

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)	

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

(杭州师范大学杭州市生态系统保护与恢复重点实验室, 杭州 310036)

摘要: 为掌握杭州市蔬菜基地土壤中重金属污染状况, 采用野外调查结合室内分析法, 就杭州市 10 个区县 30 个蔬菜基地中 203 个土壤样品进行了 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和 Ni 含量的分析及评价, 并就重金属含量与土壤理化指标进行了相关分析。结果表明, 杭州市菜地土壤中 Zn、Cr、As、Ni 含量均未超标, 但部分土壤中 Cu、Pb 和 Cd 含量有超标现象。污染指数评价表明, 杭州市菜地土壤重金属综合污染等级多为轻度污染, 且主要以 Cd 污染为主。累积评价表明, 杭州市菜地土壤重金属多呈中高度累积, 亦主要由土壤 Cd 累积所致。潜在生态风险评价表明, 杭州市菜地土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、As 和 Ni 的生态风险轻微, 综合潜在生态风险处于中等水平, 但 Cd 存在较强的潜在生态风险。相关分析表明, 土壤中 Cu、Zn、Pb、As、Cd 含量受土壤理化性质影响较大。综上, 杭州市要做好菜地土壤重金属的污染防治工作, 尤其要防范 Cd 的污染风险。

关键词: 蔬菜; 土壤; 重金属; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2329-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.042

Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou

GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin*, GU Yan-qing, LI Shu-ying, Jianati·Tunike

(Key Laboratory of Hangzhou City for Ecosystem Protection and Restoration, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: With the purpose of investigation on heavy metal contamination in soils from vegetable bases of Hangzhou, adopting field investigation and indoor analysis methods, the contents of heavy metals as Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, As and Ni, together with their relevance to the physicochemical properties of the 203 soils from 30 vegetable bases in 10 districts of Hangzhou were studied. The results showed that the contents of heavy metals such as Zn, Cr, As, Ni generally didn't exceed the standard, while the contents of heavy metals such as Cu, Pb, Cd exceeded it. The results from synthetic pollution evaluation showed that the soils were slightly polluted in soils from vegetable bases of Hangzhou, which were mainly caused by Cd pollution. Furthermore, there was slight potential ecological hazard for Cu, Zn, Pb, Cr, As and Ni but strong potential ecological hazard for Cd, and medium comprehensive ecological hazard as a whole for all the heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou. The correlation analysis indicated that the contents of Cu, Zn, Pb, As, Cd were greatly influenced by the soil physicochemical property. Thus, measures must be taken for the prevention and controlling of heavy metal pollution in the soils from vegetable bases in Hangzhou, especially for that of Cd.

Key words: vegetable; soil; heavy metal; pollution evaluation

近年来,随着工业“废水、废气、废物”的排放和各种农业化肥的不合理使用,我国农田土壤开始受到各类重金属的严重污染^[1~4]。例如,李如忠等^[5]发现铜陵惠溪流域菜地土壤中砷(As)、镍(Ni)、铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)和锌(Zn)含量均高于当地土壤背景值,污染程度严重。孙杰等^[6]发现绵阳市蔬菜基地土壤中 Zn 和 Cd 为轻度污染。马祥爱等^[7]发现山西太谷县蔬菜基地土壤以 Pb 污染为主。王广林等^[8]发现安徽六安市蔬菜基地土壤多达中度污染,并以 Pb 和 Ni 的污染最为严重。傅智慧等^[9]研究发现,浙江蔬菜基地土壤重金属含量均超过浙江省土壤背景值。Ye 等^[10]发现,浙江省蔬菜中重金属含量与相应土壤中的重金属含量呈明显正相关关系,且 Cd 比其他重金属更易积累在蔬菜中。土壤重金属污染使蔬菜摄食成为人体重金属的富集

途径并增加其健康风险^[11]。有研究表明^[12],天津市郊各类蔬菜以 Cd 和 As 污染为主,且各类蔬菜中 Cd 和 As 含量变异性较大。陈同斌等^[13]发现北京市蔬菜中 As 存在超标问题,且对部分北京人群存在一定的健康风险。孙清斌等^[14]发现大冶矿区附近蔬菜中重金属 Pb 和 Cd 超过食品卫生标准,对青少年食用蔬菜具有一定健康风险。可见,菜地土壤重金属污染日益严重,并构成一定的人体健康风险,防范与控制菜地土壤重金属污染已成为我国亟需解决的环境问题。

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2016-01-09

基金项目: 杭州市农业科研攻关项目(20120232B10); 浙江省新苗人才计划项目(2014R421036); 杭州师范大学大学生挑战杯项目(1284XXM32); 杭州师范大学本科生创新能力提升工程项目(CX2014094)

作者简介: 龚梦丹(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染控制, E-mail: 362218887@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhwq@hznu.edu.cn

随着大量工业企业的陆续搬迁,杭州市亦遗留了较为严重的土壤重金属污染问题,例如,王美青等^[15]发现杭州市城郊土壤已明显受到重金属污染;郭丹等^[16]研究发现,杭州市乔司和下沙土壤重金属为高度累积程度,七堡和蒋村土壤重金属达到严重累积程度;焦荔等^[17]发现杭州江干区蔬菜基地除茄果类蔬菜外,其他种类蔬菜中部分重金属指标均存在超标现象;王玉洁等^[18]亦研究发现,杭州市下沙、蒋村、乔司及七堡区域的小葱、韭菜、大蒜和茄子的可食部位和非可食部位 Pb 含量均远远超过食品卫生标准,样本超标率达 100%。为构建“生活品质之城”,近年来杭州市积极推进“菜篮子”工程建设,而“菜篮子”基地土壤是否受到重金属污染关系到蔬菜质量及人们的身体健康。因此,本研究旨在对杭州市“菜篮子”基地土壤重金属污染现状调查、分析及评价,掌握蔬菜生产时的土壤环境状况,这对提高杭州市蔬菜

质量、保障人们的食品安全及促进蔬菜可持续生产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杭州位于浙江省北部钱塘江下游北岸,东经 118°21′~120°30′,北纬 29°11′~30°33′,属于亚热带季风性气候,四季分明,年平均降水量为 1 439 mm。2010 年杭州市启动菜篮子计划,全市重点建设叶菜生产功能区 31 个,高山蔬菜基地 12 个,食用菌产业基地 12 个,森林蔬菜基地 10 个。本研究在杭州市境内共选择 10 个区县 30 个蔬菜基地共采集 203 个土壤样本进行分析,土壤样本采集数分布如下:江干区 15 个,西湖区 16 个,滨江区 3 个,萧山区 56 个,余杭区 46 个,富阳市 12 个,建德市 15 个,临安市 13 个,桐庐县 16 个、淳安县 11 个。采样基地分布状况如图 1 所示。

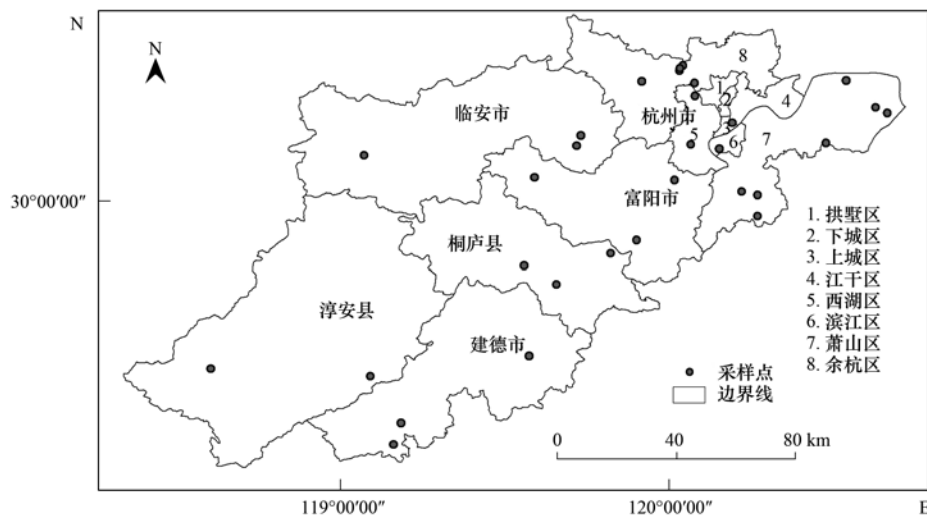


图 1 杭州市蔬菜基地采样分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling vegetable bases in Hangzhou

1.2 样品采集与分析方法

土壤样品采集采用对角线布点法,每个土壤样品主要分布在 2 m×2 m 的区域内的 4 个顶点和 1 条对角线中心点,各自采集 1 kg 土壤后用四分法取约 1~2 kg 土壤作为该点的混合土样,然后经风干、研磨、除杂后过 2 mm 筛,再分级过筛后备用。土壤基本理化性质按常规方法分析,土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 的含量测定采用 HNO₃-HClO₄ 消煮-原子吸收分光光度法测定,As 含量采用 HNO₃-HClO₄ 消煮-原子荧光光度法测定^[19],每个样品均重复测定 3 次。各样点土壤基本理化性质见表 1。

1.3 评价方法

1.3.1 污染评价方法及分级标准

(1) 单项污染指数法

单项污染指数法是一种评价土壤污染程度的无量纲指数,可反映超标倍数和污染程度^[20]。其计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为土壤中重金属 i 的单项污染指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测值; S_i 为依据土壤 pH 范围选用的温室蔬菜产地环境质量评价标准限值(HJ 333-2006),详见表 2。当 $P_i \leq 0.7$ 时,污染等级为 1,表示

土壤清洁; $0.7 < P_i \leq 1.0$ 时, 污染等级为 2, 表示土壤尚清洁; $1 < P_i \leq 2$ 时, 污染等级为 3, 表示土壤轻度污染; $2 < P_i \leq 3$, 污染等级为 4, 表示土壤中度污染; $P_i > 3$, 表示土壤重度污染, 且 P_i 越大受到污染越严重.

表 1 杭州市不同区县蔬菜基地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of soils from vegetable bases in different districts of Hangzhou											
样区	pH	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	CEC / $\text{mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$	TOC / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效 P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 P 量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效 N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 N 量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 K 量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Ca 量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Mg 量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
西湖区	7.45	154.31	1 009.45	8.07	208.95	1 481.52	102.10	2 709.69	1 138.66	4 303.96	160.96
江干区	6.04	563.18	836.22	12.65	180.11	1 060.87	136.00	2 705.93	1 264.53	1 759.06	156.07
滨江区	7.36	584.18	995.23	2.78	20.42	800.47	38.08	1 779.80	626.59	4 438.79	159.43
萧山区	6.85	645.55	881.43	7.9	229.66	1 384.12	109.71	2 630.38	1 112.14	3 833.92	152.13
余杭区	5.75	460.17	800.59	12.1	153.54	889.26	148.39	2 981.66	1 169.71	1 380.41	154.06
富阳市	6.53	232.09	760.29	16.41	212.00	991.70	136.22	2 682.80	1 211.46	1 160.32	149.69
桐庐县	6.10	254.78	744.48	12.68	129.36	648.02	99.74	2 450.69	1 190.1	1 264.52	145.20
淳安县	6.40	427.75	878.48	15.38	283.91	1 794.56	155.69	3 187.24	657.63	2 387.82	144.52
临安市	7.55	174.44	871.52	22.77	228.92	1 996.74	160.17	4 365.32	1 256.38	3 834.05	168.81
建德市	7.34	89.5	755.86	10.03	144.67	764.43	63.04	2 588.61	1 079.95	955.70	145.98

表 2 温室蔬菜产地环境质量评价标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 2 Environmental quality evaluation standard for farmland
with greenhouse vegetables production/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	pH < 6.5	pH 6.5 ~ 7.5	pH > 7.5
铜	50	100	100
锌	200	250	300
铅	50	50	50
铬	150	200	250
镉	0.3	0.3	0.4
砷	30	25	20
镍	40	50	60

(2) 综合污染指数法

内梅罗指数法 (Nemerow index) 是常用的综合污染指数法之一, 能够较全面地评价整个区域土壤重金属的污染程度^[20], 其计算公式如下:

$$P_N = \left(\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中, P_N 为某样点 (或某区域) 所有重金属的内梅罗综合污染指数; $P_{\max}$ 为土壤重金属最大单项污染指数; P_{ave} 为所有重金属单项污染指数平均值. 根据综合污染指数等级标准, 当 $P_N \leq 0.7$ 时, 污染等级为 1, 表示土壤清洁; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 时, 污染等级为 2, 表示土壤尚清洁; $1 < P_N \leq 2$ 时, 污染等级为 3, 表示土壤污染物超过背景值, 作物开始受到污染; $2 < P_N \leq 3$, 污染等级为 4, 表示土壤、作物受到中度污染; $P_N > 3$, 表示土壤、作物受到重度污染.

1.3.2 累积评价方法及分级标准

(1) 单项累积指数评价

单项累积指数计算公式为:

$$P_j = \frac{C_j}{L_j}$$

式中, P_j 为土壤中重金属 j 的单项累积指数; C_j 为土壤中重金属 j 的实测值; L_j 为重金属 j 的区域背景值. 按照杭州土壤重金属背景值, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和 Ni 这 7 个重金属背景值分别为 18.61、76.83、20.67、0.225、58.11、8.73 和 20.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(2) 综合累积指数评价

综合累积指数计算公式为:

$$P_s = \left(\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中, P_s 为某样点 (或某区域) 所有重金属的综合累积指数; $P_{\max}$ 为土壤重金属最大单项累积指数值; P_{ave} 为所有重金属单项累积指数平均值. 根据综合累积指数划分等级^[20], 当 $P_s \leq 1$ 时, 累积等级为 1, 土壤重金属污染水平为无明显累积; $1 < P_s \leq 1.5$ 时, 累积等级为 2, 为轻度累积; $1.5 < P_s \leq 2$ 时, 累积等级为 3, 为中度累积; $2 < P_s \leq 2.5$ 时, 累积等级为 4, 为高度累积; $P_s > 2.5$ 时, 累积等级为 5, 为严重累积.

1.3.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数集中体现土壤中重金属的含量、种类、毒性水平及环境对重金属污染的敏感程度. 根据瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法 (RI)^[21] 对杭州蔬菜基地土壤中重金属潜在生态危害进行评价. 潜在生态危害指数法 (RI) 计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i}$$
$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, E_r^i 为单项潜在生态风险指数, C_s^i 为土壤中重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的参比值,

本文 C_n^i 采用杭州土壤重金属背景值; T_r^i 为重金属 i 的生物毒性响应系数, 本文中 T_r^i 采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数^[27], Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和 Ni 这 7 种重金属的 T_r^i 分别为 5、1、5、30、2、10 和 5. 参考 Hakanson 的划分标准, 对单一重金属而言, $E_r^i \leq 40$ 为轻微级生态风险, $40 < E_r^i \leq 80$ 为中等生态风险, $80 < E_r^i \leq 160$ 为强生态风险, $160 < E_r^i \leq 320$ 为很强生态风险, $E_r^i > 320$ 为极强生态风险. 就多种重金属而言, $RI \leq 150$ 为轻微生态风险; $150 < RI \leq 300$ 为中等生态风险, $300 < RI \leq 600$ 为很强生态风险, $RI > 600$ 为极强生态风险.

2 结果与分析

2.1 杭州市蔬菜基地土壤重金属含量特征分析

由表 3 可见, 杭州市部分区县蔬菜基地土壤中有 Cu、Pb、Cd 含量超标现象, 其中, 土壤 Cu 含量大小顺序为富阳市 > 临安市 > 桐庐县 > 淳安县 > 西湖区 > 余杭区 > 滨江区 > 萧山区 > 江干区 > 建德市, 其中余杭区和富阳区蔬菜基地土壤中 Cu 含量超标, 超标率分别为 6.67% 和 33.33%; 土壤中 Pb 含量大小顺序为临安市 > 桐庐县 > 建德市 > 富阳市 > 西湖区 > 淳安县 > 余杭区 > 萧山区 > 江干区 > 滨江区, 且建德市、临安市和桐庐县蔬菜基地土壤 Pb 含量超标, 其中临安市蔬菜基地土壤 Pb 超标率相对最高, 达 7.59%; 土壤中 Cd 含量大小顺序为滨江区 > 桐庐县 > 江干区 > 建德市 > 临安市 > 萧山区 > 富阳市 > 淳安县 > 余杭区 > 西湖区, 且这 10 个区县菜地

土壤均存在 Cd 含量超标现象, 其中滨江区、萧山区、建德市、临安市和桐庐县蔬菜基地土壤中 Cd 含量超标率为 100%. 各蔬菜基地土壤中 Zn、Cr、As、Ni 含量均相对较低, 没有发生超标现象. 此外, 203 个采样土壤的 7 种重金属中, Pb 的变异系数较大, 最大为 128.38%, 大于 100%, 属于高等变异强度范围, 说明杭州市蔬菜基地 Pb 污染源较多^[23], 而各采样土壤中 Cu、Zn、Cd、Cr、As 和 Ni 含量的变异性均属于中等变异强度或者低等变异强度范围, 这表明采样土壤中 Cu、Zn、Cd、Cr、As 和 Ni 含量在不同区县蔬菜基地土壤间差异较小. 另由表 3 可见, 相同蔬菜基地不同重金属含量存在较大差异, 表明同一蔬菜基地不同重金属来源存在不一致性^[24].

综上所述, 杭州市不同区县蔬菜基地土壤重金属分布较为均一, 除了土壤中 Cu、Pb 和 Cd 有一定超标现象外, 其余重金属均无超标现象. 尽管如此, 杭州市蔬菜基地土壤重金属污染仍需引起重视.

2.2 杭州市蔬菜基地土壤重金属污染评价

由表 4 中不同区县蔬菜基地土壤污染评价可知, 杭州市 10 个区县蔬菜基地土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、As 和 Ni 的单项污染指数 (P_i) 均小于 0.70, 污染等级均为 1, 达清洁水平; 而各区县土壤中 Cd 的 P_i 均大于 1, 部分区县如江干区、滨江区和建德市等菜地土壤中 Cd 的 P_i 均超过 2, 达中度污染水平. 另由表 4 和图 2 可见, 除西湖区菜地土壤综合污染水平为警戒级外, 其他 9 个区县的污染水平均属于轻度污染, 且其综合污染指数 (P_N) 排名为: 滨江区 > 桐庐县 > 建德市 > 江干区 > 临安市 > 富阳市 > 萧山区 > 淳安县 > 余杭市. 另由表 4 可见, 各区县菜

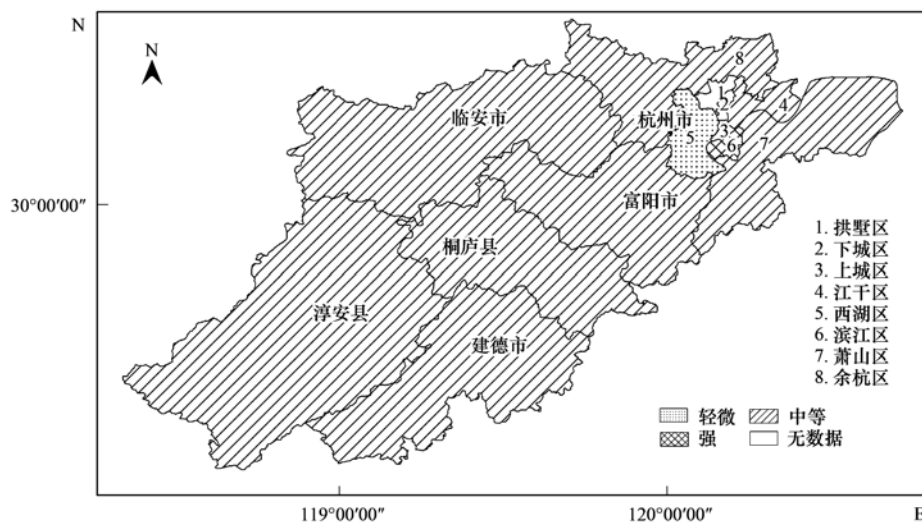


图 2 杭州市蔬菜基地土壤重金属综合污染等级

Fig. 2 Synthetic pollution level of heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou

表 3 杭州市蔬菜基地土壤重金属平均含量/mg·kg⁻¹

Table 3 Average heavy metal contents in soils from vegetable bases of Hangzhou/mg·kg ⁻¹								
区县名称	项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni
江干区	平均含量	16.07	100.90	7.59	0.74	60.69	5.78	14.15
	范围	13.70 ~ 18.60	71.52 ~ 208.80	4.33 ~ 23.33	0.18 ~ 1.46	22.49 ~ 107.86	2.55 ~ 8.82	12.32 ~ 17.71
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	83.33	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	12.60	32.13	60.91	61.37	42.34	31.45	11.24
西湖区	平均含量	24.64	115.02	20.67	0.30	80.59	7.25	21.06
	范围	15.36 ~ 32.19	84.85 ~ 156.83	10.85 ~ 31.69	0.11 ~ 0.63	50.73 ~ 111.13	4.13 ~ 10.67	13.41 ~ 33.01
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	57.14	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	22.36	18.75	27.50	53.75	23.89	27.89	29.54
滨江区	平均含量	19.47	61.69	3.65	1.10	69.35	4.73	23.87
	范围	16.17 ~ 24.07	56.85 ~ 66.80	0.11 ~ 6.44	0.91 ~ 1.27	50.32 ~ 106.55	3.92 ~ 5.27	13.16 ~ 44.10
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	100.00%	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	21.10	8.08	88.60	16.46	46.45	15.10	73.45
萧山区	平均含量	18.32	119.37	8.59	0.58	37.27	4.61	14.39
	范围	0.27 ~ 40.67	53.46 ~ 206.09	0.00 ~ 33.84	0.36 ~ 1.29	0.00 ~ 84.59	2.06 ~ 8.92	0.00 ~ 20.14
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	100	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	50.43	31.15	128.38	43.69	52.26	30.55	21.39
余杭区	平均含量	23.42	95.01	11.79	0.45	67.37	5.48	16.86
	范围	10.01 ~ 66.26	48.40 ~ 138.49	0.00 ~ 24.91	0.18 ~ 0.87	22.57 ~ 109.04	0.64 ~ 8.01	7.62 ~ 28.07
	超标率/%	6.67	0.00	0.00	82.22	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	52.76	18.73	55.86	38.18	28.48	27.86	28.84
富阳市	平均含量	51.57	150.76	24.80	0.52	69.72	12.61	15.93
	范围	24.38 ~ 138.31	97.41 ~ 225.80	17.41 ~ 37.04	0.19 ~ 0.75	50.92 ~ 146.70	6.25 ~ 22.14	2.99 ~ 42.97
	超标率/%	33.33%	0.00	0.00	91.67%	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	56.96	24.72	27.28	31.87	39.76	38.70	75.58
建德市	平均含量	14.21	74.49	29.92	0.71	56.53	7.23	7.05
	范围	9.21 ~ 29.45	50.88 ~ 103.68	7.11 ~ 92.05	0.37 ~ 1.39	22.49 ~ 82.51	2.29 ~ 15.49	2.07 ~ 10.16
	超标率/%	0.00	0.00	7.14	100.00	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	35.26	19.06	69.92	43.00	34.01	41.02	30.84
临安市	平均含量	34.39	166.77	42.25	0.63	81.39	13.89	27.82
	范围	11.64 ~ 49.30	84.90 ~ 208.63	23.07 ~ 61.32	0.37 ~ 1.10	22.61 ~ 109.84	3.30 ~ 19.67	15.27 ~ 36.38
	超标率/%	0.00	0.00	7.69	100	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	32.33	22.51	25.50	34.70	37.68	27.39	20.08
桐庐县	平均含量	30.23	112.81	34.95	0.78	67.99	6.92	13.43
	范围	6.28 ~ 50.42	9.68 ~ 191.17	7.08 ~ 73.02	0.37 ~ 1.46	22.47 ~ 110.02	2.63 ~ 13.78	1.97 ~ 26.37
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	45.83	40.62	53.26	43.49	51.92	43.77	58.12
淳安县	平均含量	28.96	110.14	17.58	0.51	66.79	14.98	25.33
	范围	6.20 ~ 44.27	79.40 ~ 153.75	7.10 ~ 26.83	0.00 ~ 0.9	22.50 ~ 106.51	6.60 ~ 22.90	15.20 ~ 34.18
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	70.00	0.00	0.00	0.00
	变异系数/%	38.97	20.02	34.29	54.30	33.72	40.23	24.05

表 4 杭州市蔬菜基地土壤重金属综合污染指数及污染评价

Table 4 Synthetic pollution index of heavy metals and its pollution evaluation in soils from vegetable bases of Hangzhou								
采样点	单项污染指数 P_i							综合污染指数 P_N
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni	
江干区	0.161	0.378	0.152	2.205	0.274	0.259	0.263	1.607
西湖区	0.418	0.536	0.414	1.058	0.497	0.266	0.506	0.873
滨江区	0.195	0.206	0.073	2.740	0.277	0.236	0.398	1.983
萧山区	0.237	0.497	0.172	1.830	0.196	0.185	0.292	1.340
余杭区	0.415	0.451	0.043	1.462	0.42	0.193	0.400	1.116
富阳市	0.678	0.656	0.089	1.739	0.381	0.479	0.332	1.347
建德市	0.248	0.346	0.563	2.415	0.338	0.256	0.163	1.762
临安市	0.398	0.663	0.845	2.000	0.431	0.558	0.554	1.523
桐庐县	0.476	0.491	0.699	2.008	0.370	0.262	0.282	1.917
淳安县	0.392	0.463	0.352	1.409	0.361	0.606	0.529	1.152

地土壤中 Cd 的 P_i 偏高,且均远大于其它重金属的 P_i . 因此,杭州市菜地土壤重金属污染主要由 Cd 污染所致. 杨晶等^[25]亦发现安徽省蚌埠市某污灌区土壤重金属污染等级为警戒级,且亦是由 Cd 污染导致. 可见,杭州市蔬菜基地土壤质量仍旧需要及时保护和治理,尤其特别重视 Cd 的防治.

2.3 杭州市蔬菜基地土壤重金属累积评价

如表 5 所示,从不同重金属的单项累积指数(P_j)看,江干区蔬菜基地土壤中 Cu、Pb、As 和 Ni 均无明显积累,其土壤中 Zn 和 Cr 均呈轻度积累,其土壤中 Cd 的 P_j 达 2.762,则呈严重积累;西湖区菜地土壤中 As 无明显积累,其余重金属均为轻度积累;滨江区菜地土壤中 Zn、Pb 和 As 无明显积累,Cu、Cr 和 Ni 呈轻度积累,而其 Cd 亦达严重积累;萧山区蔬菜基地土壤中 Zn 的 P_j 为 1.554,属中度积累,其土壤 Cd 的 P_j 为 2.539,属严重积累,其余重金属均无明显积累;余杭区蔬菜基地土壤中重金属 Pb、As 和 Ni 无明显积累,Cu、Zn、Cr 呈轻度积累,而土壤中 Cd 则呈中度积累;富阳市蔬菜基地土壤中除 Ni 无明显积累外,其余重金属

均为轻中高度积累,其中 Cu 严重积累;建德市蔬菜基地土壤中 Pb 和 Cd 分别呈轻度和高度积累,其余重金属均无明显积累;桐庐县蔬菜基地土壤中 As、Ni 无明显积累,Zn、Cr 属轻度积累,Cu、Pb 属中度积累,而其 Cd 则亦呈高度积累;淳安县蔬菜基地土壤中 Pb 无明显积累,Cd 为高度积累,其余重金属的 P_j 均在 1.0~2.0 范围,属轻中度积累. 可见,相对而言,杭州市蔬菜基地土壤中 Cd 的累积程度相对较高. 有研究亦发现浙江省蔬菜基地土壤中 Cd 的 P_j 居于 7 种重金属之首^[14]. 此外,如表 5 和图 3 所示,西湖区、萧山区和余杭区菜地土壤重金属的综合累积指数(P_s)分别为 1.559、1.995、1.722,均属中度积累,江干区、建德市、临安市和淳安县菜地土壤重金属的 P_s 分别为 2.006、2.160、2.479、2.022,均属高度积累,而滨江区、富阳市和桐庐县菜地土壤重金属的 P_s 均大于 2.5,均属严重积累,这与郭丹等^[16]的研究结果具有一致性. 综上,杭州市各区县蔬菜基地土壤中重金属总体呈中高度积累现象,且主要是由 Cd 的高度积累所致.

表 5 杭州市蔬菜基地土壤重金属累积指数及累积评价

Table 5 Accumulation index and its evaluation of heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou

采样点	单项累积指数 P_j							综合累积指数 P_s
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni	
江干区	0.864	1.313	0.364	2.762	1.044	0.663	0.681	2.006
西湖区	1.324	1.497	1.007	1.256	1.387	0.831	1.014	1.559
滨江区	1.046	0.803	0.177	4.485	1.193	0.541	1.149	2.564
萧山区	0.985	1.554	0.417	2.539	0.641	0.528	0.692	1.995
余杭区	1.258	1.237	0.547	2.003	1.159	0.628	0.811	1.722
富阳市	2.771	1.962	1.203	2.310	1.200	1.444	0.767	2.517
建德市	0.763	0.970	1.355	2.310	0.973	0.828	0.339	2.160
临安市	1.848	2.171	2.050	2.817	1.401	1.591	1.339	2.479
桐庐县	1.624	1.468	1.696	2.176	1.170	0.792	0.646	2.502
淳安县	1.556	1.434	0.853	2.046	1.149	1.716	1.219	2.092

2.4 杭州市蔬菜基地土壤重金属潜在生态风险评价

由表 6 可知,杭州市 10 个区县菜地土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、As 和 Ni 的单项潜在生态风险指数(E_i^i)均小于 40,其生态风险为轻微级;但是,对各菜地土壤中 Cd 而言,西湖区、余杭区和建德市菜地土壤中 Cd 的 E_i^i 均介于 80~160 范围,达到强生态风险,萧山区、富阳区及临安区菜地土壤中 Cd 的 E_i^i 则均介于 160~320 范围,生态风险达到很强等级,而其余 4 个区县菜地土壤中 Cd 的 E_i^i 大于 320,均达极强生态风险. 此外,如表 6 和图 4 中综合潜在生态风险指数(RI)来看,各区县菜地土壤重金属的 RI 大小顺序为:滨江区>淳安县>江干区>桐庐县>临安市

>萧山区>富阳市>建德市>余杭区>西湖区,其中,西湖区菜地土壤重金属属轻微生态风险,滨江区菜地土壤重金属的 RI 为 379.72,属强生态风险,其余 8 个区县菜地土壤重金属的 RI 介于 150~300 范围,均达中等生态风险. 可见,杭州市各区县菜地土壤中 Cd 存在较强潜在生态风险,各区县菜地土壤中重金属呈中等强度的综合潜在生态风险.

2.5 杭州市蔬菜基地土壤中重金属与其理化性质相关分析

土壤理化性质会影响土壤中重金属的含量及有效性^[27,28],例如,pH 可影响土壤中重金属化合物的溶解进而影响其迁移^[29,30];阳离子交换量(CEC)则

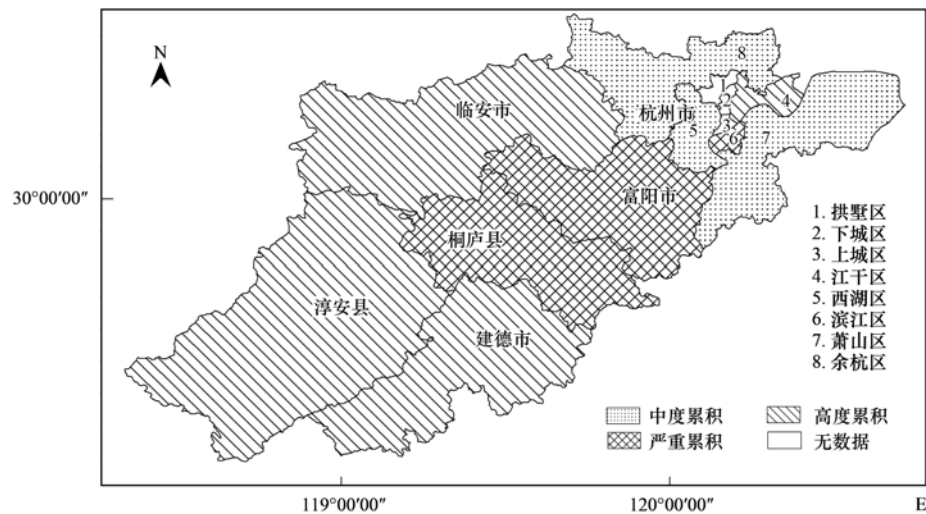


图3 杭州市蔬菜基地土壤重金属综合累积程度等级

Fig. 3 Synthetic accumulation level of heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou

表6 杭州市蔬菜基地土壤重金属的潜在生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou

采样点	单项潜在生态风险指数 (E_i)							RI
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni	
江干区	2.50	1.18	0.79	340.73	1.37	4.65	2.86	260.20
西湖区	3.83	1.34	2.16	95.79	1.82	5.83	4.26	120.18
滨江区	3.03	0.72	0.38	365.40	1.57	3.80	4.83	379.72
萧山区	2.85	1.39	0.90	194.67	0.84	3.71	2.91	207.28
余杭区	3.64	1.11	1.23	150.19	1.52	4.40	3.41	165.51
富阳市	8.02	1.76	2.59	173.88	1.57	10.13	3.22	201.19
桐庐县	2.21	0.87	3.13	406.63	1.28	5.81	1.43	251.03
淳安县	4.70	1.32	3.66	628.54	1.54	5.56	2.72	280.59
临安市	5.35	1.95	4.42	211.29	1.84	11.17	5.63	241.64
建德市	4.50	1.29	1.84	153.42	1.51	12.04	5.12	179.72

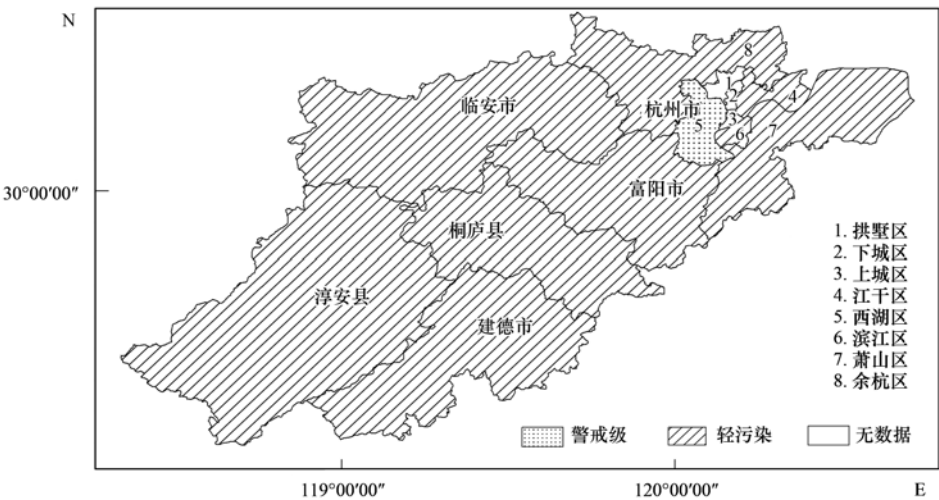


图4 杭州市菜地土壤重金属综合潜在生态风险等级

Fig. 4 Comprehensively potential ecological risk evaluation level of heavy metals in soils from vegetable bases of Hangzhou

可影响到土壤溶液中重金属的吸附-解吸行为^[31],腐殖质则会对重金属离子产生表面吸附、离子交换吸附及螯合作用等^[32].表7可见,杭州市蔬菜基地土壤中Cu、Zn、Pb含量与土壤TOC含量间均呈显著正相关关系,且土壤中Zn含量与有效P、全P量、全N量间的相关性亦达显著水平;此外,土壤中Pb含量与土壤中全N量之间、土壤中Cd含量与土壤pH、CEC之间亦均呈显著正相关关系;而土壤中As含量与EC之间、土壤中Cd含量与全K量之间则均呈显著负相

关,其余相互间则均无明显相关关系.可见,杭州市蔬菜基地土壤中Cu、Zn、Pb、Cd或As含量与土壤理化性质有一定相关性,而其土壤中Cr、Ni含量与土壤理化性质无关.另有研究表明,土壤理化性质受土壤类型、作物种类、污染和施肥等影响^[28],而化肥施用对海南岛农业土壤中Cd的贡献明显^[33],有机肥中重金属亦呈一定超标现象^[34].因此,继续就杭州市蔬菜基地土壤中Cu、Zn、Pb、Cd、As的污染溯源及其与土壤理化性质的关联规律进行深入研究具有重要意义.

表7 土壤重金属含量与其理化性质的相关系数¹⁾

	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Ni	Cd
pH	-0.169	-0.184	-0.375	-0.061	-0.208	0.289	0.794 *
EC	-0.384	-0.232	-0.327	-0.542	-0.654 *	-0.156	0.195
CEC	-0.375	-0.362	-0.486	0.002	-0.506	0.235	0.735 *
有效P	0.360	0.704 *	0.513	-0.076	0.185	-0.230	-0.391
全P量	0.186	0.617 *	0.465	0.133	0.091	0.159	0.072
有效N	0.416	0.652	0.626	0.278	0.117	-0.153	-0.511
全N量	0.363	0.766 *	0.731 *	0.381	0.461	0.280	-0.312
TOC	0.636 *	0.786 *	0.889 *	0.545	0.566	0.141	-0.478
全K	0.147	0.478	0.189	0.051	0.355	-0.027	-0.769 *
全Ca	-0.358	-0.050	-0.293	-0.174	-0.391	0.211	0.615
全Mg	-0.050	0.278	-0.059	0.377	0.004	0.561	0.135

1) * 表示相关系数达至95%可信度水平, $R_{0.05}=0.632$, $n=10$

3 结论

(1)杭州市各区县蔬菜基地土壤重金属含量分布较为均匀,整体上超标状况不严重,其中,各菜地土壤中的Cu、Zn、Pb、Cr、As和Ni污染程度均为清洁水平,但其Cd的污染程度均达轻度或中度污染水平.

(2)杭州市各区县菜地土壤中重金属的综合累积程度多为中高度累积,综合潜在生态风险处于中等水平,但其Cd的单项累积程度相对较高,亦存在相对较强的单一潜在生态风险.因此,需要做好杭州市菜地土壤中Cd累积及其潜在生态风险的防控工作.

(3)杭州市蔬菜基地土壤中Cu、Zn、Pb、Cd或As含量与土壤理化性质有一定相关性,而其土壤中Cr、Ni含量与土壤理化性质无关.继续就杭州市蔬菜基地土壤中Cu、Zn、Pb、Cd、As的污染溯源及其与土壤理化性质的关联规律进行深入研究具有重要意义.

参考文献:

[1] 史海娃,宋卫国,赵志辉.我国农业土壤污染现状及其成因

[J]. 上海农业学报, 2008, 24(2): 122-126.
[2] Jin Z J, Li Z Y, Li Q, *et al.* Canonical correspondence analysis of soil heavy metal pollution, microflora and enzyme activities in the Pb-Zn mine tailing dam collapse area of Sidi village, SW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(1): 267-274.
[3] Wu Y G, Xu Y N, Zhang J H, *et al.* Heavy metals pollution and the identification of their sources in soil over Xiaolinling gold-mining region, Shaanxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6): 1585-1592.
[4] 谢华,刘晓梅,陈同斌,等.大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J].环境科学,2008,29(12): 3503-3507.
[5] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等.典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J].环境科学,2013,34(3): 1076-1085.
[6] 孙杰,欧阳纯烈,苏画,等.绵阳市主要蔬菜基地土壤重金属污染特征与评价[J].绵阳师范学院学报,2014,33(8): 120-125.
[7] 马祥爱,王振亚,侯雅丽.山西农业大学菜市场蔬菜中重金属污染分析与评价[J].山西农业大学学报,2006,26(1): 96-97, 112.
[8] 王广林,王立龙,王育鹏,等.六安市蔬菜地土壤重金属污染的初步研究[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2005,28(4): 464-467.

- [9] 傅智慧, 俞洁, 王飞儿, 等. 浙江蔬菜基地土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(6L): 334-337, 413.
- [10] Ye X Z, Xiao W D, Zhang Y Z, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in vegetables and relationships with soil heavy metal distribution in Zhejiang province, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(6): 378.
- [11] 余元元, 黄宇妃, 宋波, 等. 南丹县矿区周边土壤与农产品重金属含量调查及健康风险评价[J]. 环境化学, 2015, **34**(11): 2133-2135.
- [12] 师荣光, 赵玉杰, 高怀友, 等. 天津市郊蔬菜重金属污染评价与特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(S1): 169-173.
- [13] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006, **61**(3): 297-310.
- [14] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区土壤-蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2013, **32**(4): 671-677.
- [15] 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.
- [16] 郭丹, 朱维琴, 林娟. 杭州市主要地区农田土壤重金属污染评价及关联特征研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2009, **8**(2): 138-143.
- [17] 焦荔, 叶旭红, 胡勤海, 等. 杭州市区蔬菜基地蔬菜重金属含量研究[J]. 环境污染与防治, 2003, **25**(4): 247-248.
- [18] 王玉洁, 朱维琴, 金俊, 等. 杭州市农田蔬菜中 Cu、Zn 和 Pb 污染评价及富集特性研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2010, **9**(1): 65-70.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 242-400.
- [20] 高清, 顾优丽, 龚梦丹, 等. 杭州市和睦湿地农田土壤重金属污染评价及关联特征研究[J]. 湿地科学与管理, 2014, **10**(2): 48-52.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. Environment International, 2004, **30**(2): 159-165.
- [23] 陈惠芳, 李艳, 吴豪翔, 等. 富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(2): 164-169.
- [24] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 647-653.
- [25] 杨晶, 赵云利, 甄泉, 等. 某污灌区土壤与蔬菜重金属污染状况及健康风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 234-238.
- [26] 刘衍君, 汤庆新, 白振华, 等. 基于地质累积指数与内梅罗指数结合法的耕地土壤重金属污染空间分布[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(20): 174-178.
- [27] 曹宏杰, 王立民, 罗春雨, 等. 三江平原地区农田土壤中几种重金属空间分布状况[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 155-161.
- [28] 谢正苗, 李静, 王碧玲, 等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2110-2116.
- [29] 潘胜强, 王铎, 吴山, 等. 土壤理化性质对重金属污染土壤改良的影响分析[J]. 环境工程, 2014, **32**(S1): 600-603, 633.
- [30] 张海龙, 李祥平, 胡国成, 等. 广西某矿区周边耕地土壤和蔬菜、大米重金属含量特征[J]. 环境化学, 2015, **34**(9): 1755-1757.
- [31] 孙慧敏. 粘土矿物胶体对铅的环境行为影响研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011. 52-64.
- [32] Bolan N S, Adriano D C, Natesan R, *et al.* Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(1): 120-128.
- [33] 李福燕. 海南岛农用地重金属污染现状调查与评价研究[D]. 海口: 海南大学, 2010. 35-47.
- [34] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 392-397.

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