

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
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	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

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

齐鹏, 余树全*, 张超, 梁立成, 车继鲁

(浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300)

摘要: 为了解永康市城区地表水沉积物中重金属的污染特征, 对永康市 122 个地表水表层沉积物中 Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb 和 Fe 共 10 种重金属含量进行分析, 解析重金属的来源并评价其潜在生态风险。结果表明, 10 种重金属的含量顺序为: Fe > Ti > Mn > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Co, 与金衢盆地土壤重金属元素背景值相比, 除 Ti 外, 其它 9 种重金属超标 1.17 ~ 3.78 倍; 大多数重金属之间存在极显著相关性, 说明大多数重金属之间存在相似污染来源, 主要为五金制造等工业污染和交通污染; 地积累指数评价结果显示, 沉积物中重金属的污染程度依次为: Cr > Zn > Ni > Cu > Fe > As > Pb > Mn > Ti, Cr、Zn、Cu 和 Ni 这 4 种元素部分样区达到中度污染或偏重污染; 9 种重金属潜在生态风险大小为: Cu > As > Ni > Cr > Pb > Co > Zn > Mn > Ti, Cu 和 As 对综合生态风险指数平均贡献分别是 22.84% 和 21.62%, 其他 7 种元素平均贡献合计 55.54%, 综合潜在生态风险指数(RI)中 89.34% 为低生态风险, 10.66% 为中等生态风险。综合以上分析, 永康市城区地表水沉积物重金属污染整体较轻, 局部污染严重。

关键词: 永康市; 地表水; 沉积物; 重金属; 生态风险评估

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4486-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.021

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang

QI Peng, YU Shu-quan*, ZHANG Chao, LIANG Li-cheng, CHE Ji-lu

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: In order to understand the pollution characteristics of heavy metals in surface water sediments of Yongkang, we analyzed the concentrations of 10 heavy metals including Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb and Fe in 122 sediment samples, explored the underlying source of heavy metals and then assessed the potential ecological risks of those metals by methods of the index of geo-accumulation and the potential ecological risk. The study results showed that: 10 heavy metal contents followed the order: Fe > Ti > Mn > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Co, all heavy metals except for Ti were 1.17 to 3.78 times higher than those of Zhejiang Jinhua-Quzhou basin natural soils background values; The concentrations of all heavy metals had a significantly correlation between each other, indicating that those heavy metals had similar sources of pollution, and it mainly came from industrial and vehicle pollutions; The pollution extent of heavy metals in sediments by geo-accumulation index (I_{geo}) followed the order: Cr > Zn > Ni > Cu > Fe > As > Pb > Mn > Ti, thereinto, Cr, Zn, Cu and Ni were moderately polluted or heavily polluted at some sampling sites; The potential ecological risk of 9 heavy metals in sediments were in the following order: Cu > As > Ni > Cr > Pb > Co > Zn > Mn > Ti, Cu and As contributed the most to the total potential ecological risk, accounting for 22.84% and 21.62%, others had a total of 55.54%, through the ecological risk assessment, 89.34% of the potential ecological risk indexes (RI) were low and 10.66% were higher. The contamination level of heavy metals in Yongkang was slight in total, but was heavy in local areas.

Key words: Yongkang City; surface water; sediments; heavy metal; ecological risk assessment

在城市经济快速发展和城市人口不断增加的背景下, 人类活动对城市环境质量的影响日益突出。工业布局的调整、用地功能的变迁以及历史遗留问题使现代城市面临多源污染威胁。重金属因其有毒性、持久性和生物富集效应等特点, 成为当今困扰城市环境与发展的最主要的环境污染源之一^[1~4]。沉积物是水体的重要组成部分, 具有水体重金属污染蓄积库与二次污染源的双重功能, 在水体重金属污染研究中起着重要作用^[5]。作为特殊的污染物载体, 沉积物中的有毒有害底泥物质严重破坏了底栖

水生生物的生境并打破了生境平衡, 底泥沉积物一般是重金属的“源”和“汇”, 因此开展沉积物中重金属元素的研究对保证水生生态系统的物质循环和能量流动正常运行具有重要的意义^[6~10]。

永康作为我国“五金城之都”, 其五金科技园是中国最大的五金专业市场, 主要有机械五金、装潢

收稿日期: 2015-05-18; 修订日期: 2015-07-04

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)

作者简介: 齐鹏(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: qipeng051624@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: yushuq@zafu.edu.cn

五金、工具五金等制造业。随着永康市工业生产和社会经济的快速增长,城市工业废水和生活污水排放量加剧,使得该区重金属富集程度较高,且部分地区重金属含量严重超标。近年来,许多学者对重金属污染开展了广泛研究,包括河流、湖泊、土壤等重金属研究^[11~13],到目前为止,对城区地表水重金属污染的研究还比较少^[14],并且尚未有针对永康市区域地表水沉积物进行研究。2013年初浙江省为保护水资源环境实现人水和谐相处提出“五水共治”,“治污水”是该项目的首要重点任务。为顺应这个大背景同时也为了使永康市的五金业发展环境与经济效益并存,客观地评价其地表水沉积物重金属环境质量是非常有必要的。

本研究以永康市城区地表水表层沉积物为研究对象,在分析钛(Ti)、铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、铅(Pb)和铁(Fe)这10种重金属元素含量的基础上,解析其污染来源,并采用地质累积指数法与潜在生态风险评估法对地表水沉积物中重金属污染现状进行评价,以期永康市城区地表水的安全利用及治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永康市隶属于浙江省地级市金华市,地处浙江省中部、金衢盆地东侧的低山丘陵区。地理坐标为北纬28°46′~29°07′,东经119°53′~120°21′,总面积1 049 km²,城区面积36.52 km²。该市共管辖11个镇,城区设东城、西城、江南这3个街道和两个区,永康经济开发区(即五金科技工业园区)和城西新区。作为中国最大的五金制造业生产基地,永康市五金企业近万家,五金工业产值占到全市工业总产值的90%以上,主要支柱产业有五金机械、防盗门、保温杯、建材等。在水源分布上永康市位于钱塘江上游、地处钱塘江和瓯江的分水岭,境内大小河流共680条,总长约1 120 km,全市流域面积大于10 km²的河道有李溪、南溪、北溪、华溪、东溪、酥溪和永康江等35条,其中流经城区的主要有永康江、南溪、北溪和华溪。据永康市2013年度环境质量公报显示,对3条主要河道南溪、华溪和永康江6个断面的地表水进行评价并按照环境保护功能区划分统计,全年监测中水质达到或优于Ⅲ类占25%,Ⅳ类占29.2%,Ⅴ类占16.7%,劣Ⅴ类占29.2%,2013年永康市各监测点地表水环境质量均未满足

功能要求^[15],目前严峻的水环境状况已对该市居民生产生活用水产生巨大影响。

1.2 样品采集和处理

样区设置在浙江省金华市永康市城区内,采样时间为2014年7月。根据研究区河流与池塘的分布情况及代表性原则,共布设122个采样点,采样点分布如图1所示。使用全球定位系统(GPS)确定采样点位置,利用ETC-300A手动土壤采样器采集河流和塘底的表层沉积物样品(0~10 cm)。样品采集完后立即放入聚乙烯袋中密封,编号、贴好标签后存入保温箱中。采样过程中记录所采样点的周边环境并拍照留档。将带回实验室的土壤去除石粒、死亡有机体和粗碎屑等杂物,经自然风干后研磨过100目筛,再次装入密封袋中,放入-20℃冰箱里留待实验室分析。

沉积物中重金属元素用德国牛津仪器公司生产的便携式X射线荧光光谱仪(型号为X-MET7000)采用X射线荧光光谱法测量,目前常见的土壤重金属检测手段有原子吸收光谱法(AAS)、原子荧光法(AFS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等,与之相比,X射线荧光光谱法具有分析迅速、样品前处理简单、可分析元素范围广以及较好的准确度和精密度等诸多优点^[16,17]。本研究测试于2014年9月在浙江农林大学生态学实验室完成。

1.3 数据处理

将实验所获得数据利用Excel进行统计处理,计算平均值($n=122$)、标准差(SD)、变异系数(CV)、地积累指数、潜在生态风险指数等。使用软件SPSS 17.1通过因子分析法研究沉积物中各重金属元素间的相关性进而确定研究区主要的重金属污染来源。利用ArcGIS 10.0软件,采用Kriging插值法获得研究区地表水沉积物重金属生态风险的等值线图。

1.4 沉积物重金属污染评价方法

1.4.1 地积累指数法

地积累指数也称Muller指数^[18],作为定量研究沉积物中重金属污染程度的参数,在结合了自然地质过程基础上,充分考虑了人为活动对重金属污染的影响。该方法能够直观反映区域内沉积物重金属的富集程度,并且对污染程度进行不同等级的划分,广泛应用于重金属污染的评价^[19]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \cdot B_i)] \quad (1)$$

式中, C_i 是沉积物中重金属元素*i*的实测含量, B_i 是重金属元素*i*的地球化学背景值, k 是代表各地岩

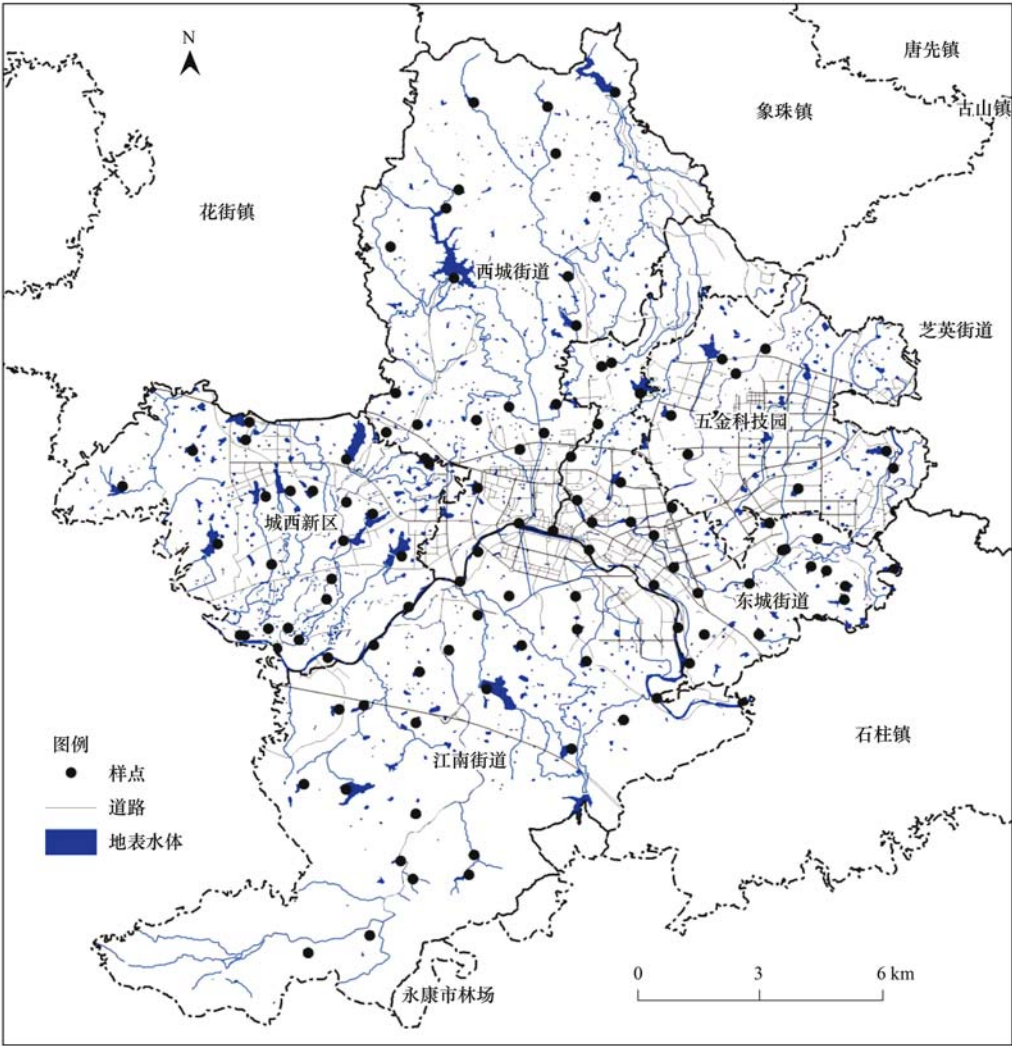


图1 研究区取样点分布
Fig. 1 Sampling points distributed in the study area

石背景值差异的常数(通常为 1.5). 由表 1 中全国、浙江省和金衢盆地土壤重金属含量可以看出, 研究区域不同, 背景值也会发生相应的变化, 本研究以金衢盆地土壤重金属的背景值为参考值^[20,21].

1.4.2 潜在生态风险指数法

1980 年瑞典学者 Håkanson 提出了潜在生态风险指数法, 用以评价重金属的污染程度^[22]. 该方法通过土壤重金属元素的背景值以及样品重金属元素含量, 计算不同重金属元素的毒性系数 (risk index, RI). 作为目前最常用的重金属污染危害评价方法^[23,24], 它具有元素丰富性、毒性响应性和水体敏感性的原则, 即元素种类数和总浓度、毒性较强的元素以及水体是否对重金属较为敏感是决定风险的关键^[25]. 排除区域间的差异以及异源污染的影响后对研究区多个重金属元素的潜在生态风险指数进行分级. 潜在生态风险指数

法的计算如下.

单项重金属元素污染系数 C_f^i :

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \tag{2}$$

单项重金属元素的潜在生态风险系数 E_f^i :

$$E_f^i = T_s^i \times C_f^i \tag{3}$$

沉积物中多项重金属元素综合潜在生态风险指数 RI:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_f^i \tag{4}$$

式中, C_f^i 是第 i 种重金属元素的污染系数; C_s^i 是沉积物中第 i 种重金属元素的实测含量; C_n^i 是第 i 种重金属元素的参照值; E_f^i 是第 i 种重金属元素的潜在生态风险系数; T_s^i 是第 i 种重金属元素的毒性响应系数; RI 是多个重金属元素的综合潜在生态风险指数. 沉积物中重金属元素的参比值地区差异性较强, 且不同参比值对计算结果影响较大, 根据采样

区地理位置与采样面积的大小选择金衢盆地土壤背景值作为参比值进行研究^[20,21]。Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 这 9 种重金属元素的毒性响应因子(T_s)分别为 1.0、2.0、1.0、5.0、5.0、5.0、1.0、10.0 和 5.0。

2 结果与讨论

2.1 重金属元素含量特征

永康市城区地表水沉积物重金属元素含量特征见表 1。Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb 和 Fe 这 10 种元素含量平均值分别为 4 617.85、154.76、555.96、10.17、31.39、50.55、236.52、10.39、44.93 和 33 947.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于目前没有相应的沉积物环境质量标准,因此以土壤的重金属含量背景值作比较。与金衢盆地土壤背景值相比,除 Ti 外其余元素含量超过背景值的 1.17~3.78 倍不等,其中 Cr、Cu、Zn 这 3 种元素含量分别达背景值的

3.41、2.86、3.78 倍。与全国土壤和浙江省土壤相比,10 种重金属元素含量也均超过背景值。将研究区沉积物重金属含量与土壤重金属含量作对比,Ti、Cr、Ni、Cu、Pb、Fe 这 6 种元素在沉积物中的含量均高于土壤^[11],这可能是由于这 6 种元素淋溶运移以及工厂排污造成。另外从总样点的超标比例来看,Cr 100% 超标,污染范围最大,而 Mn、Ni、Cu、Zn、As 和 Fe 的超标率也均超过 50%。

永康市城区内采样点间的重金属元素含量差别较大,变异系数(CV)能够反映不同样点间数据的离散程度,一般认为 $\text{CV}\leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < \text{CV} < 100\%$ 为中等变异性, $\text{CV}\geq 100\%$ 为强变异性^[24],分析所有样点数据,10 种重金属都有较强的变异性,Ti、Cr、Mn、Co、Ni、As、Pb 和 Fe 在各样点间呈现中等变异,Cu 和 Zn 则表现出强变异性。从研究区样点间数据的变异性可以看出,Cu 和 Zn 在部分样点内污染比较严重,明显为点源污染。

表 1 永康市地表水沉积物重金属含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistical parameters of heavy metals in surface water sediments of Yongkang City

项目指标	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Fe
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10 251.11	1 018.54	1 693.58	68.51	150.69	300.73	3 445.03	38.28	204.58	110 943.00
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2 292.42	70.78	31.37	0.95	12.58	2.86	33.14	1.31	11.22	11 721.00
均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 617.85	154.76	555.96	10.17	31.39	50.55	236.52	10.39	44.93	33 947.68
中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 464.86	127.04	458.86	6.98	23.59	20.44	92.12	9.26	33.18	30 104.00
标准差	1 141.42	102.37	341.18	9.81	21.12	46.14	183.44	6.33	37.20	18 407.87
变异系数/%	24.72	66.15	61.37	96.51	67.28	130.84	162.12	60.95	82.80	54.22
全国/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 300.00	65.00	600.00	13.00	26.00	24.00	68.00	10.00	23.00	29 400.00
浙江省/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 406.00	56.00	620.50	10.40	23.90	22.60	83.10	6.90	35.70	28 500.00
金衢盆地/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4 660.00	45.40	429.00	8.70	16.80	17.70	62.60	7.70	33.80	23 900.00
超过背景值的样点比例/%	36.89	100	57.38	36.07	87.70	57.38	79.51	70.49	30.33	77.05

2.2 重金属来源分析

沉积物中重金属的来源既与岩石和矿物等沉积母质有关,也与人类在生产生活过程中的排放有关^[26,27]。在一定区域内,沉积物中的重金属元素具有相对稳定性^[23],因此可以通过研究沉积物中重金属元素间的相关性,来反映沉积物中重金属元素的来源是否相同,相关性越大来源越相似^[28]。表 2 为 10 种重金属元素间的相关系数矩阵,Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 两两之间都具有极显著的相关性($P < 0.01$),其中 Cr、Ni、Cu、Zn 四者间的相关系数均大于 0.6;Ti 与 Co、As、Fe 之间具有极显著的相关性($P < 0.01$),与 Fe 相关系数最大(0.743);Mn 与 Pb 之间均具有极显著相关性($P < 0.01$),相关系数为 0.371;Ti 与 Mn、Pb 有显著相关性($P < 0.05$)。相关性分析表明研究区重金属元素大部分具有相似的来源。

采用主成分分析法进一步进行源解析,结果如图 2 所示,根据特征值 > 1 的原则提取了 3 个主成分(PC),PC1、PC2 与 PC3 的特征值分别为 3.76、2.60 和 1.11,方差贡献率为 37.57%、26.01% 和 11.07%,累计贡献达 74.62%。每个 PC 上载荷 ≥ 0.5 的土壤指标被分为 1 组,为避免变量在其他特征值 ≥ 1 的 PC 上产生信息丢失,将出现在两个 PC 上载荷高于 0.5 的变量归于变量间相关性较低的一组。Cr、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 在 PC1 上具有较高的载荷,Mn 同时在 PC3 上的载荷也较高,分析同一 PC 内各元素间的相关系数后将 Mn 放入第 3 组,其余元素为第 1 组。Cr、Ni 是不锈钢产业的主要化学元素,Cu 是五金主要元素(金、银、铜、铁、锡)之一,Zn 作为过渡金属最重要的用途是制造锌合金和作其他金属的保护层,Pb 则多来自于机动车的污染物排放^[29],所以 1 组内元素为工业污染和交通污

表 2 永康市地表水沉积物重金属含量相关系数矩阵¹⁾ (n = 122)

	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
Cr	-0.227 *								
Mn	-0.162	0.349 **							
Co	0.409 **	0.027	0.165						
Ni	-0.022	0.701 **	0.177	-0.119					
Cu	-0.127	0.684 **	0.449 **	0.059	0.612 **				
Zn	-0.188	0.639 **	0.474 **	-0.050	0.625 **	0.766 **			
As	0.412 **	0.024	-0.112	0.344 **	0.041	0.014	-0.108		
Pb	-0.204 *	0.371 **	0.441 **	-0.074	0.312 **	0.592 **	0.682 **	-0.267 **	
Fe	0.743 **	0.233 *	-0.043	0.518 **	0.248 *	0.128	0.000	0.599 **	-0.141

1) ** 表示 $P < 0.01$ 极显著; * 表示 $P < 0.05$ 显著

染. 2013 年永康市统计年鉴显示,Cu 材料同比增长 31.90%,钢材增加 21.20%,同时市内车辆近五年的增长率高达 33.10%^[30],因此工业和交通运输对其产生的污染是不可忽视的. 另外根据 2013 年污染源普查数据,永康市污染物排放主要有废水、化学需氧量(COD)排放量、工业固体废弃物、危险废物、生活垃圾以及农业固体废弃物,其中废水排放量、COD 排放量、烟粉尘排放量、工业固体废弃物作为重金属的主要来源排放量分别达到 2.39×10^7 、7 906、2 280.46、4 126 t^[30]. 在 PC2 上 Ti、Co、As、Fe 元素有着较高的载荷,根据相关系数较低原则将 Co 放入第 3 组. Ti、As、Fe 这 3 种元素化学性质都较为稳定,Ti 几乎存在于所有生物、岩石、水体及土壤中,且其均值没有超过土壤背景值,Fe 是地球化学循环主要元素^[31],所以 Ti 与 Fe 主要来自地球化学循环过程中的积累作用,As 元素主要来自农药和化肥的使用^[32],可以推测 2 组元素来源为元素长期的富集和农药、化肥污染. PC3 主要是 Mn 和 Co 元素,Co 在部分样点中含量略高于平均水平,

Mn 是冶金工业的重要元素,与 Fe 的合金常被作为钢铁生产过程中的去硫剂和去氧剂,推测 3 组元素的主要来源同样为工业污染.

2.3 重金属元素污染现状

对研究区地表水沉积物中各重金属元素的污染现状进行分析,根据公式(1)计算 10 种重金属元素的地积累指数(I_{geo}),以金衢盆地土壤重金属含量作为背景值,得到重金属 I_{geo} 及其污染分级(表 3). 从 10 种重金属元素的评价数据来看:Ti 在研究区内基本呈现无污染状态,总样点中 96.72% 为无污染,3.28% 为轻污染;Cr 在所有样点内均具有一定程度的污染,其中有 59.84% 的样点为轻污染,偏中度及中度污染的样点占 38.52%,1.64% 的样点达到偏重度污染;Mn 无污染、轻污染和偏中度污染水平的样点占所有样点的比例分别为 63.11%、34.43%、2.46%;Co 在总样点内有 76.23% 和 18.03% 比例的污染水平为无污染和轻污染,偏中度污染和重度污染仅占 5.74%;Ni 有 13.93% 的样点达到中度及偏中度污染,剩余样点中 53.28% 为无污染,32.79% 为轻污染;Cu 和 Zn 是研究区污染水平相对较高的元素,二者偏中度污染分别为 12.30% 和 14.75%,中度污染及以上分别占 14.75% 和 17.22%,其中 Zn 有 0.82% 为严重污染,说明有个别样点 Zn 污染严重超标,需要加以重视;As 在不同污染程度上的样点比例分配与 Mn 较为相似,4.10% 的样点达到偏中度污染,其余样点的 As 为无污染和轻污染;Pb 有 9.02% 的样点出现偏中度及中度污染,其余样点均为无污染和轻度污染;Fe 的污染程度较轻,基本为无污染,轻度污染样点有 21.31%,偏中度污染有 4.92%. 就不同种类重金属元素的 I_{geo} 而言,Cr 的平均 I_{geo} 最高(0.86),其次是 Zn(0.43),Co 最低(-0.68). 总体水平上看,10 种重金属元素的污染程度为:Cr > Zn > Ni > Cu >

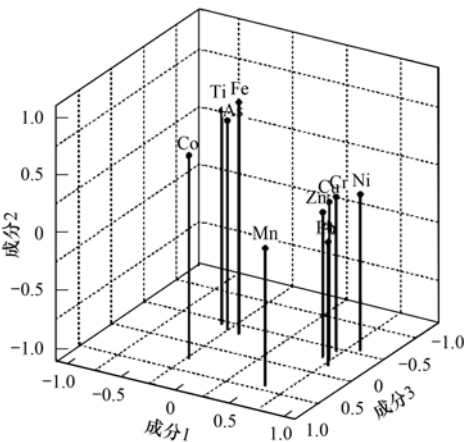


图 2 永康市河流沉积物重金属的因子载荷

Fig. 2 Factor loading of heavy metals in surface water sediments of Yongkang City

Fe > As > Pb > Mn > Ti > Co, 目前 Cr、Ni、Cu、Zn 为研究区的主要污染元素。

经采样过程中的实地调查,永康市自 2004 年起进行水环境的全面改造治理,在改造治理前永康市境内的主要河流普遍存在污染现象,除南溪水质较好达到Ⅲ类标准外,华溪和永康江水质均为劣Ⅴ类,全市水质面临由点源污染向面源污染发展、由河流支流向干流延伸、从城市向农村蔓延的危险。至

2010 年全市水环境质量得到较大改善,基本消除劣Ⅴ类水体,但大部分水体仍无法满足水质功能区要求。总体上看,目前研究区地表水沉积物的重金属污染呈现总体污染较轻个别元素污染严重的态势,说明重金属元素尚未对该区域水环境质量起到严重威胁,这有可能是由于近年内的水环境治理起到一定成效或区域内的人类活动暂时没有对沉积物重金属含量产生直接影响。

表 3 地表水沉积物重金属地积累指数评价结果

Table 3 Evaluation results of heavy metals in surface water sediments by index of geo-accumulation												
地积累指数	污染程度	污染等级	所占比例/%									
			Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Fe
$I_{geo} \leq 0$	无	0	96.72	0.00	63.11	76.23	53.28	57.38	51.64	64.75	74.59	73.77
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度	1	3.28	59.84	34.43	18.03	32.79	15.57	16.39	31.15	16.39	21.31
$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度	2	0.00	37.70	2.46	4.92	12.29	12.30	14.75	4.10	8.20	4.92
$2 < I_{geo} \leq 3$	中度	3	0.00	0.82	0.00	0.82	1.64	9.01	13.12	0.00	0.82	0.00
$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重度	4	0.00	1.64	0.00	0.00	0.00	5.74	3.28	0.00	0.00	0.00
$4 < I_{geo} \leq 5$	重度	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{geo} > 5$	严重	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00
平均 I_{geo}	—	—	-0.52	0.86	-0.43	-0.68	0.09	0.03	0.43	-0.34	-0.41	-0.18

2.4 重金属元素的潜在生态风险评价

依据金衢盆地的土壤重金属背景值,按照式(2)、(3)和(4)计算研究区 9 种地表水沉积物重金属的综合生态风险指数(RI)和潜在生态风险系数(E_i^p),对其潜在生态危害性进行说明。如图 3 所示,Cu 和 As 是 9 种重金属元素中最主要的生态风险贡献因子,平均贡献分别为 22.84% 和 21.62%,其他 7 种元素贡献相对较低,合计为 55.54%。表 4 为研究

区 9 种重金属元素潜在风险评价结果,由综合生态风险指数可以看出 89.34% 的取样点具有低等级生态风险,10.66% 为中等级生态风险,整体表现为低等级风险。根据 122 个采样点重金属的平均潜在生态风险系数值,永康市 9 种重金属平均潜在生态风险程度大小顺序为:Cu > As > Ni > Cr > Pb > Co > Zn > Mn > Ti。Ti、Mn、Co 和 Pb 其所取样点潜在生态风险系数(E_i^p)均小于 40,表现为低生态风险,说明这 4 种元素对研究区的生态环境有较小的潜在危害。Cr、Ni、Zn 和 As 其取样点中 99.18% 的潜在生态风险系数(E_i^p)小于 40,只有 0.82% 的取样点潜在生态风险系数(E_i^p)达到中等生态风险,说明它们的潜在危害处于轻微水平。Cu 元素有 9.02% 潜在生态风险系数(E_i^p)为中等生态风险,0.82% 的潜在生态风险系数(E_i^p)为强生态风险,说明 Cu 是该研究区最应引起注意的重金属元素。从空间分布上进一步了解永康市城区地表水沉积物的重金属生态风险(图 4),处于东部的五金科技园区以及城区中部的表层沉积物重金属有较高的生态风险,这是由于受到五金企业分布的影响,因此今后这两大潜在生态风险区应是该市重点防治的重金属污染区域。

重金属的潜在生态风险是由其毒性系数和累积量共同决定,因此元素累积量与潜在生态风险略有不同。通过对表 1、表 3、表 4 的对比分析,不难看出:永康市地表水沉积物重金属的含量分布、污染

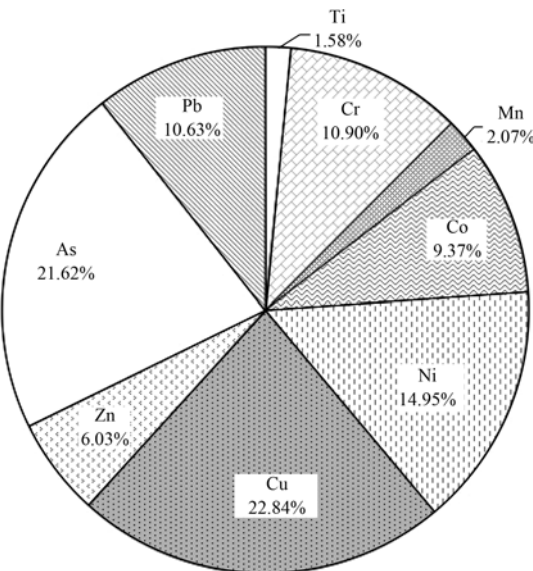


图 3 不同重金属对沉积物潜在生态风险指数的贡献
Fig. 3 Contribution of different heavy metals to potential ecological risk indices

现状分析与潜在生态风险评价整体上具有较好的一致性,这同时反映出该区重金属污染主要来自工业废弃物的排放. 重金属作为重要的工业有毒有害物质,在沉积物中积累后难以降解且容易引起“二次污染”,其污染不容忽视. 因此在今后该区的区域经济发展与环境容量相协调适应的过程中,在加大政府监管力度的基础上,注重节约用水,优化配置环境水资源,鼓

励企业使用清洁生产技术以及节能技术,并尽可能地实现废水资源化处理,同时因地制宜地建设污水处理设施. 本研究结合多种方法评价了研究区地表水的重金属污染状况,是对该区域环境质量数据应有的补充. 研究主要围绕重金属元素开展,但根据水污染现状与重金属元素的污染现状分析,其他水体污染指标的研究是今后的重要工作方向.

表 4 地表水沉积物重金属的潜在生态风险评价

Table 4 Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface water sediments													
综合风险指数 (RI)	生态风险	所占比例 /%	生态风险系数 (E_i^r)	生态风险	所占比例/%								
					Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
<110	低	89.34	<40	低	1.00	99.18	1.00	1.00	99.18	90.16	99.18	99.18	1.00
110~220	中	10.66	40~80	中	0.00	0.82	0.00	0.00	0.82	9.02	0.82	0.82	0.00
220~440	强	—	80~160	强	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00
≥440	极强	—	160~320	很强	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			320	极强	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

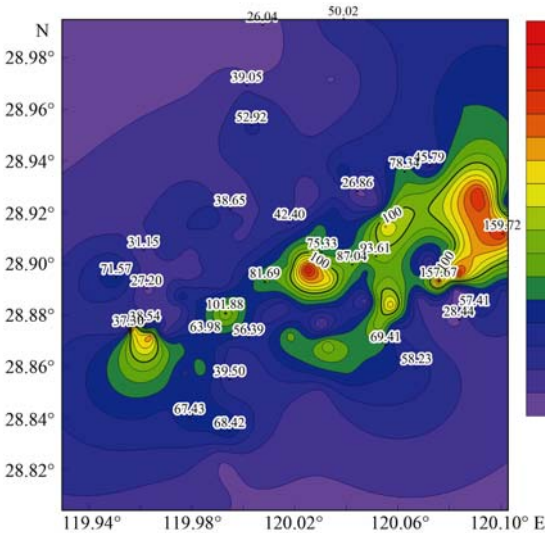


图 4 地表水沉积物重金属生态风险分布

Fig. 4 Distribution characteristics of heavy metals' RI in surface water sediments

3 结论

- (1)永康市城区地表水沉积物中 Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb 和 Fe 这 10 种重金属元素除 Ti 外其余元素含量均超过金衢盆地土壤背景值,其中 Cr、Cu、Zn 超标最严重,Cr 污染范围最广.
- (2)来源分析表明,研究区地表水沉积物中多数重金属元素具有相似来源,最主要来源为工业污染和交通污染,其中五金生产造成的污染比较突出,另外农药、化肥的使用和地球化学循环过程中的积累作用也是该区重金属元素富集的主要原因.
- (3)沉积物中重金属元素的污染现状及潜在生态风险评价结果显示,沉积物中重金属的污染程度

由大到小为:Cr>Zn>Ni>Cu>Fe>As>Pb>Mn>Ti, Cr、Zn、Cu 和 Ni 这 4 种元素部分样区达到中度污染或偏重污染,9 种重金属元素的生态风险顺序为:Cu>As>Ni>Cr>Pb>Co>Zn>Mn>Ti,所采沉积物样品中有 89.34% 的取样点为低等生态风险,剩余样点为中等生态风险.

参考文献:

[1] 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.

[2] 张雁生,侯诗宝,杜晶晶,等. 河流沉积物重金属研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(4): 630-633.

[3] Hossain M A, Ali N M, Islam M S, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soils of Gebeng industrial city, Malaysia [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(1): 115-126.

[4] Soriano A, Pallarés S, Pardo F, *et al.* Deposition of heavy metals from particulate settleable matter in soils of an industrialised area [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 113: 36-44.

[5] 冯精兰,胡鹏转,刘群,等. 黄河中下游干流沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J]. 环境化学, 2015, 34(1): 178-185.

[6] 尚林源,孙然好,王赵明,等. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 606-611.

[7] Fernández-cadena J C, Andrade S, Silva-coello C L, *et al.* Heavy metal concentration in mangrove surface sediments from the north-west coast of south America[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 82(1-2): 221-226.

[8] Song Y, Choi M S, Lee J Y, *et al.* Regional background concentrations of heavy metals (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb) in coastal sediments of the south sea of Korea[J]. Science of the Total Environment, 2014, 482-483: 80-91.

- [9] Salem Z B, Capelli N, Laffray X, *et al.* Seasonal variation of heavy metals in water, sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etueffont, France) [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **69**: 25-37.
- [10] 刘伟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 538-543.
- [11] 段慧敏, 朱丽东, 李凤全, 等. 浙江省永康城市土壤重金属元素富集特征[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(4): 956-961.
- [12] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 147-153.
- [13] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 490-496.
- [14] 严长安, 崔小丽, 王建, 等. 扬州市城区地表水底泥重金属污染现状与风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(8): 50-54.
- [15] 永康市环境保护局. 永康市 2013 年度环境质量公报[EB/OL]. <http://www.zjykepb.gov.cn>.
- [16] 陆安祥, 王纪华, 潘立刚, 等. 便携式 X 射线荧光光谱测定土壤中 Cr, Cu, Zn, Pb 和 As 的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(10): 2848-2852.
- [17] 冉景, 王德建, 王灿, 等. 便携式 X 射线荧光光谱法与原子吸收/原子荧光法测定土壤重金属的对比研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(11): 3113-3118.
- [18] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [19] 成刚, 张远, 高宏, 等. 白龟山水库规划区污染特征及潜在生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(4): 452-458.
- [20] 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征[J]. *物探与化探*, 2009, **33**(2): 132-134.
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] 叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1333-1339.
- [24] Bastami K D, Bagheri H, Kheirabadi V, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81**(1): 262-267.
- [25] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [26] Brady J P, Ayoko G A, Martens W N, *et al.* Enrichment, distribution and sources of heavy metals in the sediments of Deception bay, Queensland, Australia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81**(1): 248-255.
- [27] Pekey H, Doğan G. Application of positive matrix factorisation for the source apportionment of heavy metals in sediments; A comparison with a previous factor analysis study [J]. *Microchemical Journal*, 2013, **106**: 233-237.
- [28] 程芳, 程金平, 桑恒春, 等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1062-1066.
- [29] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [30] 永康市统计局. 永康市 14 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. http://www.yktj.gov.cn/tjgb/yktjgb/201504/t20150414_46452.shtml, 2014.
- [31] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 123-126.
- [32] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. *国外医学地理分册*, 2003, **24**(4): 173-175.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行