

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝菱,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征

刘硕¹, 吴泉源^{1*}, 曹学江², 王集宁³, 张龙龙¹, 蔡东全¹, 周历媛¹, 刘娜¹

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; 2. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 泰安 271000; 3. 山东省地质环境监测总站, 济南 250014)

摘要: 以龙口市北部煤矿区为研究区, 采集 36 个表层土壤样本, 对 Cd、As、Ni、Pb 和 Cr 这 5 种重金属含量进行测定, 利用地统计分析、主成分分析、加权平均综合污染评价等方法, 结合 GIS 技术分别对 5 种重金属含量的空间分布特征、污染来源、综合污染程度进行了探索分析. 结果表明, 土壤样本中 5 种重金属富集现象显著, 以国家土壤环境质量二级标准为背景值, 超标率分别达到 72.22%、100%、100%、91.67%、100%. 样本重金属含量均值全部超过国家二级标准, 分别为背景值的 1.53、11.86、2.40、1.31、4.09 倍; 且远远高于山东省东部地区表层土壤背景值, 含量倍数分别为 9.85、39.98、8.85、4.29 与 12.71 倍. 基于半变异函数模型分析得出, 块金效应从高到低依次为 As (0.644) > Cd (0.627) > Cr (0.538) > Ni (0.411) > Pb (0.294), 均属中等空间相关性, 重金属含量空间分布呈现中部桑园煤矿及其周围含量最高, 东部与西部含量较低的特征. 经主成分分析发现, Cd、As、Ni 和 Cr 主要来源于污水灌溉、工业企业排放和工业活动; 汽车尾气与煤炭燃烧是 Pb 的主要污染源. 单因子污染程度评价显示, 不同重金属污染程度依次为 As > Cr > Ni > Cd > Pb. 综合污染程度评价显示, 研究区土壤重金属综合污染程度较高, 综合污染指数范围处于 2.17~4.66 之间, 中度污染与重度污染样本分别为 10 个和 26 个, 重度污染地区主要分布在桑园煤矿、北皂煤矿、柳海煤矿区域, 中度污染地区包括洼里煤矿、梁家煤矿等区域. 本文研究结果将为在研究区开展生态风险评估研究工作提供数据参考与理论支持.

关键词: 龙口市; 煤矿区; 土壤; 重金属; 空间分布; 污染评价; 污染来源

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0270-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.01.035

Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City

LIU Shuo¹, WU Quan-yuan^{1*}, CAO Xue-jiang², WANG Ji-ning³, ZHANG Long-long¹, CAI Dong-quan¹, ZHOU Li-yuan¹, LIU Na¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China; 2. Shandong Provincial Coal Geological Planning, Exploration and Research Institute, Taian 271000, China; 3. Shandong Monitoring Center of Geological Environment, Ji'nan 250014, China)

Abstract: The present paper takes the coal mining area of Longkou City as the research area. Thirty-six topsoil (0-20 cm) samples were collected and the contents of 5 kinds of heavy metals were determined, including Cd, As, Ni, Pb, Cr. Geo-statistics analysis was used to analyze the spatial distribution of heavy metals. Principal component analysis (PCA) was used to explore the pollution sources of heavy metals and the degree of heavy metals pollution was evaluated by weighted average comprehensive pollution evaluation method. The results showed that enrichment phenomenon was significant for the 5 kinds of heavy metals. Taking secondary standard of National Environment Quality Standard for Soil as the background value, their exceed standard rates were 72.22%, 100%, 100%, 91.67%, 100%, respectively. Average contents of heavy metals in the soil samples were all over the national standard level two and were 1.53, 11.86, 2.40, 1.31, 4.09 times of the background value. In addition, the average contents were much higher than the background value of the topsoil in the eastern part of Shandong Province and were 9.85, 39.98, 8.85, 4.29, 12.71 times of the background value. According to the semivariogram model, we obtained the nugget-effects of 5 kinds of heavy metals and their values were in the order of As (0.644) > Cd (0.627) > Cr (0.538) > Ni (0.411) > Pb (0.294), all belonging to moderate spatial correlation. On the whole, the central part of the Sangyuan Coal Mine and its surrounding areas were the most seriously polluted, while the pollution of heavy metals in the east and west of the study area was relatively light. Principal component analysis suggested that the enrichment of Cd, As, Ni, Cr was due to irrigation of wastewater, the discharge of industry and enterprise, and the industrial activity. Automobile exhaust and coal combustion were the main pollution sources of Pb. The single-factor assessment of heavy metals pollution showed that the degree of different heavy metals pollution was in the order of As > Cr > Ni > Cd > Pb. Simultaneously, comprehensive pollution

收稿日期: 2015-07-25; 修订日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371395); 山东省龙口市龙口矿区及周边海岸带环境地质调查与评价项目(鲁勘字[2012]110号); 黄河三角洲高效生态经济区(潍坊)海咸水入侵调查与监控预警系统建设(鲁勘字[2011]14号); 山东师范大学硕士研究生科研创新基金项目(SCX1524)

作者简介: 刘硕(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测、遥感地学监测, E-mail: liushuo24@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wqy642052582@163.com

evaluation showed that the degree of heavy metals pollution in the study area was very serious, with comprehensive pollution index ranging from 2.17 to 4.66, among which, the numbers of moderate and heavy pollution samples were 10 and 26, respectively. Areas with heavy pollution were mainly distributed in the Sangyuan Coal Mine, Beizao Coal Mine, Liu hai Coal Mine; and the areas with moderate pollution covered Wali Coal Mine, Liangjia Coal Mine, and other regions. The results of this paper will provide data reference and theoretical support for the study of ecological risk assessment in the study area.

Key words: Longkou City; coal mining area; soil; heavy metals; spatial distribution; pollution assessment; pollution sources

煤炭资源的大规模开采,有助于带动当地经济的发展^[1,2]。但煤矿开采产生大量废水、煤矸石等废渣未经处理排放到环境中会直接或间接造成重金属在土壤中的迁移和富集^[3~5];金属冶炼等工业生产与农业污水灌溉造成的重金属污染也不容忽视^[6]。生物毒性显著的重金属元素含量一旦超过自然生态量,便会造成土壤重金属污染^[7]。农田土壤被重金属污染后很难恢复,并会通过食物链对人体的组织和细胞等造成结构和功能上的损害^[8]。

近年来,土壤重金属污染现象引起广泛关注,国内外学者开展了大量关于土壤重金属污染评价、污染机理、污染特征和污染治理方面的研究工作^[9~11]。吕建树等^[1]利用多元统计与地统计分析技术对日照市土壤重金属来源及环境风险进行了分析评价;张雷等^[12]分析了大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布特征,发现盐度和悬浮物颗粒对重金属的分布影响较大;Benhaddya 等^[13]利用 GIS 技术研究了阿尔及利亚表层土壤重金属污染空间分布特征;戴彬等^[14]发现莱芜市钢城区土壤重金属整体处于中度与高度生态风险的临界水平。大量研究表明,基于地统计分析与污染程度评价并结合 GIS 的方法为解决土壤重金属污染空间分布等问题提供了行之有效的途径^[15,16]。

本文研究区地处龙口煤矿区内,由于煤矿开采,未经处理的矿井废水与煤矸石等废渣会严重威胁土壤环境^[5];周围坐落的金属冶炼厂、火电厂等也会在一定程度上加剧重金属在土壤中的富集^[14]。但至今尚未有针对龙口矿区表层土壤重金属污染程度方面的研究。为此,本研究基于地统计学理论并结合 GIS 技术,分析 Cd、As、Ni、Pb 和 Cr 这 5 种重金属的空间分布特征;选用单因子污染指数法和加权平均综合污染评价法对重金属污染程度进行评估,并在利用层次分析法确定重金属污染因子权重时,加入重金属含量离差值这一指标以提高评价结果准确性。采用主成分分析法探索重金属异常富集的来源。通过了解研究区重金属污染情况,以期对龙口市土壤重金属污染控制,生态环境安全监测提供数据参考与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省龙口市龙口矿区内(图 1),地势平坦,北傍渤海湾,两面环海,地理坐标为:东经 120°13'14" ~ 120°44'46",北纬 37°27'30" ~ 37°47'24",龙口煤矿区最早于 1968 年开发建设,已勘明煤田储量 26.8 亿 t,其中陆地储量 13.9 亿 t,海底储量 12.9 亿 t,年产量约 670 万 t^[17]。

矿区坐落矿井 7 对(图 1),除产量较大的北皂煤矿、梁家煤矿和洼里煤矿之外,还散落着多个小型煤矿,开采方式主要为长壁开采。煤田成煤于新生代古近纪,煤种多为变质程度较高的长焰煤,碳化程度较低的褐煤和油母页岩等。岩层为单斜构造,多断裂带,主要由煤、含油泥页岩、砂岩、黏土层组成。除煤矿外,研究区还分布着铝金属冶炼、塑胶、钛业化工等工厂。该地区交通发达,206 国道横贯东西,并拥有国家一级对外开放口岸龙口港。煤矿区周围土壤类型主要包括非灰性滨海潮土、砂质湿潮土和砂姜黑土,主要农用地类型为耕地、园地等,多种植小麦、玉米、苹果、葡萄等。研究区为温带季风气候,四季分明,年平均降水量 600 mm 左右,常年主导风向为西北风。

1.2 样品采集与分析

在充分分析研究区土地利用现状和地质背景的基础上,采取蛇形布点法对煤矿区周围土壤进行采样,共采集矿区土样 36 个,龙口西南部非矿区对照土样 10 个,采样密度约基本能控制在 2 km² 一个样点。采样点设定在开阔的农田或果园内,每个采样点划定 30 m × 30 m 样方,样方内采用对角线采样法,共取 5 处土样。采集土样时,剔除土壤中大粒径石砾、杂草、植物根系等杂物,用木铲取 0 ~ 20 cm 表层土,将 5 处土样均匀混合后利用四分法缩减至 1 kg 装入聚乙烯塑料袋中,贴好标签,记录样方周围环境和植被覆盖等情况,地理坐标用精度为 10 m 的手持 GPS 确定。

将采集的样品在室温自然风干并去除石块和植物组织等杂物,用玛瑙研钵磨碎过 100 目尼龙筛后,

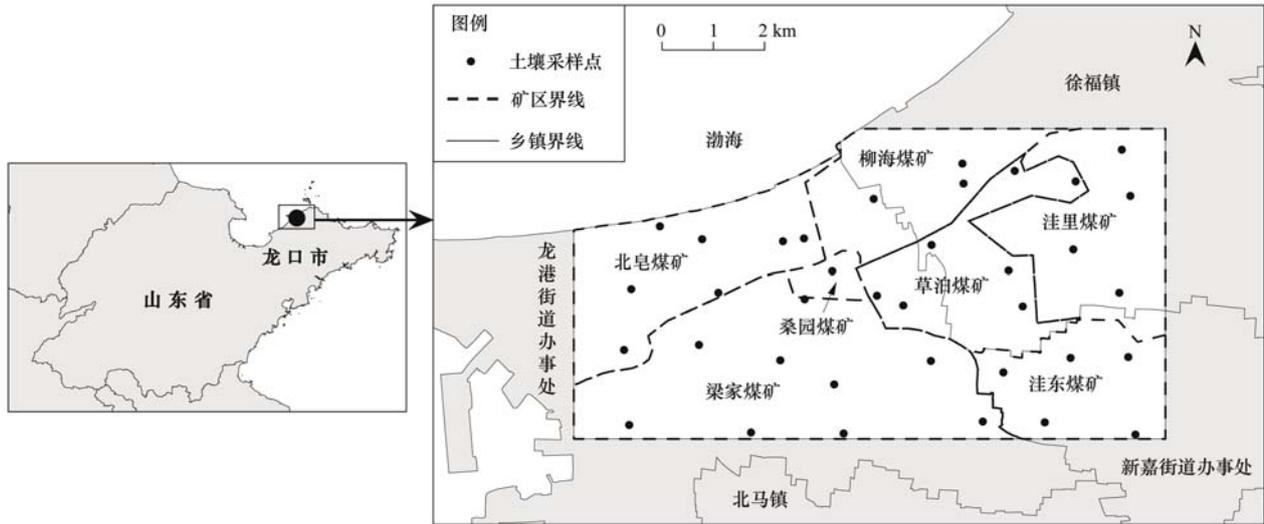


图1 研究区与土壤采样点位置

Fig. 1 Location of study area and soil samples

备用. 土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ 进行微波消解, 采用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 对 Cd、As、Ni、Pb 和 Cr 这 5 种重金属元素含量进行测定. 分析过程中试剂均为优级纯, 并用国家标准土壤样品 (GBW07401) 进行质量控制, 回收率介于 $100\% \pm 10\%$ 之间, 说明本研究的测试精度符合研究要求.

1.3 土壤重金属污染评价方法

目前, 土壤重金属污染程度评价方法很多, 许多专家学者根据不同方法从不同角度对土壤重金属污染程度与危害进行评估^[18~21]. 因不同重金属的生物毒性差异, 且对土壤环境、生态环境影响程度不同, 结合煤矿区土样数据, 本研究采用单因子指数评价法和加权平均综合法分别来评价单因子污染程度和多因子综合污染程度, 并通过改进加权平均方法进行改进, 来完善和提高评价的科学性.

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是对单个污染因子的污染程度进行评价^[22], 它以土壤元素的背景值作为评价标准, 其表达式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为采样点某污染因子的污染指数值, C_i 为该污染因子的实际测定值, S_i 为该污染因子的背景标准值. 本研究采用《国家土壤环境质量标准 GB 15618-2008》^[23] 中的农用地土壤环境质量二级标准作为背景值. 若 $P_i > 1.0$ 说明土壤中该重金属含量已超标, 土壤已被污染; 当 $P_i \leq 1.0$ 时, 说明该重金属含量尚在背景值含量范围之内, 目前未受污染; P_i 的值越大, 表明该重金属富集情况越严重.

1.3.2 改进的加权平均综合评价法

加权平均法通过对不同重金属元素赋予不同的权重, 来评价每一个采样点的综合污染程度, 该方法计算简便、灵敏度高, 能够直观反映土壤综合污染程度^[24], 表达式为:

$$P = \sum (W_i \times P_i) \quad (2)$$

式中, P 为某采样点重金属综合污染指数值, W_i 为不同重金属污染权重, P_i 为式 (1) 中单因子污染指数值. 当 $P \leq 1$ 时, 表示无污染; 当 $1 < P \leq 2$ 时, 表示轻度污染; 当 $2 < P \leq 3$ 时, 表示中度污染; 当 $P > 3$ 时, 表示重度污染^[25]. 在此方法中, 如何确定权重 W_i 是评价土壤重金属综合污染程度的关键, 层次分析法已广泛应用于确定重金属污染因子权重^[26,27]. 但重金属本身在土壤中是客观存在的, 区域和土壤类型不同, 它们的临界含量和容量也会有差异^[28], 故本文在利用 AHP 法确定权重时, 在粮食作物限量值^[29,30] 和毒性响应系数^[20] 两项指标的基础上, 加入了矿区污染样本与非矿区未受污染对照样本 (对照样本) 重金属含量离差值, 离差值代表一组数据与平均值的偏离程度, 值越大, 说明土壤内该重金属因污染而导致的累积量越大, 赋予的权重值也就越大.

(1) 层次分析指标体系构建

指标体系如图 2 所示, 因不同重金属在土壤含量比重不同, 计算离差和之前, 需要对其进行标准化来消除不同量纲带来的影响, 标准化表达式和离差和表达式分别为:

$$S_{ij} = \frac{C_{ij} - \text{Min}(C_{ij})}{\text{Max}(C_{ij}) - \text{Min}(C_{ij})}$$

$$(i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 36) \quad (3)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^n (S_{ij} - \bar{S}'_i) \quad (i = 1, \dots, 5, n = 36) \quad (4)$$

式(3)中, S_{ij} 为标准化值, C_{ij} 为第 i 种重金属第 j 个样本的含量值, $\text{Max}(C_{ij})$ 与 $\text{Min}(C_{ij})$ 分别代表该重

金属样本含量的最大值和最小值; 式(4)中 D_i 为第 i 种元素离差和, S_{ij} 为标准化值, \bar{S}'_i 为对照样本均值, n 为样本个数. 经计算得到矿区样本 Cd、As、Ni、Pb、Cr 含量离差和、重金属限量值与毒性响应系数如表 1.

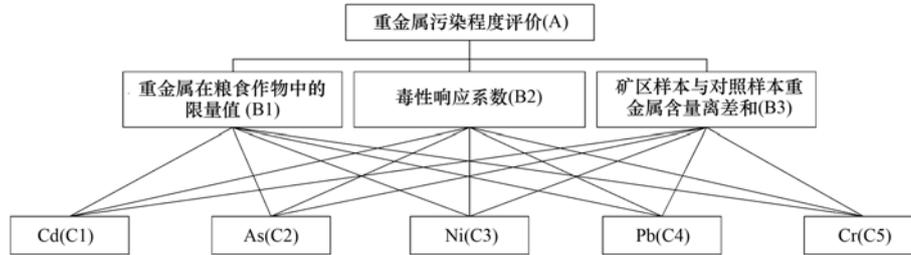


图 2 重金属污染评价指标层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure of evaluation index of heavy metals pollution

表 1 准则层 B 详细标准值

Table 1 Detailed standard values of the hierarchy B

| 元素 | Cd | As | Ni | Pb | Cr |
|--|--|--------------|--------------|------------------------------|--------------|
| 离差和 | 3.3 | 9.0 | 9.4 | 7.9 | 8.8 |
| 毒性系数 | 30 | 10 | 5 | 5 | 2 |
| 粮食与食品限量值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 0.1 | 0.5 | 1.0 | 0.2 | 1.0 |
| 限量值标准代码 | GB 2715-2005 ^[25] GB 2762-2012 ^[26] | GB 2762-2012 | GB 2762-2012 | GB 2715-2005 GB 2762-2012 | GB 2762-2012 |

(2) 构建判定矩阵

通过咨询专家并查阅相关资料^[20,24,26,27], 判断准则层 B 的 3 个指标重要性; 通过对表 1 中给出的 5 种重金属元素标准值进行对比, 得出基于不同准则 B 各重金属元素的重要性, 得到判断矩阵 $A \rightarrow B$

[公式(5)], 判断矩阵 $B \rightarrow C$ [公式(6)].

$$\begin{bmatrix} A & B1 & B2 & B3 \\ B1 & 1 & 3 & 5 \\ B2 & 1/3 & 1 & 3 \\ B3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} B1 & Cd & As & Ni & Pb & Cr \\ Cd & 1 & 5 & 7 & 3 & 7 \\ As & 1/5 & 1 & 3 & 1/3 & 3 \\ Ni & 1/7 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 \\ Pb & 1/3 & 3 & 5 & 1 & 5 \\ Cr & 1/7 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B2 & Cd & As & Ni & Pb & Cr \\ Cd & 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ As & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\ Ni & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ Pb & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ Cr & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B3 & Cd & As & Ni & Pb & Cr \\ Cd & 1 & 5 & 7 & 3 & 7 \\ As & 1 & 1/9 & 1/3 & 5 & 3 \\ Ni & 1/11 & 3 & 1 & 7 & 5 \\ Pb & 5 & 1/5 & 1/7 & 1 & 1/3 \\ Cr & 7 & 1/3 & 1/5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3) 权重确定与一致性检验

本研究采用方根法依次求取 5 种重金属的权重, 权重计算结果通过一致性检验, 各层次指标权重如表 2 所示.

1.4 重金属空间分布特征分析方法

在空间统计分析中, 地统计分析是以区域化变量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 研究具有地理空间信息的事物或现象的分布特征与变化规律^[31]. 半变异函数 $\gamma(h)$ 与克里金法计算公式分别为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)] \quad (7)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半变异函数, $N(h)$ 为样点对的个数, $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的观测值 [$i = 1, 2, \dots, N(h)$]; $\hat{Z}(x_0)$ 为预测位置模拟值, λ_i 为第 i 个位置处的测量值的未知权重, N 为样点个数. 克里金插值包括简单克里金、普通克里金等, 普通克里金法要求数据符合正态分布, 本研究选用 Kolmogorov-Smirnov 非参数检验方法结合 QQ 图示法检验数据的正态分布情况. 并利用 Pearson 相关系数分析不同重金属

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (8)$$

表 2 各层次指标权重

Table 2 Index weight of each hierarchy

| 目标层 A | 准则层 B | 权重 | 指标层 | 权重 | 指标 | 最终权重 |
|-------|-------|---------|-----|---------|----|---------|
| A | B1 | 0.637 0 | Cd | 0.510 1 | Cd | 0.456 9 |
| | | | As | 0.123 0 | | |
| | | | Ni | 0.053 7 | | |
| | | | Pb | 0.259 4 | | |
| | | | Cr | 0.053 7 | | |
| | B2 | 0.258 3 | Cd | 0.501 1 | As | 0.169 8 |
| | | | As | 0.246 1 | | |
| | | | Ni | 0.103 8 | | |
| | | | Pb | 0.103 8 | | |
| | | | Cr | 0.045 3 | | |
| | B3 | 0.104 7 | Cd | 0.024 3 | Pb | 0.199 1 |
| | | | As | 0.266 0 | | |
| | | | Ni | 0.509 1 | | |
| | | | Pb | 0.067 6 | | |
| | | | Cr | 0.132 9 | | |

之间的依附关系,利用主成分分析法探索主要污染源.

1.5 数据处理

选用 SPSS 22.0 软件对土壤重金属含量数据进行 Pearson 相关性分析、正态分布检验和主成分分析;地统计中空间变异结构分析在 GS + 9.0 中完成,QQ 图等正态分布检验辅助利用 ArcGIS 10.2 中的地统计模块 Geostatistical Analyst Tools 数据探索工具集分析,采样点分布图与重金属污染空间分布特征图利用 ArcGIS 10.2 绘制.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量统计分析

5 种土壤重金属元素含量统计结果如表 3 所示.本研究以国家土壤环境质量农业用地第二级标准为背景值,并与山东省东部地区表层土壤重金属含量背景值^[32]进行对比.在 36 个土壤样本中各重金属元素含量平均值全部超过国家二级背景值,Cd、As、Ni、Pb、Cr 含量超标率(超过国家二级背景值样本数占总样本的百分比)分别为 72.22%、100%、100%、91.67%、100%.其中 As 的超标情况最为明显,样本均值为背景值的 11.86 倍;Cr、Ni 含量均值分别为背景值的 4.09 倍,2.40 倍,富集情况严重;Cd 与 Pb 相对较低,但富集情况也很明显,分别为 1.53 和 1.31 倍.同时,Cd、As、Ni、Pb 与 Cr 的样本含量均值远远高于山东省东部地区表层土壤背景值,分别为背景值的 9.85、39.98、8.85、4.29 和 12.71 倍.以上结果表明研究区内这 5 种重

金属污染情况显著,富集现象严重,极有可能对当地的农业生产以及人体健康造成危害,应当引起足够的重视.

与标准差相比,变异系数可消除重金属含量不同量纲的影响,反映 5 种重金属含量数据的离散性^[16].由表 3 可以看出,5 种重金属含量的变异离散程度差别较大,Cd(53.44%) > Cr(22.22%) > Pb(18.34%) > As(12.60%) > Ni(9.26%).根据 Wilding 对变异程度的分类^[33],Cd 的变异系数最大,属于高度变异性质(36% < 变异系数),表明其变异程度较高,样本含量数据空间分布离散性比较大,且分布不均匀,差异性大,极有可能受到外界因素影响;其他 4 种重金属相对 Cd 变异程度较低,说明这几种元素空间分布离散性较小,样本含量数据空间分布相对较为均匀,其中 Cr 与 Pb 属于中等变异(15% < 变异系数 < 36%),As 与 Ni 属于轻度变异(变异系数 < 15%).如表 3 所示,通过分析 5 种重金属含量数据的 K-S 统计量与双尾检验系数并结合 QQ 图,确定 5 种重金属样本数据均呈正态分布.

2.2 重金属污染来源与空间分布特征分析

2.2.1 研究区重金属异常富集来源探索

表 4 中给出的 5 种重金属含量两两相关系数,可以在一定程度上反映不同重金属之间的相互依存关系.其中 As 分别与 Cd、Ni、Cr 呈极显著正相关,来自同一种污染源的可能性较大;Ni 与 Cd、Cr 呈显著正相关,可能具有相似的污染源;Pb 与其它重金属相关性较弱,可能来自不同污染源.

为了进一步探索重金属污染的来源,本研究采

表 3 土壤重金属含量统计特征分析

Table 3 Statistical characteristics analysis of heavy metals content in soil

| 元素 | 平均值 /mg·kg ⁻¹ | 中值 /mg·kg ⁻¹ | 含量范围 /mg·kg ⁻¹ | 国家土壤 二级标准 /mg·kg ⁻¹ | 山东省东部 土壤背景值 /mg·kg ⁻¹ | 超标率(国家 土壤二级标准) /% | 标准差 | 变异系数 /% | K-S 统计量 Z 值 | 双尾检 验系数 P 值 | 分布 类型 |
|----|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------|--------|------------|-------------------|-------------------|----------|
| Cd | 0.69 | 0.66 | 0.17~1.40 | 0.45 | 0.07 | 72.22 | 0.37 | 53.44 | 0.963 | 0.75 | 正态 |
| As | 355.88 | 364.10 | 245.75~430 | 30 | 8.90 | 100.00 | 44.85 | 12.60 | 0.924 | 0.222 | 正态 |
| Ni | 216.04 | 220.50 | 181.75~254.50 | 90 | 24.40 | 100.00 | 20.01 | 9.26 | 0.944 | 0.434 | 正态 |
| Pb | 105.27 | 103.88 | 77.63~136.50 | 80 | 24.50 | 91.67 | 19.31 | 18.34 | 0.936 | 0.335 | 正态 |
| Cr | 817.37 | 900.13 | 493.13~1006.75 | 200 | 64.30 | 100.00 | 181.63 | 22.22 | 0.799 | 0.104 | 正态 |

用了国内外运用较为广泛的主成分分析法^[34,35],结果如表 5 所示. 可以看出 5 种污染物的污染情况可以由两个主成分因子反映,总累计值为 82.805%,说明两个主成分已经能够反映 5 种重金属污染的大部分信息. 主成分 1 累计方差为 58.255%,且 Cd、As、Ni 与 Cr 在主成分 1 上有较高的正载荷,且 As 最高,说明这 4 种重金属在主成分 1 中有较高的贡献率,而 Pb 的载荷较低,综合前 4 种重金属的相关性分析和主成分分析可推断 Cd、As、Ni 和 Cr 受相同污染源影响的可能性较大.

结果显示,研究区土壤重金属污染现象不容乐观,重金属污染情况严重. 通过课题组实地调查,两个主成分基本可排除成土母质影响,人类活动是造成重金属富集的主要原因. 研究区重金属污染来源主要有以下两个方面. 一方面主要是由于研究区煤矿资源丰富,并且分布金属铝等冶炼厂. 煤矿开采产生的大量矿井水、洗煤水和金属冶炼产生的废水,未经处理排放到外界环境,污染地下水与地表水等灌溉水源,大量 Cd、As、Ni 和 Cr 经污水灌溉直接进入农田土壤中,导致重金属在土壤中大量累积^[5]. 其次采矿过程中产生大量煤矸石等废渣,经雨水冲刷淋溶等作用,进入农田土壤,也加重了重金属的异常迁移^[6]. 同时煤矿开采造成周边农田大面积塌陷,为实现农田复垦,采用充填整平模式,把煤矸石、电厂粉煤灰等废渣填充于塌陷处^[36,37],虽对土地起了一定的修复作用,但不可避免地扩大了土壤和煤矸石的接触,导致重金属在土壤中逐渐累积. 研究区中部地区有兴隆鑫源橡胶、中西部有道恩化工等大型工厂,塑胶、电镀作业过程中会使用如防老剂、着色剂锌铬黄等含有 Cr、Ni 等重金属元素的原料,生产过程中产生的“三废”排入土壤环境^[38],进一步造成重金属累积. 另一方面,农药与化肥过度使用也在一定程度上加重了土壤重金属污染. 研究区小麦、玉米、葡萄与苹果等作物的种植污水灌溉现象较为普遍,同时大量使用农药与化学肥料,也

会导致重金属在土壤中的富集,比如 As 化物广泛用于农药生产与使用^[39],Cd 在磷肥中的含量较高^[40]. 主成分 2 的累计方差为 24.55%,Pb 表现为较高的正载荷,说明 Pb 与其他 4 种重金属有很大可能不属于同一污染源,调查发现该区域交通发达,国道、港口一应俱全,虽然在 2000 年国家已经逐渐淘汰含 Pb 汽油,但汽车尾气排放,煤炭燃烧导致 Pb 的累积效应仍不能忽视^[1].

表 4 重金属含量相关性分析¹⁾

Table 4 Pearson correlation coefficient matrix of heavy metals content

| | Cd | As | Ni | Pb | Cr |
|----|---------|---------|--------|--------|----|
| Cd | 1 | | | | |
| As | 0.723** | 1 | | | |
| Ni | 0.621* | 0.680** | 1 | | |
| Pb | 0.100 | 0.121 | 0.477 | 1 | |
| Cr | 0.472 | 0.648** | 0.594* | -0.196 | 1 |

1) * 0.01 水平显著相关(双尾), *0.05 水平显著相关(双尾), 样本数为 36

表 5 重金属含量主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis results of heavy metal contents

| 元素 | 主成分 1 | 主成分 2 |
|--------|--------|--------|
| Cd | 0.827 | -0.061 |
| As | 0.900 | -0.106 |
| Ni | 0.885 | 0.302 |
| Pb | 0.243 | 0.952 |
| Cr | 0.759 | -0.464 |
| 特征值 | 2.913 | 1.227 |
| 方差/% | 58.255 | 24.550 |
| 累积方差/% | 58.255 | 82.805 |

2.2.2 重金属空间分布特征分析

根据 5 种重金属含量数据正态分布检验结果,利用 GS+9.0 地统计软件对数据进行半变异函数分析,因研究区范围较小,土壤类型差异很小,选择各向同性分析其空间分布特征. 在半变异函数模型中,块金值 C_0 表示因非自然因素导致重金属空间分布情况的程度; C 为结构方差值,表示因自然等非人为因素的影响程度;基台值 $C_0 + C$ 表示系统内的

总变异程度;块金效应 $C_0/(C_0 + C)$ 为块金值与基台值之比,表示人为等非自然随机因素导致的重金属含量空间变异占总体变异的比重. 其中块金效应值小于 0.25 表示空间变异主要以结构性变异为主,各采样点具有很强的空间相关性,在 0.25 与 0.75 之间表明重金属具有中等空间相关性,大于 0.75 说明空间相关性较弱,变异主要由随机变异组成.

表 6 中给出了 5 种重金属最优半变异函数拟合模型与各项参数,利用均方根误差(RMSE)、平均标准误差等参数对比不同拟合模型的精度,最终列出了 5 种重金属的最优半变异函数模型,其中 Cd 与 As 以球型模型最佳, Ni 与 Pb 以高斯模型最佳, Cr 以指数模型最佳. 从表 6 中可以看出:每种重金属的块金效应均大于 0.25,且在 0.25 ~ 0.75 之间,按从大到小排列依次为 As、Cd、Cr、Ni、Pb,说明这些重金属各样点为中等空间相关性.

综合以上分析结果,选取普通克里金插值方法

进行空间插值,得到 5 种重金属含量空间分布特征图(图 3). 从图 3 中可以看出 5 种重金属空间分布变化较大,但仍具有一定的规律性,重金属含量空间分布特征在某些区域类似. 从整体上看,研究区中部桑园煤矿及其周围重金属富集程度较为严重,东部与西部重金属富集程度相对较低. 其中 Cd 与 As 空间分布格局相似,研究区中部地区,即桑园煤矿区、北皂煤矿东部、梁家煤矿东南部地区含量高,呈带状分布,沿东西方向逐渐递减; Ni 含量高值区分布在研究区外围,位于梁家煤矿与洼东煤矿南部,其他地区相对较低,东北部草泊煤矿区域最低; Pb 含量由研究区西南部向东北部逐渐降低,呈明显的阶梯下降趋势,梁家煤矿区域含量相对较高; Cr 含量空间分布高值区与 Cd、As 相似,并呈明显带状分布,低值区主要集中在研究区的东北和西南区域,位于梁家煤矿与草泊煤矿区内,并呈两个漏斗状.

表 6 土壤重金属含量半变异函数模型统计

Table 6 Semivariogram models statistics of Heavy metal content

| 元素 | 模型选择 | 块金值 C_0 | 基台值 $C_0 + C$ | 块金效应 $C_0/(C_0 + C)$ | 标准均方根 | 标准平均值 | 平均标准误差 | 均方根误差 |
|----|------|-----------|---------------|----------------------|-------|-------|---------|---------|
| Cd | 球型 | 0.097 | 0.154 | 0.627 | 0.965 | 0.013 | 0.412 | 0.396 |
| As | 球型 | 1508.492 | 2341.342 | 0.644 | 0.849 | 0.007 | 50.614 | 41.834 |
| Ni | 高斯 | 173.981 | 423.756 | 0.411 | 1.413 | 0.065 | 17.720 | 27.665 |
| Pb | 高斯 | 93.475 | 318.145 | 0.294 | 1.169 | 0.083 | 13.660 | 18.007 |
| Cr | 指数 | 16175.561 | 30052.023 | 0.538 | 1.028 | 0.012 | 173.123 | 176.716 |

2.3 重金属污染程度评价

龙口煤矿区土壤重金属单因子污染指数评价与改进的加权平均综合污染评价结果如表 7 所示,综合污染程度空间分布如图 4 所示. 从表 7 中可以看出 As 的污染指数最高,全部样本均属于重度污染,说明研究区内 As 污染程度高. 其次为 Cr,全部样本均受到不同程度的污染,其中 10 个样本属中度污染,26 个

样本为重度污染. Ni 全部样本也均受到污染,指数值范围为 2.02 ~ 2.83,为中度污染,可以看出 Ni 在土壤中富集情况较为严重. Cd 样点变异性较强,不同地区污染程度不同,无污染样本 9 个,轻度污染、中度污染、重度污染样本分别为 17、7、3 个,相对以上 3 种重金属污染程度较轻. Pb 大部分样本属于轻度污染,样本含量值与背景值离差较小,污染较轻.

表 7 表层土壤重金属污染评价

Table 7 Assessment of the heavy metals pollution in surface soil

| 元素 | 单因子污染指数 | | | 污染程度样本统计 | | | | 国家土壤二级标准 /mg·kg ⁻¹ | 超标率 /% |
|------|---------|-------|-------|----------|------|------|------|----------------------------------|-----------|
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 无污染 | 轻度污染 | 中度污染 | 重度污染 | | |
| Cd | 0.38 | 3.11 | 1.53 | 9 | 17 | 7 | 3 | 0.45 | 73.33 |
| As | 8.19 | 14.33 | 11.86 | 0 | 0 | 0 | 36 | 30 | 100.00 |
| Ni | 2.02 | 2.83 | 2.40 | 0 | 0 | 36 | 0 | 90 | 100.00 |
| Pb | 0.97 | 1.71 | 1.32 | 3 | 33 | 0 | 0 | 80 | 93.33 |
| Cr | 2.47 | 5.03 | 4.09 | 0 | 0 | 10 | 26 | 200 | 100.00 |
| 综合污染 | 2.17 | 4.66 | 3.50 | 0 | 0 | 10 | 26 | | |

根据层次分析法权重计算结果,综合以上 5 种重金属单因子污染指数,计算得出研究区 36 个样本综合污染指数范围为 2.17 ~ 4.66,中度污染样本为

10 个,重度污染样本为 26 个. 可以看出,研究区全部样本均受到不同程度的污染,样本重度污染率达 72.2%. 综合污染程度空间分布图显示:东南区域

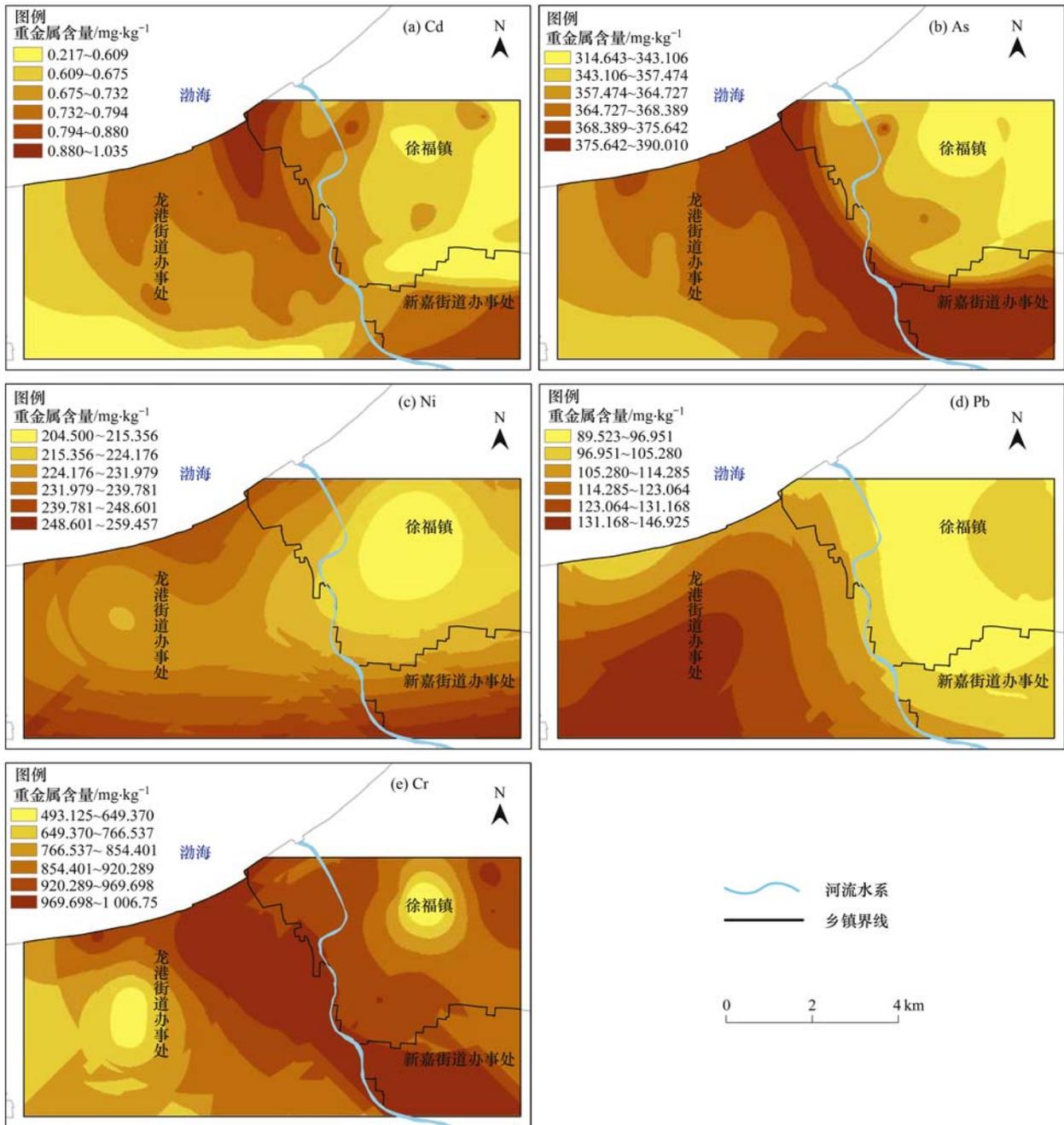


图3 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in soil of study area

污染程度相对较弱,污染严重地区主要分布在研究区的中北部.

3 结论

(1) 龙口矿区 5 种重金属 (As、Cd、Cr、Ni、Pb) 富集情况严重,平均值均高于国家土壤环境质量二级标准,并远高于山东省东部表层土壤重金属含量背景值.

(2) 在主成分分析的基础上,经调查分析发现人类活动是导致重金属富集的主要原因. 其中 Cd、As、Ni 和 Cr 主要来源于污水灌溉、工业企业排放以及农业活动; Pb 的污染主要受汽车尾气与煤炭燃烧的影响.

(3) As 与 Cd 的最优半变异模型为球型模型,Cr 与 Ni 的最优半变异模型为高斯模型,Pb 的最优半变异模型为指数模型. 5 种重金属块金效应均在

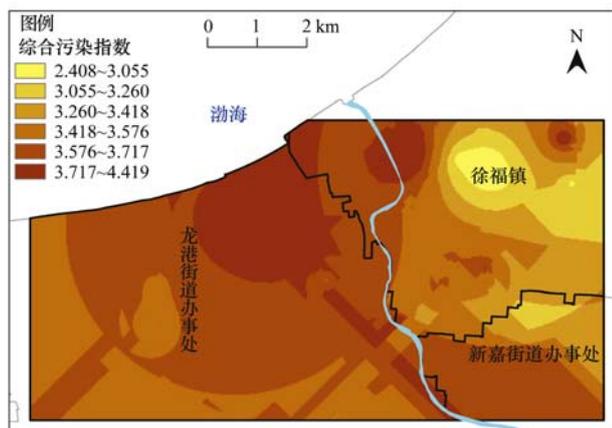


图 4 土壤重金属综合污染程度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of comprehensive pollution level of heavy metals in soil

0.25~0.75 之间,属于中等空间相关性。不同重金属空间分布略有差异,但综合所有重金属空间分布情况发现,研究区中部桑园煤矿区域污染最为严重。

(4) 单因子污染程度评价显示 5 种重金属污染程度依次为 $As > Cr > Ni > Cd > Pb$ 。综合污染程度评价显示研究区污染程度严重,综合污染指数范围在 2.17~4.66 之间,样本重度污染率达 72.2%;从综合污染程度空间分布可以看出研究区中北部整体污染较为严重,东南部污染相对较弱。综上所述,研究区重金属污染现状不容乐观,这势必会对当地的农业生产和居民的身体健康形成威胁,因此当地政府应给予重视,并针对重金属污染现状采取相应的治理措施。

参考文献:

- [1] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7):971-984.
- [2] 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.
- [3] 韩平,王纪华,陆安祥,等.北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J].农业环境科学学报,2012,31(1):106-112.
- [4] 吴洋,杨军,周小勇,等.广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J].环境科学,2015,36(8):2964-2971.
- [5] 谢代兴,孟小军,唐建生,等.煤矿废水对岩溶区水源及土壤污染、危害与评价[J].中国农学通报,2013,29(32):296-302.
- [6] 郭伟,赵仁鑫,张君,等.内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J].环境科学,2011,32(10):3099-3105.
- [7] 王幼奇,白一茹,王建宇.引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例[J].环境科学,2014,35(7):2714-2720.
- [8] 张金莲,丁疆峰,卢桂宁,等.广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J].环境科学,2015,36(7):2633-2640.
- [9] Gramatica P, Battaini F, Giani E, et al. Analysis of mosses and soils for quantifying heavy metal concentrations in Sicily: a multivariate and spatial analytical approach[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2006, 13(1): 28-36.
- [10] 孙贤斌,李玉成.淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J].地理科学,2013,33(10):1238-1244.
- [11] 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清.博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价[J].环境科学,2015,36(7):2422-2429.
- [12] 张雷,秦延文,马迎群,等.大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价[J].环境科学,2014,35(9):3336-3345.
- [13] Benhaddya M L, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1473-1486.
- [14] 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.
- [15] 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等.陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J].农业工程学报,2014,30(6):88-96.
- [16] 战玉柱,姜霞,陈春霄,等.太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J].环境科学研究,2011,24(4):363-370.
- [17] 烟台市统计局.烟台统计年鉴2013[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [18] 隋红建,吴璇,崔岩山.土壤重金属迁移模拟研究的现状与展望[J].农业工程学报,2006,22(6):197-200.
- [19] 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.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] 刘庆,王静,史衍玺,等.基于GIS的县域土壤重金属健康风险评价——以浙江省慈溪市为例[J].土壤通报,2008,39(3):634-640.
- [22] 张鹏岩,秦明周,陈龙,等.黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J].环境科学,2013,34(9):3654-3662.
- [23] GB 15618-2008,土壤环境质量标准[S].
- [24] 李雪梅,邓小文,王祖伟,等.污染因子权重及区域环境质量综合评价分级标准的确定——以土壤重金属污染为例[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):97-100.
- [25] 石占飞,王力.神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(6):1150-1158.
- [26] Swaine D J. Why trace elements are important [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66: 21-23.
- [27] 胡森,吴家强,彭佩钦,等.矿区耕地土壤重金属污染评价

- 模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 423-430.
- [28] 夏增禄. 中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量的区域分异[J]. 地理学报, 1993, **48**(4): 297-303.
- [29] GB 2715-2005, 粮食卫生标准[S].
- [30] GB 2762-2012, 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
- [31] 杨慧. 空间分析与建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. 137-139.
- [32] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学基准值与背景值及元素富集特征研究[J]. 地球化学, 2011, **40**(6): 577-587.
- [33] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys [R]. Pudoc, Wageningen, Netherlands; Soil Spatial Variability, 1985. 166-193.
- [34] 刘瑞民, 王学军, 陶澍, 等. 天津表土 PAHs 的空间主成分与污染源分析[J]. 地理科学进展, 2005, **24**(3): 109-117.
- [35] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.
- [36] 刘硕, 吴泉源, 张龙龙, 等. 基于野外实测光谱的污灌区土壤重金属污染快速监测[J]. 安全与环境学报, 2015, **15**(2): 297-302.
- [37] 张海林. 龙口煤矿塌陷区遥感动态监测及土地复垦利用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2006.
- [38] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [39] 赵兴敏, 王春玲, 董德明, 等. 重金属和有机氯农药在沈阳郊区农田土壤中的吸附和迁移[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9): 1880-1887.
- [40] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3569-3576.

CONTENTS

| | |
|--|---|
| Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe | BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1) |
| Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure | LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10) |
| Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou | HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16) |
| Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region | SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22) |
| Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games | ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28) |
| Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City | LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35) |
| Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring | MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41) |
| A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51) |
| Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants | WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60) |
| Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66) |
| Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing | FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74) |
| Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng | WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82) |
| Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88) |
| Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region | YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94) |
| Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China | WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102) |
| Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn | LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112) |
| Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China | SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123) |
| Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River | HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132) |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff | YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141) |
| Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban | FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148) |
| Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River | WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156) |
| Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir | HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166) |
| Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir | YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173) |
| Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing | WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180) |
| Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism | WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187) |
| Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂ | XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193) |
| Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV | DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198) |
| Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution | LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208) |
| Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂ | ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220) |
| Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters | ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228) |
| Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System | GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240) |
| Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate | ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247) |
| Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta | LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253) |
| Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization | XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262) |
| Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City | LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270) |
| Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration | WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280) |
| Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil | ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288) |
| Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil | AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293) |
| Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings | PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301) |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils | WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309) |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China | LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317) |
| Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors | WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325) |
| Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland | JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335) |
| Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill | LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342) |
| Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction | YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350) |
| Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy | DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359) |
| Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying | QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366) |
| Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter | CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377) |
| Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens | WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384) |
| Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants | LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391) |
| Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact | LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397) |

《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

| | | | | |
|---------|---|------------------|----|--|
| 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