

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王伟,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除了及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价

姜时欣^{1,2}, 翟付杰^{2,3}, 张超², 王蒙蒙^{2,3}, 单保庆^{2*}

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 邯郸 056038; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450045)

摘要: 通过对伊通河(长春城区段)7个沉积短岩芯中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等重金属元素含量与赋存形态的分析,研究了重金属污染特征和潜在生态风险. 沉积物中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量范围分别为 0.10~1.18、23.57~66.35、11.27~43.95、10.78~29.82、15.02~60.81 和 54.27~175.83 mg·kg⁻¹. Cd 弱酸可溶态的质量分数为 42.1%~51.28%; Cr、Ni 和 Zn 以残渣态为主,质量分数分别为 63.54%~79.91%、35.16%~53.75% 和 27.55%~57.55%. 沉积物垂向污染程度和生态风险评价结果显示,研究区域受到 Cd、Cu、Pb 及 Zn 污染, Cd 的生态风险最高, Zn 和 Cu 次之,各岩芯中每组元素具有相似的垂向变化规律,其中 4~8 cm 深度生态风险相对较高. 污染来源解析结果显示,伊通河(城区段)沉积物中 Cd、Zn 和 Pb 主要来源于工业污染和城市污水排放, Cu 可能受自然过程和人类活动的双重影响, Cr、Ni 可能较多地来源于自然过程.

关键词: 伊通河; 沉积物; 重金属; 分级提取; 风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2653-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910113

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area

JIANG Shi-xin^{1,2}, ZHAI Fu-jie^{2,3}, ZHANG Chao², WANG Meng-meng^{2,3}, SHAN Bao-qing^{2*}

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The total content and chemical speciation of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in seven short cores sampled from the Yitong River from Changchun City were analyzed to assess the pollution levels and potential ecological risks of heavy metals in the sediments. The results demonstrated that the total contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in sediments were 0.10-1.18, 23.57-66.35, 11.27-43.95, 10.78-29.82, 15.02-60.81, and 54.27-175.83 mg·kg⁻¹, respectively. The acid-soluble fraction of Cd varied from 42.1% to 51.28%, whereas Cr, Ni, and Zn were mainly found in the residual fraction; their mass fractions were 63.54%-79.91%, 35.16%-53.75%, and 27.55%-57.55%, respectively. The vertical results of pollution degree and ecological risk assessment indicated that the studied sediment was polluted by Cd, Cu, Pb, and Zn, and the ecological risk of Cd was the highest, followed by Zn and Cu. Each group of metals in each core showed a similar vertical variation, and the ecological risk of metals in sediment of 4-8 cm depth was relatively high. Cd, Zn, and Pb in the sediments of Yitong River were mainly from industrial pollution and municipal sewage discharge, and Cu could be attributed to both natural processes and human activities, whereas Cr and Ni may be attributed to natural processes.

Key words: Yitong River; sediments; heavy metal; sequential extraction; risk assessment

随着工业化的持续发展和城镇化的不断推进,城市河流重金属的污染状况也受到了越来越多的关注与研究^[1-5]. 沉积物是重金属的重要载体,当外界环境适宜的情况下沉积物中的重金属会再次进入水体,对水环境形成威胁^[6,7]. 中国北方城市水资源量相对匮乏,城区河流天然径流量不足且多呈季节性特点,导致河流自净能力差,水质风险较高^[8],因此北方城市河流可能面临较为严重的重金属污染风险. 伊通河贯穿整个吉林省长春城区,其中城区核心段长度为 16 km,是长春城区的主要纳污河流. 20 世纪下半叶,长春作为老牌重工业基地,大量工业废

水和生活污水直接排放至伊通河,沉积物中积累了包括重金属在内的大量污染物. 董德明等^[9]的研究表明,伊通河(城区段)在 2004 年时受到较重的 Pb、Cu 和 Zn 污染. 2016 年,长春市开展伊通河流域综合治理,通过开展控源截污、底泥治理、补水和生态修复工程,伊通河(城区段)水质显著好转.

河流岩芯在一定程度上反映了历史条件下的沉

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877368)

作者简介: 姜时欣(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为水环境与水生生态修复, E-mail: jiangshixin1994@126.com

* 通信作者, E-mail: bqshan@cees.ac.cn

积动力学过程,重金属地球化学组分的垂向分布为揭示富集程度和生物可利用性的变化趋势提供了直观的视角,能够反映一定时间内河流所受污染源的变化^[1].近20年来伊通河(城区段)主要污染源经历了由上世纪工业废水、生活污水直排到本世纪初生活污水的排放再到近年城市面源污染和污水溢流污染的变化.然而近年关于伊通河(城区段)沉积物中重金属含量和地球化学组分的信息很少,因此本研究的目的是基于改进的BCR法分析伊通河(城区段)沉积物重金属的总量、形态分布及空间、垂向变化特征,探讨不同时期的主要污染源对沉积物中重金属含量的影响;运用富集系数分析法(EF)、地累积指数法(I_{geo})、潜在生态风险法(RI)和风险评价编码法(RAC)等多种方法进行污染程度分析和生态风险评价,同时利用主成分分析法、聚类分析法和相关性分析探究重金属可能的具体来源,以期为进一步研究伊通河(城区段)沉积物中重金属元素迁移和形态转化机制以及污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

伊通河发源于吉林省伊通县东南哈达岭山脉大青顶子山北麓,是松花江的二级支流,河流全长283 km.伊通河是长春境内主要纳污河流,也是长春市工业用水和灌溉用水最重要的取水源地^[10].伊通河上游新立城水库则是长春的饮用水源地.此次研究

区域为伊通河(城区段),该段河流位于长春市主城区,南起南三环桥,北至四化拦河闸,河流长度15.89 km,河道平均宽度140 m,水体总容量约为630万 m^3 .伊通河(城区段)汇水区面积约109 km^2 ,其中居住用地、公共设施、道路广场和工业用地高度硬化面积所占比例约为75%.伊通河主要水源来自于新立城水库生态放流,生态基流严重不足,河道水动力差.

长春作为老牌工业城市,过去几十年间含有重金属的工业废水不断排放进入伊通河,部分重金属存留于河底沉积物中并不断累积.此外,研究区域内排水体制以合流污水管网为主,20世纪下半叶城市生活污水基本直排至伊通河.近年来,随着国家《水污染防治行动计划》(水十条)的颁布,长春市城市排水管网通过末端截留系统,基本实现旱季无污水直排,但是受汇区内管网的排水体制影响,汛期合流制溢流污染造成生活污水入河.主要合流制排口位于永宁大桥至四化拦河闸,具体分布如图1所示.

在伊通河(城区段)布置7个采样点位,如图1.于2019年5月采用柱状采样器采集7根10 cm深度的岩芯,以2 cm为单位用聚乙烯刀现场分层,装入自封袋中密封保存,借助车载冰箱带回实验室并于 $-25^{\circ}C$ 低温保存.沉积物样品经冷冻干燥后用玛瑙研钵研磨成粉末状,过100目筛后置于 $4^{\circ}C$ 冰箱备用.

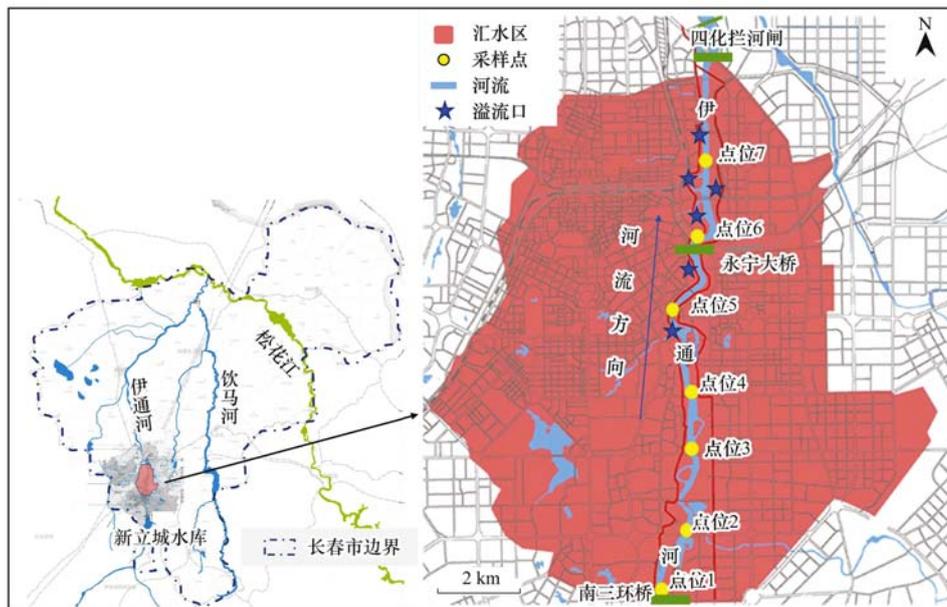


图1 研究区域及采样点示意

Fig. 1 Study area and sediment sampling sites

1.2 实验方法

伊通河(城区段)沉积物中重金属赋存形态由改进的BCR法测定^[7, 11].重金属总量及残渣态

(F4)含量采用 $HF-HClO_4$ 消解法^[12].6种重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)总量及4种提取态含量由ICP-MS(2030,日本岛津)测定.沉积物中Fe和

Al 的总量由 ICP-OES(OPTIMA 8300, 美国珀金埃尔默)测定. 实验所用药品均为优级纯. 沉积物标样 5 次测定结果平均值在推荐误差范围内, 相对标准偏差低于 10.00%. 每一个样品均做 2 组平行, 结果以平均值显示. 每组实验均选用土壤成分分析标准物质 GBW07428(GSS-14, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所)进行质量控制. 重金属总量回收率在 90.24%~115.43% 之间, 与重金属总量相比, 4 种提取态含量之和的回收率范围在 82.45%~118.67% 之间, 所有沉积物样品进行 3 次测定, 测定结果取平均值.

采用改进的 BCR 3 步法^[7,11], 实验步骤如下.

(1) 弱酸可溶态(F1) 精确称取 0.5 g 样品置于 50 mL 离心管中, 加入 40 mL 0.11 mol·L⁻¹ 的 CH₃COOH 溶液, 在 25℃ 下以 60 r·min⁻¹ 振荡 16 h, 3 000 r·min⁻¹ 离心 20 min, 倒出上清液, 用 0.45 μm 滤膜过滤同时转移至 15 mL 离心管, 于 4℃ 冰箱保存备用. 残渣用 20 mL 超纯水清洗. 该步骤可提取可交换态及碳酸盐结合态重金属.

(2) 可还原态(F2) 向步骤 F1 的残渣中加入 20 mL 0.5 mol·L⁻¹ 的 NH₂OH·HCl(用 HNO₃ 调节 pH 至 5). 将此混合物在上述同样条件下振荡、离心、过滤及洗涤. 该步骤可提取 Fe/Mn 氧化物结合态重金属.

(3) 可氧化态(F3) 向步骤 F2 的残渣中加入 5 mL 含量为 30% 的 H₂O₂ 溶液, 盖子拧松, 在 25℃ 下放置 1 h, 每隔一段时间手动振荡离心管. 然后放于 85℃ 水浴锅中消解至近干, 再次加入含量为 30% 的 H₂O₂ 溶液, 放置 1 h 后重复消解. 蒸干冷却后, 加入 20 mL 1 mol·L⁻¹ 的 CH₃COONH₄(用 HNO₃ 调节 pH 至 2), 将此混合物在上述同样条件下振荡、离心、过滤及洗涤. 该步骤可提取有机物及硫化物结合态重金属.

(4) 残渣态(F4) 将步骤 F3 中的残渣在 105℃ 烘箱内烘干后, 采用与测定重金属总量相同的方法测定残渣态含量. 该步骤可提取结合在硅铝酸盐矿物晶格中的重金属.

1.3 富集系数法(enrichment factor, EF)

富集系数法常用来判断沉积物重金属的污染程度^[13]. 在土壤和沉积物中 Fe 含量较高, 不易受外界因素干扰, 在富集系数计算中常被用为基础值^[14,15]. 其计算公式为:

$$EF = \frac{(Me/Fe)_{\text{sample}}}{(Me/Fe)_{\text{background}}}$$

式中, 分子部分的 Me、Fe 为样品中的重金属含量, mg·kg⁻¹; 分母部分的 Me、Fe 是当地土壤/沉积物重

金属背景值, mg·kg⁻¹. 在此次研究中选用吉林省土壤元素背景值, Fe、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 背景值分别为 28 763、0.095、48.29、15.1、25.6、22.16 和 61.79 mg·kg⁻¹.

1.4 地累积指数法(index of geoaccumulation, I_{geo})

地累积指数法用土壤/沉积物中重金属含量与当地地球化学背景值的关系来反映土壤/沉积物中重金属的受污染程度^[16]. 地累积指数计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]$$

式中, C_i 为沉积物中第 i 种重金属的实测含量; k 为常数, 取 1.5; B_i 为普通页岩中重金属地球化学平均背景值, 在此次研究中采用吉林省土壤元素背景值.

1.5 潜在生态风险指数法(comprehensive potential ecological risk index, RI)

潜在生态风险指数法是由 Hakanson^[17]首次提出用以评估沉积物中重金属生态风险的方法, 潜在生态风险指数又包括单因子潜在生态风险指数(potential ecological risk factor, EI)和综合潜在生态风险指数(RI). 生态风险划分标准见表 1. 其计算公式为:

$$C_r^i = C_i / C_n^i$$

式中, C_rⁱ 为某一重金属的污染系数; C_i 为沉积物中重金属 i 实测含量, mg·kg⁻¹; C_nⁱ 为重金属 i 的区域背景值, 在此次研究中采用吉林省土壤元素背景值. 单种重金属污染物潜在生态风险系数的计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

式中, T_rⁱ 为重金属 i 的毒性响应系数, 分别为: Cd = 30、Pb = Cu = Ni = 5、Zn = 1 和 Cr = 2, 总风险的计算公式为:

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_r^i = \sum T_r^i \times C_i / C_n^i$$

1.6 风险评价编码法(risk assessment code, RAC)

风险评价编码法基于重金属酸溶态的含量确定重金属的风险程度, 是目前较为常用的评判水体沉积物形态分级的重金属元素风险评价方法, 被广泛用于评价沉积物重金属的生物可利用度和生态风险^[15,18]. RAC 把以可交换态和碳酸盐结合态(F1)存在的重金属看作有效部分, 通过计算 F1 态重金属含量占沉积物重金属总量的比重来评价沉积物中重金属的生物可利用性, 从而评价其环境风险. F1 态占重金属总量比重越大, 说明其生物可利用性越高, 环境风险越大. RAC 风险等级标准如表 1.

表 1 地累积指数法、富集系数法、潜在生态危害指数及风险评价编码法分级标准

Table 1 Index of geoaccumulation, enrichment factor, potential ecological risk assessment index, and risk assessment code grading standards

地累积指数法		富集系数法		潜在生态危害指数法		风险评价编码法	
阈值区间	污染等级	阈值区间	污染等级	阈值区间	风险程度	阈值区间/%	风险程度
$I_{geo} \leq 0$	清洁	0 ~ 2	无 ~ 轻微污染	$E_r^i < 40$	轻微风险	0 ~ 1	无风险
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染	2 ~ 5	中度污染	$40 \leq E_r^i < 80$	中等风险	1 ~ 10	低风险
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染	5 ~ 20	重度污染	$80 \leq E_r^i < 160$	较强风险	20 ~ 30	中等风险
$2 < I_{geo} \leq 3$	偏重污染	20 ~ 40	显著污染	$160 \leq E_r^i < 320$	强风险	30 ~ 50	高风险
$3 < I_{geo} \leq 4$	重度污染			$E_r^i > 320$	极强风险	50 ~ 100	极高风险
$4 < I_{geo} \leq 5$	严重污染			$RI < 150$	低风险		
$I_{geo} > 5$	极重污染			$150 \leq RI < 300$	中等风险		
				$300 \leq RI < 600$	高风险		

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属总量分布特征

伊通河(城区段)沉积物中重金属含量不同程

度地超过土壤背景值(图 2 中红线为吉林省土壤背景值). 重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量范围分别为 0.10 ~ 1.18、23.57 ~ 66.35、11.27 ~ 43.95、10.78 ~ 29.82、15.02 ~ 60.81 和 54.27 ~ 175.83

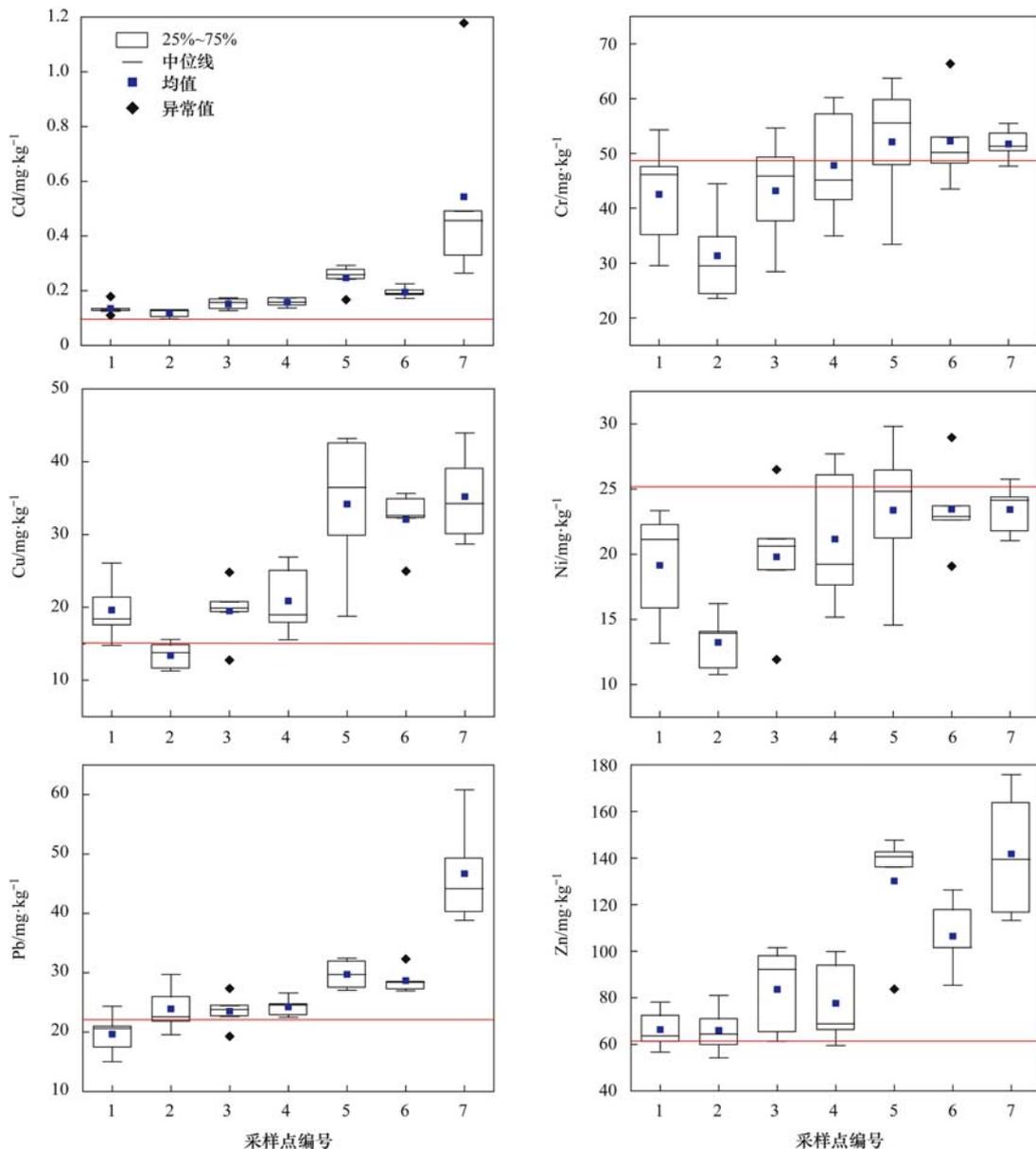


图 2 伊通河(城区段)沉积物重金属含量

Fig. 2 Content of heavy metals in sediments from the Yitong River city area

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 所有深度的含量均值分别为 0.221、45.84、24.98、20.51、28.06 和 96.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中, Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均值分别超过土壤背景值 133%、65%、27% 和 55%, 表明受到一定程度的人为污染^[19]. 从重金属含量分布看, 如图 2 所示, 其空间差异性较大, 下游含量明显高于上游. 重金属 Cd、Pb 和 Zn 含量随河流流向呈阶梯式上升, 在点位 5 或 7 处达到最大值. 重金属 Cr、Cu 和 Ni 呈现先下降后上升的趋势, 在点位 2 处达到极小值. Ni 含量空间变化较小且普遍低于背景值. 总体来说, 伊通河(城区段)中下游沉积物重金属含量明显高于上游, 且重金属含量随河流流向逐渐增大, 原因可能是伊通河越深入主城区, 受到人类活动影响越大.

2.2 沉积物重金属形态分布特征

伊通河(城区段)沉积物中不同的重金属其形态分布存在显著差异性. 如图 3 所示, Cd 主要以可

交换态和碳酸盐结合态(F1)与 Fe/Mn 氧化物结合态(F2)存在, 分别占总量的 42.1%~51.28% 和 18.10%~32.35% (质量分数, 下同). 特别是点位 7 的 6~8 cm 层 F1 态含量最高, 达到 0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超出背景值 1140%. Cr 主要以残渣态(F4)和有机物及硫化物结合态(F3)存在, 分别占总量的 63.54%~79.91% 和 15.35%~18.96%. Cu 和 Pb 主要以 Fe/Mn 氧化物结合态(F2)与残渣态(F4)存在, 分别占总量的 20.68%~32.74% 和 39.95%~63.08% (Cu), 31.26%~57.65% 和 29.64%~61.23% (Pb). Zn 主要以残渣态(F4)、可交换态和碳酸盐结合态(F1)及 Fe/Mn 氧化物结合态(F2)的形式存在, 分别占总量的 27.55%~57.55%、22.01%~37.9% 和 21.61%~32.21%. 其中 6~8 cm 层的 F1 和 F2 态含量最高, 含量均值分别达到 32.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 26.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ni 则在 4 态中均

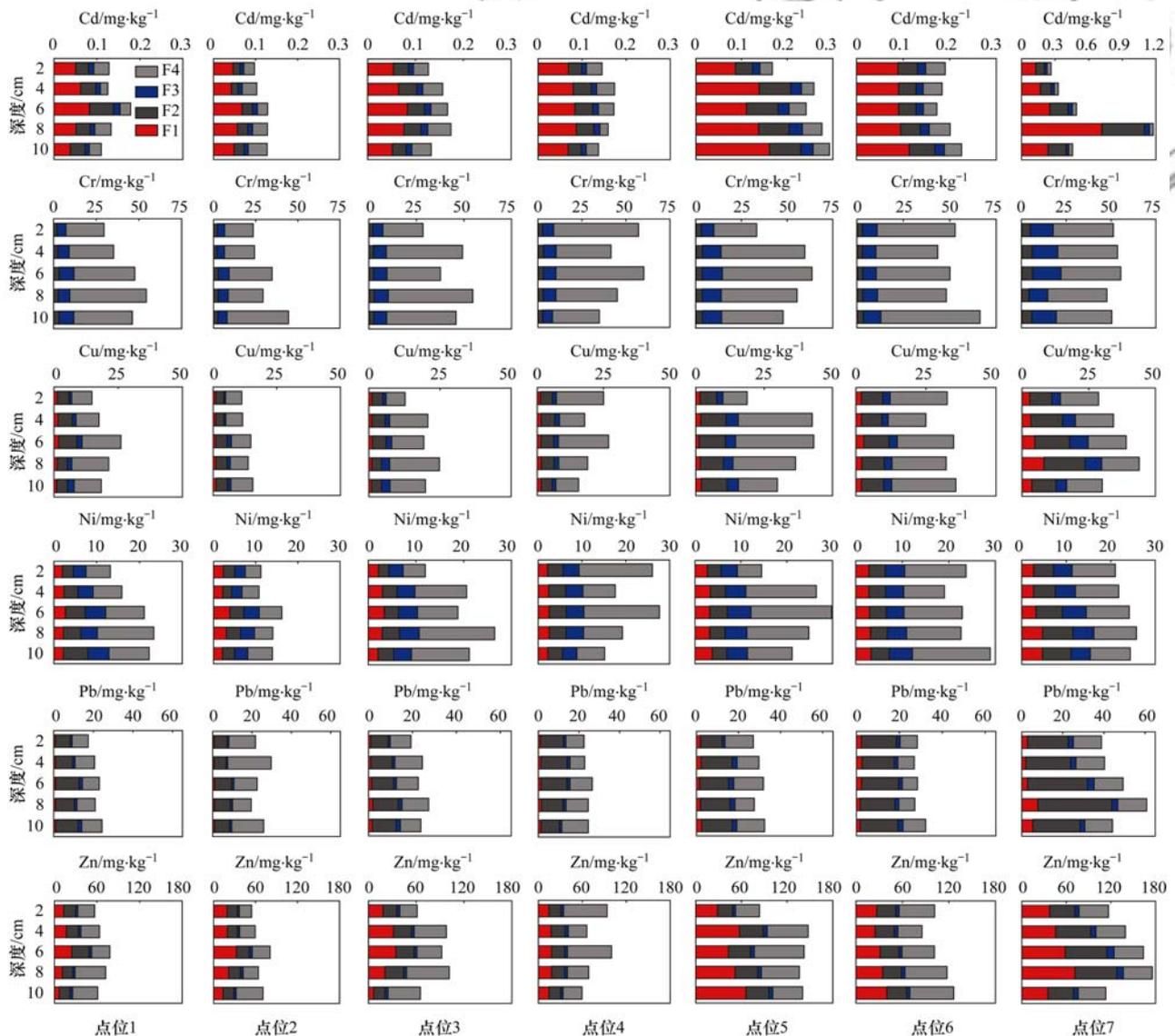


图3 伊通河(城区段)沉积物重金属元素形态分布特征

Fig. 3 Speciation of heavy metals in sediments from the Yitong River city area

有存在,其中 F4 态含量相对较高,均值为 $9.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量的 35.16%~53.75%;F1、F2 和 F3 态含量相近,分别占总量的 11.93%~20.38%、14.22%~22.33% 和 17.61%~22.80%。

重金属赋存形态的不同,其生物可利用性、迁移能力也不同^[20]。F1、F2 和 F3 态为次生相态,生物可利用性较强,对生态环境危害较大^[11]。其中 F1 态对环境变化极为敏感^[21],一般在偏酸性或中性条件下很容易释放出来^[22,23];F2 态一般以矿物的外囊物和细粉颗粒存在,专属吸附作用较强,在水体氧化还原电位降低或水体缺氧的条件下较容易被释放^[24];以 F3 态存在的重金属稳定性较高,一般只有在强氧化环境下才能被释放出来^[25];F4 态是赋存于原生矿及次生矿的矿物晶格中的重金属形态(原生相态),正常情况下很难被释放^[25]。故伊通河(城区段)沉积物中重金属 Cd 和 Zn 具有较高的生物可利用性和较强的迁移能力,对底栖环境威胁较大;Cu、Pb 和 Ni 存在一定程度的生物的可利用性,可能在外界理化条件改变的情况下释放出来对环境风险构成威胁;Cr 的生物可利用性和可迁移性很低。

从沉积物垂向变化来说,随着岩芯深度增加重金属含量呈现出先增加后降低的趋势,在 4~6 cm 和 6~8 cm 层达到含量最高值,这在位于铁北工业区且重金属含量最高的点位 7 表现得最为明显。利用刘小雪^[26]得出的松花江城区段沉积速率计算推测出 10 cm 深度大致对应的年代是 1997~1998 年,这与吉林产业结构演变特征一致,其在 1978~1998 年间第二产业比重持续下降,1999 年后开始回升^[27],所以 6~8 cm 层岩芯重金属含量较高可能由于在沉积过程中受纳较多的工业污水。而进入本世纪后,工业污水直排的现象得到改善,所以 6 cm 以上岩芯重金属含量特别是 F1 态含量逐渐降低。0~2 cm 岩芯的重金属含量主要体现出近年河流受城市面源污染及溢流污染的影响,可以发现其含量大部分均接近土壤背景值,表明长春管网改造取得了良好成效。

从空间变化来说,以 F1 态存在的重金属含量随河流流向明显增加,且在最下游(点位 7)达到最大,特别是重金属 Cd 含量的变化尤为明显。以 F1 态存在的重金属主要来自于人为活动^[28],这表明了伊通河(城区段)重金属主要来自于两岸,而非来自于上游的输入。0~2 cm 岩芯重金属含量可能更多地受污水溢流吐口的影响。其中,点位 1~3 附近无吐口,重金属含量均接近或低于背景值;点位 4~6 附近出现排污吐口,重金属含量逐渐增加;点位 7 附近存在 4 个吐口,重金属含量最高。

2.3 重金属污染程度分析

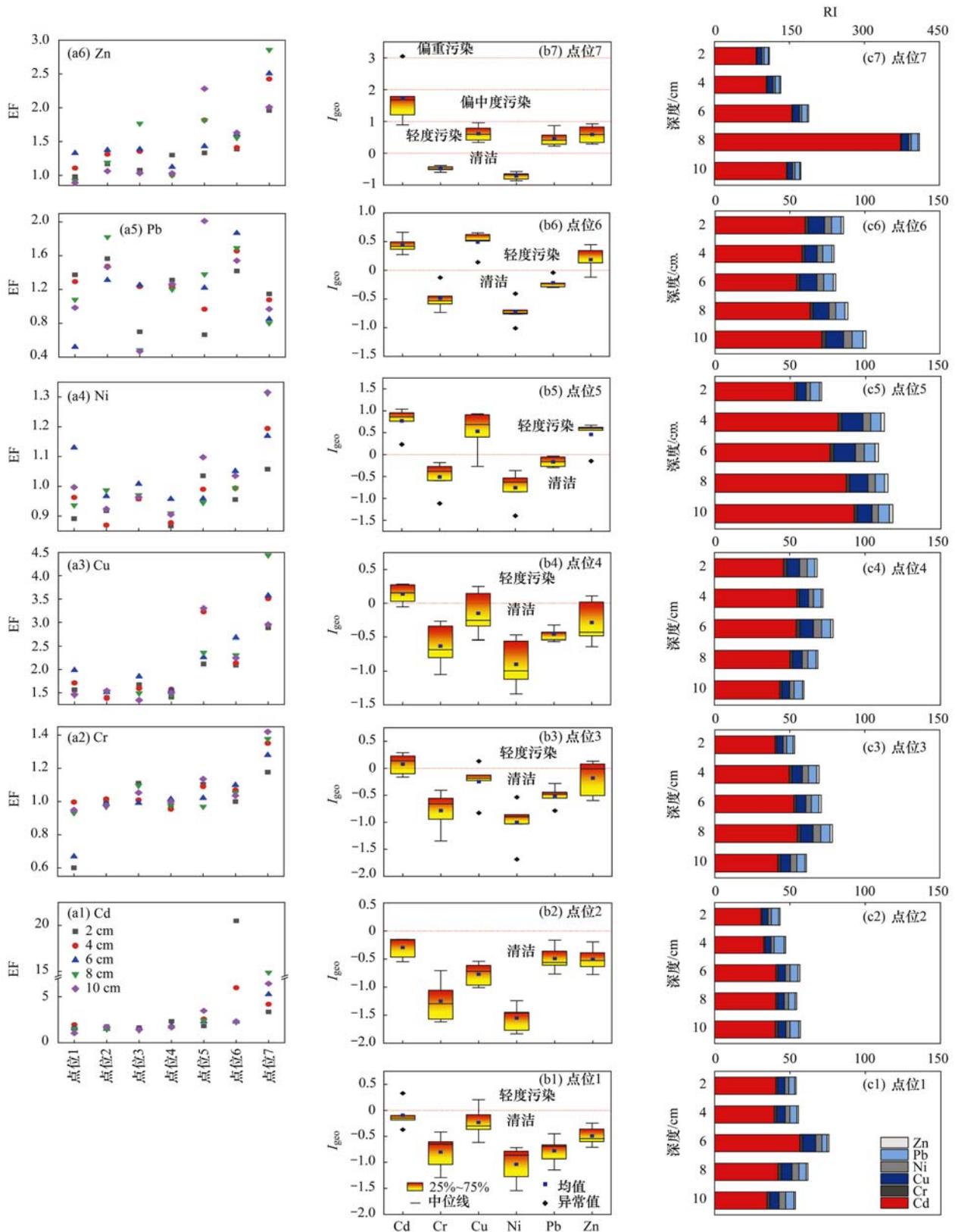
利用富集系数法对伊通河(城区段)沉积物中 6 种重金属元素进行污染程度分析,如图 4(a),可以发现重金属 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的 EF 值随着河流流向逐渐增大。其中,重金属 Cd 的 EF 值相对较高,明显受到了 Cd 污染;Cr 和 Ni 的 EF 值均低于 1.5,表明沉积物基本未受到 Cr 和 Ni 污染;Pb 的 EF 值基本在 0.5~2 之间,表明受到轻微的 Pb 污染;Cu 和 Zn 上下游的 EF 值相差较大,中上游受到轻微的 Cu 和 Zn 污染,而下游部分深度的 Cu 和 Zn 含量达到了中度污染水平。对比点位 1~4,点位 5~7 的污染程度明显上升。

利用地累积指数法对具体点位进行污染程度分析,如图 4(b),点位 1 和 2 的岩芯的 I_{geo} 值基本上都在 0 以下,表明点位 1 和 2 未受到重金属污染;对于点位 3 和 4,只有 Cd 元素的 I_{geo} 值其中位数和均值均大于 0,而其余元素 I_{geo} 值的中位数和均值均小于 0,表明点位 3 和 4 基本只受到轻度的 Cd 污染;对于点位 5 和 6,其 Cd、Cu 和 Zn 元素不同深度的 I_{geo} 值基本在 0~1 之间,而其余元素基本小于 0,表明点位 5 和 6 受到轻度的 Cd、Cu 和 Zn 污染;对于点位 7,则可以明显看出受到了偏中度的 Cd 污染及轻度的 Cu、Pb 和 Zn 污染。

综合上述 2 种方法可以发现,伊通河(城区段)沉积物按污染状况可以分为 4 段,以点位 1 和 2 代表的上游靠近南三环桥,再上游即为长春饮用水源地的新立城水库,水质较好,且两岸基本无排污吐口,故没有受到重金属污染;以点位 3 和 4 为代表的中上游逐渐进入主城区,只受到轻度的 Cd 污染;以点位 5 和 6 代表的中下游位于中心城区,受到轻度的 Cd、Cu 和 Zn 污染;以点位 7 为代表的下游则流入工业区,污染相对较重,受到偏中度的 Cd 污染及轻度的 Cu、Pb 和 Zn 污染。

2.4 重金属生态风险评价

基于重金属总量运用潜在生态危害指数法对伊通河(城区段)进行生态风险评价,如图 4(c)所示,Cd 为主要的生态风险因子,6 种重金属 E_i^p 值从大到小顺序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$ 。对于点位 1~6,其 RI 值均小于 120,表明其综合潜在生态风险低,但其 0~10 cm 深度 Cd 的 EI 均值达到 52.79,存在 Cd 污染风险。对于点位 7,RI 均值为 202.80,达到了中等生态风险水平,其中 Cd 的 EI 均值达到了 171.60,具有很强的生态风险。从沉积物垂向变化来说,4~8 cm 层生态风险相对较高,尤其是点位 7,其 6~8 cm 层 EI 值高达 372.06,具有极强的生态风险。



(a) 伊通河(城区段) 沉积物重金属富集系数(EF); (b) 伊通河(城区段) 沉积物重金属地累积指数(I_{geo});

(c) 伊通河(城区段) 沉积物潜在风险指数(RI)

图4 伊通河(城区段) 沉积物重金属污染程度和潜在生态风险评价

Fig. 4 Degree of pollution of heavy metals in sediments and potential ecological risk assessment of the Yitong River city area

平均地累积指数(mean Geo-accumulation index, mI_{geo})是某个点位所有单因子地累积指数之和,可以判断不同点位的重金属复合污染状态和风险水

平^[6]. 如图5(a), mI_{geo} 指数显示, 点位5和7达到轻度污染水平, 其余点位则基本无污染.

基于重金属形态采用风险评价编码法对伊通河

(城区段)进行生态风险评价,如图5(b)所示,Cd的F1态含量在40%以上,总体处于高风险状态,尤其是位于中下游的点位5和点位7,F1态含量高达51.28%、55.25%,处于极高风险水平;Zn的F1态含量在21.37%~37.90%之间,点位2、5和7达到高风险水平,其余点位为中等风险状态;Ni的F1态含量在11.03%~20.38%之间,处于中等风险状态;点位1~6 Cu的F1态含量在4.83%~7.41%之间,处于低风险状态,最下游点位7的Cu的F1态含量则为12.99%,处于中等风险水平;Pb的F1态含量在3.42%~8.82%之间,处于低风险状态。

综合上述3种风险评价方法进行讨论,伊通河(城区段)沉积物中重金属Cd含量较高且多为F1态,故面临较高的Cd污染风险;Zn含量平均超背景

值55%且F1态含量占比相对较高,但由于Zn的毒性响应系数为1,EI均值仅为1.55,远低于其他的重金属,所以存在一定程度的生态风险;Cu含量相对较高,平均超背景值64%,但其F1态含量占比相对较低,故其生态风险相对较小;Pb含量亦普遍超背景值,但其EI均值极低仅为6.33,且F1态含量占比极低,所以Pb生态风险很小;以RAC法判断Ni处于中等风险水平,但其总量较低,EI均值为4.01,所以其生态风险很小;Cr总量普遍低于背景值且F1态含量占比极低,所以基本不存在生态风险。从空间分布上讲,以点位5和7为代表的伊通河(城区段)中下游主要受到以Cd为主的生态风险。从沉积物垂向变化上讲,4~8 cm岩芯生态风险相对较高,首要风险因子亦是Cd元素。

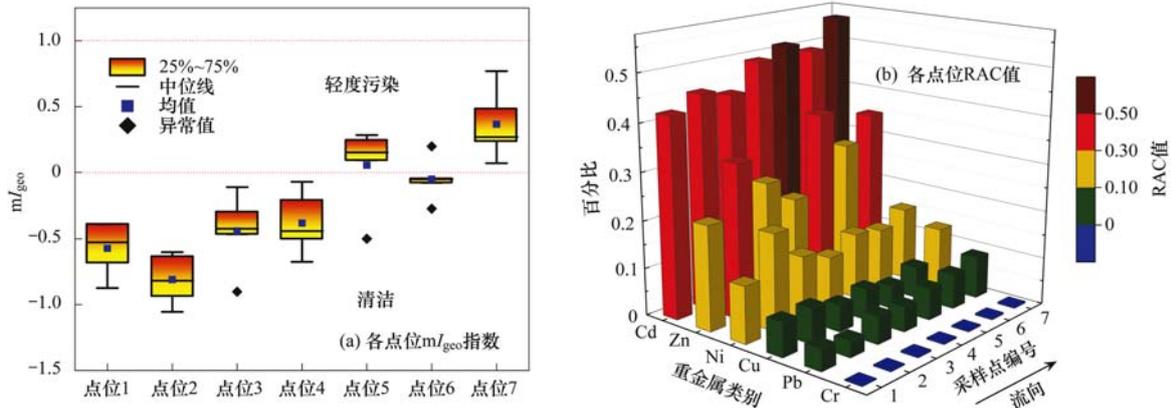


图5 伊通河(城区段)沉积物各点位风险评估

Fig. 5 Risk assessment at different sampling sites of the Yitong River city area

2.5 重金属污染来源分析

以F1、F2和F3态存在的重金属受人为因素影响较大,以F4态存在的重金属则更多地受到自然因素的影响^[28],有研究人员将各元素的富集系数与F1+F2+F3态及F4态含量作相关性分析可以推断受污染来源类型^[1,14]。如图6所示,Cd、Pb和Zn的可提取态(F1+F2+F3)的含量与富集系数呈明显相关性, R^2 分别为0.985、0.686和0.872,表明Cd、Pb和Zn主要可能来源于工业排放和城市活动的人为输入^[29]。Cu的可提取态含量、残渣态含量与富集系数都存在线性相关, R^2 分别为0.503和0.798,说明包括工业活动、城市污水在内的人为污染与岩石的自然风化、矿化均为伊通河(城区段)Cu污染的主要可能来源^[1,14]。Ni的残渣态含量与富集系数存在线性相关, R^2 为0.606,说明伊通河(城区段)重金属Ni主要来源于自然过程。相关性分析结果与单纯基于EF系数的来源判断^[3]基本一致。

对重金属含量进行主成分分析可以反映其相似的来源和迁移行为^[30]。首先对伊通河(城区段)6种

重金属元素(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)和Fe与Al的含量数据进行因子分析,结果显示各因子之间具有较强的相关性,进而通过主成分分析计算发现沉积物中8种重金属(8个变量)的全部信息可由2个主成分反映95.59%,即对这2个主成分进行分析已经能够反映全部数据的大部分信息。如图7所示,Fe和Al与点位1和4及点位2和3均在左半轴且呈正相关,说明点位1和4与点位2和3来源相近,且与Fe和Al元素来源相似,而Fe和Al为大量元素,其在河流沉积物中广泛而大量存在,其不易受人类活动影响可以看做自然源的代表元素^[31],故可以得出结论以点位1~4为代表的伊通河(城区段)中上游沉积物重金属含量更多地由自然因素所主导。点位5~7与Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn在右半轴呈正相关,表明以点位5~7为代表的伊通河(城区段)中下游更多受人为因素的影响,点位5~7位于长春城区北部,靠近老铁北-二道工业区,上世纪末至本世纪初曾大量存在冶金、化工、造纸、制革、纺织、印染和机械制造类企业^[32],故推测沉积物中Cd、Pb、Cu

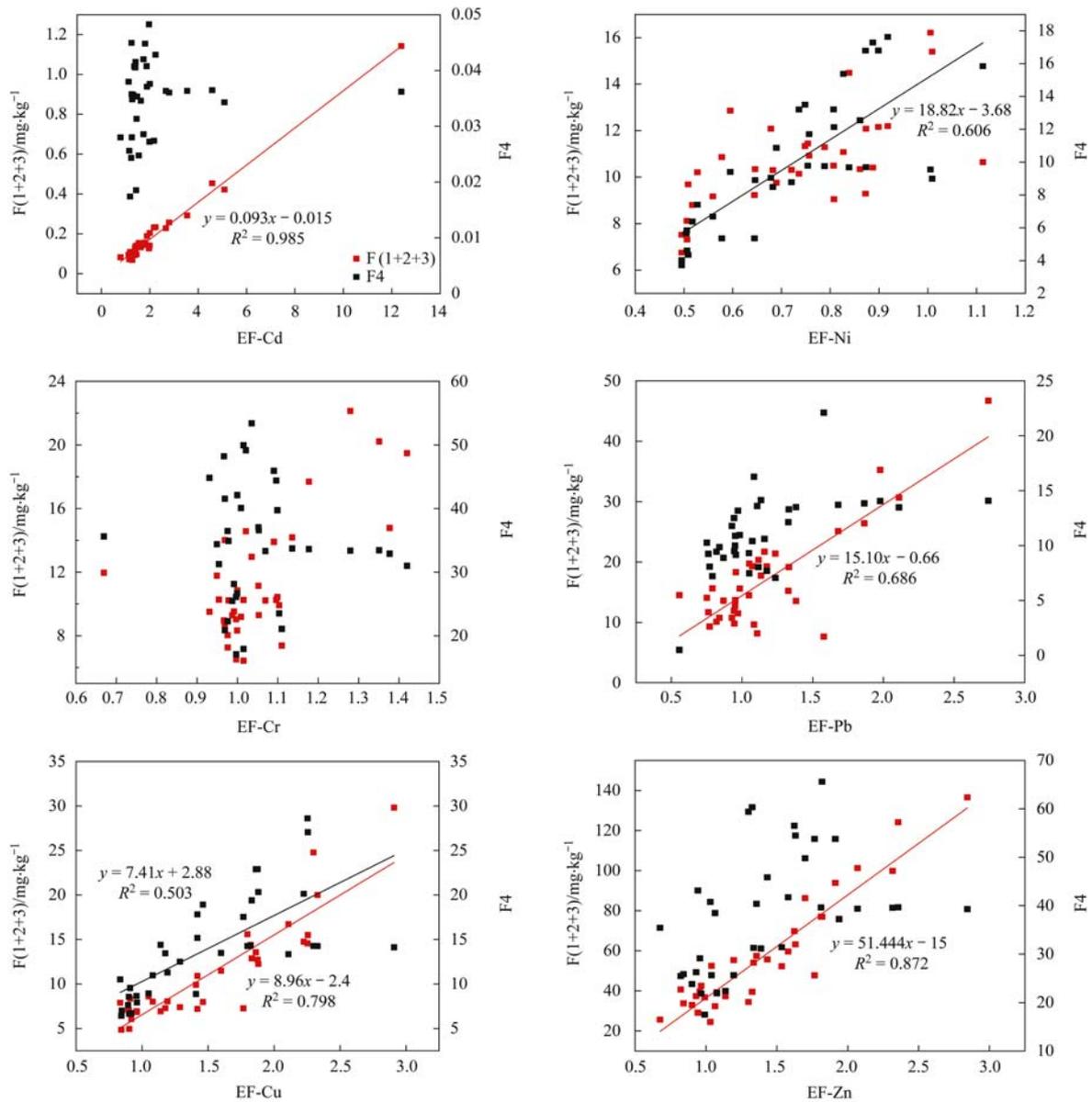


图 6 伊通河（城区段）沉积物重金属富集因子值及相关性

Fig. 6 Enrichment factor value and correlation in heavy metal of sediments from the Yitong River city area

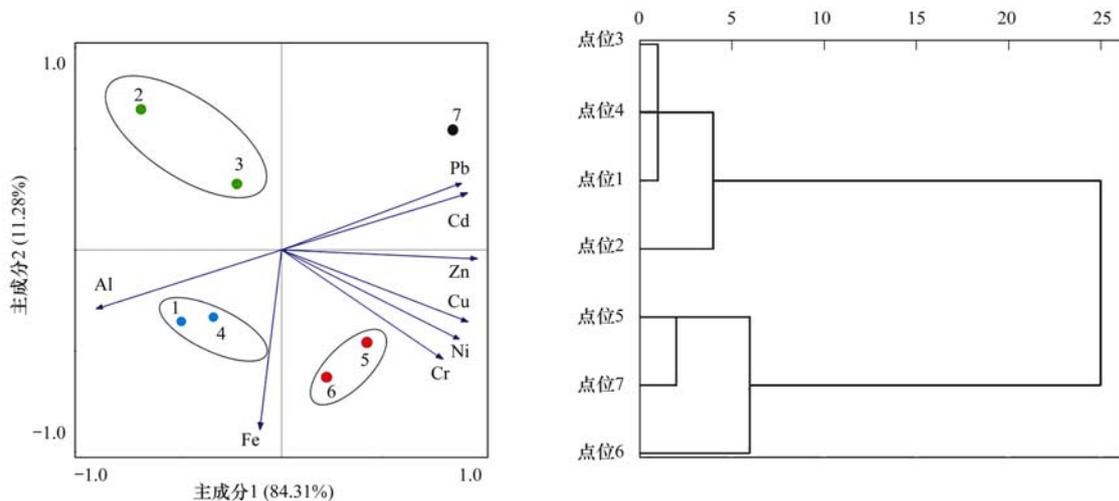


图 7 伊通河（城区段）沉积物重金属含量主成分分析及空间聚类

Fig. 7 Principal component analysis and spatial clustering analysis of heavy metals in sediments from the Yitong River city area

和 Zn 主要可能来源于这些产业^[33]。聚类分析常被用来研究沉积物中元素的来源及其空间变化规律^[30,33],如图7,将伊通河(城区段)6种重金属含量进行空间聚类,结果显示点位1~4为一类,该类点位基本不存在重金属污染或者污染较轻,点位5~7为一类,该类点位重金属污染相对较重,可能受到人为污染,这与主成分分析结果一致。

3 结论

(1)伊通河(城区段)沉积物重金属含量总体沿河流流向呈阶梯式增加,其中 Cd、Ni 和 Zn 的可提取态含量超过总量的 50%,有较高的二次释放风险。

(2)污染程度和风险评价结果分析显示 Cd 元素存在较高的生态风险,Cr 基本不存在风险;上游基本没有受到污染,生态风险很小,下游存在以 Cd 为首要因子的生态风险。

(3)伊通河(城区段)不同深度的岩芯重金属含量的变化体现出伊通河不同时期的主要污染源的变化,6~8 cm 层代表了工业废水和生活污水直排阶段,污染程度普遍较高。

(4)过去工业排污和城市污水对 Cd、Pb 和 Zn 的贡献最大,Cu 受人为和自然因素双重影响,岩石风化等自然因素则对 Cr 和 Ni 的贡献较多。

参考文献:

- [1] Gao L, Wang Z W, Li S H, *et al.* Bioavailability and toxicity of trace metals (Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) in sediment cores from the Shima River, South China[J]. *Chemosphere*, 2018, **192**: 31-42.
- [2] Abdollahi Z, Kaviani A, Sadeghi S H R, *et al.* Identifying environmental risk associated with anthropogenic activities in Zanjanrud River, Iran, using an integrated approach [J]. *CATENA*, 2019, **183**: 104156, doi: 10.1016/j.catena.2019.104156.
- [3] 张伯镇, 雷沛, 潘延安, 等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 2185-2192.
Zhang B Z, Lei P, Pan Y A, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments from the tributaries in the main urban districts, Chongqing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 2185-2192.
- [4] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 典型城市河流(凉水河)表层沉积物中重金属赋存形态特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3898-3905.
Tang W Z, Wang L S, Shan B Q, *et al.* Speciation distribution of heavy metals in the surface sediments of a typical urban river (Liangshui River System)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3898-3905.
- [5] Sun C Y, Zhang Z X, Cao H N, *et al.* Concentrations, speciation, and ecological risk of heavy metals in the sediment of the Songhua River in an urban area with petrochemical industries [J]. *Chemosphere*, 2019, **219**: 538-545.
- [6] Wang X X, Su P, Lin Q D, *et al.* Distribution, assessment and coupling relationship of heavy metals and macroinvertebrates in sediments of the Weihe River Basin[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **50**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101665.
- [7] 李佳璐, 姜霞, 王书航, 等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1207-1217.
Li J L, Jiang X, Wang S H, *et al.* Heavy metal in sediment of Danjiangkou Reservoir: chemical speciation and mobility [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1207-1217.
- [8] 郝立彦, 于洪利, 李丙瑞. 北方城市河流治理新模式[J]. *东北水利水电*, 2010, **28**(5): 23-24.
Hao L Y, Yu H L, Li B R. New treatment modes for urban river in northern cities [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2010, **28**(5): 23-24.
- [9] 董德明, 路永正, 李鱼, 等. 吉林省部分河流与湖泊表层沉积物中重金属的分布规律[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, **35**(1): 91-96.
Dong D M, Lu Y Z, Li Y, *et al.* The distribution of heavy metals in the surface sediments in parts of rivers and lakes in Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, **35**(1): 91-96.
- [10] 李忠平. 吉林省伊通河生态需水量计算及分析[J]. *长江科学院院报*, 2015, **32**(9): 37-41, 46.
Li Z P. Calculation and analysis of minimum ecological water demand of Yitong River in Jilin Province[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, **32**(9): 37-41, 46.
- [11] Davidson C M, Thomas R P, McVey S E, *et al.* Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1994, **291**(3): 277-286.
- [12] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Reconstruction of atmospheric trace metals pollution in Southwest China using sediments from a large and deep alpine lake: Historical trends, sources and sediment focusing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 331-341.
- [13] Yan G, Mao L C, Liu S X, *et al.* Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: a case study of two urban/rural roads [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 942-950.
- [14] Zhang C, Shan B Q, Tang W Z, *et al.* Heavy metal concentrations and speciation in riverine sediments and the risks posed in three urban belts in the Haihe Basin[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **139**: 263-271.
- [15] 臧飞, 王胜利, 南忠仁, 等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 497-506.
Zang F, Wang S L, Nan Z R, *et al.* Speciation Distribution and risk assessment of heavy metals in sediments in suburban outfall of industrial oasis region[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 497-506.
- [16] 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 等. 乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 691-701.
Yu Y, Lü Y N, Wang W J, *et al.* Spatio-temporal Distribution and risk assessment of heavy metals in middle and lower reaches of Le'an River[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 691-701.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [18] 张运, 许仕荣, 卢少勇. 新丰江水库表层沉积物重金属污染特征与评价[J]. *环境工程*, 2018, **36**(1): 134-141.
Zhang Y, Xu S Y, Lu S Y, *et al.* Pollution characteristics and

- assessment of heavy metals in the surface sediment of Xinfengjiang Reservoir[J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(1): 134-141.
- [19] 徐晨,王沛芳,陈娟,等. 望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4914-4923.
Xu C, Wang P F, Chen J, *et al.* Contaminant characteristics and ecological risk assessments of heavy metals from river networks in the western area of the Wangyu River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4914-4923.
- [20] 王书航,王雯雯,姜霞,等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Heavy metal speciation and stability in the sediment of Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [21] 陈春霄,姜霞,战玉柱,等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
Chen C X, Jiang X, Zhan Y Z, *et al.* Speciation distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [22] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [23] 周怀东,袁浩,王雨春,等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. *环境化学*, 2008, **27**(4): 515-519.
Zhou H D, Yuan H, Wang Y C, *et al.* The chemical speciation of heavy metals in sediments from Yangtze Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, **27**(4): 515-519.
- [24] 石一茜,赵旭,林军,等. 基于总量和形态的表层沉积物重金属污染及来源——以马鞍列岛海域为例[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1189-1198.
Shi Y Q, Zhao X, Lin J, *et al.* Contamination level and source determination of heavy metals in surface sediments from the Ma'an Archipelago based on the total content and speciation analysis [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1189-1198.
- [25] 包先明,晁建颖,尹洪斌. 太湖流域湖底泥重金属赋存特征及其生物有效性[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(5): 1010-1017.
Bao X M, Chao J Y, Yin H B. Occurrence characteristics and bioavailability of heavy metals in surface sediments of Lake Gehu, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(5): 1010-1017.
- [26] 刘小雪. 松花江干流沉积物中重金属和多环芳烃污染特征[D]. 长春: 吉林大学, 2016. 143.
- [27] 陈延斌,陈才. 改革开放以来吉林省产业结构演进特征分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, **27**(5): 55-59.
Chen Y B, Chen C. Characteristics of industrial structure evolution of Jilin Province since reform and opening up [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, **27**(5): 55-59.
- [28] 李小林,刘恩峰,于真真,等. 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 614-624.
Li X L, Liu E F, Yu Z Z, *et al.* Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 614-624.
- [29] 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.
- [30] Chai M W, Li R L, Ding H, *et al.* Occurrence and contamination of heavy metals in urban mangroves: a case study in Shenzhen, China [J]. *Chemosphere*, 2019, **219**: 165-173.
- [31] 盛维康,侯青叶,杨忠芳,等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2230-2240.
Sheng W K, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiang River [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- [32] 翟航. 长春市土壤重金属分布规律及土壤环境质量评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. 99.
- [33] 汪敬忠,刘卓,魏浩,等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 224-231.
Wang J Z, Liu Z, Wei H, *et al.* Spatial Characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 224-231.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)