

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

**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

编者按 ..... (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 ..... 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 ..... 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 ..... 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM<sub>2.5</sub>中碳气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 ..... 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O<sub>3</sub>生成潜势的相关性分析 ..... 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 ..... 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 ..... 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 ..... 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 ..... 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 ..... 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 ..... 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 ..... 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 ..... 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 ..... 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 ..... 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 ..... 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 ..... 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 ..... 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 ..... 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 ..... 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 ..... 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 ..... 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 ..... 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 ..... 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 ..... 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 ..... 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 ..... 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 ..... 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 ..... 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A<sup>2</sup>O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 ..... 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 ..... 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 ..... 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 ..... 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 ..... 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 ..... 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 ..... 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 ..... 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 ..... 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 ..... 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 ..... 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 ..... 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 ..... 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 ..... 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 ..... 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N<sub>2</sub>O产生的影响 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 ..... 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

# 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征

王幼奇, 白一茹\*, 王建宇

(宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

**摘要:** 以银川市 8 种不同城市功能区表层土壤(0~20 cm)为研究对象, 每个功能区各采集 10 个土样, 共 80 个样. 通过数理统计和地统计学方法, 分析和评价银川市不同功能区土壤重金属 Zn、Cd、Pb、Mn、Cu 和 Cr 污染现状及其来源, 并在 GIS 支持下绘制土壤重金属含量空间分布图. 结果表明, 银川市 Zn、Cd、Pb、Mn、Cu 和 Cr 的平均值分别为 74.87、0.15、29.02、553.55、40.37 和 80.79 mg·kg<sup>-1</sup>, 均高于宁夏土壤背景值, 呈现出重金属累积现象. 通过单因子污染指数可知, 银川市不同重金属污染程度依次为: Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > Mn. 从空间分布可以看出, Zn、Cd、Pb 和 Cr 在东北、西南和市区中部含量较高, Mn 和 Cu 在东北方向和市区中部含量较高. 通过内梅罗综合指数可知, 银川市道路和工业区呈现中度污染, 其它功能区均表现为轻度污染. 不同功能区污染程度依次为: 道路 > 工业区 > 商业区 > 医疗区 > 住宅区 > 公园 > 开发区 > 科教区. 说明伴随经济发展, 银川市土壤重金属含量已受到城市中各种人类活动的影响.

**关键词:** 银川市; 重金属; 城市土壤; 空间分布; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0710-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.02.041

## Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City

WANG You-qi, BAI Yi-ru\*, WANG Jian-yu

(College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Surface soil samples (0-20 cm) from eight different functional areas in Yinchuan city were collected. There were 10 samples respectively in each functional area. The urban soil heavy metals (Zn, Cd, Pb, Mn, Cu and Cr) pollution characteristics and sources in eight different functional areas were evaluated by mathematical statistics and geostatistical analysis method. Meanwhile, the spatial distributions of heavy metals based on the geography information system (GIS) were plotted. The average values of total Zn, Cd, Pb, Mn, Cu and Cr were 74.87, 0.15, 29.02, 553.55, 40.37 and 80.79 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The results showed that the average value of soil heavy metals was higher than the soil background value of Ningxia, which indicated accumulation of the heavy metals in urban soil. The single factor pollution index of soil heavy metals was in the sequence of Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > Mn. The average values of total Zn, Cd, Pb and Cr were higher in north east, south west and central city, while the average values of Mn and Cu were higher in north east and central city. There was moderate pollution in road and industrial area of Yinchuan, while the other functional areas showed slight pollution according to Nemoro synthesis index. The pollution degree of different functional areas was as follows: road > industrial area > business district > medical treatment area > residential area > public park > development zone > science and education area. The results indicated that the soil heavy metal pollution condition in Yinchuan City has been affected by human activities with the development of economy.

**Key words:** Yinchuan City; heavy metal; urban soil; spatial distribution; pollution evaluation

随着工业化和城市化进程加速, 通过工业排放、城市交通、大气沉降和生活垃圾排放等方式导致大量重金属元素在城市土壤中累积<sup>[1-3]</sup>. 土壤中重金属元素会直接或间接地危害居民健康和城市环境质量, 分析城市土壤重金属污染程度, 是评价城市环境质量的重要内容之一<sup>[4-6]</sup>. 目前城市多元化发展也会影响城市不同功能区间土壤重金属种类和含量<sup>[7]</sup>. 近年来国内外学者对不同城市功能区土壤重金属分布特征进行分析和评价<sup>[8-11]</sup>. Manta 等<sup>[12]</sup>绘制了意大利西西里首府巴勒莫各种重金属分布, 发

现土壤重金属来源主要是由于城市交通. 田媛等<sup>[13]</sup>发现北京市不同功能区呈现出 Cu、Pb、Cd 污染, 且高速公路区和交通繁忙区重金属污染比较严重. Al Obaidy 等<sup>[14]</sup>分析伊拉克巴格达市区 3 种功能区重金属分布特征, 发现工业区重金属表聚现象

收稿日期: 2015-07-16; 修订日期: 2015-09-14

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(NZ14028); 宁夏高校科学研究项目(NGY2013031); 国家自然科学基金项目(41461104, 41161085)

作者简介: 王幼奇(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染及防治, E-mail: wyq0563@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: yr0823@163.com

明显. 郭伟等<sup>[15]</sup>对呼和浩特市 7 种功能区土壤重金属进行污染评价,发现重金属污染已经对呼和浩特市生态系统健康构成一定威胁. 相关研究表明城市不同功能区对土壤重金属含量具有重要影响,所以深入分析城市重金属污染特征和来源,对于提高环境质量、改善人居环境有重要作用.

银川地处西北干旱半干旱区,生态环境极其脆弱,其环境容量和承载力较小. 目前,由于经济发展需要包括银川在内的西北内陆地区开始承接东部高耗能、高污染企业,这些企业会严重威胁当地脆弱生态环境,亟需引起关注<sup>[16,17]</sup>. 为此,本文针对银川市发展进程中对城市土壤造成的重金属污染问题进行研究,按照城市不同功能区进行分别采样,利用污染指数法、地统计学和 GIS 的方法,分析银川市不同功能区土壤重金属污染现状及重金属可能来源,同时绘制城区各重金属元素空间分布图,以期为银川市土壤重金属污染风险控制提供基础数据参考和方法借鉴.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

银川地处中国西北地区,西倚贺兰山、东临黄河,为宁夏回族自治区首府,是全区军事、政治、经济、科研、文化、金融和交通中心. 研究区地势平坦,海拔高度 1 100 m 左右,年均气温 8.5℃,年均日照时数 2 880 h,年均降水量 200 mm,属典型的中温带干旱气候. 气候干燥,冬季寒冷,夏季酷热<sup>[18]</sup>. 随着“西部大开发”和“新丝绸之路经济带”的推进,银川市步入快速发展期,但伴随着经济快速发展城市生态环境压力也在增加.

### 1.2 样品采集与测定

根据人类活动对城市所施加的影响<sup>[2,4,7]</sup>,把银川市划分为开发区、住宅区、公园、道路、商业区、科教区、工业区和医疗区这 8 个功能区,每个功能区随机均匀设置 10 个采样点,共 80 个采样点(图 1). 每个采样点在 1 m 半径内利用不锈钢铲采集表层(0~20 cm)土壤样品 4 个,混合后采用四分法留约 500 g 土样. 样品风干、剔除杂质后研磨过 20 目和 100 目尼龙筛备用. 采用原子吸收分光光度计(上分 AA320)测定重金属 Cu、Zn、Mn 和 Cr,石墨炉原子吸收分光光度法(上分 GA3202)测定 Cd 和 Pb 含量. 测定重金属含量时每个样品均采用 3 组平行试验,取均值作为样品测定重金属浓度. 准确度和精度利用国家标准土壤物质(GSS-8)进行质量控制计算回收率,Cu、Zn、Mn、Cr、Cd 和 Pb 的平均

回收率分别为:101.6%、100.5%、102.1%、99.8%、89.9%和 102.3%,并进行随机检查和异常点检查,结果符合监控要求.



图 1 采样点示意

Fig. 1 Location of sampling points

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 土壤污染评价

土壤重金属污染评价采用单因子指数法和内梅罗综合指数法. 计算公式分别为:

$$P_i = c_i/s_i \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(P_{i_{\text{avg}}}^2 + P_{i_{\text{max}}}^2)/2} \quad (2)$$

式中, $P_i$ 为土壤重金属*i*的单因子指数; $c_i$ 为重金属*i*的实测值( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $s_i$ 为重金属评价标准( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),采用宁夏土壤重金属环境背景值<sup>[19]</sup>. $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数, $P_{i_{\text{max}}}$ 为重金属单因子指数最大值, $P_{i_{\text{avg}}}$ 是其平均值. 单因子指数法评价标准: $P_i \leq 1$ ,无污染; $1 < P_i \leq 2$ ,轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ ,中度污染; $P_i \geq 3$ ,重度污染. 内梅罗综合指数法评价标准: $P_{\text{综}} \leq 1$ ,无污染; $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ ,轻度污染; $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ ,中度污染; $P_{\text{综}} \geq 3$ ,重度污染.

### 1.3.2 空间变异性分析

采用地统计学分析土壤重金属含量空间变异特征. 其公式表达式为<sup>[17]</sup>:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (3)$$

式中, $r(h)$ 为半方差函数, $h$ 为滞后距离, $N(h)$ 为相距*h*的数据点对数, $Z(x)$ 为区域化变量在*x*处实测值, $Z(x+h)$ 为区域化变量在*x+h*处实测值.

### 1.3.3 分析方法

利用 SPSS 17.0 对各项土壤重金属含量进行经典统计分析,地统计分析在 GS + 7.0 中完成,空间插值图利用 ArcGIS 10.1 完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量的描述性统计

研究区 80 个土样重金属含量统计结果见表 1.

Zn、Cd、Pb、Mn、Cu 和 Cr 的平均值分别为 74.87、0.15、29.02、553.55、40.37 和 80.79  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,除 Mn 没有国家标准值外,其它重金属元素的平均值均未超过国家二级标准.同时所有重金属元素平均值均高于宁夏土壤背景值,特别是 Cu、Pb 的平均含量分别为各自背景值的 1.83 和 1.41 倍.说明伴随经济发展,银川市土壤重金属含量已受到城市中各种人类活动的影响.6 种重金属变异系数大小顺序为:Cu  $\geq$  Cd > Pb > Zn > Cr  $\geq$  Mn.根据变异程度的分类<sup>[9]</sup>,

Pb、Zn、Mn 和 Cr(0.33、0.24、0.17 和 0.17)为中等变异( $0.15 < CV < 0.36$ ),而 Cd 和 Cu(0.40、0.40)为高变异( $CV > 0.36$ ).Cd 和 Cu 的变异系数大于其它重金属元素,吕建树等<sup>[20]</sup>对日照重金属元素评价也得出相同结论.说明 Cd 和 Cu 易受交通、城市建设和商业活动等人为活动影响,且在城市空间分布上存在有较大差异.Mn 的偏度为负值,其分布峰为左偏.其它重金属的偏度值为正值,表现为右偏.KS 检验表明所有重金属元素均符合正态分布.

表 1 土壤重金属描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil heavy metals

元素	极小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	极大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	极差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	偏度	峰度	分布	宁夏背景值 <sup>[19]</sup> / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	国家二级标准 <sup>[21]</sup> / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Zn	43.03	117.72	74.87	17.79	74.69	0.24	0.002	-0.98	正态	58.8	300
Cd	0.06	0.35	0.15	0.06	0.29	0.40	1.069	1.73	正态	0.11	1.00
Pb	17.04	67.96	29.02	9.72	50.92	0.33	1.307	2.12	正态	20.6	350
Mn	289.19	742.92	553.55	91.56	453.73	0.17	-0.821	0.70	正态	524	—
Cu	16.56	99.46	40.37	16.24	82.90	0.40	1.303	2.49	正态	22.1	100
Cr	52.78	108.89	80.79	13.82	56.11	0.17	0.006	-1.07	正态	60.6	250

## 2.2 银川市不同功能区土壤重金属分布特征

从表 2 可以看出,银川市 8 个功能区土壤重金属含量存在明显的差异.工业区 Zn、Cu 和 Cr 含量最高,住宅区和医疗区 Cd 含量最高,道路的 Pb 含量最高,商业区 Mn 含量最高.对 8 个功能区重金属含量进行方差分析,结果表明不同功能区的 Zn、Cd、Pb、Mn、Cu 和 Cr 存在显著差异( $P < 0.05$ ).其中,Zn 和 Cu 在工业区、商业区和道路与其它功能区存在显著差异( $P < 0.05$ ).Zn 和 Cu 在不同功能区分布具有相似性,说明二者存在明显的依存关

系,即它们的污染途径基本一致,这与吴新民等<sup>[22]</sup>分析南京市 Zn 和 Cu 在不同功能区分布情况一致.Pb 在道路和工业区含量显著高于城市其它区域( $P < 0.05$ ),这说明汽油燃烧和工业是 Pb 的主要来源<sup>[13]</sup>.住宅区和医疗区 Cd 显著高于商业区和科教区( $P < 0.05$ ).公园和科教区 Mn 含量显著低于商业区( $P < 0.05$ ).Cr 在工业区显著高于其它功能区( $P < 0.05$ ).总体上看,道路、工业区和商业区各种重金属含量比较高,而公园和科教区重金属含量较低,土壤较为清洁.

表 2 不同功能区土壤重金属含量水平/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Mean values of soil heavy metals in different functional zones/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

功能区	样点数	Zn	Cd	Pb	Mn	Cu	Cr
开发区	10	63.15 $\pm$ 7.71 d	0.15 $\pm$ 0.04 abc	24.72 $\pm$ 3.92 c	573.56 $\pm$ 71.55 ab	30.14 $\pm$ 3.00 b	64.41 $\pm$ 5.60 d
住宅区	10	82.57 $\pm$ 8.49 b	0.18 $\pm$ 0.07 a	29.87 $\pm$ 3.27 b	536.37 $\pm$ 64.72 abc	31.30 $\pm$ 7.96 b	68.13 $\pm$ 11.57 cd
公园	10	53.68 $\pm$ 4.25 e	0.16 $\pm$ 0.03 ab	21.15 $\pm$ 1.38 c	520.05 $\pm$ 63.94 bc	30.24 $\pm$ 9.72 b	72.93 $\pm$ 4.69 c
道路	10	89.68 $\pm$ 6.12 a	0.17 $\pm$ 0.10 ab	44.06 $\pm$ 4.47 a	538.75 $\pm$ 139.38 abc	48.69 $\pm$ 30.16 a	90.33 $\pm$ 4.89 b
商业区	10	90.19 $\pm$ 7.39 a	0.12 $\pm$ 0.04 bc	30.22 $\pm$ 4.97 b	603.98 $\pm$ 42.70 a	50.33 $\pm$ 12.42 a	90.13 $\pm$ 4.37 b
科教区	10	52.61 $\pm$ 6.60 e	0.10 $\pm$ 0.04 c	20.52 $\pm$ 0.93 c	492.01 $\pm$ 106.63 c	34.13 $\pm$ 5.88 b	71.04 $\pm$ 3.91 c
工业区	10	96.24 $\pm$ 10.00 a	0.17 $\pm$ 0.07 ab	39.88 $\pm$ 11.30 a	590.07 $\pm$ 117.08 ab	51.06 $\pm$ 14.29 a	99.87 $\pm$ 4.27 a
医疗区	10	70.81 $\pm$ 9.77 c	0.18 $\pm$ 0.05 a	21.72 $\pm$ 3.80 c	573.63 $\pm$ 51.35 ab	47.05 $\pm$ 10.84 a	89.50 $\pm$ 8.65 b

## 2.3 土壤重金属污染评价

根据宁夏土壤重金属环境背景值计算出的各重金属污染物  $P_i$ (表 3),6 种被研究重金属在银川市都存在不同程度的污染,其中 Mn 和 Cr 大部分样点属于轻度污染,轻度污染占总数百分比分别为 66.25% 和 93.75%; Cd、Pb 和 Cu 都存在少量重度

污染的样点; Zn 以轻度污染为主占总数的 76.25%.通过  $P_{\text{综}}$  可以看出,银川市重金属污染情况比较乐观,70% 的样点不存在重金属污染,轻度和中度污染占比分别为 27.50% 和 2.5%,且不存在重度污染情况.

进一步分析银川市不同功能区土壤重金属污染

(表 4). 通过  $P_i$  可知,不同重金属污染程度依次为:  $Cu > Pb > Cd > Cr > Zn > Mn$ . 各功能区 Cu 以轻度和中度污染为主; Pb 在道路呈现出中度污染特征,其

表 3 不同污染级别样点数占总数百分比

Table 3 Percentages of sites at different pollution levels

参数	元素	不同污染级别样点比例/%			
		无污染	轻度	中度	重度
$P_i$	Zn	22.50	76.25	1.25	0
	Cd	26.25	63.75	7.50	2.50
	Pb	18.75	66.25	13.75	1.25
	Mn	28.75	71.25	0	0
	Cu	6.25	60.00	27.50	6.25
	Cr	6.25	93.75	0	0
$P_{综}$	—	70.00	27.50	2.50	0

表 4 不同功能区土壤重金属污染指数

Table 4 Pollution indexes of heavy metals in different functional zones

功能区	$P_i$						$P_{综}$
	Zn	Cd	Pb	Mn	Cu	Cr	
开发区	1.07	1.41	1.20	1.09	1.37	1.06	1.37
住宅区	1.40	1.62	1.45	1.02	1.42	1.12	1.64
公园	0.91	1.45	1.03	0.99	1.37	1.20	1.41
道路	1.53	1.53	2.14	1.03	2.20	1.49	2.33
商业区	1.53	1.06	1.47	1.15	2.28	1.49	1.96
科教区	0.89	0.93	1.00	0.94	1.54	1.17	1.34
工业区	1.64	1.54	1.94	1.13	2.31	1.65	2.21
医疗区	1.21	1.64	1.06	1.10	2.13	1.48	1.89
平均值	1.27	1.40	1.41	1.06	1.83	1.33	1.77

它功能区均为轻度污染; Zn 和 Mn 在科教区和公园不存在污染,在其它功能区均表现为轻度污染; Cr 在所有功能区都呈现出轻度污染; Cd 在科教区无污染,其它功能区均呈现出轻度污染. 通过  $P_{综}$  可知,银川市道路和工业区呈现中度污染,其它功能区均表现为轻度污染. 不同功能区污染程度依次为: 道路 > 工业区 > 商业区 > 医疗区 > 住宅区 > 公园 > 开发区 > 科教区. 为了全面和直观反映银川城市土壤重金属污染空间分布特征,利用 ArcGIS 10.1 绘制  $P_{综}$  的空间插值图. 从图 2 可以看出,在东北和西南方向上含量较高,同时在市区中部也出现含量较高的现象.

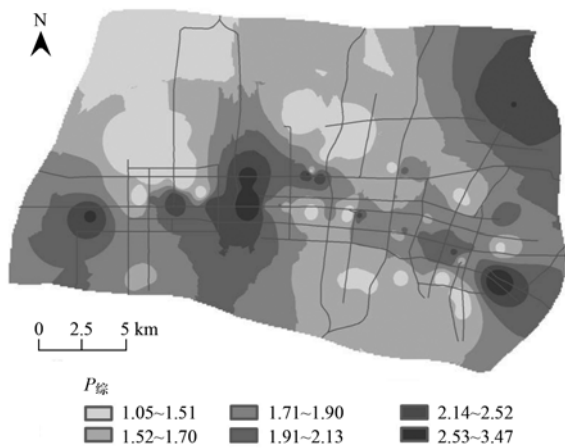


图 2 银川市土壤重金属复合污染指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the composite pollution index for soil heavy metals in Yinchuan

### 2.4 银川市重金属元素空间分布特征

利用公式(3)计算银川市土壤重金属半方差函数值,采用优先考虑残差最小和决定系数最大原则,确定最优理论模型及相关参数. 经最优拟合发现它们的最佳拟合模型可以用高斯模型、球状模型和指数模型分别拟合(表 5). 块金值/基台值表示系统变量空间相关程度. Cu 的块金值/基台值介于 0.25 ~ 0.75,具有中等空间相关性,受到随机和结构因素共同影响,说明 Cu 在银川市的分布已经受到比较明显的人为因素的影响. 其它 5 种重金属元素的块金值/基台值均小于 0.25,说明其具有强烈的空间相关性,其空间分布主要受结构因素影响. 变程反映出各重金属空间自相关范围的大小. 银川市内 6 种重金属的空间自相关距离有明显差别,其变程范

表 5 重金属含量半方差函数模型及参数

Table 5 Semivariogram model and parameters of soil heavy metals

元素	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数	残差
Zn	球形	27.40	329.50	0.08	1550	0.76	175
Cd	高斯	0.0009	0.0040	0.23	641	0.88	$3.88 \times 10^{-6}$
Pb	指数	10.80	97.60	0.11	5340	0.75	11.71
Mn	指数	970	8350	0.12	1440	0.67	19.61
Cu	球形	103.70	292.60	0.35	4670	0.65	126
Cr	球形	10.60	194.70	0.05	1690	0.71	8.16

围在 641 ~ 5 340 m, 相差近 10 倍, 说明影响 6 种重金属的生态过程在不同空间尺度起作用. 原因在于城市生态系统受到人类活动的强烈影响, 特别是不同功能区的存在, 其对土壤重金属的输入方式和输入量存在很大差别, 从而导致不同土壤重金属在银川市存在不同空间结构性.

在分析重金属空间结构特征的基础上, 利用 ArcGIS 10.1 绘制银川市 6 种重金属空间分布. 从图 3 可以看出, Zn、Cd、Pb 和 Cr 有相似的空间分布特征, 4 种元素在东北和西南方向上含量较高, 同时在市区中部也出现含量较高的现象. Mn 和 Cu 的分布相似, 2 种元素在东北方向上含量较高且市区中部含量较高. 6 种元素在东南方向上也小范围出现

了较高的现象. 经过实地调查发现银川市西南方向有中国石油宁夏分公司, 其生产过程中排放出大量烟雾, 这一区域重金属元素存在明显的集聚现象. 银川市东北方向是德胜工业园区, 所以在工业生产中有重金属元素释放的现象. 在市区中部即火车站附近重金属含量也偏高, 火车站人、车流量大, 且商业活动较多. 银川市东南方向属于兴庆区, 是银川的老城区, 人口密度大, 商业活动发达, 所以呈现出重金属偏高现象. 总体上 6 种重金属元素在银川市呈现出明显的斑块分布特征, 这也说明城市土壤可能由于受到工业排放、城市交通、大气沉降和生活垃圾排放等影响, 使得土壤重金属在城市中分布复杂.

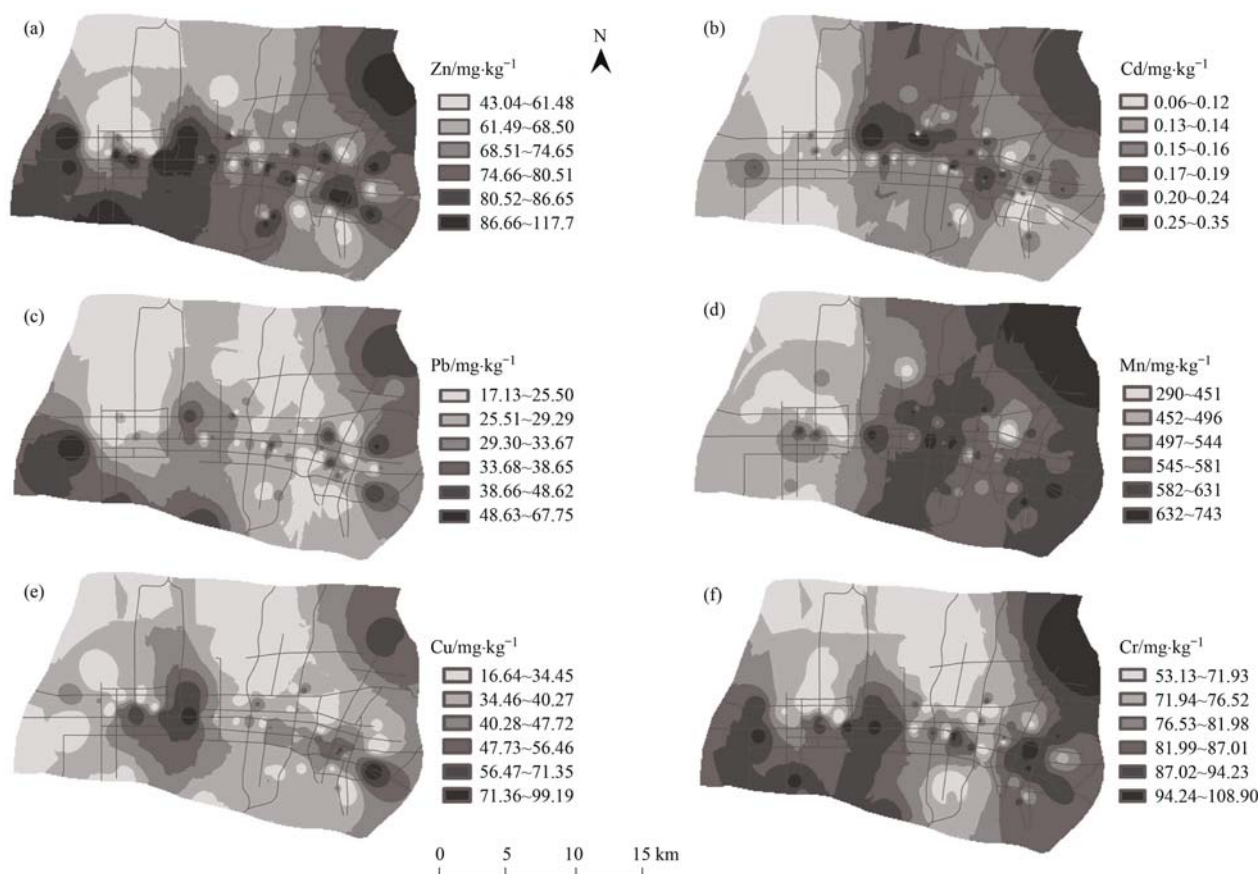


图 3 银川市土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metals in Yinchuan

### 3 讨论

以宁夏土壤重金属环境背景值为标准, 通过  $P_{\text{综}}$  可知银川市道路和工业区呈现中度污染, 其它功能区均表现为轻度污染. 分析银川市土壤重金属来源, 工业生产、电厂等煤炭燃烧过程中排放的气态或气溶胶态重金属进入大气, 通过干湿沉降进入土

壤<sup>[23]</sup>. 据宁夏统计年鉴显示 2012 年银川市降尘值为 5.87 万 t, 其中工业烟(粉)尘 0.97 万 t, 工业二氧化硫排放量 2.69 万 t, 工业氮氧化物排放量 2.21 万 t<sup>[24]</sup>, 所以通过沉降进入土壤的重金属不能忽视. 同时工业生产中废水和废渣的排放, 如果不经过很好地处理也会迁移到城市土壤中. 此次工业区监测样点分别位于城市西部宁夏石化、赛马实业

公司周边以及市区东北部德胜工业园区,樊韬等<sup>[25]</sup>分析银川城市大气污染特征发现银川西部由于宁夏石化等重工业发展导致该区域大气污染物浓度较其它区域高。因此工业等燃炭过程可能是银川土壤重金属的重要来源。

银川市道路附近的重金属污染最为严重,污染物主要来自机动车尾气排放,以及车身、零件及轮胎等部位磨损释放出大量含 Cu、Zn、Pb 和 Cd 等的有害粉尘、气体<sup>[1, 26]</sup>。据银川市 2014 年国民经济和社会发展统计公报显示,2014 年末全市各种民用汽车保有量 51.23 万辆,比上年末增长 15.5%,私人汽车保有量 44.70 万辆,比上年末增长 19.4%<sup>[27]</sup>。车辆保有量快速增加导致城区道路车流量大,特别是上下班高峰期拥堵严重,车辆怠速情况时有发生,尾气排放量增加,重金属也大量迁移到道路两侧,形成线源甚至面源污染。其中道路土壤重金属 Pb 含量最高,虽然目前我国汽油中基本不含 Pb,但是先前长期使用含 Pb 汽油,可能导致道路两侧土壤中残留大量 Pb 元素<sup>[28]</sup>。

银川市重金属在市区集聚与冬季燃煤采暖也有很大关系,银川市冬季供暖期长达 5 个月(11 月初~4 月初),目前大部分集体供暖采用燃煤,而煤炭中含有多种微量元素如 Hg、Pb、Cd、Zn、As<sup>[23]</sup>,这些元素在煤炭燃烧过程中挥发释放到大气环境中进而沉降于土壤。樊韬等<sup>[25]</sup>分析发现银川市采暖期大气中各污染物浓度明显高于非采暖期。对于商业区、医疗区和住宅区等人口密集区域土壤中各重金属含量也较高,原因在于汽车尾气、生活废弃物以及产品包装物污染所致。这一现象呼和浩特<sup>[15]</sup>、长春<sup>[29]</sup>和南京市<sup>[22]</sup>等都存在。银川市科教区、开发区和公园土壤重金属含量低,其中开发区处于西夏区和金凤区之间,经过实地采样和考察发现,园区企业是以信息软件、动漫创意和生物医药等为主导的高新技术产业园区,且建成时间短、人类活动对该地区土壤影响较小,污染程度低。这与呼和浩特市高新开发区情况类似<sup>[15]</sup>。通过以上分析可以看出,银川市有必要加强土壤污染监测和防治;将部分高污染、高耗能工业企业搬迁出市区;同时借助西气东输工程为契机,优化能源结构,推广使用清洁能源和新能源;加强对机动车尾气污染的监管,大力推广油改气;增加城区绿化覆盖率。减轻和消除由工业、交通、燃煤及人类日常活动带来的市区土壤重金属污染。

## 4 结论

(1)银川市 Zn、Cd、Pb、Mn、Cu 和 Cr 的平均值分别为 74.87、0.15、29.02、553.55、40.37 和 80.79  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均高于宁夏土壤背景值,未超过国家二级标准(Mn 没有国家标准值可比),银川市存在一定程度重金属集聚现象。

(2)通过  $P_i$  可知,银川市不同重金属污染程度依次为:Cu > Pb > Cd > Cr > Zn > Mn。结合空间分布图可以看出,Zn、Cd、Pb 和 Cr 在东北、西南和市区中部含量较高,Mn 和 Cu 在东北方向上含量较高且市区中部含量较高。重金属空间分布与工业及交通布局有较强的相关性。

(3)通过  $P_{\text{综}}$  可知,银川市道路呈现中度污染,其它功能区均表现为轻度污染。不同功能区污染程度依次为:道路 > 工业区 > 商业区 > 医疗区 > 住宅区 > 公园 > 开发区 > 科教区。

### 参考文献:

- [1] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong[J]. *Environmental Pollution*, 1997, **96**(1): 61-68.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 余健, 房莉, 方凤满, 等. 芜湖市不同功能区土壤重金属污染状况与环境质量评价[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2): 210-213, 217.
- [5] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(4): 542-551.
- [6] 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.
- [7] 于瑞莲, 胡恭任, 林燕萍, 等. 泉州市不同功能区土壤铅同位素组成及其来源分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(7): 1996-2003.
- [8] Cui Z A, Qiao S Y, Bao Z Y, *et al.* Contamination and distribution of heavy metals in urban and suburban soils in Zhangzhou City, Fujian, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **64**(6): 1607-1615.
- [9] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: PUDOC Publishers, 1985. 166-194.
- [10] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical



- regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [11] 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.
- [12] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, *et al.* Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **300**(1-3): 229-243.
- [13] 田媛, 郭希娟, 刘效兰. 北京市不同功能区土壤重金属污染探究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(12F): 83-86.
- [14] Al Obaidy A H M J, Al Mashhadi A A M. Heavy metal contaminations in urban soil within Baghdad City, Iraq [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2013, **4**(1): 72-82.
- [15] 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.
- [16] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1887-1894.
- [17] 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.
- [18] 史彦文, 方树星, 刘海峰, 等. 宁夏引黄灌区水资源利用研究[J]. *人民黄河*, 2004, **26**(7): 31-32.
- [19] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国科学出版社, 1990.
- [20] 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.
- [21] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [22] 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.
- [23] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *土壤*, 2010, **42**(6): 928-934.
- [24] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [25] 樊韬, 陶涛, 舒志亮, 等. 银川市环境空气质量统计特征分析[J]. *科技信息*, 2011, (9): 5-7.
- [26] Fakayode S O, Olu-Owolabi B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osagbo, Nigeria: its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. *Environmental Geology*, 2003, **44**(2): 150-157.
- [27] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏回族自治区 2014 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [http://www.nxtj.gov.cn/nxtjxbww/tjgb/2014ntjgb/201504/t20150413\\_53633.html](http://www.nxtj.gov.cn/nxtjxbww/tjgb/2014ntjgb/201504/t20150413_53633.html), 2015-04-13.
- [28] 孟可, 张学林, 秦建业, 等. 我国大城市环境铅污染影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 1995, **15**(2): 135-141.
- [29] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. *地理科学*, 2005, **25**(1): 108-112.

## CONTENTS

Editor's comment .....	( 403 )
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China .....	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> ( 404 )
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution .....	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng ( 413 )
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010 .....	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming ( 420 )
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Guanzhong Area .....	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> ( 427 )
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS .....	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> ( 434 )
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District .....	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> ( 443 )
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area .....	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 452 )
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing .....	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> ( 459 )
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China .....	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> ( 466 )
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha .....	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> ( 475 )
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau .....	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> ( 482 )
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet .....	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> ( 490 )
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika .....	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu ( 499 )
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> ( 507 )
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China .....	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> ( 513 )
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> ( 520 )
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed .....	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> ( 527 )
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province .....	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> ( 534 )
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake .....	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> ( 542 )
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China .....	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 548 )
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay .....	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> ( 558 )
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou .....	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> ( 565 )
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors .....	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> ( 573 )
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> ( 580 )
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate .....	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong ( 588 )
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe .....	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> ( 595 )
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property .....	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi ( 602 )
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic .....	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 609 )
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water .....	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> ( 615 )
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria .....	JING Ming, WANG Lei ( 622 )
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02 .....	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> ( 630 )
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A <sup>2</sup> O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology .....	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin ( 638 )
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment .....	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 655 )
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water .....	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> ( 662 )
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions .....	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> ( 668 )
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions .....	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> ( 680 )
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge .....	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> ( 689 )
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period .....	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 697 )
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland .....	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> ( 703 )
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City .....	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu ( 710 )
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas .....	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> ( 717 )
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil .....	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> ( 726 )
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> ( 734 )
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province .....	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> ( 740 )
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment .....	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang ( 750 )
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 756 )
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls .....	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> ( 765 )
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N <sub>2</sub> O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 775 )
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method .....	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> ( 782 )

# 《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2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 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