

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
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	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征

张海珍¹, 唐宇力¹, 陆骏², 周虹¹, 徐芸茜², 陈川², 赵赟¹, 王美娥^{3*}

(1. 杭州园文局灵隐管理处(杭州花圃), 杭州 310012; 2. 杭州植物园, 杭州 310012; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 西湖景区由于其特殊的社会价值和地理位置, 其土壤重金属污染问题备受关注. 本研究通过对景区网格布点采样, 采用数学统计学和 Arcgis 手段进行西湖风景区土壤重金属污染物的来源及空间分布特征分析. 结果表明, 景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显人为累积, 为景区的主要重金属污染物, 浓度范围分别是 4.6 ~ 197、11.1 ~ 885、11.7 ~ 346 mg·kg⁻¹. Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部西湖周围绿地面积比例较小、交通道路密度大、城市化程度较高的区域; 不同土地利用类型之间这 3 种重金属污染物含量的多重比较及空间聚类与离散分析的结果表明, 交通排放是这 3 种重金属污染物的主要来源. 本研究的结果为城市交通排放重金属污染土壤生态风险评价及城市环境管理提供了基础数据与理论依据.

关键词: 城市土壤; 重金属污染; 交通排放; 城市生态风险; 空间分布

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1516-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.046

Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area

ZHANG Hai-zhen¹, TANG Yu-li¹, LU Jun², ZHOU Hong¹, XU Yun-qian², CHEN Chuan², ZHAO Yun¹, WANG Mei-e³

(1. Lingyin Administration Department (Hangzhou Flower Garden), Hangzhou Park and Cultural Relic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310012, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Due to the importance as a famous scenic area in China and its special geographical position, heavy metal pollution in soils in Xihu Scenic Area has attracted great concerns. Typical heavy metals in surface soils (0-20 cm) in Xihu Scenic Area was investigated using the grid sampling method and statistical analysis and Arcgis approaches. It was suggested that there were anthropogenic accumulations of Cu, Zn and Pb in soils, and they were the main heavy metal pollutants in Xihu Scenic Area. The contents of Cu, Zn, Pb in soils are in the ranges of 4.6-197 mg·kg⁻¹, 11.1-885 mg·kg⁻¹ and 11.7-346 mg·kg⁻¹, respectively. The area with the highest 25% of Cu, Pb and Zn content located in the north-east part of the scenic area, which had lower ratios of green land, dense traffic roads and was characterized with high urbanization. Results of multiple comparison among different land uses and spatial cluster and outlier analysis revealed that those three main heavy metal pollutants Cu, Pb and Zn in Xihu Scenic Area were from traffic emissions. The purpose of this study was to provide basic data and theoretical bases for the ecological risk assessment of heavy metals in urban soils and environmental management of urban soils.

Key words: urban soil; heavy metal pollution; traffic emission; urban ecological risk; spatial distribution

城市土壤重金属污染一直以来是城市环境管理者及环境科学研究者的关注重点. 近年来有关国内外大、中城市土壤重金属污染的研究报道较多, 大多集中在土壤重金属污染物的来源及空间分布特征分析研究. 众多研究报道表明, 城市土壤重金属污染来源主要为工业活动、交通排放以及废弃物填埋等, 其中交通排放是城市环境中的主要非点源污染源^[1, 2]. 交通源重金属引起的土壤污染已经成为了环境科学与土壤学的关注热点, 对城市不同功能区土壤重金属含量的调查结果发现, 城市主要交通干道土壤中 Cu、Pb、Zn 含量较高, 通过 Pb 同位素的研究发现, 香港城市土壤中汽车排放等人为输入的污染水平明显较其它区域高^[3]. 对土耳其伊斯坦

布尔的街尘、表土层以及亚表层土壤的调查中发现, Pb、Zn、Cu 含量在汽车流量大的高速公路旁显著比二级公路旁高, 说明来源于交通排放(包括尾气排放及刹车片和轮胎磨损)是城市中重金属的主要来源^[4]. 对北京市建成区的土壤重金属调查结果发现, 北京市区土壤中 Pb、Cu、Zn 主要来自于交通源^[5].

西湖景区地处杭州市城西, 自古以来为著名旅

收稿日期: 2013-08-11; 修订日期: 2013-10-23

基金项目: 杭州市科技发展计划项目(20130533B23); 杭州园文局科技发展计划项目(201101)

作者简介: 张海珍(1975~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为园林生态, E-mail: haizhenzhang@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

游胜地,植被覆盖率达 98%,周围无工矿企业等污染源,被形容为杭州的“绿肺”。然而,随着景区旅游业的蓬勃发展,人类活动对环境影响程度的日益增大。最为显著的是交通压力增大,高度密集的旅游活动使风景区成为了杭州市城市土壤重金属污染的重点区域,众多针对杭州市土壤重金属污染的研究报道中都指出了西湖景区土壤的环境质量问题^[6~14]。目前,针对西湖风景区环境问题的研究大多以西湖水体^[15]、湖中沉积物^[16]、茶叶^[17]及茶园土壤^[18,19],尚未有针对整个西湖风景区土壤重金属污染物的分布特征及主要来源进行系统的研究报道。

本研究以西湖风景区土壤为对象,通过空间网格布点采样分析,揭示景区土壤中典型重金属污染物的空间分布特征,分析和探索影响西湖风景区土壤重金属污染物的来源及影响空间分布的关键因子,以期为城市土壤重金属污染生态风险研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集及化学分析

本研究区域为西湖风景区主体部分,面积约为 65 km²。首先对研究区域进行 500 m × 500 m 网格划分,然后在大面积相同土地类型区域如山体,按照 1 km × 1 km 布置采样点,在土地利用类型较为破碎的区域按照 500 m × 500 m 布置采样点;结合景区土地利用类型所占比例,分别采集茶园样点 6 个、景区绿地样品 8 个、林地 66 个、交通区 27 个、住宅区 9 个、竹林 5 个,共采集土壤样品 123 个,采样点分布如图 1 所示。采用 10 m × 10 m 正方形 5 点混合采样方法采集 0 ~ 20 cm 表层土壤混合表层土壤样品。

土壤样品风干后,碾磨,过 2 mm 筛。一部分过 2 mm 筛的土壤继续碾磨,过 100 目筛。称取 100 目土壤样品 0.5 g,采用 1:1 王水法消煮。消煮结束后,采用 ICP-AES 测定 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、V、Mn、Co、P 等 9 种元素的含量。同时使用土壤标准物质 GSS-5 进行质量控制。

1.2 数据分析方法

采用 SPSS 18,把 9 个所测元素组成一个多元数列进行多元分析、方差分析(ANOVA)、多重比较以及皮尔逊相关分析。在多元分析之前,原始数据采用对数转换法进行标准化。存在潜在土壤污染的重金属元素通过含量的普通 Kriging 插值(ArcGIS 9.0)以及局部 Moran's I 法进行空间分布特征分



图 1 西湖景区采样点分布示意

Fig. 1 Simplified map of Xihu Scenic Area with soil sampling locations

析,在插值前原始数据进行自然对数转换。

采用局部 Moran's I 法进行土壤重金属污染的空间聚类分析和空间离群^[20],重金属污染空间聚类意味着重金属污染物含量较高的样点的周围样点重金属含量同样较高,而重金属污染空间离群意味着重金属污染物含量较高的样点的周围样点重金属含量中等或较低。较高的正局部 Moran's I 指数说明采样点具有和周围样点类似较高或较低的重金属含量,这些样点被称之为土壤污染“区域性热点”(regional hotspots)或“区域性凉点”(regional coolspots)。反之,较高的负局部 Moran's I 指数说明该采样点与周围采样点相比重金属含量明显较低或较高,具有空间离散性,比周围采样点重金属含量高的样点称之为“独立热点”(individual hotspots),反之为“独立凉点”(individual coolspots)。本研究中采用欧式距离矩阵分析法进行权重矩阵设置。

2 结果与讨论

2.1 西湖景区土壤元素含量的统计学分布情况

西湖风景区土壤元素的统计学分布如表 1 所示,9 种所测的土壤元素都具有较大的标准差,最大值与最小值之间差异 1 ~ 2 个数量级。

土壤元素含量的数学分布在自然状态下一般呈

表 1 西湖风景区土壤元素含量的描述性
统计学分布/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Statistics distribution of soil elements contents
in Xihu Scenic Areas/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	最小值	中值	最大值	平均值	S. D.
Mn	18.3	368	1 388	397	287
Cu	4.60	19.7	197	250	22.1
Zn	11.1	56.6	885	82.4	91.0
Pb	11.7	43.1	346	54.6	45.5
Cr	8.33	27.4	300	32.1	28.6
Ni	7.93	21.7	99.6	23.2	11.3
Co	0.47	8.48	18.1	8.17	4.09
V	15.5	39.8	133	44.3	19.7
P	88.7	502	2 907	715	561

对数分布,然而如果人为干扰使土壤元素含量发生变化,其数学分布会发偏离正态分布^[21].为了明确西湖景区土壤元素的分布情况,需要对数据进行多元统计分析,因此必须对原始数据的概率分布情况

表 2 西湖景区土壤元素含量数据分布特征参数及其 K-S p 检验结果

Table 2 Shape parameters and results of kolmogorove smirnov test after Lilliefors significance correction

(K-S p) for element concentrations in soils in Xihu Scenic Areas

元素	原始数据			对数转换		
	偏度	峰度	K-S p	偏度	峰度	K-S p
Cu	4.55	30.9	0.00	0.420	0.673	0.941
Zn	6.00	50.0	0.00	0.569	0.851	0.528
Pb	3.52	16.4	0.00	0.720	1.14	0.427
Cr	7.17	64.8	0.00	1.23	4.99	0.122
Ni	2.92	16.3	0.00	0.189	0.822	0.818
Mn	1.17	1.77	0.242	-0.713	0.058	0.029
Co	0.201	-0.369	0.674	-1.54	2.80	0.001
V	2.20	5.94	0.001	0.646	1.42	0.317
P	1.66	3.05	0.004	0.021	-0.422	0.855

2.2 西湖景区土壤典型重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 基本统计结果及比较

土壤重金属元素背景值是衡量土壤中重金属元素累积和人为污染强度的依据.如表 3 所示,西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 的平均值和标准差明显高于 1985 年与 2002 年的背景值水平^[7,12],Cr 元素评价含量低于背景值,而 Ni 元素的含量与背景值相似.与 2002 年背景值最高限值的比较结果发现,西湖景区表层土壤中 Cu 含量高于背景值最高限值占总样品数量的 13.8%、Zn 为 10.6%、Pb 为 56.9%、Cr 为 1.6%、Ni 为 5.69%.一半以上的样点 Pb 含量超过背景值的最高限值,说明总体上 Pb 在西湖景区土壤中水平较高.根据许多研究结果报道,城市区域中公园土壤 Pb 含量较其它土地利用类型高,北京市城市土壤调查中也发现公园土壤中 Pb

进行分析^[22].对原始数据及其对数转换的数据进行了 Lilliefors 显著性校准,这些数据的形状参数以及 K-S 正态分布检验结果如表 2 所示.西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量的原始数据都呈正偏态,偏度和峰度参数都较大.而剩余的几种元素 Mn、Co、V 和 P 的峰度明显比前 5 种元素小.K-S p 值是检验是否正态分布的重要参数,当 K-S p 值大于 0.05 时,数据呈正态分布,当小于 0.05 时为非正态分布,从表 1 可以看出,除了 Mn 和 Co 元素以外,西湖景区土壤元素含量的原始数据的 K-S p 值都达到了极显著水平,说明非正态分布较为严重.对原始数据进行对数转换后,除了 Mn 和 Co 元素,其它元素非正态分布的状况有明显改善,偏度和峰度参数明显降低,并趋向“0”,K-S p 值都超过了 0.05,通过了正态检验.以上结果表明,西湖景区重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、V 和 P 含量受到了人为因素干扰,然而,干扰程度相对较小.

含量在所有土地利用类型土壤中最高,并且老城区的土壤 Pb 含量较新城区高,这现象发生的原因可能是因为 20 世纪 90 年代之前含铅汽油的消耗使道路密度大、交通量高的区域土壤中的 Pb 含量较高,随着含铅汽油被禁止使用后,土壤中 Pb 的累积逐步下降,但是含铅汽油排放对土壤 Pb 污染的影响将会持续几十年^[23].Cr 和 Ni 高于最高限的样品数量较少,Cr 只有两个样品高于最高限值,值得注意的是景行桥样点土壤 Cr 含量达 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远超过土壤环境质量的二级标准 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} < 6.5$),这与该样点土壤为客土有关.总之,与背景值的比较西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显累积,部分样点已经达到污染水平,Cr 和 Ni 总体上处于自然背景值范围,只有个别客土样点存在累积现象.

与以往有关杭州市城市土壤重金属污染状况的报道比较^[6-14; 17-19] (表 4), 本研究在农业用地(茶园)土壤中的 Pb 和 Zn 元素的最大值、最小值及平均值和标准差都比文献报道高, 而 Cu、Cr 和 Ni 含量比其它报道结果低. 对商住区土壤的结果

比较发现, 本研究调查区域的 5 种重金属元素含量都比文献报道低. 因此, 除了农业用地的 Pb 和 Zn 以外, 西湖景区农业用地(茶园)和商住区土壤重金属含量与杭州市其它区域相比处于较低水平.

表 3 西湖景区土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量与杭州市土壤背景值比较结果 (mean ± S. D.)

Table 3 Comparison of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni content in soils in Xihu Scenic Area with the respective background values in Hangzhou City (mean ± S. D.)					
项目	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni
实测值/mg·kg ⁻¹	25.0 ± 22.1	82.4 ± 91.0	54.6 ± 45.5	32.1 ± 28.6	23.2 ± 11.3
背景值(1985)/mg·kg ⁻¹	18.6 ± 9.68	76.8 ± 70.2	20.7 ± 10.7	58.1 ± 29.5	20.8 ± 9.3
背景值上限(2002)/mg·kg ⁻¹	40.8	110	38.2	92.1	41.1
n > 背景值/%	13.8	10.6	56.9	1.60	5.69

表 4 西湖景区农业用地与商住区土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 元素含量与杭州市其它文献报道结果的比较

Table 4 Comparison of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni contents in soils in agricultural and residential areas in Xihu Scenic Area with those reported in other areas in Hangzhou City											
土地利用类型	项目	Cu	本研究	Pb	本研究	Cr	本研究	Zn	本研究	Ni	本研究
农业用地	最大	48.3	46.9	53.5	71.5	60.9	29.6	220	257	—	24.6
	最小	24.2	13.7	11.7	22.2	37	18.6	75	30.4	—	9.1
	平均	33.4	23.0	36.4	45.4	49.0	26.3	141	79.8	22.7	18.2
	SD	7.38	12.10	12.4	17.1	16.9	4.2	48.2	88.1	—	5.7
商住区	最大	154	86.3	752	241.7	60.3	44.2	301	202	31.5	31.5
	最小	34.4	10.7	13.3	12.7	39.9	23.1	76.8	48.7	22.8	11.6
	平均	80.8	31.4	313	65.1	47	31.0	176	89.9	27.0	24.8
	SD	62.0	24.2	390	74.8	8.3	7.8	96.5	48.4	4.8	7.4

2.3 西湖景区土壤元素的多元统计分析

多维尺度分析方法能够把来源相似的土壤元素进行分类. 对西湖景区土壤元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Mn、P、V、Co 含量的对数进行多维尺度分析(图 2), 结果发现可以分为 4 组: 第一组: P 元素; 第二组: Cu、Zn 和 Pb 元素; 第三组: Mn 和 Co 元素; 第四组: Cr、Ni 和 V 元素. 对 9 种元素的主成分分析结果见表 5, 一共可以提取 3 个主成分, 即这 9 种元素可以分为 3 组: 第一组: Cu、Zn、Pb、P; 第二组: Cr、Ni 和 V; 第三组: Mn 和 Co 两种分类方法除了 P 元素的归属以外, 结果基本一致. 在多维尺度分析中 P 元素和 Cu、Zn、Pb 这 3 种元素分开了, 但是在主成分分析中这 4 种元素归属于一类. 然而, 环境中通过人类活动如农业施肥以及生活垃圾排放途径输入的 P 元素较多, 因此在主成分分析中 Cu、Zn、Pb 这 3 种重金属与 P 元素归属于一类能够解释为都具有人为输入的影响. 另一方面, 多维尺度分析结果中 P 元素单独一组, 这是因为 P 是非重金属元素, 其化学性质及地球化学行为与重金属元素不同, 因此导致其在土壤中的分布与重金属元素的分布差异. 此

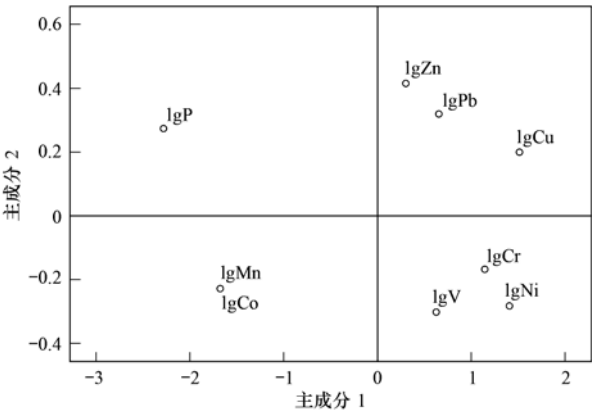


图 2 西湖景区土壤元素的多维尺度分析

Fig. 2 Multidimensional scaling analysis of elements in soils in Xihu Scenic Area

外, 从多维尺度分析的结果中也可以看出 Mn 和 Co 这 2 种元素之间以及 Cr、Ni 和 V 这 3 种元素之间具有相似性质, 而 Zn、Pb 和 Cu 之间具有相似性质. 结合统计学分布分析以及与背景值比较的结果, 西湖景区土壤中 Zn、Pb 和 Cu 这 3 种重金属的人为累积效应较为明显, 因此西湖景区土壤中的重金属污染物为 Zn、Pb 和 Cu 元素.

表 5 西湖风景区土壤元素主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis of soil elements in Xihu Scenic Area

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Mn	0.251	0.211	0.891
Cu	0.950	0.092	0.089
Zn	0.886	0.083	0.044
Pb	0.853	0.023	0.112
Cr	0.045	0.957	-0.008
Ni	0.129	0.894	0.235
Co	0.114	0.206	0.924
V	-0.128	0.825	0.349
P	0.751	-0.120	0.230
特征值	3.73	2.59	1.18
方差百分比/%	41.5	28.8	13.1

表 6 西湖景区不同土地利用类型土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb 含量之间的比较结果 (mean $\pm$ S. D.)

Table 6 Contents of Cu, Zn and Pb in soils of different land uses in Xihu Scenic Area

土地利用类型	Cu	Zn	Pb
茶园/mg·kg ⁻¹	22.9 $\pm$ 12.1b	79.8 $\pm$ 88.1b	45.4 $\pm$ 17.1ab
景区绿地/mg·kg ⁻¹	28.1 $\pm$ 9.9ab	104 $\pm$ 62.9ab	57.0 $\pm$ 23.2ab
林地/mg·kg ⁻¹	18.0 $\pm$ 11.4b	51.8 $\pm$ 31.6b	46.3 $\pm$ 31.3b
公路边/mg·kg ⁻¹	41.6 $\pm$ 35.7a	157 $\pm$ 155a	76.0 $\pm$ 67.2a
住宅区绿地/mg·kg ⁻¹	30.0 $\pm$ 23.0ab	87.5 $\pm$ 45.9b	60.9 $\pm$ 71.1ab

2.5 西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb、Zn 的空间分布特征

把西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb、Zn 含量范围分成 3 个等级,分别为:低于 25% 的含量、25% ~ 75% 之间的含量、高于 75% 的含量,然后进行普通克里格插值,结果见图 3. Cu 含量最低 25% 的区域在西北部,该区域在五云山一带,城市化程度较低,无重要的交通道路;除了东北部和西南部以外,其它大部分区域的 Cu 含量在 25% ~ 75% 之间. Pb 和 Zn 含量最低 25% 的区域没有能够在普通克里格插值图中显现出来,说明所占面积比例非常小;最高 25% 的区域较为明显,集中在东北部城市化较高的区域,并且 Zn 所占的面积比 Pb 大,几乎覆盖了整个东北部道路密集区域. 由此可见,Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部城市化程度较高的区域,并且这个区域的绿地面积比例较小,交通道路密度大. 与不同土地利用类型之间的统计分析结果类似,普通克里格插值的结果表明交通排放是西湖景区土壤中 Cu、Pb、Zn 这 3 种重金属污染的主要来源.

土壤污染调查中污染“热点”和“凉点”分别指与周围样点比较污染物含量较高或较低的样点,也就是污染物含量区域相对高点和低点. 与普通克里

2.4 不同土地利用类型对西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb 和 Zn 累积的影响

对西湖景区不同土地利用类型土壤重金属污染物 Cu、Pb 和 Zn 含量的方差分析和多重比较结果如表 6 所示,公路边土壤中这 3 种重金属含量在 5 种土地利用类型中最高,林地土壤中含量最低,并达到显著水平 ($P < 0.05$). Cu 元素在 5 种土地利用类型土壤中的含量大小次序为:公路边 > 住宅区绿地 > 景区绿地 > 茶园 > 林地; Zn 元素含量大小的次序为:公路边 > 景区绿地 > 住宅区绿地 > 茶园 > 林地; Pb 含量的大小为:公路边 > 住宅区绿地 > 景区绿地 > 林地 > 茶园. 以上结果表明,西湖景区重金属污染物 Pb、Zn、Cu 主要来源于交通排放.

格插值不同,污染物分布的“热点”和“凉点”分析有助于鉴别出污染物含量异常的样点,是污染来源分析的重要手段,尤其是区域性污染物“热点”与独立污染物“热点”具有重要意义,例如:区域性污染物“热点”一般表示面源污染,而独立污染物“热点”一般是点源污染引起. 对西湖景区 Cu、Pb、Zn 这 3 种重金属污染物的“热点”分析结果如图 4 所示.

Cu 的区域性“热点”有 4 个,分别位于凤凰山风景区:玉皇山月宝厅、将台山、八卦田南观音洞、八卦田北门,对比 Cu 的普通克里格插值图可以发现,区域性“热点”并不位于 Cu 含量最高 25% 级别的区域内,说明这些区域性高含量样点有可能是因为这个区域的成土母质或成土母岩的原因; Cu 的独立“热点”有 2 个,分别为龙井问茶和满觉陇与虎跑路路口,这两个样点与周围样点比较,Cu 的含量显著较高,根据这两个样点都是车流量较高的区域,土壤中 Cu 的累积可能来自于汽车排放.

Pb 的区域性“热点”较多,一共有 17 个样点,几乎覆盖了西湖周围一圈所有的重要景点,并位于普通克里格插值图的含量最高 25% 区域内. Pb 的独立“热点”有 2 个,分别为上天竺站和宝塔,这两个样点一直以来都是交通要道,因此较周围区域含量高.

Zn 的区域性“热点”分布与 Pb 类似,一共为 12

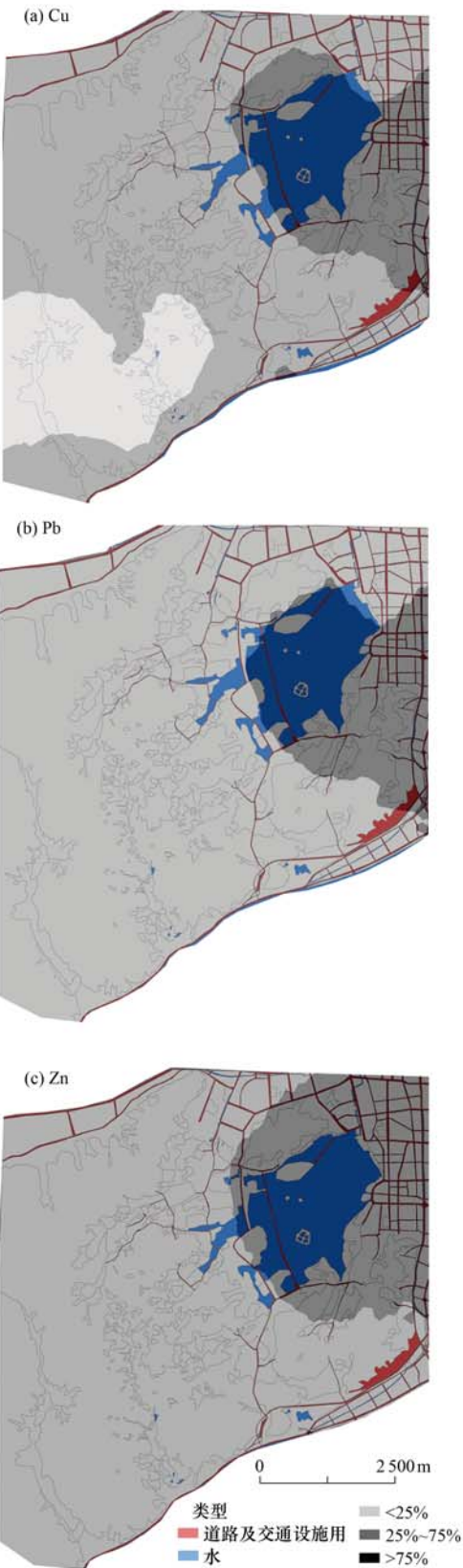


图3 西湖景区重金属污染物 Cu、Pb、Zn 的普通克里格插值图

Fig. 3 Spatial distribution Cu, Pb and Zn in soils in Xihu Scenic Area

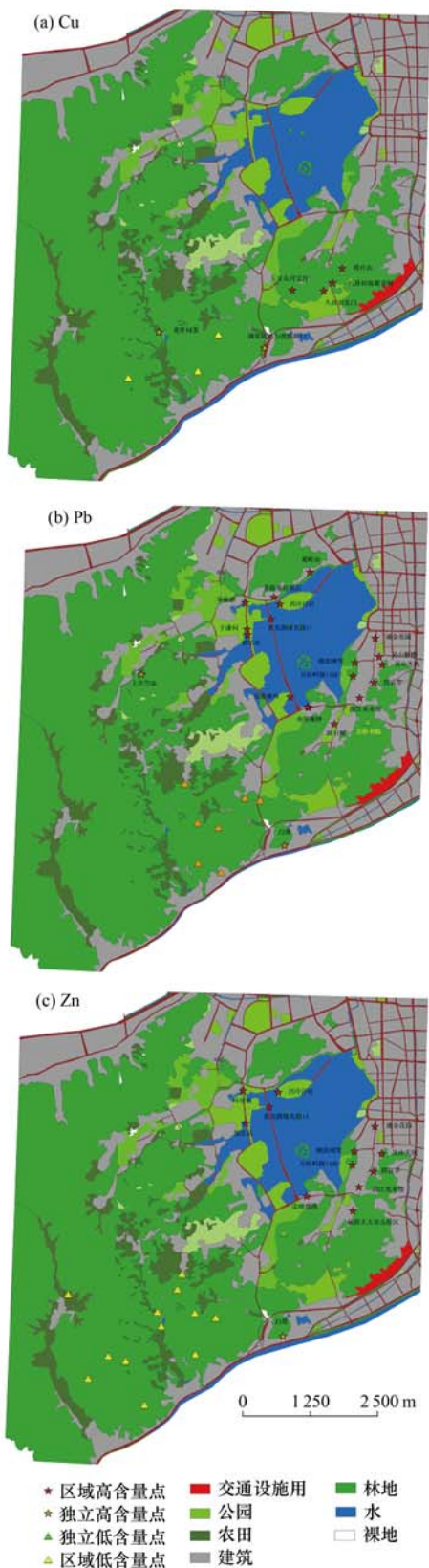


图4 西湖景区土壤重金属 Cu、Pb、Zn 污染的“热点”和“凉点”分布

Fig. 4 Pollution hotspots and coolspots identification of Cu, Pb and Zn in soils in Xihu Scenic Area

个,都分布于西湖周围的主要景点中,并位于普通克里格插值图的含量最高 25% 区域内。Zn 的独立“热点”只有一个,位于白塔。西湖景区土壤中 Zn 的累积特征与 Pb 十分类似,城市土壤中 Pb 的累积与汽车排放十分相关,因此从 Zn 的空间分布特征中也可以发现,西湖景区土壤中 Zn 的累积主要来源于汽车排放。

因此,从西湖景区土壤污染物 Cu、Pb、Zn 的空间分布特征中也可以推断出这 3 种重金属污染物主要来源于交通排放。

3 结论

(1)西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量呈正偏态分布,在土壤中的累积存在人为因素干扰,但是干扰程度相对较小。

(2)西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 的平均值和标准差明显高于背景值水平,Cr 元素评价含量低于背景值,而 Ni 元素的含量与背景值相似;与背景值的比较结果表明,西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显累积,为景区的主要重金属污染物,Cr 和 Ni 总体上处于自然背景值范围,只有个别样点存在累积现象;多维尺度分析以及主成分分析结果表明,西湖风景区土壤重金属污染物为 Cu、Zn、Pb。

(3)西湖风景区交通区土壤中 Zn、Pb 和 Cu 显著比其它土地利用类型尤其是林地土壤高;空间插值结果也表明,Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部绿地面积比例较小,交通道路密度大,城市化程度较高的区域,交通排放来源的特征较为明显。

(4)污染“热点”与“凉点”分析结果表明:Cu 的区域性“热点”是由于区域成土母质或成土母岩的原因,而两个独立“热点”来源于汽车排放;Pb 和 Zn 的区域性“热点”基本覆盖西湖周围的重要景点;其余的独立高“热点”也具有汽车流量大的特点。

参考文献:

- [1] 郭广慧,雷梅,陈同斌,等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- [2] 邵莉,肖化云,吴代赦,等. 交通源重金属污染研究进展[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 445-459.
- [3] Li X D, Lee C S, Wong S C, *et al.* The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach[J]. Environmental Pollution, 2004, **129**(1): 113-124.
- [4] Guner M, Onay T T, Coptay N K. Impact of overland traffic on heavy metal levels in highway dust and soils of Istanbul, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **164**(1-3): 101-110.
- [5] Wang M, Markert B, Chen W P. Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(10): 5889-5897.
- [6] 宋明义,刘军保,周涛发,等. 杭州城市土壤重金属的化学形态及环境效应[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 666-670.
- [7] 余世清,杨强. 杭州城市土壤重金属污染研究进展及展望[J]. 环境科学与管理, 2011, **36**(4): 44-49.
- [8] 贾华清,章明奎. 杭州市城市土壤重金属的积累和释放潜力及其空间分异[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, **33**(6): 677-684.
- [9] 李静,谢正苗,徐建明,等. 杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 生态环境, 2003, **12**(3): 277-280.
- [10] 康占军,王加恩,任荣富,等. 浙江省安吉县土壤元素含量背景值[J]. 甘肃农业, 2009, (7): 81-86.
- [11] 李向远,蔡子华,任荣富,等. 浙江天目山地区土壤地质与地球化学特征[J]. 甘肃农业, 2005, (10): 41-42.
- [12] 汪庆华,董岩翔,郑文,等. 浙江土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 地质通报, 2007, **26**(5): 590-597.
- [13] 王美青,章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5): 603-608.
- [14] 刘玉燕,刘敏,刘浩峰. 城市土壤重金属污染特征分析[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 184-188.
- [15] 王莉红,汤福隆,胡岭,等. 杭州西湖水中四种重金属的形态分布和交换过程研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(2): 147-152.
- [16] 路远发,陈好寿,陈忠大,等. 杭州西湖与运河沉积物铅同位素组成及其示踪意义[J]. 地球化学, 2006, **35**(4): 333-345.
- [17] 励建荣,陆海霞,季静冰. 浙江省部分地区绿茶中重金属含量的调查和研究[J]. 中国食品科学, 2004, **4**(1): 87-92.
- [18] 李仪,章明奎. 杭州西郊茶园土壤重金属的积累特点与来源分析[J]. 广东微量元素科学, 2010, **17**(2): 18-25.
- [19] 麻万诸,章明奎. 浙江省典型茶园生态系统中重金属流及其平衡分析[J]. 茶叶科学, 2011, **31**(4): 362-370.
- [20] Zhang C, Luo L, Xu W, *et al.* Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland [J]. Science of the Total Environment, 2008, **398**(1-3): 212-221.
- [21] 王学松,秦勇. 利用对数正态分布图解析徐州城市土壤中重金属元素来源和确定地球化学背景值[J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 98-102.
- [22] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2006, **142**(3): 501-511.
- [23] 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.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd (II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe (II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行