

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芻对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价

刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰

(河南科技大学化工与制药学院, 洛阳 471003)

摘要: 以河南洛阳市居民区、科教区、城市绿地、商业区、城市主干道、工业区和城乡结合处这 7 个功能区为研究对象, 共采集 63 个样品。分析不同功能区土壤重金属含量, 采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价重金属污染的程度, Hakanson 潜在生态风险指数法评价土壤重金属潜在生态风险, 主成分分析重金属污染的成因和来源。结果表明, 6 种重金属平均含量均超过河南省土壤重金属背景值。不同功能区重金属的单因子污染指数平均污染趋势为 $Cd > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr$ 。内梅罗综合污染指数显示工业区分重金属总含量最高, 污染最为严重。单个重金属潜在生态危害指数 E_i^p 表明, Cd 的潜在生态危害指数最高。不同功能区土壤多金属潜在危害危险指数 RI 依次为工业区 (548.87) > 主干道 (466.06) > 商业区 (392.81) > 居民区 (226.27) > 科教区 (189.76) > 绿地 (153.72) > 城郊 (117.45), 工业区、主干道和商业区达强生态危害水平, 居民区、科教区和绿地达中等生态危害水平, 而城乡属轻微生态危害。Cu、Zn、Pb 和 Cd 为人为因子, 主要来源于工业废物和交通排放; Cr 和 Ni 为自然源因子, 受成土母质的控制。

关键词: 土壤重金属; 城市功能区; 污染; 特征; 评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2322-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.041

Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang

LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, MIAO Juan, ZHOU Ming, GUAN Feng-jie

(Department of Chemical and Pharmaceutical, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The residential areas, science and education areas, urban green lands, commercial districts, urban arterial roads, industrial zones and urban and rural junction districts in seven different functional zones of Luoyang City were taken as research subjects, and sixty-three soil samples were gathered. The concentrations of soil heavy metals were measured and their pollution levels were evaluated by single pollution index and Nemerow complex pollution indices. The ecological risks of soil heavy metals were discussed with Hakanson potential ecological risk index (RI) and their geneses and sources were indicated by the principal component analysis (PCA). The results showed that the average level of all heavy metals exceeded the background values of Henan Province. The pollution degree of single gene index was in the following order: $Cd > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr$. Nemerow complex pollution indices indicated heavy metals had the highest concentration and the heaviest pollution in industrial zones. A single heavy metal potential ecological harm (E_i^p) showed Cd had the highest risk index. RI was ranked as industrial zones > urban arterial roads > commercial districts > residential areas > science and education areas > urban green lands > rural junction districts. The heavy metal pollution in industrial zones, urban arterial roads and commercial districts reached strong levels, and the pollution in residential areas, science and education areas, urban green lands reached moderate risk levels, but that in rural junction districts belonged to slight risk level. Cu, Zn, Pb and Cd were called anthropogenic factors and came from industrial wastes and transport emissions, but Cr and Ni were explained as natural factors and their contents depended upon the parent materials of soil.

Key words: heavy metals in soil; urban functional areas; pollution; characteristics; assessment

城市土壤是城市生态环境的有机组成部分, 是城市污染的源和汇。随着城市工业和交通运输的发展, 以及人类社会活动的增加, 城市土壤受到较为严重的重金属污染。土壤受到污染后, 重金属元素通过直接或间接途径进入大气、水体和人体, 危害环境质量和人类健康^[1~7]。

因此, 城市土壤重金属污染已成为国内外环境科学等领域研究的热点^[8]。与欧美国家相比, 我国对于城市土壤重金属的研究起步较晚。目前, 许多学者已经对北京^[9]、上海^[10]、广州^[10]、沈阳^[11]、南京^[12]、呼和浩特^[13]、贵阳^[14]和开封^[15]等大中型

城市土壤中的 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 等元素的来源、含量和分布等进行了深入地研究。

洛阳市位于河南西部, 是国务院首批公布的历史文化名城, 也是我国著名的重工业城市之一。地处暖温带, 夏季炎热多雨, 冬季干冷少雨。工业以装备制造、能源电力、石油化工、新材料和硅光伏

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471256); 河南省科技厅科技攻关项目 (122102210551); 河南省教育厅科学技术重点研究项目 (14B610002)

作者简介: 刘亚纳 (1979 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤重金属治理, E-mail: lyn306@126.com

及光电为主,城市西部分布大量工厂^[16,17]。近年来洛阳市的人口、工业和城市面积发展迅速,城市规模不断扩大,机动车数量大幅度增加,在此过程中产生的重金属污染也越来越受到人们的关注。刘德鸿等^[16]对洛阳市道路灰尘重金属的污染做了详尽地研究。但目前对洛阳城市土壤重金属的全面研究和评估还未有报道。

所以,本文以洛阳市城市土壤重金属为研究对象,按照土地利用不同方式对城市土壤分区采样,对重金属做了如下研究:①对不同功能区土壤重金属的含量进行测定,用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法分析和评价土壤重金属污染程度。②采用多因素多重比较法分析不同功能区土壤重金属分布特征,Hakanson 潜在生态危害指数法评价重金属的潜在生态风险。③应用主成分统计方法分析重金属可能的来源途径。以期为城市土壤重金属污染防

治提供基础数据和科学依据,同时对其他类似城市也有一定的借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设和样品的采集

根据城市土地的不同规划和利用方式,将洛阳市分为7个功能区,即商业区、居民区、科教区、城市绿地、城市主干道、工业区和城乡结合处。每个功能区设置9个采样点,共63个。采样点分布如图1所示。2015年3~5月间进行土壤样品采集,土壤样品采样点布设方法视情况采用对角线法、梅花形、棋盘式法和蛇形法,多点取样混合成一个代表样,采集0~10 cm 表层土壤,每个混合样品为1 kg左右。土样采集后,去除枯枝、石子等,避光自然风干,研磨、过筛,四分法得到20 g左右样品,装袋备用。

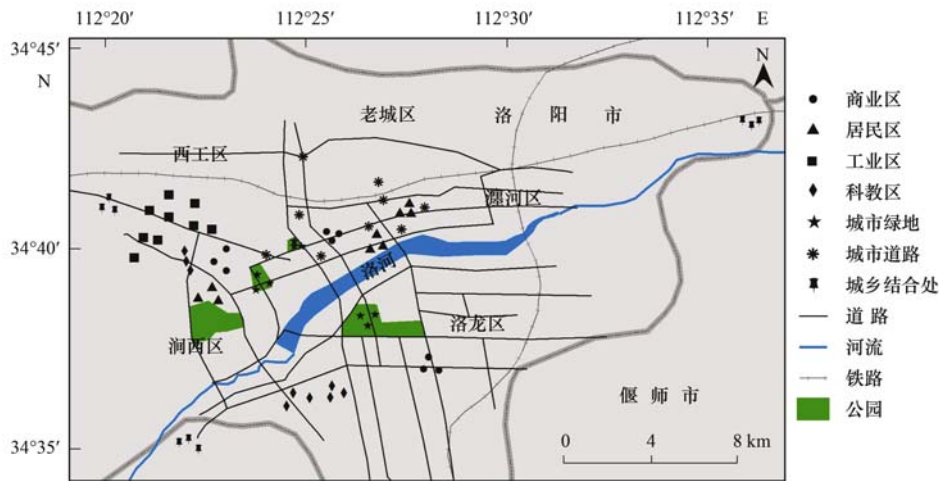


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling points

1.2 样品消解和重金属的测定

采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解的方法^[4,5],破坏土壤矿物晶格,使试样中的待测元素全部进入待测液,用4510型原子吸收光谱仪(上海精密仪器有限公司)测定重金属。实验过程所用酸均为优级纯,实验用水为超纯水。Cu、Zn、Ni、Cr、Pb和Cd的检出限分别为4、4、8、12、10和10 μg·L⁻¹,精密度分别为0.09%、0.26%、0.12%、0.55%、0.18%和0.43%。测试过程中,采用土壤成分分析标准物质GBW07405(GSS-5)进行质量控制,同时所有样品做两次平行性实验,相对误差控制在±5%以内,回收率在95%~105%之间。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法对土壤中的某一污染物的污染程度进行的评价。其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

式中, C_i 为污染物*i*的实测浓度(mg·kg⁻¹); S_i 为污染物*i*的评价标准(mg·kg⁻¹),本研究选用河南省土壤重金属元素的平均背景值作为污染物的评价标准^[18]。

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

综合污染指数法兼顾单因子污染指数平均值和最高值,全面反映土壤中各污染物的平均污染水平,突出污染较重的重金属给环境造成的危害。计算方

法如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 为综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为各污染物

中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各污染物中污染指数的算数平均值.

依据单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法将土壤重金属污染划分为 5 个等级. 如表 1 所示.

表 1 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法分级标准

Table 1 Classification criterion of single gene index and complex pollution indices methods

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤轻污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤中污染
V	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	土壤重污染

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法 (RI) 是瑞典学者 Hakanson 根据重金属性质及环境行为特点, 从沉积学角度对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法. 考虑土壤重金属含量的同时, 将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起^[19]. 其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^i) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_i^i}{C_n^i} \right) \quad (3)$$

式中, RI 为多金属潜在生态风险指数, E_r^i 为单一金属潜在生态风险因子, C_i^i 重金属含量, C_n^i 土壤背景参考值^[18], T_r^i 不同金属生物毒性响应因子 (Cd = 30、Cu = 5、Pb = 5、Ni = 5、Cr = 2、Zn = 1). E_r^i 和 RI 的分级标准如表 2 所示.

表 2 重金属污染潜在生态风险指数法分级标准

Table 2 Classification criterion and potential ecological risk index of heavy metals

单一金属潜在生态风险因子	多金属潜在生态风险指数	危害程度
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害 (I)
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害 (II)
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害 (III)
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI > 600$	很强生态危害 (IV)
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害 (V)

表 3 洛阳市土壤重金属含量 (n = 63)

Table 3 Concentrations of soil heavy metals in Luoyang City (n = 63)

元素	含量范围/mg·kg ⁻¹	$\bar{x} \pm s$ /mg·kg ⁻¹	变异系数/%	样本超标率/%	背景值 ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	比值 ²⁾
Cu	14.33 ~ 126.68	34.75 ± 26.08	75.07	80.95	19.7	1.76
Zn	62.32 ~ 542.35	293.67 ± 155.95	58.66	95.24	60.1	4.42
Ni	21.07 ~ 51.08	37.58 ± 7.63	20.32	85.71	26.7	1.41
Cr	29.59 ~ 159.94	66.47 ± 26.70	40.16	57.13	63.8	1.04
Pb	6.18 ~ 219.42	56.64 ± 48.75	86.01	80.95	19.6	2.89
Cd	0.18 ~ 1.18	0.65 ± 0.37	53.29	100	0.074	8.75

1) 为河南省土壤背景值; 2) 为平均值/背景值

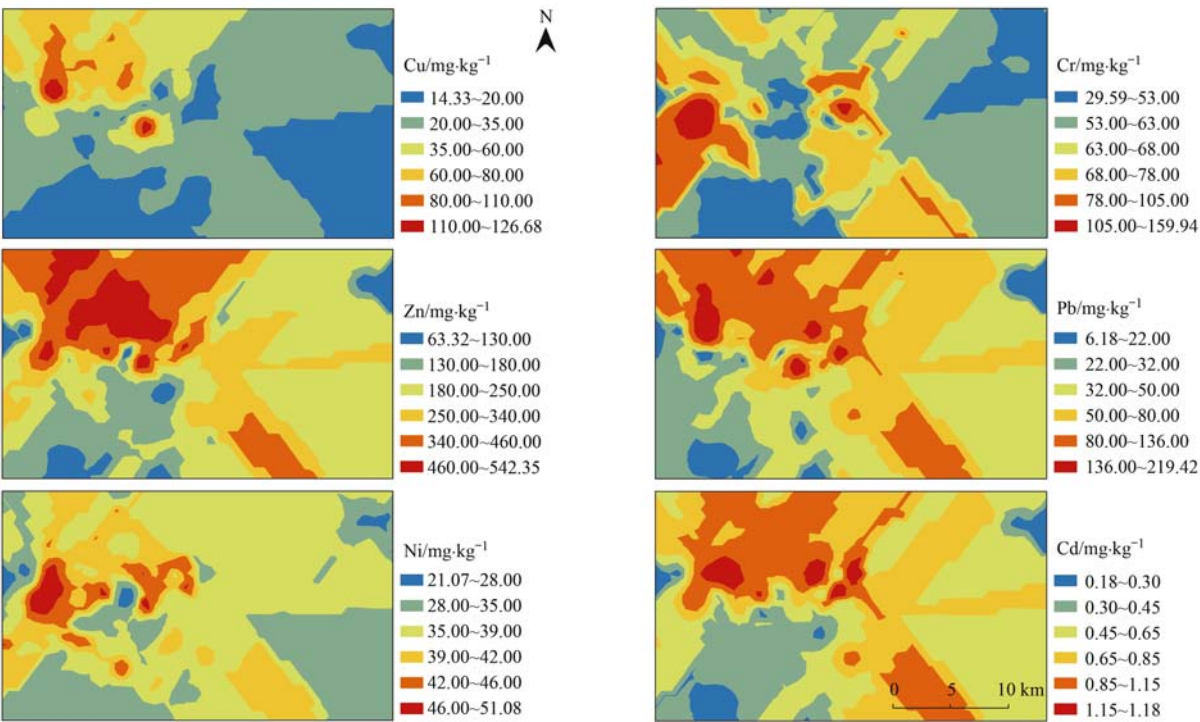


图2 洛阳市不同功能区重金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal contamination in soil of Luoyang city

与北京^[9]、上海^[10]和广州^[20]这些大城市相比,除Cr外,洛阳市土壤中其他重金属含量处于较高水平(表4);与西安^[21]、沈阳^[11]这些老工业城市相比,洛阳市土壤中重金属含量较低;与欠发达地区呼和浩特^[13]相比,洛阳市土壤中重金属含量均较高;与邻近城市郑州^[22]、开封^[15]相比,Ni含量最高,其他重金属含量处于中等水平。

表4 国内其他城市土壤重金属含量

Table 4 Concentrations of soil heavy metals in other Chinese cities

城市	土壤重金属含量/mg·kg ⁻¹					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
北京 ^[9]	17.33	92.60	24.00	61.00	23.30	0.13
上海 ^[10]	27.80	99.36	— ¹⁾	87.72	28.86	—
广州 ^[20]	11.00	277.00	11.10	22.40	65.40	0.23
西安 ^[21]	94.98	421.46	—	167.28	230.52	—
沈阳 ^[11]	41.60	234.80	—	67.90	80.20	1.1
呼和浩特 ^[13]	30.07	89.93	16.47	54.75	11.63	0.31
贵阳 ^[14]	61.59	201.17	47.73	37.25	20.01	—
郑州 ^[22]	27.61	397.96	11.68	187.75	97.27	0.91
开封 ^[15]	36.40	164.03	23.87	53.11	36.71	1.05
本研究	34.75	293.67	37.58	56.64	66.47	0.65

1) “—”表示文章中没有相关数据

2.2 不同功能区土壤重金属分布特征

洛阳市不同功能区土壤重金属含量如表5所示. 从中可知,不同功能区重金属含量差异明显. 工业区的Cu、Cr和Cd含量最高,分别是背景值的3.90、1.73和16.08倍;主干道的Zn和Pb含量最高,分别是背景值的7.81和5.53倍. 对不同功能区的重金属元素进行单因素方差分析,选择 Duncan

分析法两两比较. 结果表明,Cu、Ni、Cr、Cd、Zn和Pb的分布差异具有统计学意义($P < 0.05$). 工业区的Cu含量高于其他6个功能区,Zn高于除城市主干道以外的其他5个功能区,Ni含量高于城市绿地和城乡结合处,Cr和Pb含量高于城乡结合处;Cd含量高于城市绿地、居民区、城乡结合处和科教区,差异具有统计学意义($P < 0.05$). 城市主干道

Zn 高于其他 6 个功能区,Ni 含量高于城市绿地和城乡结合处,Pb 含量高于城乡结合处,Cd 含量高于城市绿地、居民区、城乡结合处和科教区,差异具有统计学意义($P < 0.05$). 商业区的 Zn 高于城市绿地、城乡结合处、科教区和居民区,Cd 含量高于城市绿地、居民区、城乡结合处和科教区,差异具有

统计学意义($P < 0.05$). 城乡结合处 6 种重金属含量与工业区相比,差异具有统计学意义($P < 0.05$). 阴雷鹏等^[21]的研究也表明西安市工业区 Cu 和 Zn 的含量显著高于其他功能区. 钱翌等^[23]的研究也显示青岛市工业区 Cd 有明显的积累,城乡结合处含量最低.

表 5 洛阳市不同功能区土壤重金属含量水平¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 5 Content of soil heavy metals in different functional zones of Luoyang City/mg·kg⁻¹

功能区	采样数	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
绿地	9	30.64 ± 2.71b	100.34 ± 27.63de	28.79 ± 7.15b	58.61 ± 11.15ab	39.75 ± 17.53ab	0.31 ± 0.058de
居民区	9	32.19 ± 13.75b	258.92 ± 33.70c	39.35 ± 2.83a	70.11 ± 14.28ab	49.00 ± 13.31ab	0.47 ± 0.046d
城乡	9	17.70 ± 3.53b	79.35 ± 14.99e	26.50 ± 2.42b	43.12 ± 15.39b	11.05 ± 5.14b	0.25 ± 0.061e
主干道	9	43.28 ± 29.59ab	469.54 ± 63.73a	40.84 ± 2.20a	70.17 ± 19.16ab	108.33 ± 7.51a	1.01 ± 0.245ab
工业区	9	76.78 ± 43.64a	457.56 ± 27.66a	46.45 ± 5.03a	101.58 ± 50.70a	106.04 ± 98.30a	1.19 ± 0.135a
商业区	9	23.30 ± 4.68b	333.83 ± 40.74b	41.26 ± 2.02a	64.79 ± 12.48ab	51.76 ± 28.49ab	0.88 ± 0.040c
科教区	9	19.33 ± 3.18b	161.58 ± 25.77d	39.82 ± 4.06a	56.93 ± 23.03ab	31.11 ± 15.55ab	0.41 ± 0.036de
背景值		19.7	60.1	26.7	63.8	19.6	0.074

1) 同一列中相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.3 洛阳市不同功能区土壤重金属污染评价

洛阳市不同功能区土壤重金属污染评价如表 6 所示. 单因子污染指数 P_i 表明,不同功能区 6 种重金属的单因子指数均大于 1,说明各功能区的重金属均出现富集现象,其中 Cd 富集程度最高,污染最为严重. 重金属的平均污染趋势为 Cd > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr. Zn 呈重污染和轻污染(绿地和城郊土壤除外); Pb 主干道和工业区为重污染,居民区和商业区为中污染,绿地和科教区为轻污染,城乡的土壤为无污染; Cu 呈轻污染和无污染(除工业区为重污染外); Ni 在 6 个功能区的土壤均为轻污染. Cr 为轻污染和无污染(绿地、城郊和科教区土壤). 由

土壤重金属综合污染指数 P_N 可知,工业区的重金属总含量在各功能区中最高,主干道次之,之后的顺序依次是商业区 > 居民区 > 科教区 > 绿地 > 城乡,城乡和绿地土地质量较好,其他功能区污染严重.

同时,由表 6 中的单个重金属潜在生态危害指数 E_r^i 可知,洛阳市不同功能区土壤中 Cd 的潜在生态危害指数最高, E_r^i 均值为 262.32,主干道、工业区和商业区 Cd 均达极强生态危害,居民区和科教区 Cd 为很强生态危害,城乡和绿地 Cd 为强生态危害;而 Cu、Zn、Ni、Cr 和 Pb 这 5 种重金属的 E_r^i 均值分别为 8.81、4.89、7.23、2.08 和 14.68,均属于轻微生态危害水平. 洛阳市不同功能区土壤综合潜

表 6 洛阳市不同功能区土壤重金属污染指数评价

Table 6 Pollution index evaluation of soil heavy metals in different functional zones of Luoyang City

项目		绿地	居民区	城乡	主干道	工业区	商业区	科教区	均值
Cu	P_i	1.56	1.63	0.9	2.2	3.9	1.18	0.98	1.76
	E_r^i	7.78	8.17	4.49	10.98	19.49	5.91	4.91	8.81
Zn	P_i	1.67	4.31	1.32	7.81	7.61	5.55	2.69	4.42
	E_r^i	1.67	5.14	1.49	8.76	7.61	6.39	3.19	4.42
Ni	P_i	1.08	1.47	0.99	1.53	1.73	1.55	1.49	1.41
	E_r^i	5.39	7.37	6.35	7.65	8.7	7.73	7.46	7.04
Cr	P_i	0.92	1.10	0.68	1.10	1.59	1.02	0.89	1.04
	E_r^i	1.84	2.2	1.35	2.2	3.18	2.03	1.78	2.08
Pb	P_i	1.98	2.50	0.56	5.53	5.42	2.64	1.59	2.89
	E_r^i	9.88	12.50	2.82	27.71	27.09	13.20	7.94	14.45
Cd	P_i	4.24	6.39	3.38	13.66	16.08	11.95	5.50	8.73
	E_r^i	127.16	191.73	101.50	409.70	482.80	358.38	164.99	262.32
P_N		3.28	4.96	2.55	10.36	12.16	8.90	4.19	
RI		153.72	226.27	117.45	466.06	548.87	392.81	189.76	

在危害危险指数 RI 依次为工业区(548.87) > 主干道(466.06) > 商业区(392.81) > 居民区(226.27) > 科教区(189.76) > 绿地(153.72) > 城郊(117.45), 工业区、主干道和商业区达到强生态危害, 居民区、科教区和绿地达到中等生态危害, 而城乡属于轻微生态危害。

土壤重金属综合污染指数 P_N 和潜在生态危害指数 RI 表明, 工业区污染最严重、潜在危害指数最大。洛阳涧西区是传统的老工业区, 中国一拖、中信重工和耐火厂等有着几十年的历史, 本研究工业区取样点主要集中在该区。这些企业数十年间的生产活动产生含有 Cu、Zn、Cd 和 Pb 等重金属粉尘、废气和废渣等, 通过干湿沉降或堆放的方式导致工业区土壤重金属含量增加, 超过土壤背景值, 出现严重富集现象。有研究结果也表明^[11,15,21], 南京、沈阳和开封等城市工业区的污染程度同样最重。主干道 Pb、Zn 和 Cd 积累程度最高, 与近年来洛阳市逐渐增加的机动车数量有关, 据资料显示, 2015 年洛阳市机动车保有量达 105 万量, 比 2014 年多了 17.4 万辆。机动车含 Pb 汽油的燃烧是 Pb 污染的主要来源, 同时汽车轮胎老化、磨损过程中产生 Zn 和 Cd 等污染物^[9,16]。受城市道路的影响, 在交通繁忙的

商业区, Pb、Zn 和 Cd 这 3 种金属的含量也表现出了较高的积累性。商业区采样点主要集中在上海市场、新都汇和关林市场这 3 个商业中心, 商业区的餐饮废物、生活废物和产品包装等投入到环境中对重金属污染也造成一定的影响。居民区选择的是居民生活时间长、面积大的老家属院, 居民生活垃圾是土壤重金属的主要来源^[13]。城乡结合处主要选择谷水西、后河西和白马寺这 3 个郊区, 土壤质量较好, 重金属 Cu、Ni、Cr 和 Pb 低于土壤背景值, 但 Cd 是土壤背景值的 3.38 倍。与国内其他城市的城乡土壤重金属 Cd 含量相比^[13,15,20], 处于中等水平, 大气中镉的沉降, 农药、化肥和塑料薄膜的使用, 都能导致土壤镉的污染。

2.4 洛阳市不同功能区土壤重金属的主成分分析和源分析

首先对洛阳市不同功能区重金属因子进行 Pearson 相关性分析, 结果如表 7 所示。各个重金属因子之间具有较强的相关性, Cu-Zn-Pb-Cd、Cd-Cr-Ni 和 Zn-Cr-Ni 显著正相关。KMO 效度检验值为 0.749, Bartlett 球度检验的 P 值为 0.000, 小于显著性水平 0.05, 所以本研究中的数据适合做因子分析。

表 7 洛阳市不同功能区土壤重金属相关系数

Table 7 Correlation coefficient of soil heavy metals in different functional zones of Luoyang City						
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
Cu	1					
Zn	0.495 *	1				
Ni	0.341	0.648 **	1			
Cr	0.200	0.447 *	0.451 *	1		
Pb	0.814 **	0.634 **	0.397	0.155	1	
Cd	0.449 *	0.866 **	0.614 **	0.443 *	0.635 **	1

1) ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著, * 表示相关系数在 0.05 水平上显著

主成分分析计算结果如表 8 所示, 土壤中 6 种污染物的全部信息基本可有 2 个主成分(特征值: $3.60 + 1.12 = 4.72$ 个变量)反映 78.48%, 即对前 2 个主成分进行分析已经基本能够反映全部数据的大部分信息。第一主成分的贡献率为 60.06%, 特点表现在 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量上有较高的正载荷。这种组合特征说明污染主要是人为源输入的结果。Pb 是城市土壤受机动车污染的标识性元素^[24,25]。机动车在燃油及轮胎磨损过程中会释放 Cu、Zn 和 Cd 等重金属元素。另外, 工业排放和生活废弃物也是 Cd 的一个重要的来源。李一蒙等^[15]的研究也证明了开封高的 Cd 含量是由工业烟尘排放和生活燃煤产生。所以, 第一主成分反映的是工业和交通运

表 8 主成分分析的主要计算结果

Table 8 Main calculation results of principal component analysis(PCA)		
项目	第一主成分	第二主成分
特征值	3.60	1.12
贡献率/%	60.06	18.62
累积贡献率/%	60.16	78.68
Cu	0.715	-0.551
Zn	0.904	0.115
Ni	0.644	0.348
Cr	0.537	0.628
Pb	0.805	-0.518
Cd	0.887	0.126

输对土壤的污染, 称为“人为因子”。第一主成分也支配着 Cr 和 Ni 的含量。第二主成分的贡献率是 18.62%, Cr 和 Ni 的载荷分别为 0.628 和 0.348, 两

种元素的含量分别为背景值的 1.04 和 1.41 倍(见表 3),其含量一般认为受地球化学的影响. 张一修等^[14]对贵阳市土壤的研究也认为 Cr 和 Ni 主要为地质来源,受控于成土母质. 所以第二主成分称为“自然源因子”. Cr 和 Ni 是城市土壤中污染程度最低的重金属,这与其他学者的研究结果一致^[26,27]. 第二主成分也支配着部分 Cd 和 Zn 的来源.

3 结论

(1) 洛阳城市土壤重金属平均含量分别为 34.75、293.67、37.58、66.47、56.64 和 0.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过河南土壤背景值.

(2) 土地的利用方式不同,土壤重金属含量不同. 洛阳市不同功能区土壤重金属的含量差异明显 ($P < 0.05$),工业区污染最为严重,其次是城市主干道和商业区,城乡结合处污染程度最轻. Cu、Zn、Pb 和 Cd 在工业区和主干道具有较高的积累.

(3) 洛阳城市土壤单个重金属平均 E_i^r 值表明, Cd 的生态危害达极强水平,而其他重金属属轻微生态危害水平. 综合潜在危害危险指数 RI 表明,工业区、主干道和商业区达到强生态危害,居民区、科教区和绿地达到中等生态危害,而城乡结合处属于轻微生态危害.

(4) 洛阳城市土壤重金属主成分分析表明,洛阳市土壤重金属受人为活动影响程度不同. Cu、Zn、Pb 和 Cd 受第一主成分支配,主要由人类活动造成; Cr 和 Ni 主要受第二主成分支配,源于自然源,受人类活动干扰小.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
- [3] Zhong P Y, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, **108**(1): 27-38.
- [4] Tang X J, Shen C F, Shi D Z, *et al.* Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: an emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3): 653-660.
- [5] Hu Y N, Wang D X, Wei L J, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the Loess Plateau, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **110**: 82-88.
- [6] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. 环境科学, 2014, **34**(4): 1516-1522.
- [7] Lu Y, Zhu F, Chen J, *et al.* Chemical fractionation of heavy metals in urban soils of Guangzhou, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **134**(1-3): 429-439.
- [8] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [9] 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.
- [10] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
- [11] Li X Y, Liu L j, Wang Y G, *et al.* Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China[J]. Geoderma, 2013, **192**: 50-58.
- [12] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 105-111.
- [13] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [14] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 204-212.
- [15] 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.
- [16] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 253-259.
- [17] 白世强, 卢升高. 洛阳市工业区及郊区土壤的重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 257-261.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] Peter E, Adeniyi G. Spatial relationships of urban land use, soils and heavy metal concentrations in Lagos Mainland area[J]. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 2011, **15**(2): 391-399.
- [20] 陈海珍, 龚春生, 李文立, 等. 广州市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境与健康杂志, 2010, **27**(8): 700-703.
- [21] 阴雷鹏, 赵景波. 西安市主要功能区表层土壤重金属污染现状评价[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2006, **34**(3): 109-112.
- [22] 楚纯洁, 马建华, 朱玉涛. 不同级别城镇土壤重金属含量与潜在生态风险比较——以郑州市、中牟县和韩寺镇为例[J]. 土壤通报, 2010, **41**(2): 467-472.
- [23] 钱翌, 赵世刚. 青岛市不同生态功能区表层土壤重金属污染初步评价[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(9): 352-356.
- [24] 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来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.
- [25] 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.
- [26] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.
- [27] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China[J]. Chemosphere, 2013, **92**(5): 517-523.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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