

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升钕压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价

张倩¹, 陈宗娟^{1,2}, 彭昌盛³, 李发生¹, 谷庆宝^{1*}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266003)

摘要: 在前期调研与野外调查的基础上, 在天津大港工业区周边采集 128 个表层土壤样品, 测试和分析了其中 10 种重金属 (As、Cd、Cr、Co、Cu、Pb、Ni、V、Zn 和 Hg) 的含量, 分别利用地累积指数法和地统计方法研究了重金属的污染程度和空间分布特征, 并对土壤重金属的潜在生态风险进行了评价, 最后对重金属的来源进行了分析。结果表明, 该研究区 As、Cd 和 Co 超过天津背景值的比例最大, 分别为 100%、97.66% 和 96.88%; 各种重金属的含量与 2004 年相比有一定程度的升高, 以 Cd 和 As 的污染情况最严重, 其余重金属多为中度及以下污染水平。不同用地类型中重金属的生态风险存在较大差异, 西南部农业用地或与工业用地周边区域表层土壤存在较高的生态风险, 综合生态危害指数最大可达 1 437.37。相关性分析和主成分分析的结果表明, 交通运输和农业生产可能是该研究区重金属的主要污染源, 周边的工业活动对区域内重金属的累积可能也有一定影响。

关键词: 工业区; 重金属; 生态风险评价; 土壤; 地累积指数

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4232-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.039

Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment

ZHANG Qian¹, CHEN Zong-juan^{1,2}, PENG Chang-sheng³, LI Fa-sheng¹, GU Qing-bao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Based on previous studies and field investigation of Dagang industry area in Tianjin, a total of 128 topsoil samples were collected, and contents of 10 heavy metals (As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, V, Zn and Hg) were determined. The geoaccumulation index and geostatistics were applied to examine the degree of contamination and spatial distribution of heavy metals in topsoil. The assessment on ecological risk of heavy metals was carried out using Hakanson's method, and the main resources of the heavy metals were analyzed as well. It was found that As, Cd and Co had the highest proportions exceeding Tianjin background value, which were 100%, 97.66% and 96.88%, respectively; the heavy-metal content increased to some extent comparing with that in 2004, and the pollutions of As and Cd were the worst, and other metals were at moderate pollution level or below. The ecological risks of heavy metals were different in topsoil with different land use types, the farmland soil in the southwest as well as soils adjacent to the industrial land were at relatively high potential ecological risk level, and the integrated ecological risk index reached up to 1 437.37. Analysis of correlation and principal component showed that traffic and transportation as well as agricultural activities might be the main resources of heavy metals in the area, besides, the industrial activities in the region might also affect the accumulation of heavy metals.

Key words: industry area; heavy metals; ecological risk assessment; soil; geoaccumulation index

近年来,随着工业化的不断加剧和城市的日益扩张,工业废弃物排放和人为活动的增多导致城市土壤中重金属的污染日趋严重^[1]。由于重金属通常具有持久性、累积性和循环性的特点,并可通过各种途径对生态环境和人体健康造成一定风险^[2],因此受到了国内外学者的广泛关注^[3,4]。城市土壤重金属的来源较为复杂,工业和能源生产、汽车尾气、废物处理、污水灌溉以及煤和燃料的燃烧等人类活动均可能导致土壤中重金属的增加^[5]。功能区划和土地利用方式的不同,使得不同城市中土壤重金属的空间分布和时间累积特征存在较大差异^[6,7]。目

前关于大中城市中重金属的研究已取得了一定成效,许多学者利用主成分分析和聚类分析的方法来确定土壤或其他介质中重金属的来源^[8],并采用地理信息系统(geographical information system, GIS)或不同插值方法等来研究土壤中重金属的空间分布特征^[9]。由于国内工业化区域规模和范围的不断扩大,工业区周边常分布着农田以及与之相匹配的居

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309032)

作者简介: 张倩(1984~),女,硕士,工程师,主要研究方向为土壤污染与控制, E-mail: zhangqian@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: guqb@craes.org.cn

住区,多重污染源的共同作用导致土壤中重金属的分布和来源较为复杂,因此有必要针对工业区及周边多种用地类型中的重金属开展研究.

天津作为中国北方的经济中心和沿海开放城市之一,工业基础雄厚,区内还有长达几十年的农业污灌区^[10],加之近年来其工业、农业及建筑业等迅猛发展,众多因素综合作用影响了天津地区土壤重金属的含量,从而通过植物富集和生物链的传递对人体健康及生态环境造成重大影响^[11]. 目前针对天津地区的重金属污染研究主要集中在污灌区、城市道路或沉积物中^[12,13],或分析某一种重金属的污染情况等. 本文以天津大港工业区为研究对象,分析了研究区土壤中 10 种重金属的含量和污染状况,分别利用地累积指数法和潜在生态危害指数法评价了当地土壤重金属的污染程度和生态风险水平,同时利用主成分分析对各种重金属的可能来源进行讨论,以期工业城市不同用地类型中土壤环境的污染预防、风险控制和管理提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该研究区位于天津市东南部(东经 117°07′~117°35′,北纬 38°34′~38°57′),濒临渤海湾,区内以平原为主,地势平坦,平均海拔 3 m. 该研究区东部主要为滩涂,中部有面积为 22 万亩的大港水库,西部和西南部为农田. 气候上属于北半球暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 11.9℃,年平均降水量 561.5 mm. 土壤类型以潮土、盐化潮土为主,经检测该研究区土壤 pH 平均值约为 8.8,最高值可达 9.64. 该研究区是全国正在建设中的四大石化基地之一,工矿企业以石油和石油化工为主要产业,金属制品与冶炼业、机械加工、橡胶制品业、装备制造制造业同步发展. 城郊型农业发展较快,现有耕

地近 20 万亩,主要种植小麦、玉米、水稻和棉花等农作物. 按照研究区目前的用地类型,将其分为农业用地、居住用地和工业用地(见图 1).

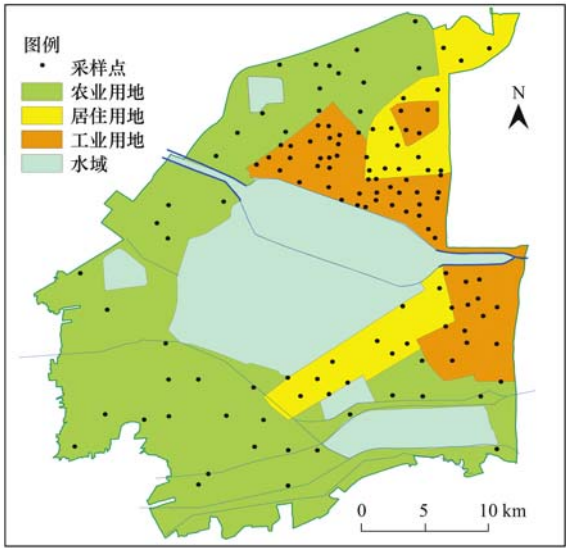


图 1 大港工业区土地利用现状

Fig. 1 Current land use situation of Dagang Industrial Area

1.2 样品采集及检测

土壤样品于 2013 年年底采自天津市大港区的表层土壤,采集深度为 0~20 cm. 采样点位分布在道路、农田、住宅及工业区内人为扰动相对较少的地块. 按照以工业区为中心,网格布点与重点区域加密布点相结合的方法,平均距离 2~5 km 布设一个点位. 将土壤样品中的碎石、根系等杂质去除后,低温储存,以备检测. 土壤样品各种重金属含量 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{V})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 参照美国国家环保署 USEPA 6010C 方法进行分析测定, $\omega(\text{Hg})$ 参照 USEPA 7470A 方法进行分析测定^[14]. 采样点位利用 GPS 进行精确定位,并进行空间分析. 试验过程中需要进行质量控制,检出限和精密度如表 1 所示.

表 1 土壤重金属元素分析检出限和精密度

Table 1 Detection limits and precision of heavy metals in soils

重金属	As	Cd	Cr	Co	Cu	Pb	Ni	V	Zn	Hg
检出限/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1	0.05	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05
精密度/%	7.13	10.2	2.96	2.03	3.93	4.73	3.87	2.37	5.77	1.01

1.3 地累积指数评价方法

地累积指数法^[15](index of geoaccumulation, I_{geo})是由德国学者 Müller 提出的一种反映沉积物中重金属污染程度的定量方法,后被广泛应用^[16]. 其计算方法为:

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

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 为沉积物中第 n 种元素的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_n 为第 n 种元素的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 常数 k 是考虑到造岩运动可能引起的背景值变动而取的系数,此处取 1^[17]. 根据 I_{geo} 的计算

结果,重金属的污染程度共分为 7 级(表 2).

1.4 潜在生态风险评价方法

潜在生态危害指数法 (potential ecological risk index) 由瑞典学者 Hakanson 最早提出,后被广泛用于评价底泥和土壤中污染物的生态风险^[18]. 使用 Hakanson 潜在生态危害指数法对土壤中 As、Cd、Cr、Co、Cu、Pb、Ni、V、Zn 和 Hg 这 10 种重金属污染的生态环境风险进行综合评价,其计算公式如下:

$$\begin{aligned} RI &= \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \right) \end{aligned}$$

式中,RI 为综合生态风险指数(区域多因子生态风险指数), E_r^i 为单污染物潜在生态风险指数, T_r^i 为单

个污染物的毒性响应参数, C_r^i 为某一金属的污染指数, C_i 为土壤中污染物的实测参数, C_n^i 为某污染物参比值,本研究以天津市背景值为评价标准^[19]. 由于考虑了重金属生物毒性的影响,潜在生态风险评价方法的评价结果较为全面和准确^[17],因此本研究参照徐争启等^[20]的研究成果,将涉及重金属的毒性响应系数分别定为 $Zn = 1$, $V = Cr = 2$, $Cu = Ni = Co = Pb = 5$, $As = 10$, $Cd = 30$, $Hg = 40$. 根据 C_r^i 、 E_r^i 和 RI 的分级标准分别来评价单污染物污染程度、单个污染物生态风险程度和总的综合生态风险程度. 鉴于文献^[18,21]中多只涉及 7 种重金属,而该研究区调研了 10 种重金属,故笔者通过调研和分析将综合生态风险的分级标准进行了相应调整^[22],分级情况如表 3 所示.

表 2 地累积指数(I_{geo})与污染程度分级

Table 2 Classification of geoaccumulation index and the pollution degree

级数	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
污染程度	无	无-中度	中度	中-重度	重度	重-严重	严重

表 3 重金属 E_r^i 和 RI 分级表

Table 3 Classification of E_r^i and RI of heavy metals

项目	危害程度				
	低度	中等	较重	重度	严重
E_r^i	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	< 180	180 ~ 360	360 ~ 720	≥ 720	

1.5 空间及数据分析方法

利用 ArcGIS 软件对天津大港区的图形进行处理,根据实际情况将该研究区土地利用类型分为三类(农业用地、居住用地和工业用地),并在研究区中标注采样点位. 结合 Kriging 方法对区内重金属的生态风险进行插值,以显示其空间分布特征. 采用 Excel 2010 和 Spss 20.0 统计软件对相关数据进行处理和统计分析,运用相关性分析和主成分分析法对重金属的可能来源进行解析.

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属的含量分布及富集情况

对天津大港区不同用地类型 128 个采样点的土壤样品进行测试,重金属含量的分析结果见表 4. 10 种重金属中, $\omega(As)$ 、 $\omega(Cd)$ 和 $\omega(Co)$ 超天津市背景值的比例最高,分别为 100%、97.66% 和 96.88%. 通过重金属平均质量分数($\bar{\omega}$)的数据分析得到, $\bar{\omega}(As)$ 和 $\bar{\omega}(Cd)$ 与背景值相比增加幅度较大,其余重金属的平均含量均与背景值相差不大.

由于选用背景值的调查时间较早,且其采样位置与本次调查区域存在一定差别,因此为了更好地研究该研究区近年土壤重金属的累积状况,将本次检测结果与同区域 2004 年的调查结果^[23] 进行比较(见表 4). 结果表明,各种重金属的平均含量与 2004 年相比有一定升高, $\bar{\omega}(As)$ 和 $\bar{\omega}(Cd)$ 分别为 2004 年的 3.5 倍和 5.2 倍, $\bar{\omega}(Co)$ 、 $\bar{\omega}(Cu)$ 、 $\bar{\omega}(Pb)$ 、 $\bar{\omega}(Ni)$ 和 $\bar{\omega}(Zn)$ 比 2004 年均少量增加, $\bar{\omega}(Hg)$ 和 $\bar{\omega}(Cr)$ 未见明显增加. 可见,近年来大港区土壤重金属中 As 和 Cd 的累积情况较为严重.

该研究区各种重金属中,除了 V 的变异系数(0.15)较小外,其余重金属的变异系数均大于 0.2,属于中等以上程度变异^[24]. 其中,Hg 的变异系数高达 3.76,As、Ni 和 Cd 的变异系数在 1 左右. 上述结果表明这 4 种重金属受外界干扰较为显著,且空间分布差异较大,这通常是由土地利用方式、耕作、管理措施和污染等人为活动等造成. 其余几种重金属的变异系数较小,说明其含量受外界的影响较小,其来源可能较为相似^[25].

表 4 土壤重金属含量分析
Table 4 Concentration analysis of heavy metals in soil

重金属	ω /mg·kg ⁻¹	$\bar{\omega}$ /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数	2004 年含量 ^[23] /mg·kg ⁻¹	背景值 ^[19] /mg·kg ⁻¹	超背景值倍数	超背景值比例 /%
As	10 ~ 269	27.59	34.07	1.23	8	9.60	2.87	100
Cd	ND ~ 3.42	0.52	0.50	0.96	0.1	0.09	5.78	97.66
Cr	50.9 ~ 430	79.38	34.85	0.44	80	84.20	0.94	21.09
Co	12.1 ~ 55.4	19.34	4.15	0.21	16	13.60	1.42	96.88
Cu	15.1 ~ 44.5	28.74	6.05	0.21	25	28.80	1.00	45.31
Pb	13.7 ~ 71.6	21.43	7.80	0.36	20	21.00	1.02	36.72
Ni	22.4 ~ 543	38.77	45.09	1.16	35	33.30	1.16	57.03
V	55.7 ~ 123	87.14	13.03	0.15	—	85.20	1.02	51.56
Zn	53.3 ~ 322	95.23	30.28	0.32	85	79.30	1.20	77.34
Hg	ND ~ 0.15	0.01	0.02	3.76	0.08	0.08	0.08	2.34

2.2 地累积指数法评价结果

将天津大港区土壤各种重金属的地累积指数计算结果列于表 5,并将评价结果绘制成图 2。由图 2 可知,该研究区含 Cd、As 和 Ni 的样品均有一定比例处于重度以上污染水平,比例分别为 10.86%、4.66% 和 0.78%。Cd 的污染相对最重,主要在西部和东北部农业用地范围内处于重度以上污染水平,并有少量处于严重污染级别。As 污染最严重的点

位与 Cd 相同,在工业用地和居住用地也有少量点位处于中度污染水平。Ni 处于重度污染等级的采样点位于工业用地中。含 Cr、Co、Pb 和 Zn 的土壤样品大部分无污染,仅有个别点位处于中度污染水平,其余重金属均处于清洁水平。以地累积指数的平均值 I_{geo} 作为评价标准,该研究区 10 种重金属的污染程度由强至弱依次为: Cd > As > Co > Zn > Ni > V > Pb > Cu > Hg > Cr。

表 5 表层土壤重金属 I_{geo} 分级统计
Table 5 Statistical classification of heavy metal I_{geo} in topsoil

重金属种类	I_{geo}	百分含量/%						
		0 ¹⁾	1	2	3	4	5	6
As	1.153	0	51.94	36.43	6.98	2.33	2.33	0
Cd	2.062	0	28.68	10.08	49.61	6.98	2.33	1.55
Cr	-0.145	78.29	20.93	0	0.78	0	0	0
Co	0.481	2.33	96.90	0	0.78	0	0	0
Cu	-0.038	53.49	46.51	0	0	0	0	0
Pb	-0.028	62.02	34.88	3.10	0	0	0	0
Ni	0.074	41.86	57.36	0	0	0	0.78	0
V	0.013	47.29	52.71	0	0	0	0	0
Zn	0.216	21.71	74.42	3.10	0.78	0	0	0
Hg	-0.142	5.43	2.33	0	0	0	0	0

1) 0 ~ 6 表示 I_{geo} 分级

2.3 潜在生态危害指数法评价结果

天津市大港工业区土壤重金属的单污染物潜在生态风险指数 (E_r^i) 如表 6 所示。比较 10 种重金属 E_r^i 的平均值可得,大港工业区重金属元素的风险值由大到小的排序为: Cd > As > Co > Ni > Pb > Cu > Hg > V > Cr > Zn。Cd 是生态危害最严重的金属元素,采样点位中有 96.9% 的样品处于中度以上污染水平,其中较重污染水平的点位占 39.8%,重度污染水平的点位占 35.2%,严重污染水平的点位占 7.8%。由此可见 Cd 对整个区域的土壤重金属潜在生态危害污染贡献较为突出。含 As 的土壤样品中,

有 11.7% 的样品具有中度以上生态风险,其中较重污染水平和重度污染水平的样品比例均为 2.3%,整体生态危害程度呈恶化趋势。Ni、Hg 均只有个别采样点的生态风险较高,有 2.3% 的含 Hg 土壤样品处于中度风险等级。128 个土壤样点中 Cr、Co、Cu、Pb、V、Zn 这 6 种金属元素的潜在生态危害程度处于低度水平,对大港工业区土壤重金属潜在生态污染危害的贡献较少。

天津市大港工业区土壤潜在生态危害综合指数 RI 的分布情况见图 3。128 个土壤采样点的综合生态危害指数最小值为 79.78,最大值为 1437.37,平

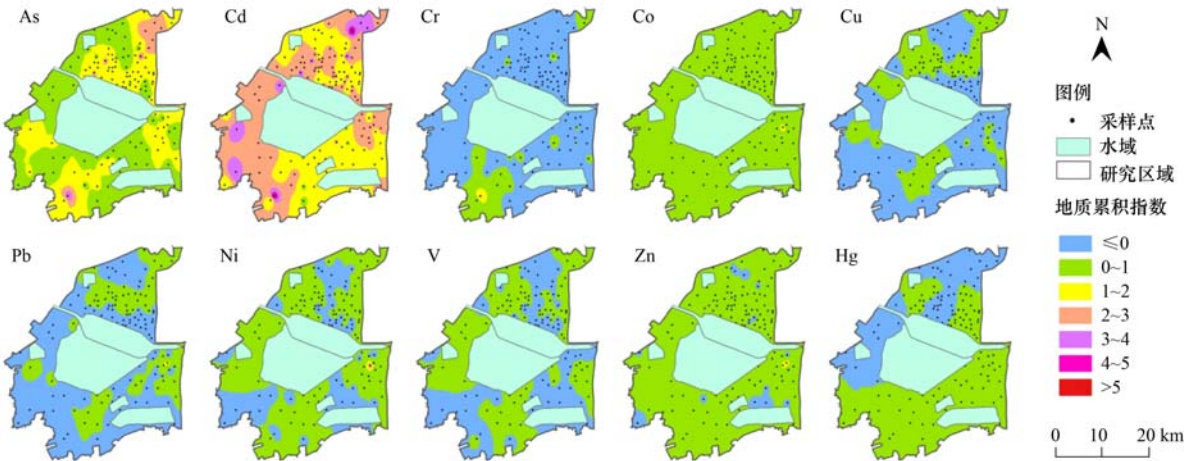


图2 表层土壤重金属 I_{geo} 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal I_{geo} in topsoil

均值为 227.17,按风险等级划分属于中度风险级别.低度、中度、重度和严重这4个风险等级的样点比例分别为56%、43%、9%和2%,大部分样点为低度和中度风险程度.处于重度以上风险等级的点位主要分布在西南部农业用地以及东北部与工业区邻近的农业用地中.

表6 土壤重金属潜在生态危害评价结果

Table 6 Evaluation results of potential ecological risk index of heavy metals in soil

重金属	最低值	最高值	平均值	样点频数分布				
				$E_r^i < 40$	$40 \leq E_r^i < 80$	$80 \leq E_r^i < 160$	$160 \leq E_r^i < 320$	$E_r^i \geq 320$
				低	中	较重	重度	严重
As	10.42	280.21	28.74	113	9	3	3	0
Cd	ND	1 140.00	172.21	4	18	51	45	10
Cr	1.21	10.21	1.89	128	0	0	0	0
Co	4.45	20.37	7.11	128	0	0	0	0
Cu	2.62	7.73	4.99	128	0	0	0	0
Pb	3.26	17.05	5.10	128	0	0	0	0
Ni	3.36	81.53	5.82	127	0	1	0	0
V	1.31	2.89	2.05	128	0	0	0	0
Zn	0.67	4.06	1.20	128	0	0	0	0
Hg	ND	71.43	3.05	125	3	0	0	0

分析本研究区不同用地类型潜在生态风险的计算结果(见表7),除Ni、Pb和Cu的生态风险顺序存在差别外,其余重金属的风险高低体现了相同的规律.3种用地类型中,生态风险最高的均为Cd,其次是As和Co,风险值最小的为Zn,Hg、V和Cr依次比Zn高.研究区重金属生态风险的整体分布趋势较为明显.将同种重金属在不同用地类型中的风险均值进行比较后发现,As、Co和Ni在工业用地中的风险高于其余两种用地类型;而居住用地中的Cu、Pb、V和Zn比其余两种用地类型中的同类金属风险值略高;Cd、Cr和Hg在农业用地中的平均风险高于其余两种用地途径.数据分析结果表明,天津市大港工业区重金属污染已存在一定程度的生态风险,对As和Cd应给与重点关注.研究区整体

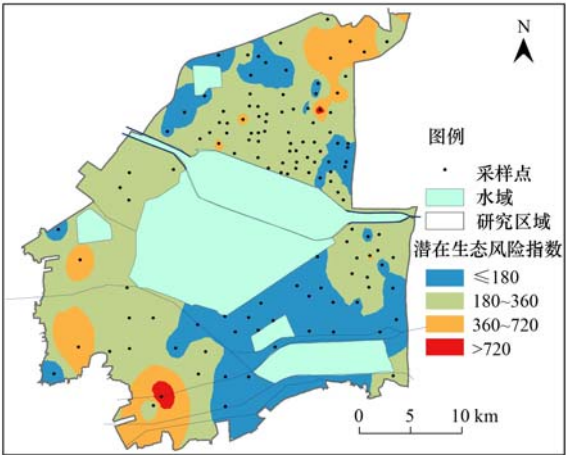


图3 大港工业区土壤重金属潜在生态风险分布示意

Fig. 3 Distribution of potential ecological risk index of heavy metals in soil of Dagang Industrial Area

表 7 潜在生态风险值在不同用地类型中的比较

Table 7 Comparison of potential ecological risk index in different land use types

用地类型	E_r^i										RI
	As	Cd	Cr	Co	Cu	Pb	Ni	V	Zn	Hg	
工业	31.68	180.38	1.83	7.19	4.96	5.10	6.54	2.05	1.22	2.13	237.17
居住	24.17	132.79	1.88	7.09	5.44	5.81	5.44	2.09	1.25	3.11	182.18
农业	27.87	184.55	1.94	6.96	4.74	4.69	5.14	2.00	1.15	4.19	240.42

还未达到严重的程度,但已在部分区域有恶化的趋势,需要采取必要措施规避风险和进行污染防治。

2.4 土壤重金属的来源分析

近年来,相关性分析及主成分分析已经成为重金属溯源中应用较多的手段之一,若元素间显著相关,说明他们出自同一来源的可能性较大^[26,27]。将大港区 10 种重金属的相关关系列于表 8,结果显示各种重金属彼此间存在一定的相关性。Cu 与多数金属均呈现出了较好的相关关系; As、Cd 和 Cr 呈显著正相关; Co、Cu、Ni、V 和 Zn 呈显著正相关; Pb、Cu 和 Zn 具有较好的正相关关系。As、Cd 和 Cr 主要分布在农业用地范围内,磷肥中可能含有大量有害元素(As、Cr、Pb、Cd 和 Cu)^[28,29],农田所用地

膜的生产过程中也会加入含有 Cd、Pb 的热稳定剂,因此长期施肥和地膜的大规模使用会导致土壤中此类重金属的逐年累积。Facchinelli 等^[30]认为,Co、Ni 等与基岩有关,因此与之相关性较好的几种重金属可能的来源也为基岩。Cu、Zn 和 Pb 在含量较低时认为其来源于成土母质,但在含量较高时通常认为主要由于人类活动特别是交通运输等原因造成的,且主要分布在城市区域和工业区域^[27,30]。

主成分分析可用来判别土壤中各种重金属的来源^[31]。大港区表层土壤重金属的主成分分析结果表明,10 种重金属可由前 4 个主成分反映 82.247% 的信息,因此对前 4 个主成分进行分析就可以得到本研究区各种重金属数据的大部分信息,详情见表 9。

表 8 表层土壤重金属的相关关系¹⁾ (n=128)

Table 8 Correlative coefficients of heavy metals in topsoils (n=128)

	As	Cd	Cr	Co	Cu	Pb	Ni	V	Zn	Hg
As	1									
Cd	0.651 **	1								
Cr	0.401 **	0.381 **	1							
Co	0.138	0.144	0.318 **	1						
Cu	0.190 *	0.238 **	0.349 **	0.659 **	1					
Pb	0.063	0.211 *	0.226 *	0.321 **	0.623 **	1				
Ni	0.142	0.149	0.289 **	0.849 **	0.602 **	0.472 **	1			
V	0.104	0.148	0.313 **	0.751 **	0.778 **	0.387 **	0.594 **	1		
Zn	0.107	0.275 **	0.347 **	0.464 **	0.662 **	0.817 **	0.581 **	0.526 **	1	
Hg	0.003	0.087	0.079	0.334 **	0.184 *	0.313 **	0.420 **	0.136	0.234 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; 2) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

表 9 表层土壤重金属成分矩阵

Table 9 Component matrixes of heavy metals in topsoils

重金属	因子负荷(主成分)				因子负荷(旋转主成分)			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
ω (As)	0.303	0.828	-0.092	0.129	0.055	-0.056	0.892	0.011
ω (Cd)	0.387	0.772	0.146	0.102	-0.016	0.182	0.859	0.080
ω (Cr)	0.508	0.482	-0.117	-0.059	0.320	0.155	0.614	-0.063
ω (Co)	0.813	-0.201	-0.440	0.173	0.918	0.093	0.106	0.248
ω (Cu)	0.861	-0.088	-0.057	-0.260	0.700	0.546	0.171	-0.055
ω (Pb)	0.709	-0.135	0.612	-0.177	0.180	0.926	0.072	0.181
ω (Ni)	0.824	-0.215	-0.179	0.255	0.765	0.261	0.099	0.400
ω (V)	0.789	-0.170	-0.370	-0.220	0.863	0.273	0.082	-0.104
ω (Zn)	0.806	-0.081	0.416	-0.237	0.361	0.851	0.152	0.083
ω (Hg)	0.390	-0.212	0.276	0.805	0.141	0.147	0.012	0.938
特征值	4.508	1.707	1.033	0.976	2.951	2.112	1.996	1.166
贡献率/%	45.080	17.070	10.334	9.763	29.507	21.121	19.960	11.659
累积贡献率/%	45.080	62.150	72.484	82.247	29.507	50.628	70.588	82.247

对因子初始矩阵提取的 4 个主要因子进行分析(表 9),结果显示,因子 1(F1)中负荷较高的是 Co、Cu、Ni、V、Pb、Zn; 因子 2(F2)中负荷较高的重金属为 As、Cd; 因子 3(F3)和因子 4(F4)中负荷较高的分别是 Pb 和 Hg。结果显示,同种因子间的各种重金属的来源复杂多样,无明显规律。将 4 种因子进行矩阵变换后得到,Co、V、Ni、Cu 在 F1 中显示出较高的因子负荷,Pb、Zn 和 Cu 在 F2 中具有较高因子负荷,As、Cd 和 Cr 在 F3 中具有较高因子负荷,Hg 为 F4 的主要负荷,但其中还包含部分 Ni。与天津大港工业区地表重金属的地累积指数图(图 3)对照分析可知,F1 包含的几种重金属(Co、Cu、Ni 和 V)主要在农业用地以及与工业区和居住区邻近的农业用地中有检出,分布相对较为广泛,且浓度与背景值及 10 年前的检测值相比仅有少量升高,基本可认为其主要来源为成土母质。前人的研究结果也表明,Co 可用作化学分析试剂,用于电子、焊接、冶金和电池工业^[31]以及饲料工业^[32]; V 主要来源于化石燃料燃烧和煤电厂废气排放等^[33],作为催化剂在橡胶工业^[34]和机械制造业^[35]中也有广泛应用; Ni 主要用于电镀行业或作为催化剂在工业中使用^[36]。鉴于该研究区中分布大量的石化、电镀、橡胶和机械制造业,因此推断工业生产对这几种重金属有少量贡献。F2 包含了 Pb、Cu 和 Zn,表层土壤中 3 种重金属的含量及生态风险均不高,但从研究区地累积指数的分布图中可看出,交通较为频繁的居住用地和工业用地中 Pb、Cu 和 Zn 的浓度高于周边农业用地。城市环境中的 Pb 常与燃料燃烧以及汽车尾气相关,并可通过大气沉降进入土壤^[37]; Zn 可用于制作防锈汽车油漆及车轮钢圈等^[38],也多与汽车轮胎的磨损^[39]有关; Cu 主要源于人类活动^[40],常在大气污染源分析中与 Zn 和 Pb 一同作为城市交通污染源的标志性元素^[38,41]。因此分析认为交通运输是这 3 种金属的主要来源。在大港区发展过程中,人口数量和交通密度均不断增长,因此需要采取一定的管控措施防止此类重金属的进一步累积。F3 包含的 As、Cd 和 Cr 在农业区域污染较为严重,在工业区周边也有分布,且三者显著相关。这 3 种重金属常见于农业生产过程中使用的农药(常含 As)、肥料(含 Cr 和 As)、地膜(含 Cd)等产品中。有研究表明,农业灌溉、大气沉降、采矿活动及其他人类活动可能产生 Cd 污染^[42]。Cr 可来源于冶金、电镀、制革等行业,且 Cr 渣的堆放通常会对周边的土壤和水源造成污染,已有研究表明天津地区

存在这样的情况^[43],因此工业活动产生的污染通过沉降或者灌溉可能导致农业用地中 Cr 的污染。王瑞霖等^[44]的研究表明,目前海河流域中 Cd 为最主要的生态风险元素,Pb、Cu 和 As 等也存在一定风险,而其研究中的多条河流均流经大港研究区,分布在采样点位附近。因此,大港区表层土壤中的 Cd 和 As 可能来源于河流灌溉。在区域采样调查过程中发现,在此 3 种重金属风险较大的区域零星分布一些乡镇企业,以砖厂、橡胶厂和机械加工厂等为主,这可能也是这 3 类重金属的来源之一。经分析,认为河流灌溉等农业活动可能是这 3 类重金属的主要来源,但农业用地周边的工业生产和交通也对重金属的含量有一定影响。F4 主要包含 Hg,前人研究表明城市 Hg 可能主要来源于燃煤^[45]或者含 Hg 农药和化肥的施用,本研究区各点位中 Hg 的检出率较小,且主要分布在研究区的居住以及农业用地,可认为 Hg 部分来源于人为活动,部分来源于农业生产。

3 结论

(1)大港工业区表层土壤重金属存在不同程度的累积,多数平均值高于土壤背景值,以 As 和 Cd 的污染情况最为严重,且部分重金属的空间分布差异较大。

(2)大港工业区 10 种重金属的潜在生态危害指数由强至弱依次是: Cd > As > Co > Ni > Pb > Cu > Hg > V > Cr > Zn。As 和 Cd 均处于严重生态风险水平,应列为当地优先控制污染元素。大港工业区生态风险较高的点位多集中在农业用地范围内,工业用地及周边区域也有零星分布。

(3)该研究区中分布较为广泛的且浓度水平较低的 Co、Cu、Ni 和 V 来源主要为成土母质; 风险值较低的 Pb、Cu 和 Zn 可能来源于交通运输; 污染严重的 As、Cd 和 Cr 可能主要来源于农业生产,同时该区域的工业生产对重金属的累积也有一定的影响。

参考文献:

- [1] Chen X, Xia X H, Zhan Y, *et al.* Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181** (1-3): 640-646.
- [2] Park B Y, Lee J K, Ro H M, *et al.* Effects of heavy metal contamination from an abandoned mine on nematode community structure as an indicator of soil ecosystem health [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, **51**: 17-24.
- [3] Yuan G L, Sun T H, Han P, *et al.* Source identification and

- ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **136**: 40-47.
- [4] Liu X H, Gao Y T, Khan S, *et al.* Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on contaminated sites and their potential accumulation capacity in Heqing, Yunnan [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(12): 1469-1474.
- [5] 齐雁冰, 楚万林, 蒲洁, 等. 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1453-1460.
- [6] Lee C S L, Li X D, Shi W Z, *et al.* Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 45-61.
- [7] Xia X H, Chen X, Liu R M, *et al.* Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 2043-2050.
- [8] Dragović R, Gajić B, Dragović S, *et al.* Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **84**: 550-562.
- [9] Xu S, Tao S. Coregionalization analysis of heavy metals in the surface soil of Inner Mongolia [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **320**(1): 73-87.
- [10] 王祖伟, 张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. *生态环境*, 2005, **14**(2): 211-213.
- [11] Xu J C, Sharma R, Fang J, *et al.* Critical linkages between land-use transition and human health in the Himalayan region [J]. *Environment International*, 2008, **34**(2): 239-247.
- [12] 乔俊, 邵德智, 罗水明, 等. 天津滨海新区黑潮河沉积物中重金属污染特征及地区性重金属污染指标选择[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(11): 1343-1350.
- [13] Guo W H, Liu X B, Liu Z G, *et al.* Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 729-736.
- [14] US EPA. Selected Analytical Methods for Environmental Remediation and Recovery (SAM) [R]. Cincinnati: Office of Research and Development, 2012. 54-108.
- [15] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [16] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry [J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 159-165.
- [17] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 329-382.
- [20] 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]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [21] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [22] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(5): 33-37.
- [23] 曹淑萍. 重金属污染元素在天津土壤剖面中的纵向分布特征[J]. *地质找矿论丛*, 2004, **19**(4): 270-274.
- [24] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [25] 马啸, 左锐, 王金生, 等. 沈阳浑河冲洪积扇土壤的重金属空间分布特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1298-1305.
- [26] 杨彦, 李良忠, 于云江, 等. 基于统计分析的太湖流域某市农业活动区重金属污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1319-1327.
- [27] Martín J A R, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [28] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, *et al.* Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **168**: 44-53.
- [29] 王登启. 设施菜地土壤重金属的分布特征与生态风险评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. 7-10.
- [30] 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.
- [31] 刘三平, 王海北, 蒋开喜, 等. 钴提取分离技术分析与应用[J]. *有色金属*, 2004, **56**(2): 73-76.
- [32] 李娟, 张洪丽. 矿物元素饲料添加剂——硫酸钴[J]. *中国饲料添加剂*, 2014, (3): 16-17.
- [33] 滕彦国, 矫旭东, 左锐, 等. 攀枝花矿区表层土壤中钒的环境地球化学研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(2): 278-283.
- [34] 高巍, 张春英, 吕云霞, 等. 用于烯烃聚合的钒系催化剂的研究[J]. *现代化工*, 2013, **33**(12): 73-75.
- [35] 杨金燕, 唐亚, 李延强, 等. 我国钒资源现状及土壤中钒的生物效应[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(6): 1511-1517.
- [36] 王锐, 于宗灵, 关畅. 土壤镍污染植物修复的研究概况[J]. *环境科学与管理*, 2013, **38**(8): 111-114.
- [37] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(4): 542-551.
- [38] Karim Z, Qureshi B A, Mumtaz M, *et al.* Heavy metal content in urban soils as an indicator of anthropogenic and natural influences on landscape of Karachi—A multivariate spatio-

- temporal analysis[J]. *Ecological indicators*, 2014, **42**: 20-31.
- [39] Friedlander S K. Chemical element balances and identification of air pollution sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 1973, **7**(3): 235-240.
- [40] Gowd S S, Reddy M R, Govil P K. Assessment of heavy metal contamination in soils at Jajmau (Kanpur) and Unnao industrial areas of the Ganga Plain, Uttar Pradesh, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 113-121.
- [41] Mazzei F, D'Alessandro A, Lucarelli F, *et al.* Characterization of particulate matter sources in an urban environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **401**(1-3): 81-89.
- [42] 汪嘉利, 李章平, 杨志敏, 等. 重庆市主城区土壤重金属的污染特征[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **29**(5): 31-35.
- [43] 王威, 刘东华, 蒋悟生, 等. 铬污染地区环境对植物生长的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(3): 257-259.
- [44] 王瑞霖, 程先, 孙然好. 海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3740-3747.
- [45] Madrid L, Díaz-barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(10): 1301-1308.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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