

环境科学

(HUANJING KEXUE)

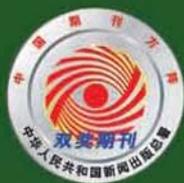
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 王振翔, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍树林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析

宋志廷^{1,2}, 赵玉杰^{2*}, 周其文², 刘潇威², 张铁亮²

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 为了解天津市武清区重金属污染状况及污染来源情况, 在研究区共采集了 578 个表层土壤样品并分析了 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As(类金属)、Ni、Cr 等 8 项重金属含量. 综合应用描述性统计、主成分分析、地质统计学及随机森林回归技术对研究区表层土壤重金属含量时空变化特征及人为及自然源污染贡献性进行了探讨. 结果表明, 除 Cr 以外, 研究区其余重金属平均含量均高于区域背景值, 土壤 As、Ni、Cr 主要来自于自然源即土壤类型的差异性, Cu、Zn 的变异性一是受土壤类型差异性的影响, 二是受污灌的影响, Pb、Cd 的变异主要受面源污染的影响, 局部存在点源污染. Hg 变异性主要受污灌的影响. 实践证明多技术联合应用是土壤重金属来源解析的有效方法.

关键词: 土壤; 重金属; 源解析; 地质统计学; 随机森林回归

中图分类号: X53; X833 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2756-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.044

Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China

SONG Zhi-ting^{1,2}, ZHAO Yu-jie^{2*}, ZHOU Qi-wen², LIU Xiao-wei², ZHANG Tie-liang²

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: A survey on soil samples was conducted to study the heavy metal pollutions and their potential sources in Wuqing District, Tianjin, China. A total of 578 topsoil samples were collected and the concentrations of eight heavy metals, namely, Cd, Pb, Cu, Zn, Cr, Ni, As (metalloid) and Hg were analyzed. A summary of descriptive statistics, principal component analysis, geostatistical analysis and stochastic forest regression models were applied to study the spatial and temporal variation and identify proportional contribution from either natural or anthropogenic sources for the eight heavy metals in topsoils of the study region. The results indicated that the average concentrations of all the heavy metals except for Cr in the topsoils exceeded their corresponding natural-background values. As, Ni and Cr were mainly contributed by natural sources (i. e., soil parent materials). Cu and Zn originated from both the soil parent materials and sewage irrigation. Pb and Cd originated mainly from non-point source pollution and partially from point source. Hg originated from sewage irrigation. It was proved that combination of multi-technologies provides an effective way to delineate multiple heavy metal pollution sources.

Key words: soil; heavy metals; source apportionment; geostatistics; stochastic forest regression

近年来,随着产地环境调查工作的开展,我国基本农田重金属污染物空间分布情况已基本掌握^[1-4],而重金属污染来源问题成为防控其污染必须解决的关键问题之一. 重金属来源复杂多样,不但有母质贡献源,而且人为贡献也越发突出,如企业点源、农业投入品、大气降尘面源等,而且区域重金属污染还可通过社会经济发展指标差异性间接反映出来. 正是来源的复杂性及空间变异不确定性,造成了重金属源解析的困难性. 目前,科研人员对重金属来源解析技术进行的研究主要集中在对汇变异性的分析及对源特征的专家判断来建立源-汇之间的关系,采用的方法主要有主成分分析、正定主成分分析、地质统计学、混合分布模型等,主成分、正定主成分分析是一种数据降维分析方法,可以有

效将有同源特征的重金属进行归类进而根据归类特征探寻污染源^[5-8],地质统计学方法是建立在空间相关理论基础上以变异函数为基本工具以揭示污染物空间分布特征而用于判定污染源的统计技术^[9-11],混合分布模型则是将数据分布进行分开拟合而确定人为源及自然源的一种有效工具^[12,13]. 近年来,随着随机模拟技术的发展,随机森林回归技术逐步被应用于土壤污染来源解析中来,随机森林回归克服了传统技术对数据的苛刻要求,不必担心

收稿日期: 2015-11-19; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403014-01); 工程院咨询项目(2014001)

作者简介: 宋志廷(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染物的生物有效性及其风险评估, E-mail: songzhiting1990@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yujiezhao@126.com

过度拟合问题,是解决源污染分担计算的重要工具之一^[14]。因此发挥各自特长,将多种技术融合应用于产地重金属污染源解析中是污染源解析技术发展的必然选择,而相关研究还明显不足。

本研究选择在天津西北部武清区,武清是天津市主要集约化农区,同时也是北京排污河、北运河及永定河等北京、河北、天津排污河流的主要通道,有 50 余年的污灌历史。关于本区域土壤及水体有机污染物研究较多^[15~18],而很少关于本区域重金属污染状况及污染来源的研究。本研究在武清区采用了 578 个土壤样品,采用主成分分析、地质统计学及随机森林回归相结合的方法探寻农田重金属污染源并估计各源相对贡献,以期为本区域重金属污染治理及环境管理提供有效支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况,样品采集及分析

天津市武清区属大陆型半干旱季风气候区,一般年份降水量在 500~600 mm 之间,7~8 月降水占全年降水量的 80% 左右。汛期洪水来水量年际变化很大,枯水季节河道一般无天然径流,只有少量污水。北京排污河、北运河及永定河的污水大部分在本区域内被用来灌溉。武清区污灌自从 1982 年开始,到 2000 年以后,由于水资源越来越缺乏,污灌问题更加突出^[19]。研究区种植的农作物以小麦、玉米为主,土壤类型主要由潮土、壤质潮土、沙质潮土、黏化潮土、盐化潮土、湿潮土、石灰岩类淋溶潮土等组成^[20]。

本研究在武清区 29 个乡镇共布设 578 个土壤表层(0~20 cm)采样点,见图 1 所示。每个样品代表面积约为 100 hm²,每个样品由 4~6 个子样混合组成,采样时记录采样点经纬度坐标。样品采集后自然风干捡去杂草、石粒后过 2 mm 筛备用。采用四分法取 100 g,用玛瑙球磨机研磨至全部通过孔径 0.149 mm 尼龙筛,混匀后用于测定重金属含量。准确称取 0.500 0 g 准备好的土壤样品,采用硝酸-氢氟酸-高氯酸三酸混合液微波消解后采用 ICP-MS(安捷伦 7500)检测重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni 含量^[21],另准确称取 0.500 0 g 土壤采用 50% 王水微波消解后采用原子荧光法检测 As、Hg 含量,仪器为吉天 AFS-9130^[22, 23]。采用复样、盲样及穿插标样检测等方法控制检测精度及准确度。

1.2 数据收集及准备

采用随机森林回归计算各源对土壤重金属的贡

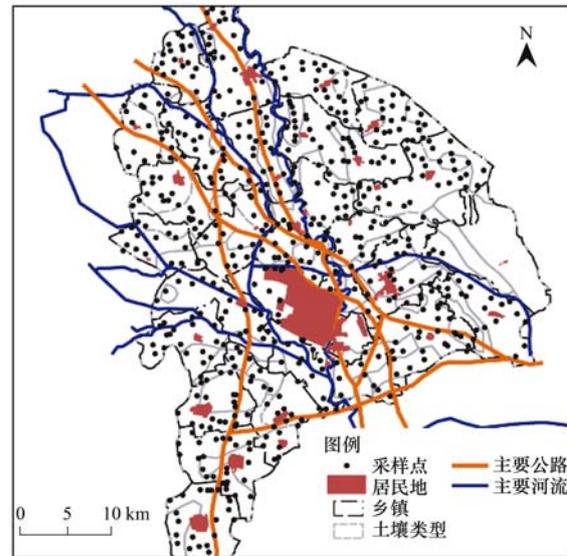


图 1 研究区采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study region

献分担,首先需获取研究区影响土壤重金属含量及空间变异性的基础数据,本研究收集的数据主要有以下 5 类。①基础地理数据,主要包括可能引起重金属变异的污灌河流、主要道路、居民地位置等,并以此为依据计算各监测点到最近河流、道路及居民地的距离;②土壤基础数据,主要包括土壤类型,各乡(镇)耕地面积;③投入品数据:主要为各乡(镇)猪、牛、鸡养殖量,并以此为基础,结合各乡(镇)耕地面积计算单位面积耕地猪、牛、鸡等承压压强;④污染源数据,主要为排放重金属的企业分布情况;⑤社会经济发展数据,包括各乡镇面积、人口数量、农业人口数量、各乡镇工业生产总值、各乡镇粮食平均单产等,并以此为基础结合各乡镇面积,计算单位面积人口、农业人口压力及工业生产压强。基础地理数据依据全国 1:25 万地形图获取。土壤基础数据根据天津土种志^[20]及武清区统计年鉴获得。投入品,社会经济发展数据均来自于武清区统计年鉴^[24]。污染源数据原自于 Google Earth 软件查询结果。

1.3 高斯条件模拟值法

高斯条件模拟值技术是地统计模拟技术中最常用的方法,高斯条件模拟技术首先要创建一个基于标准正态分布(平均值=0,方差=1)绘制的随机分配值的网格。然后,将由简单克里格法创建的半变异函数模型应用到栅格。这样可以确保栅格值遵循输入数据集中的空间结构。生成的栅格构成一个非条件实现,而且通过每次使用不同的包含正态分布值的栅格可生成更多的非条件实现^[25, 26]。如果已

选择条件模拟,则会通过克里格法将非条件栅格条件化. 该过程利用每个位置处的克里格估计值(预测值)确保模拟值遵循输入数据值,且平均来看,克里格法预测得到复制. 高斯地统计模拟的一般工作流程包括:一是数据准备如降聚,正态化转化,趋势移除等;二是创建简单克里格模型,如计算并拟合实验半变异函数,确定领域搜索策略等,模型的选择、拟合优度的评估及搜索领域的确定采用交叉验证法,一般采用标准化平均误差及均方根标准化误差两项指标来评估结果的无偏性及最优性,标准化平均误差应尽可能地为 0,而均方根标准化误差应尽可能接近于 1;三是创造实现,如运行简单克里格模型,建立高斯条件模拟基础面,对数据进行反变换处理,增加移除趋势等;四是进行高斯条件模拟计算处理,如选择模拟次数,确定模拟边界,确定计算统计量等^[27].

1.4 随机森林回归

随机森林回归算法是由 Breiman 提出的基于决策树分类器的融合算法,其基本思想是基于统计学理论,利用 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,对每个 bootstrap 样本构建决策树,然后将所有决策树预测平均值作为最终预测结果. 随机森林回归可以看成是由很多弱预测器(决策树)集成的强预测器. 具有:①较少的参数调整;②不必担心过度拟合;③适用于数据集中存在大量未知特征;④能够估计哪个特征在分类中更重要以及⑤数

据集中存在大量噪声时同样可以取得很好的预测性能等优点. 具体计算步骤参见文献[28].

1.5 数据分析采用的软件

数据描述性统计、主成分分析采用的软件为 IBM SPSS V20,数据条件模拟值及其图件制作采用软件为 ArcGIS Desktop 10.3,随机森林回归采用的软件为 R V3.1.2.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量描述性统计

表 1 给出了武清区土壤 8 项重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、As、Hg 描述性统计结果,天津市背景值及武清区背景值参见文献[29, 30]. 海河流域平原区土壤重金属平均含量参见文献[2]. 可见,研究区土壤重金属平均含量与海河流域平原区基本相当,Cd、Cr、As 略低,Pb、Cu、Zn、Ni、Hg 略高,与天津市背景值相比,Cd、Pb、As、Hg 有所增加,而 Cu、Zn、Cr、Ni 依然低于背景值,这与张文具等人研究结果一致^[30]. 但与本区域背景值相比,除 Cr 减少外,其它 7 项重金属含量均有增加. 结合 Cr 的中值及峰度、偏度统计值可知,Cr 基本处于背景水平,而其它 7 项重金属均受外界环境的影响出现增加态势,其中 Cd、Pb、Hg 的峰度、偏度值较高,偏态分布明显,且其平均值也有增加,尤其是 Hg 增加突出,可知 Cd、Pb、Hg 受到外界污染,且存在点源性污染高值.

表 1 研究区表层土壤重金属含量描述性统计结果

Table 1 Summary statistics of metal concentrations in topsoils in the study region

重金属	平均值 /mg·kg ⁻¹	天津市背景值 /mg·kg ⁻¹	武清区背景 /mg·kg ⁻¹	海河流域平均值 /mg·kg ⁻¹	中位数 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	偏度	峰度
Cd	0.14	0.09	0.09	0.16	0.13	50.2%	0.02	0.65	1.82	6.78
Pb	24.27	20	20.60	23.42	23.38	21.3%	12.00	51.00	1.25	2.91
Cu	24.54	28.4	19.88	23.94	23.50	28.3%	9.35	48.00	0.60	0.14
Zn	71.56	77.75	66.87	70.14	69.00	28.9%	17.00	141.50	0.50	0.23
Cr	62.52	83.8	63.69	66.39	60.07	21.4%	34.63	106.75	0.64	0.11
Ni	32.12	32.95	26.69	28.19	30.55	29.4%	8.25	74.45	0.60	0.31
As	9.47	9.32	8.39	9.98	9.20	29.6%	2.80	20.20	0.82	1.00
Hg	0.08	0.05	0.04	0.05	0.07	61.1%	0.00	0.32	1.59	3.29

2.2 主成分分析

主成分分析是一种对高维数据进行降维从而更好了解重金属之间关系的方法,本研究对 8 项重金属进行主成分分析,同时为了更好地展示结果差异性,采用标准化最大方差法对主成分矩阵进行旋转,结果见表 2 所示. 基于特征值大于 1 的限制,本研究共获得 3 个主成分,可解释数据 68.27% 的变异性.

主成分 F1 代表总变异的 35.24%,主要有 Cu、Zn、Cr、Ni、As 等 5 项重金属组成,描述性统计可知,研究区这 5 项重金属除 Cr 外虽有一定累积,但总体增加量不高,监测值基本服从正态分布,异常高值少,因此可初步判断,这 5 项重金属变异主要来源于土壤类型即背景的差异性. Pb、Cd 属于第二组分 F2,代表总变异的 19.18%,Pb、Cd 两种元素都在研究

区内有一定的累积,而且从峰度、偏度值可知,两者都有大值存在,说明受到点源的污染. Google Earth 查询结果可知,在 Pb、Cd 高值区共有 23 家重金属排污企业,主要企业类型为电镀、电子、化工类及畜禽养殖. Hg 属于第三组分 F3,代表总变异的 13.85%,本区域 Hg 背景值为 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而现在平均值达到了 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值也达到了 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值增加了 2 倍,可见,Hg 存在较严重的外源污染情况,1982 年天津市农科院中心实验室对北京排污河沿岸水体、地下水及土壤监测结果表明,河水、地下水及土壤都受到 Hg 的污染,水体污染尤其严重^[31],可见,Hg 明显受到污灌的影响.

表 2 标准化最大方差法旋转后的重金属主成分矩阵承载

Table 2 Loadings of heavy metals on VARIMAX-rotated factors of different datasets

项目	组分		
	F1	F2	F3
Cu	0.691	0.453	0.136
Zn	0.655	0.266	0.389
Pb	0.093	0.769	-0.070
Cr	0.806	0.205	-0.062
Cd	0.148	0.783	0.028
Ni	0.828	0.091	0.049
Hg	0.023	-0.065	0.962
As	0.739	-0.030	-0.024
特征值	2.819	1.535	1.108
方差/%	35.239	19.183	13.850
累积/%	35.239	54.422	68.272

2.3 重金属空间分布

数据经正态变换后采用高斯条件模拟值法绘制研究区 8 项重金属空间分布插值图,见图 2 所示. 高斯条件模拟所依据的简单克里格拟合模型及模型参数见表 3 所示. 块金值与基台值比值 $[C_0/(C_0 + C)]$ 一方面反映了样品分析误差及采样误差在微域内存在变异性的存在,另一方面则反映了人为因素对重金属空间变异性的影响^[32],块金比越高,反映人为因素对重金属空间变异性影响越强,中等强度的变异性(块金比在 0.25 ~ 0.75 之间)则反映了重金属空间变异受到人为及自然因素的双重作用,而弱变异则反映了重金属空间变异的本质特征^[10]. 在 8 项重金属中,土壤 As 块金值比最小,表明 As 空间变异性受外界因子影响最小,其变异主要是受土壤类型变异影响,这与主成分分析结果一致,王馨慧等对北京排污河上游凉水河沉积物 As 含量的监测结果也表明,本区域 As 并非来源于污灌^[33]. 而 Hg、Pb、Cu、Zn、Cd、Ni、Cr 块金比均属于中等强度变异性,说明还有外界因素影响其分布,而 Hg 受到的影响最强. 这一特点由重金属的变程大小也可以看出,As、Ni、Cr 的变程均大于 2 km,而受外界影响大的 Hg、Pb、Cu、Zn、Cd 变程均在 1.7 km 左右,由于 8 项重金属所采用的模型相同,变程的小大直接反映了空间自相关距离的大小,受外界人为影响大,其空间自相关自然下降,变程则相应减少.

表 3 重金属空间变异半变异函数拟合模型及参数

Table 3 Best-fitted semivariogram models and parameters of the soil heavy metals

重金属	模型	块金值/ C_0	基台值/ $(C_0 + C)$	块金比/ $[C_0/(C_0 + C)]$	变程/km	系数
Cu	平稳	0.645	1.073	0.60	1.75	1.33
Zn	平稳	0.615	1.067 8	0.57	1.76	1.42
Pb	平稳	0.631	1.045	0.60	1.37	1.33
Cd	平稳	0.658	1.215	0.54	1.78	2.0
Hg	平稳	0.736	1.043	0.70	1.71	2.0
As	平稳	0.090	1.188	0.07	2.23	0.61
Ni	平稳	0.626	1.247	0.50	2.89	1.88
Cr	平稳	0.511	1.169	0.43	2.83	1.38

图 2 表明,8 项重金属的空间分布有差异性也有相同性,高值区主要集中在武清区县城西南地区以及北京排污河一线,还有部分重金属在研究区东南部靠近大毕庄附近也有高值区. 具体而言,重金属 Zn 高值区主要沿北京排污河及永定河一线,距离河流越近,Zn 含量越高,可见,Zn 的变异必然是受到了污灌的影响. Cu 的分布基本与 Zn 相同,主要差别在于 Cu 在东南部高值区与黏化潮土分布更加一致,而沿北京排污河的高值区更窄,说明 Cu 是受

土壤类型及污灌的双重影响. Ni 高值区分布与黏化潮土区基本一致,说明土壤类型是其主要影响因素. Cr、As 的变异由图 2 可知与土壤类型有更直接的联系,黏质土壤 Cr、As 含量明显高于其它类型土壤. Pb 的污染点状比较突出,说明有排污企业的污染,如靠近北辰区大毕庄的高值区,在大孟庄附近的高值区. Hg 的高值区主要沿北京排污河分布,说明主要是由于污灌引起的. Cd 的分布与其它重金属有明显的差异,呈现四周高,中间低的趋势,显然这种

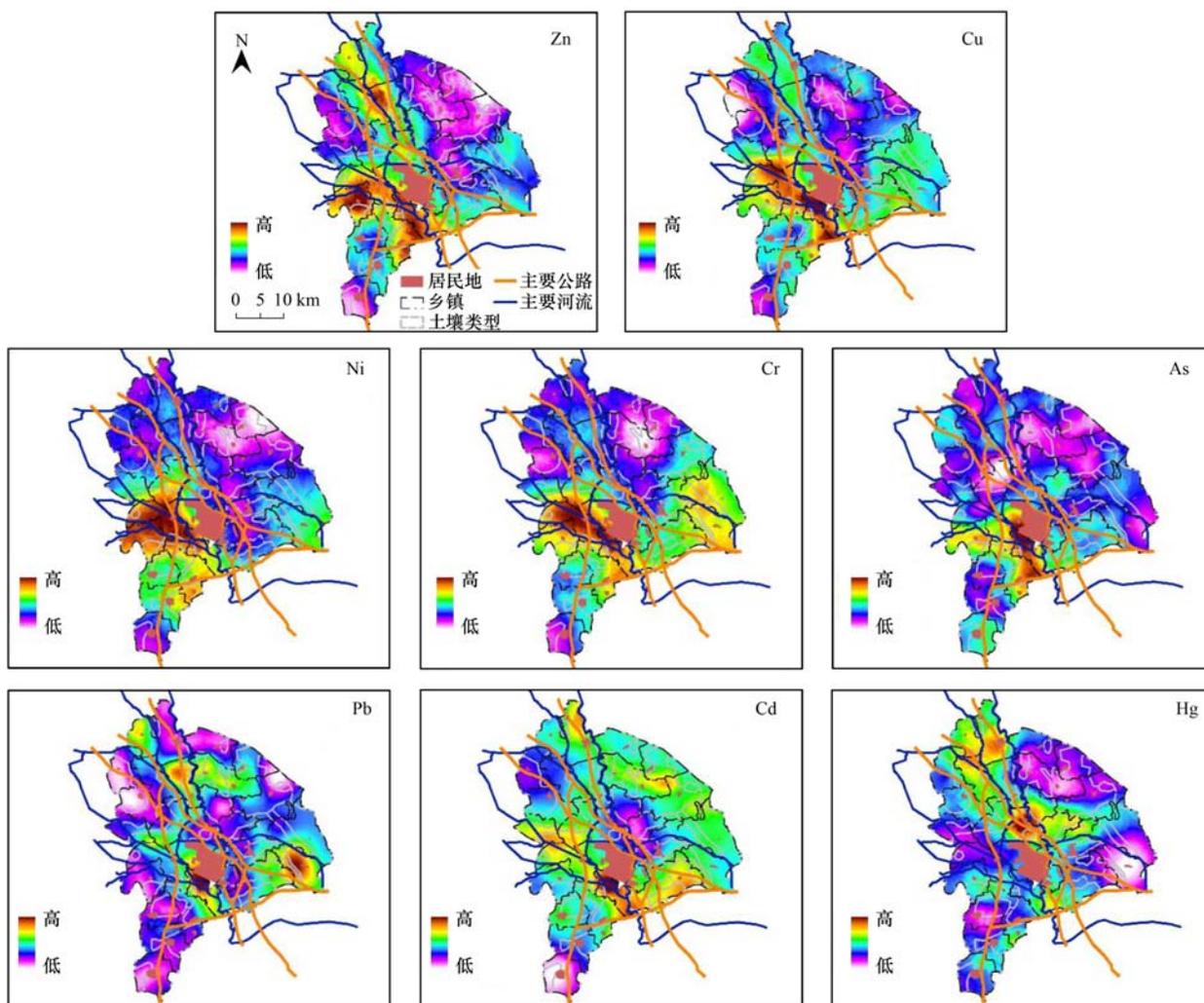


图2 武清区重金属(Zn、Cu、Ni、Cr、As、Pb、Cd、Hg)含量分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of heavy metals (Zn, Cu, Ni, Cr, As, Pb, Cd and Hg) in topsoils in the Wuqing district in Tianjin, China

变异性不是由土壤类型的变化造成的,但似乎也与污灌关系不密切。

2.4 重金属来源的随机森林回归分析

研究区8项重金属描述性统计分析、主成分分析及地质统计学分析逐步明析了重金属含量增加及空间变异性产生的原因。但以上分析基本是对重金属汇展开的探讨,土壤重金属含量增加及空间变异的原因分析在很大程度上是基于对已有知识的掌握及专家判断,并没有在源-汇之间建立起真实的量化联系。且在某些情况下专家判断存在较大的不确定性,更有时无法给出明显的答案,如对重金属Cd空间变异原因的探讨。正是基于以上问题,本研究采用了随机森林回归技术构建重金属源-汇量化关系。结果见图3所示。所构建的模型对重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As、Ni、Cr空间变异可解释性分别为94.43%、95.64%、90.85%、91.41%、91.54%、

90.11%、96.39%、96.11%,均达到极显著水平。图3可知,Cd的空间变异第一影响因素为粮食单产,也就是说乡(镇)粮食平均单产越高,土壤Cd的污染越重,高投入与高产出的关联性,及Cd污染与土壤类型的不一致性说明农业投入品如矿物肥对产地Cd的长期累积性应引起重视,这与Chen等^[34]的研究结果一致,再结合描述性统计及主成分分析结果可知,Cd的变异性是以面源污染为主,点源污染为辅的。土壤Pb变异主要贡献源为粮食单产、鸡粪承载及距离居民地距离远近,可见,Pb的来源比较复杂,即有面源污染也有点源污染。Hg最主要变异源为距离河流及道路的远近,由于本研究主要道路及河流具有一定的重叠性,可见,Hg主要是来源于污灌。Cu、Zn的变异源与上文分析的一致,Cu的变异更多来自于土壤类型的变化,而Zn的变异则主要由土壤类型及污水灌溉造成的。Ni、As、Cr的变

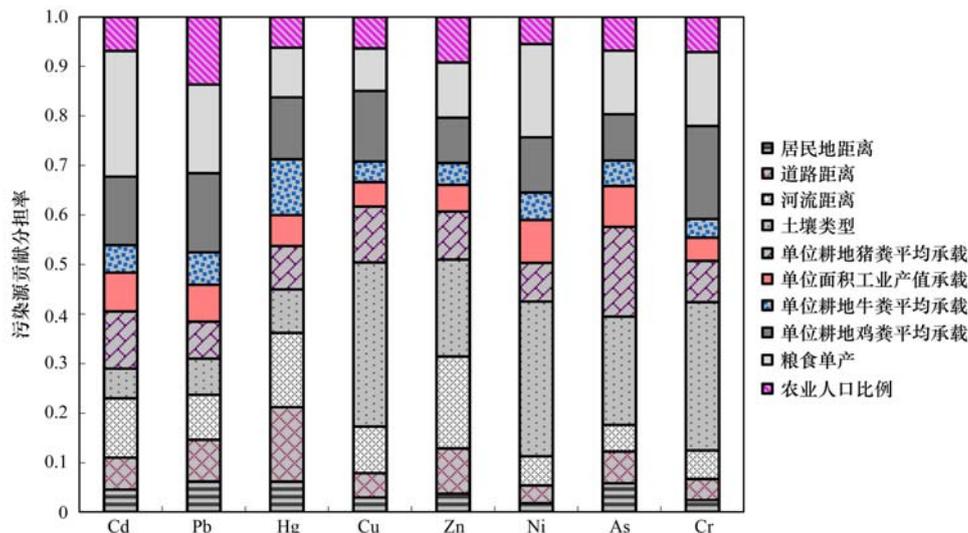


图3 不同贡献源对不同重金属变异贡献比例

Fig. 3 Sources importance scores for spatial variation of the heavy metals in the topsoils in the study region

异也主要来源于土壤类型的变化,虽然土壤类型的变化承担率有所不一。

3 结论

(1)描述性统计结果表明,除 Cr 以外,天津武清区 7 项重金属平均含量均有所增加,其中 Hg 平均含量增加了 2 倍,Cd、Pb 增加次之,Hg、Cd、Pb 均存在点源污染引起的高值点。

(2)主成分分析结果表明,8 项重金属可提取 3 个主成分,并基本判断 Cu、Zn、As、Ni、Cr 的变异来源主要是土壤类型的差异性,Pb、Cd 变异与点源污染有关,Hg 主要来源于污灌。

(3)地质统计学半变异函数拟合结果表明,除 As 外,其余 7 项重金属变异性明显受到人为活动的影响,Hg、Pb 影响最为强烈。重金属空间分布表明,Cu、Zn 的变异与污灌有必然的联系,Ni、Cr、As 的变异与土壤类型差异性有更直接的联系。

(4)随机森林回归在进一步量化源-汇关系基础上,印证了以上判断,并进一步锁定土壤 Cd 的变异性是受到农业投入品及点源污染的双重影响。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [2] 中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学调查——海河流域平原区[M]. 北京: 中国地质出版社, 2014. 16-173.
- [3] Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, *et al.* Geochemical evaluation of land quality in China and its applications [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 122-135.
- [4] Teng Y G, Wu J, Lu S J, *et al.* Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review [J]. *Environment International*, 2014, **69**: 177-199.
- [5] Liu P, Zhao H J, Wang L L, *et al.* Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from Shandong province, China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, **10**(1): 109-119.
- [6] Micó C, Recatalá L, Peris M, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis [J]. *Chemosphere*, 2006, **65** (5): 863-872.
- [7] Esmacili A, Moore F, Keshavarzi B, *et al.* A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran [J]. *CATENA*, 2014, **121**: 88-98.
- [8] Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of heavy metals in soils using multivariate statistics and geostatistics [J]. *Pedosphere*, 2013, **23**(4): 437-444.
- [9] Wei C Y, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(9): 1230-1236.
- [10] Gu Y G, Li Q S, Fang J H, *et al.* Identification of heavy metal sources in the reclaimed farmland soils of the pearl river estuary in China using a multivariate geostatistical approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **105**: 7-12.
- [11] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **425**: 66-74.
- [12] Zhong B Q, Liang T, Wang L Q, *et al.* Applications of stochastic models and geostatistical analyses to study sources and spatial patterns of soil heavy metals in a metalliferous industrial district of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 422-434.
- [13] Yang S Y, Chang W L. Use of finite mixture distribution theory

- to determine the criteria of cadmium concentrations in Taiwan farmland soils[J]. *Soil Science*, 2005, **170**(1): 55-62.
- [14] Hu Y N, Cheng H F. Application of stochastic models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a large-scale region [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(8): 3752-3760.
- [15] 张枝焕, 陶澍, 沈伟然, 等. 天津地区主要河流沉积物中多环芳烃化合物的组成与分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(11): 1507-1516.
- [16] 张枝焕, 陶澍, 叶必雄, 等. 天津地区表层土壤和河流沉积物中甾烷与五环三萜烷的分布特征及污染源分析[J]. *生态环境*, 2005, **14**(2): 157-164.
- [17] 张翔宇, 张枝焕, 陶澍, 等. 天津地区表层土壤中菲系列化合物的分布特征和污染源分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(1): 74-78.
- [18] 刘瑞民, 王学军, 张巍. 天津地区表层土壤 PAHs 多尺度空间分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(3): 844-849.
- [19] 于卉, 郭勇, 刘德文, 等. 武清县污水灌溉情况及影响分析[J]. *水资源保护*, 2000, (4): 3-6.
- [20] 蒋德勤. 天津土种志[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1990. 68.
- [21] Method 3052, Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices[S].
- [22] GB/T 22105.2-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分: 土壤中总砷的测定[S].
- [23] GB/T 22105.1-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分: 土壤中总汞的测定[S].
- [24] 武清区统计. 2006年武清统计年鉴[EB/OL]. <http://www.tjqw.gov.cn/tongji/tjzl/list.shtml>, 2015-02-09.
- [25] Dietrich C R, Newsam G N. A fast and exact method for multidimensional Gaussian stochastic simulations; extension to realizations conditioned on direct and indirect measurements[J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(6): 1643-1652.
- [26] Dietrich C R, Newsam G N. A fast and exact method for multidimensional gaussian stochastic simulations [J]. *Water Resources Research*, 1993, **29**(8): 2861-2869.
- [27] Chiles J P, Delfiner P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999. 449-471.
- [28] 崔东文, 金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价[J]. *水利水电科技进展*, 2014, **34**(5): 56-60, 79.
- [29] 张文具, 范华义. 天津市土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn、Ni 环境标准制订[J]. *城市环境与城市生态*, 2002, **15**(3): 47-48.
- [30] 范华义, 张文具. 天津市土壤元素背景值的地域差异及成因分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2002, **15**(1): 13-14.
- [31] 沈碧贞. 北京排污河污水灌溉对武清县的土壤、作物与地下水的影响[J]. *天津农业科学*, 1985, (1): 33-37.
- [32] 戴明新, 师荣光, 赵玉杰, 等. 四川泸县农业土壤 Cd 含量空间变异性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 1093-1099.
- [33] 王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 等. 北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 180-186.
- [34] Chen W P, Chang A C, Wu L S. Assessing long-term environmental risks of trace elements in phosphate fertilizers[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, **67**(1): 48-58.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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