] Sall M L, Diaw A K D, Gningue-Sall D, *et al.* Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(24): 29927-29942.
- [17] Yaashikaa P R, Senthil Kumar P, Jeevanantham S, *et al.* A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119035.
- [18] Xu Y, Tan L, Li Q, *et al.* Sublethal concentrations of heavy metals Cu^{2+} and Zn^{2+} can induce the emergence of bacterial multidrug resistance [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, **27**, doi: 10.1016/j.eti.2022.102379.
- [19] Rajakumar S, Abhishek A, Selvam G S, *et al.* Effect of cadmium on essential metals and their impact on lipid metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2020, **25**(1): 19-33.
- [20] Mukherjee A G, Wanjari U R, Renu K, *et al.* Heavy metal and metalloid-induced reproductive toxicity [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2022, **92**, doi: 10.1016/j.etap.2022.103859.
- [21] Valko M, Morris H, Cronin M T D. Metals toxicity and oxidative stress[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2005, **12**(10): 1161-1208.
- [22] Rahman M, Rima S A, Saha S K, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals in the surface water of a remote island Nijhum Dweep, northern Bay of Bengal [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2022, **18**, doi: 10.1016/j.enmm.2022.100706.
- [23] Selvam S, Jesturaja K, Roy P D, *et al.* Human health risk assessment of heavy metal and pathogenic contamination in surface water of the Punnakayal estuary, South India [J]. *Chemosphere*, 2022, **298**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134027.
- [24] 王晓峰. 全国第15城, 宁波汽车保有量突破300万辆[EB/OL]. http://nbjt.china.com.cn/2021-02/01/content_41458732.html, 2021-02-01.
- [25] 张晓燕. 宁波镇海区 $\text{PM}_{2.5}$ 现状及来源初步分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Zhang X Y. Pollution characteristics and sources apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Zhenhai district of Ningbo, China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [26] 俞永均, 陆海龙. 宁波: 2021年GDP增量创历史新高[N]. *宁波日报*, 2022-01-27.
- [27] Häder D P, Banaszak A T, Villafañe V E, *et al.* Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: emerging problems with global implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586.
- [28] Tkaczyk A, Mitrowska K, Posyniak A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137222.
- [29] Carolin C F, Kumar P S, Saravanan A, *et al.* Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: a review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, **5**(3): 2782-2799.
- [30] Sarma G K, Sen Gupta S, Bhattacharyya K G. Nanomaterials as versatile adsorbents for heavy metal ions in water: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6245-6278.
- [31] 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2095-2103.

- Liang M Q, Shao M L, Cao C L, *et al.* Characteristics of dissolved organic Matter (DOM) and relationship with dissolved heavy metals in a peri-urban and an urban river [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2095-2103.
- [32] 徐美娟, 鲍波, 陈春燕, 等. 宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 729-737.
- Xu M J, Bao B, Chen C Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and human health risk of surface waters in the City of Ningbo, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 729-737.
- [33] 徐美娟, 童桂华, 孙丹, 等. 城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3218-3224.
- Xu M J, Tong G H, Sun D, *et al.* Comparison of heavy metal contamination characteristics in surface water in different functional areas: a case study of Ningbo [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3218-3224.
- [34] 胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 等. 宁波三江口水域原核生物群落结构分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2487-2495.
- Hu A Y, Li J W, Yang X Y, *et al.* Analysis of prokaryotic community structure in river waters of the Ningbo Sanjiang mouth [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2487-2495.
- [35] 宁波市人民政府. 自然地理[EB/OL]. <http://www.ningbo.gov.cn/col/col1229099787/index.html>, 2021-12-31.
- [36] 百度百科. 宁波[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%AE%81%E6%B3%A2/209476?fr=aladdin>, 2022-02-21.
- [37] 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.
- Le X Y. Study on noise characteristics of urban road and construction of noise map information system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [38] 宁波市公安局交通警察局. 浙B车主注意! 宁波城区迎来交通高峰! 这些路段一定要当心... [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/290621565_179403, 2019-01-21.
- [39] 人民网. 宁波民营企业首破20万户大关 连续11个月增长[EB/OL]. <http://politics.people.com.cn/n/2015/0203/c70731-26498832.html>, 2015-02-03.
- [40] US EPA. Guidelines for performing aggregate exposure and risk assessments[R]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticide Programs, 1999b.
- [41] EPA/630/P-03/001F, Guidelines for carcinogen risk assessment[S].
- [42] EPA/600/Z-92/001, Guidelines for exposure assessment[S].
- [43] 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.
- [44] Zhang L, 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.
- [45] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund, vol. I: Human Health Evaluation Manual (Part A) EPA/540/1-89/002 [R]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, 1998.
- [46] 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.
- [47] 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- Zhang Y R, Che F F, Fu Z H, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy Metals in sediments of lake Qinghai[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- [48] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [49] 张彦, 邹磊, 梁志杰, 等. 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2537-2547.
- Zhang Y, Zou L, Liang Z J, *et al.* Differential characteristics and source identification of water quality of the rivers in northern Henan before and after rainstorm[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2537-2547.
- [50] 徐静, 李杏茹, 张兰, 等. 北京城郊PM_{2.5}中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, *et al.* Concentration and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in urban and suburban areas of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2501-2509.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)