

杭州经济技术开发区河渠沿岸土壤中重金属积累特征及其风险评价

王雅玉¹, 周溶冰^{1*}, 陈天力², 吴卫红¹, 谢正苗¹

(1. 杭州电子科技大学环境科学与工程研究所, 浙江杭州 310018; 2. 杭州市环境信息中心, 浙江杭州 310003)

摘要 [目的] 为杭州经济技术开发区土壤重金属污染的防治提供参考。[方法] 采集开发区主要河渠沿岸表层土壤, 设置 27 个采样点, 检测土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 5 种重金属含量。采用单项污染指数、内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数法, 对开发区土壤重金属含量进行风险评价。[结果] 土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 含量平均浓度分别为 74.28、142.80、93.15、8.75、177.80 mg/kg。土壤中 Cd 单项污染指数为 14.58, 其他重金属均小于 1, 各重金属的单项污染指数大小依次为 Cd > Cu > Cr > Zn > Pb; 内梅罗综合指数显示该开发区土壤处于重度污染水平; 潜在生态风险评价显示 Cd 处于极强风险等级, 其他重金属均处于轻微危害水平。[结论] Cd 污染程度远超过国家土壤二级标准的 14 倍, 应引起高度重视。

关键词 土壤; 重金属; 风险评价; 经济开发区

中图分类号 S158.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)16-108-05

Accumulation Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of River Banks from Hangzhou Economic & Technological Development Area

WANG Ya-yu¹, ZHOU Rong-bing^{1*}, CHEN Tian-li² et al (1. Institute of Environmental Science & Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018; 2. Hangzhou Environmental Information Center, Hangzhou, Zhejiang 310003)

Abstract [Objective] The research aimed to provide a reference for soil heavy metal pollution prevention and control in Hangzhou Economic & Technological Development Area (HEDA). [Method] The topsoil samples of 27 plots located in the banks of main rivers were collected in studied area. The contents of five heavy metals, i.e. Cu, Zn, Pb, Cd and Cr, in the topsoils were detected. Single pollution index, Nemerow combined pollution index and Hakanson potential ecological risk index were used to assess ecological and human health risk of heavy metals. [Result] The average content of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in the soils was 74.28, 142.80, 93.15, 8.75 and 177.8 mg/kg, respectively. In terms of single pollution index, the value of Cd was 14.58, and other heavy metal values were less than 1. The single pollution index of heavy metals in the soils decreased in the order of Cd > Cu > Cr > Zn > Pb. The Nemerow combined pollution index results demonstrated that the studied area was at a quite serious pollution level. The Hakanson potential ecological risk index revealed that the heavy metals in soil of HEDA were all at the low risk level except Cd was at a very strong risk level. [Conclusion] Due to Cd concentration was far exceeding Grade II Criteria of Environmental Quality Standard by 14 times, close attention should be paid.

Key words Soil; Heavy metal; Risk assessment; Economic development area

随着我国改革开放的推进和深化, 国家经济技术开发区在全国的建设快速发展, 工业企业生产规模不断扩大。土壤是开发区赖以发展的物质基础, 然而开发区一般具有工业集群、资源利用程度高、污染物排放种类多等特点, 土壤遭受到不同程度的污染和破坏^[1]。在一系列的土壤污染问题中, 土壤重金属污染是最突出的。土壤重金属污染由于其巨大的危害性及其难治理的特点而越来越受到人们的关注。有关土壤重金属污染的研究也越来越多^[1-5]。大部分开发区原属于城郊农业区, 仍会保留一部分农用区。这些土壤中的重金属可以通过作物根部吸收进入可食部分, 导致食物链污染, 通过食物链富集传递而影响人体健康^[2]。除食物链外, 地表灰尘和土壤粉尘所含的重金属污染物可在外力作用下经口、呼吸和皮肤接触等暴露方式进入人体, 危害人类健康^[6-10]。杭州经济技术开发区原属城郊农业区, 后随着开发区的建设与发展, 土壤环境受到严重的人为干扰, 人们迫切需要了解该地区的土壤环境质量状况, 以期能为杭州开发区土壤重金属污染的防治提供参考。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况 杭州经济技术开发区 (Hangzhou econom-

ic & technological development area (HEDA)) 是以工业制造、产品加工、高教科研、农业生产为一体的国家级开发区, 位于杭州下沙。其四大主导产业分别为电子信息、生物医药、机械制造、食品饮料。目前, 行政管辖面积 105 km², 辖区人口约 40 万人。随着城市化和工业化进程的推进, 开发区的大气、水质和土壤等污染问题越来越突出。开发区的土壤类型以滨海盐土为主, pH 为 8.3 左右, 偏碱性。根据下沙土地利用方式和人类活动特点, 将其分为北部农业保留区、东部高教工业区、西部城乡结合区三大区。由于 2008 年前后开发区仍处于城市的郊区, 居住用地主要沿路或河渠分散布置, 且以农居为主; 开发区各大河渠附近主要为公路主干道、工业园或高教园。

1.2 采样点布设 在 2008 年 6、12 月, 沿着开发区 21 条主要河渠进行采样, 共设置 27 个采样点。利用 GPS 定位, 采集 0~15 cm 表层土壤 (一般不少于 500 g), 装入样品袋, 并且带回实验室。土壤采样点分布如图 1 所示^[11]。

1.3 样品分析 将采集的土壤样品经自然风干后, 除去样品中石子和动植物残体等异物, 研磨至全部通过 100 目 (孔径 0.149 mm) 尼龙筛, 混合。然后, 用 HNO₃-HF 法消解样品, 采用原子吸收火焰法测定样品中 Cu、Zn、Pb 和 Cr, 采用原子吸收石墨炉法测定 Cd^[12]; 在元素分析中, 样品的质量控制用国家标准土壤样品 (GBW07046) 进行操作。每种样品平行测定 3 次, 测定的相对标准偏差均小于 10%。

基金项目 国家自然科学基金项目 (40801116, 41101213); 浙江省自然科学基金项目 (LY14D01009)。

作者简介 王雅玉 (1990-), 女, 浙江临安人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤污染修复。* 通讯作者, 副教授, 从事土壤污染修复、海洋污染评价、有机物污染过程及控制等方面的研究工作。

收稿日期 2015-04-10

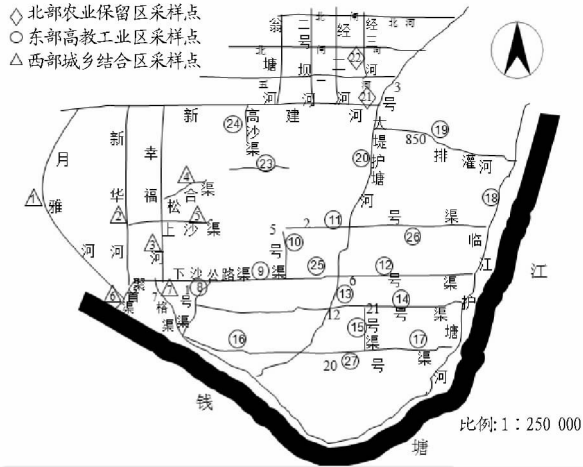


图1 杭州经济技术开发区土壤采样点分布

1.4 数据处理方法 用 SPSS13.0 和 Excel2003 软件进行数据分析和处理。

1.5 评价方法

1.5.1 污染评价方法。土壤重金属的积累状况采用杭嘉湖平原土壤背景值参照标准^[13], 并且将其作为当地背景值; 土壤重金属污染评价采用我国在 1995 年发布的土壤环境质量标准 (GB15618-1995) 中的国家二级标准 (pH > 7.5)。

单项污染指数 (P_i) 公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 为各种重金属的单因子指数; C_i 为土壤重金属 i 的实测值; S_i 为上述国家二级标准。

内梅罗综合评价指数 ($P_{\text{综合}}$) 公式为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_i^2_{\text{average}} + P_i^2_{\text{max}}}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_i_{average} 为各种重金属单因子指数的平均值; P_i_{max} 为最大的重金属单因子指数。土壤中重金属梅罗综合污染指数评价标准^[14]见表 1。

表 1 土壤中重金属梅罗综合污染指数评价标准

等级	综合污染指数	污染等级
I	$P_{\text{综合}} \leq 0.7$	清洁 (安全)
II	$0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1.0$	尚清洁 (警戒限)
III	$1.0 < P_{\text{综合}} \leq 2.0$	轻度污染 (轻度超标)
IV	$2.0 < P_{\text{综合}} \leq 3.0$	中度污染 (中度超标)
V	$P_{\text{综合}} > 3.0$	重度污染 (重度超标)

1.5.2 Hakanson 潜在生态风险指数。在 20 世纪 80 年代, 瑞典科学家 Hakanson 提出相对快速、简便和标准的潜在生态风险指数法。该方法综合考虑多元素的协同作用、毒性水平、污染浓度以及生态对重金属的敏感性等方面的因素^[15-17]。其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C_j^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中, RI 为多元素综合潜在生态风险指数; m 为重金属种类; E_r^i 为单项元素的潜在生态风险指数; C_j^i 为单项元素的污染系数; T_r^i 为单项元素的毒性响应系数, 反映重金属毒性水平和生物对其污染的敏感程度^[17]。Zn、Cr、Cu、Pb、Cd 元素毒性系数分别为 1、2、5、5、30^[15]。 C_i 、 C_n^i 分别为土壤中重金属 i 的实测浓度值、参比值。文中, C_n^i 采用杭嘉湖平原土壤背景值。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量的统计分析 由表 2 可知, 杭州经济技术开发区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 5 种重金属平均值分别为 74.28、142.8、93.15、8.75、177.80 mg/kg。除 Pb 和 Cd 平均值超出国家二级标准 (pH > 7.5) 外, 其余重金属平均含量均超标。变异系数是反映统计数据波动特征的参数。对某元素分布特征的描述可在一定程度上反映研究区土壤中该元素的分布与均一状况^[18]。5 种重金属的变异系数在 13% ~ 20% 范围内, 属于较弱变异程度。Cu、Zn 和 Pb 变异系数在 19% 左右, Cd 和 Cr 的变异系数在 14% 左右, 说明 Cd 和 Cr 空间变异相对不显著, 受外界因素影响较一致^[19]。

由偏度可知, 除 Cu 元素外, 其他重金属表现出不同程度的正偏, Zn 元素的偏度最大, 其次为 Cr。在自然背景下, 环境地球化学变量的概率分布通常为正态分布或对数分布, 但在人为活动干扰下会引起元素富集, 导致分布正偏^[20-22]。研究区 Cu 的偏度为负值, 表明该元素贫化。这可能与其他人活动或局部地区的淋滤有关^[19]。峰度是比较两侧极端数据分布情况的指标。若两侧极端数据较多, 则峰度为正, 反之为负。正态分布的峰度为 0。除 Zn 和 Pb 两种重金属为负值外, 其他均为正, 故 Zn 和 Pb 几乎无异常极端值, 其他重金属均有一定的异常极端值。

箱线图不仅可以呈现各重金属元素浓度分布, 而且可以直观看出异常极端值点。由图 2 可知, Zn 浓度的变化范围最大, Cd 浓度的变化范围最小。Zn 和 Pb 均没有异常值点, 而 Cu、Cd 和 Cr 分别在 24 号、8 号、18 号采样点出现异常极端值。Cu 浓度在 24 号采样点过低, Cd 和 Cr 浓度分别在 8 号和 18

表 2 各种重金属元素含量的描述性统计分析

元素	浓度范围 mg/kg	平均值 mg/kg	标准差 mg/kg	变异系数 %	偏度	峰度	国家二级标准 (pH > 7.5) // mg/kg
Cu	35.08 ~ 98.91	74.28	14.00	18.8	-0.71	1.50	100.00
Zn	95.59 ~ 204.00	142.80	28.20	19.8	1.50	-0.49	300.00
Pb	60.22 ~ 123.90	93.15	17.61	19.7	0.26	-0.82	35.00
Cd	6.42 ~ 12.01	8.75	1.18	13.5	0.67	1.07	0.60
Cr	140.00 ~ 244.60	177.80	26.15	14.7	0.88	0.08	250.00

号采样点过高。这一现象与上述峰度、偏度分析结论一致。

2.2 土壤重金属的相关性分析和聚类分析 研究各重金属

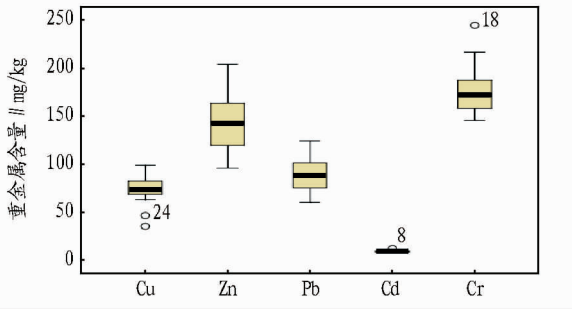


图2 各重金属含量箱线图

之间的相关性,可推测出重金属元素的来源。若它们之间具有显著的相关关系,则说明它们可能污染程度相似或来源相同^[3,23-24]。利用 SPSS 软件,对杭州经济开发区土壤中重金属含量做 Pearson 相关分析。各重金属之间的相关系数绝对值越大,说明相关性越显著。由表 3 可知,Cu 与 Pb、Cd 呈现负相关,Pb 与 Zn 呈现负相关,其他重金属之间均呈现正相关,且各个重金属之间相关性不显著。Cu 与 Zn 的相关性最高,仅为 0.299,其次为 Cd 与 Pb,达 0.213。根据 KMO 值(0.492)和 Bartlett 球检验值(0.716),发现 5 种重金属相关性不显著,不适合进行主成分因子分析^[25]。

表3 土壤重金属含量的相关系数

重金属	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
Cu	1.000	0.299	-0.094	-0.117	0.169
Zn	0.299	1.000	-0.040	0.212	0.142
Pb	-0.094	-0.040	1.000	0.213	0.058
Cd	-0.117	0.212	0.213	1.000	-0.084
Cr	0.169	0.142	0.058	-0.084	1.000

运用 Ward 法,对 5 种重金属进行系统聚类分析。根据聚类分析的性质,可知聚类分析的亲密程度由距离决定,距离越近越亲密^[1,3]。由图 3 可知,聚类分析与相关分析结果一致。5 种重金属被分成三大类,即 I 类 Cu 和 Zn,II 类 Cr 单独一类,III 类 Pb 和 Cd。在三大类中,Cu、Zn 和 Cr 为一类,Pb 和 Cd 为另一类,所以这两类可能来自不同的来源与途径。从表 3 还可以看出,同一类中各个重金属相关性不显著。这 5 种重金属可能来自多种复合污染源。由于杭州经济开发区为工业、农业和高教科研等聚集地,污染来源相对较复杂。

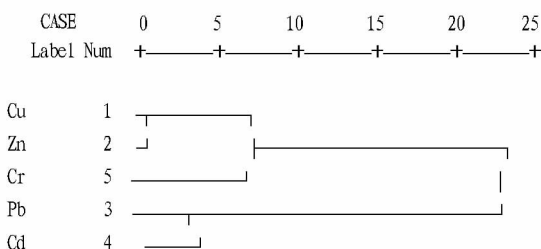


图3 重金属树状图

2.3 各功能区土壤重金属积累特征 由图 4~8 可知,杭州经济开发区不同功能区土壤重金属含量存在差异。北部农业区、城乡结合区和高教工 5 种重金属均超出背景值。北

部农业区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 含量分别为 71.0、140.6、101.1、162.5、9.12 mg/kg,分别超出背景值 1.30、0.52、2.33、1.09、58.98 倍,说明农业区土壤重金属积累较明显,其中 Cd 积累状况突出;城乡结合区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 含量分别为 79.03、135.3、88.85、165.1、8.56 mg/kg,分别超出相应背景值 1.56、0.46、1.93、1.13、55.32 倍;而高教工业区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 分别超出背景值 1.35、0.57、1.95、1.38 和 56.73 倍。所以,对于 Cd 和 Pb 积累状况,北部农业区相对最突出,其次为高教工业区;而对于 Zn 和 Cr 的积累状况,高教工业区相对最突出,其次为农业区;对于 Cu 积累状况,则为城乡结合区相对最突出,其次为农业区。

经方差分析,可知研究区 5 种重金属积累状况区域差异性较小,研究区土壤中 5 种重金属积累程度由高到低依次为 Cd、Pb、Cu、Cr 和 Zn。在整个研究区,Cd、Pb 和 Cu 积累状况突出,尤其 Cd 严重超出当地背景值。这可能与开发区原属于城郊农业区有关。农业的生产与发展离不开化肥、农药和地膜等重要的农用物资,但长期不合理施用含有重金属的肥料与农药会造成土壤重金属污染^[24]。磷肥、复合肥、钾肥和氮肥均含有重金属,而磷肥的重金属含量最高,其次为复合肥。许多研究表明,大量的施用磷肥、复合肥会导致土壤中有效 Cd 含量不断增加^[24,26]。在地膜生产过程中会加入含 Cd、Pb 的热稳定剂^[26],故地膜的大面积推广使用不仅造成土壤的白色污染,而且增加土壤重金属污染。除上述农用物资使用不当外,污水灌溉和污泥施肥可能是整个研究区 Cd、Pb 和 Cu 重金属污染的重要来源。城乡结合区土壤中 Cu 积累状况相对最明显。这可能是由于开发区城市化发展,该功能区逐渐成为开发区的生活聚集地,为研究区人气最旺的区域,故车流量和人流量随之增加;而 Cu 常被作为交通污染源的标识元素之一,它来源于机动车含 Cu 零件的磨损与腐蚀^[27],因此该区 Cu 元素可能为生活污染和交通污染组成的混合污染源。相对其他 2 个功能区,高教工业区土壤中 Cr 积累更突出,可能与后来的工业发展密切相关。染料、电镀、制药、皮革等制造企业均会排放出含 Cr 的污染物^[28]。

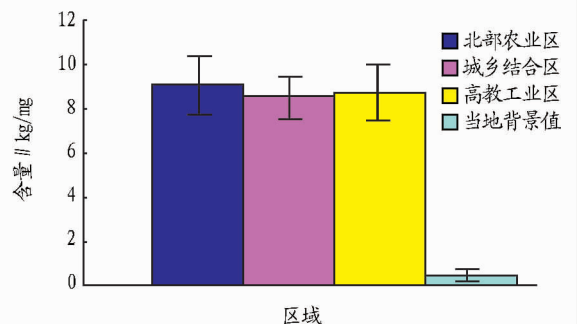


图4 杭州经济开发区不同功能区土壤 Cd 含量

2.4 与其他地区土壤重金属含量的比较 为了更清晰地了解杭州经济开发区土壤重金属浓度,将研究区土壤中的重金属含量与其他地区进行比较。这些地区与杭州经济开发区

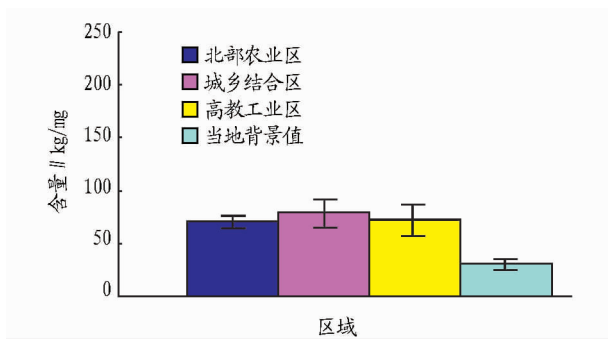


图5 杭州经济开发区不同功能区土壤 Cu 含量

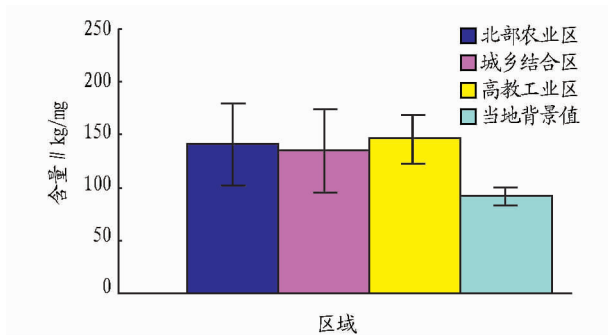


图6 杭州经济开发区不同功能区土壤 Zn 含量

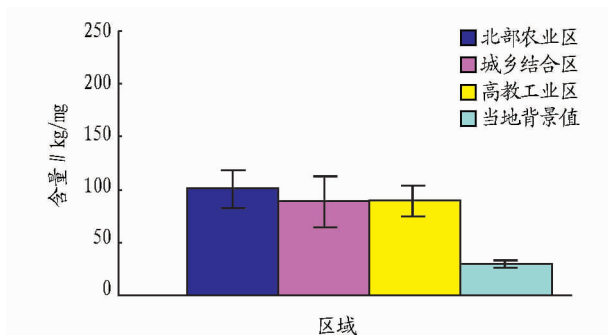


图7 杭州经济开发区不同功能区土壤 Pb 含量

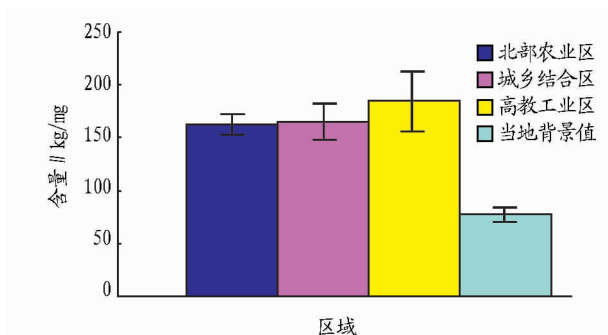


图8 杭州经济开发区不同功能区土壤 Cr 含量

均属于长江三角洲地区,土壤母质较相近,多为浅海沉积物、海湾泻湖沉积物、河流冲积物及湖沼沉积物,主要属于潮土,灰潮土和滨海盐土。由表4可知,开发区土壤中5种重金属均明显高于杭嘉湖平原背景值和中国土壤重金属背景值。研究区土壤中Cu、Cd、Cr含量均高于这些地区,几乎是它们的2倍多,其中Cd含量则达到这些地区和背景值的几十倍;研究区Zn、Pb含量除低于杭州市城郊外,均高于其他地区,其中Zn含量与嘉兴、上海城郊较相近,Pb含量是大部分地

区的3倍左右。由此可知,Cu、Pb、Zn、Cr浓度较高,而Cd浓度极高。

表4 杭州经济开发区与其他地区土壤中重金属含量对比 mg/kg

地区	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
苏州市 ^[29]	32.5	92.8	34.3	0.21	84.4
无锡市 ^[29]	29.5	81.3	34.2	0.20	78.9
常州市 ^[29]	27.3	69.9	33.6	0.18	77.6
南通市 ^[30]	21.0	90.0	16.9	0.11	51.3
湖州市 ^[31]	25.0	85.1	32.7	0.25	66.5
嘉兴市 ^[32]	40.6	108.1	49.9	0.19	92.5
上海市城郊 ^[33]	34.97	117.4	24.5	-	87.81
杭州市城郊 ^[34]	48.8	186.2	137.3	1.35	47.0
杭州经济开发区	74.28	142.8	93.15	8.75	177.8
杭嘉湖平原背景值 ^[13]	30.85	92.67	30.35	0.152	77.55
中国土壤背景值 ^[35]	22.6	74.2	26.0	0.097	61.0

注:“-”表示无。

2.5 重金属污染评价和潜在生态风险 根据中国土壤环境质量标准(GB15168-1995),可知Cu、Pb、Zn、Cr这4种重金属处于二级标准,Cd则超过二级标准($pH > 7.5$)。为了进一步分析重金属污染情况,在国家二级标准($pH > 7.5$)下做单项污染指数和内梅罗综合指数分析。由表5可知,三类功能区土壤中重金属的内梅罗综合指数差异性不明显,均远大于3.0,说明研究区土壤处于重度污染水平(V等级)。由单项污染指数可知,研究区土壤中各重金属的单项污染指数均值大小顺序为 $Cd > Cu > Cr > Zn > Pb$,Cd平均单项污染指数为14.58,其他重金属均小于1,说明研究区土壤Cd已达重度污染水平,而其他重金属处于安全或警戒限范围内。经过进一步的分析,可知三类功能区土壤Cu污染指数在0.7~0.8范围内,处于尚清洁水平;高教工业区土壤Cr的单项污染指数污染指数在0.7~0.8范围内,处于尚清洁水平,其他两个功能区小于0.7,处于清洁水平;三类功能区土壤Zn、Pb的单项污染指数均小于0.7,属于清洁水平。所以,Cd导致整个开发区的综合污染水平处于重度污染。

表5 土壤重金属污染指数

功能区	单项污染指数					内梅罗综合指数	综合污染水平
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr		
北部农业区	0.71	0.47	0.29	15.20	0.65	10.95	重度污染
城乡结合区	0.79	0.45	0.25	14.27	0.66	10.28	重度污染
高教工业区	0.72	0.49	0.26	14.63	0.74	10.54	重度污染
全区平均值	0.74	0.48	0.27	14.58	0.71	10.51	重度污染

重金属的潜在生态风险指数和土壤重金属污染程度有着密切关系。由表6和表7可知,3个功能区土壤中Cd的潜在生态风险系数都处于极强生态危害,其均值为1727,而其他4种重金属风险系数均属于轻微生态危害;开发区土壤中重金属的综合风险指数均值为1761,属于极强的生态危害。各重金属对开发区土壤的综合风险贡献率从大到小依次为 $Cd > Pb > Cu > Cr > Zn$,其中Cd的贡献率达98.1%,因此Cd是整个杭州经济开发区生态风险处于极强风险水平的主要原因。

表6 土壤重金属的单项潜在生态风险指数和综合风险指数

功能区	E_r^i					RI
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	
北部农业区	11.51	1.52	16.66	1 800	4.19	1 833
城乡结合区	12.81	1.46	14.64	1 690	4.26	1 723
高教工业区	11.74	1.57	14.74	1 733	4.76	1 765
总体均值	12.04	1.54	15.35	1 727	4.58	1 761

表7 潜在生态危险评价指标与分级关系^[9]

指标	危害轻微	危害中等	危害强	危害很强	危害极强
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	600~1 200	>1 200

3 结论与讨论

杭州经济技术开发区土壤 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的平均含量分别为 74.28、142.8、93.15、8.75、177.8 mg/kg。5 种重金属积累程度由高到低顺序为 Cd > Pb > Cu > Cr > Zn, 其中 Cd 积累量高出 Zn 2 个数量级, 5 种重金属元素相关性不显著。

土壤中重金属的单项污染指数依次为 Cd > Cu > Cr > Zn > Pb。Cd 的单项污染值达 14.58, 属于重度污染; 其他重金属处于安全或警戒限范围内。在整个研究区, 土壤环境质量内梅罗污染指数为 10.51, 属于重度污染。土壤中重金属潜在生态风险除 Cd 风险值处于极强风险等级外, 其他均处于轻微危害等级; 各重金属潜在风险指数依次为 Cd > Pb > Cu > Cr > Zn。

研究区 Cd 污染程度远超过国家土壤二级标准的 14 倍, 所以应引起高度重视, 亟待采取污染防治措施, 改善开发区的土壤环境质量。

参考文献

- [1] 姜军. 山东省经济开发区土壤重金属环境质量现状及潜在生态风险评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2014: 1-3.
- [2] 景丽洁, 王敏. 不同类型土壤对重金属的吸附特性[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 245-248.
- [3] LI X P, FENG L N. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China[J]. Atmospheric Environment, 2012, 47: 58-65.
- [4] YANG Z P, LU W X, LONG Y Q, et al. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 108: 27-38.
- [5] 李瑞琴, 于安芬, 白滨, 等. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 31(1): 103-110.
- [6] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 福州市公交枢纽站地表灰尘重金属含量、来源及其健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2013, 26(8): 906-912.
- [7] 姚娜, 彭昆国, 刘足根, 等. 石家庄北郊土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 313-321.
- [8] WANG Z, LIU S Q, CHEN X M, et al. Estimates of the exposed dermal surface area of Chinese in view of human health risk assessment[J]. Journal

of Safety and Environment, 2008, 8(4): 152-156.

- [9] CHABUKDHARA M, NEMA A K. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: Probabilistic health risk approach[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 87: 57-64.
- [10] ZHAO L, XU Y F, HOU H, et al. Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 654-662.
- [11] 林静, 周溶冰, 谢正苗. 沉积物有机氯农药残留特征和风险分析[J]. 杭州电子科技大学学报, 2013, 33(4): 75-78.
- [12] 况辉, 卢邦俊. 微波消解-原子吸收分光光度法测定土壤中的 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni[J]. 分析仪器, 2007, 6(3): 29-31.
- [13] 王庆华, 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): 598-597.
- [14] 国家环境保护总局. HJ/T 160-2004《土壤环境监测技术规范》[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [15] HÅKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 于云江, 胡林凯, 杨彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1523-1527.
- [17] 郑洪萍. 福建省耕地土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 福建农业学报, 2012, 27(28): 888-894.
- [18] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属累积特征及其污染评价[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 135-140.
- [19] 张明, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江三角洲地区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1099-1103.
- [20] 夏学齐, 陈骏, 廖启林, 等. 南京地区表土锡汞铅含量的空间统计分析[J]. 地球化学, 2006, 35(1): 95-102.
- [21] 杨志斌, 杨志芳, 冯海燕, 等. 沈阳市新城区土壤重金属元素空间变异性[J]. 地质通报, 2007, 26(1): 1480-1485.
- [22] 邵学新, 黄标, 赵永村, 等. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J]. 环境化学, 2008, 27(2): 218-221.
- [23] 辛蕊, 张思冲, 周晓聪, 等. 大庆地区土壤重金属污染及相关性分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 416-420.
- [24] 王艳霞. 兰州市安宁区菜园土壤重金属含量分析与评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007: 3-5.
- [25] SZOLNOKI Z, FARSANG A, PUSKÁ S T. Cumulative impacts of human activities on urban garden soils: Origin and accumulation of metals[J]. Environmental Pollution, 2013, 177: 106-115.
- [26] 何燕. 浙北平原典型地区土壤及农作物重金属污染特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2008: 5-7.
- [27] 王波, 冯昌伟, 刘晓青, 等. 太阳埠城市湿地公园土壤重金属污染及生态风险预警评估[J]. 土壤通报, 2014, 44(2): 484-489.
- [28] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 84-88.
- [29] 廖启林, 华明, 金洋, 等. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1163-1173.
- [30] 黄辉, 檀满枝, 周峰, 等. 南通市城市边缘带土壤重金属污染现状及评价[J]. 土壤, 2007, 39(2): 286-290.
- [31] 陈江, 张海燕, 何小峰, 等. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J]. 土壤, 2010, 42(4): 595-599.
- [32] 洪春来, 黄锦法, 叶正钱, 等. 嘉兴市蔬菜土壤重金属含量的初步调查分析[J]. 农业环境与发展, 2009(1): 76-79.
- [33] 谢小进, 康建成, 李卫红, 等. 上海城郊地区城市化进程与农用地土壤重金属污染的关系研究[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1250-1256.
- [34] 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.
- [35] 蒋德珍, 刘志虹, 孙本民. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, 7(1): 1-6.

(上接第 59 页)

- [6] JOANITTI G A, FREITAS S M, SILVA L P. Proteinaceous protease inhibitors: Structural features and multiple functional faces[J]. Curr Enzyme Inhibition, 2006, 2: 199-217.
- [7] 黄菁, 乔传令. 昆虫解毒酶解毒机理及其在农药污染治理中的应用[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3): 285-287.

- [8] WU H H, ZHU K Y, GUO Y P, et al. Comparative studies of substrate and inhibitor specificity of glutathione S-transferase in six tissues of *Oxya chinensis* (Thunberg) (Orthoptera: Aericidae)[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(4): 462-468.
- [9] YAN S, CUI F, QIAO C. Structure, function and applications of carboxylesterases from insects for insecticide resistance[J]. Protein Pept Lett, 2009, 16(10): 1181-1188.