

湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价^①

陈江¹, 张海燕¹, 何小峰², 曹水华¹, 杨国祥¹

(1 浙江省湖州市环境监测中心站, 浙江湖州 313000; 2 浙江省上虞市水处理发展有限责任公司, 浙江上虞 312300)

摘要: 在对湖州市土壤重金属污染状况进行调查后, 按照有关标准和方法对该市土壤重金属潜在生态风险进行了评价。结果表明: 单因子污染指数最小的是Pb, 最大的是Cd。土壤中Pb含量均达标, 其余各重金属元素有部分土壤超标。68.9% 的土壤处于安全等级, 21.6% 的土壤处于警戒限, 轻污染土壤占 8.1%, 重污染土壤占 1.4%。68.9% 的土壤处于低风险等级, 27.0% 的土壤处于中等风险等级, 强风险等级土壤占 2.7%, 很强风险等级土壤占 1.4%。林地的重金属含量变化幅度普遍大于耕地。耕地土壤污染程度轻于林地。土壤中各重金属对污染的贡献大小为: Cd>Ni>Cr>Hg>Zn>Cu>As>Pb。

关键词: 土壤; 重金属; 潜在生态风险; 评价

中图分类号: X820.4

近年来, 由于人口急剧增长, 工业迅猛发展, 固体废物不断向土壤表面堆放和倾倒, 有害废水不断向土壤中渗透, 大气中的有害气体及飘尘也不断随雨水降落在土壤中, 导致土壤环境的重金属污染日趋严重。国内不少学者对土壤中重金属的污染等级及风险评价作了研究^[1-7]。2007—2008年, 浙江省湖州市环境监测中心站在完成《湖州市土壤环境质量信息管理系统研究》课题过程中对湖州市行政辖区内土壤的重金属污染情况作了详细的调查。本文以此次调查数据为基础, 对湖州市土壤中的重金属含量及潜在生态风险进行评价。

1 材料和方法

1.1 样品采集

将土壤按土地利用类型分为耕地和林地。以网格法在湖州市范围内均匀布点, 耕地网格大小为 4 km × 4 km, 林地网格大小为 16 km × 16 km, 并用 GPS 定位。采得样品 74 个, 其中耕地耕地样品 52 个, 林地样品 22 个。耕地采集 0~20 cm 层土壤, 林地采集 0~15 cm 层土壤, 多点采集, 混匀后四分法制样。样品置于布袋中运回实验室经风干、磨碎、过 100 目筛进一步制备后待分析测试。

1.2 分析方法与质量控制

待测 8 种重金属为: As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn。分析方法均为相关的中华人民共和国国家标准。

其中, Pb、Cd 的测定为石墨炉原子吸收分光光度法 (GB/T17141-1997); Cr 的测定为火焰原子吸收分光光度法 (GB/T17137-1997); Ni 的测定为火焰原子吸收分光光度法 (GB/T17139-1997); Hg 的测定为冷原子吸收分光光度法 (GB/T17136-1997); As 的测定为硼氢化钾-硝酸银分光光度法 (GB/T17135-1997); Cu、Zn 的测定为火焰原子吸收分光光度法 (GB/T17138-1997)。使用的重金属土壤标准样品为 ESS-4 系列黑钙土。每 10 个样品带标准土壤 1 个, 每 10 个样品中随机挑选 1 个样品进行加标回收试验; 并随机抽取 15 个样品 (约占样品总数的 20%) 进行重复测定, 以此对分析结果的质量进行控制。

1.3 主要分析仪器

耶拿 Zeenit700 原子吸收光谱仪 (德国耶拿仪器股份有限公司), T6 新悦分光光度计 (北京普析通用仪器有限公司)。

1.4 评价方法

1.4.1 单因子评价指数 P_i

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

式中, P_i 为各种重金属的单因子指数, S_i 为土壤环境质量标准 (GB15618-1995) 中各重金属的评价标准值。

1.4.2 内梅罗综合评价指数 PN

$$PN = \sqrt{\frac{P_{平均}^2 + P_{最大}^2}{2}} \quad (2)$$

^①基金项目: 环境保护部全国土壤现状调查及污染防治项目 (2110402) 和湖州市科技局科研项目 (2007YS19) 资助。

作者简介: 陈江 (1980—), 男, 浙江湖州人, 工程师, 从事环境监测工作。E-mail: chemistryren@163.com

式中, PN 为内梅罗综合评价指数, $Pi_{平均}$ 为各种重金属单项污染指数的平均值, $Pi_{最大}$ 为最大重金属单项污染指数。

内梅罗综合污染指数反映了各污染物对土壤的作用, 同时突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响, 可按内梅罗综合污染指数划定污染等级。内梅罗综合污染指数土壤污染评价标准见表 1。

表 1 土壤内梅罗综合污染指数评价标准^[8]

Table 1 Evaluating criterions of Nemeró combined pollution indices in soil

等级	内梅罗综合污染指数	污染水平 (安全等级)
I	$PN \leq 0.7$	清洁 (安全)
II	$0.7 < PN \leq 1.0$	尚清洁 (警戒限)
III	$1.0 < PN \leq 2.0$	轻度污染 (轻污染)
IV	$2.0 < PN \leq 3.0$	中度污染 (中污染)
V	$PN > 3.0$	重度污染 (重污染)

1.4.3 Hacanson 潜在生态风险指数 该法主要衡量土壤中重金属对环境存在的生态风险。Hacanson^[9]认为土壤中重金属对环境存在着潜在的生态风险可用如下公式表示:

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

式中, RI 为土壤中多种重金属的综合潜在生态风险指

数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数, T_r^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数, 反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度。Hacanson^[9]只对 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 5 种重金属的毒性系数进行了研究, 在此基础上, 徐争启等^[5]根据各类环境物质中各重金属元素的丰度推算出 Ni、As、Hg 的毒性系数。各重金属的毒性系数分别为: $Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Ni = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30 < Hg = 40$ 。 C_f^i 为第 i 种重金属元素的污染系数, 即为第 i 种重金属元素的污染累积指数, C^i 为土壤重金属元素实测值, C_n^i 为参比值, 即为本地土壤背景值。土壤中重金属浓度越大, 重金属污染物种类越多, 重金属的毒性水平越高, 潜在生态风险指数 RI 值越大, 表明其潜在生态风险越高。具体分级见表 2。

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属含量

由表 3 可见, 土壤中各重金属元素含量均存在一定的波动。变异系数大小顺序为: $Cd > As > Cu > Hg > Zn > Ni > Cr > Pb$, 说明土壤中 Pb 含量比较平均, 变化幅度最小, Cd 含量变化幅度最大。从土地利用类型来看, 林地的重金属含量变化幅度普遍大于耕地。含量均值耕地大于林地的重金属元素为 Hg、Pb、

表 2 土壤潜在生态风险分级

Table 2 Classification of potential ecological risk in soil

污染程度	低	中等	强	很强	极强
E_r^i	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	< 150	150 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1 200	$> 1 200$

表 3 土壤中重金属含量 (mg/kg)

Table 3 Contents of heavy metals in soil

土地类型	统计值	Hg	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Ni
总体 ($n = 74$)	均值	0.151	9.6	32.7	0.25	25.0	66.5	85.1	24.4
	范围	0.013 ~ 0.637	1.9 ~ 47.5	14.4 ~ 56.3	0.06 ~ 4.34	3.4 ~ 169	15.5 ~ 217	25.8 ~ 371	6.7 ~ 75.5
	变异系数	0.75	0.84	0.26	1.96	0.77	0.42	0.53	0.46
耕地 ($n = 52$)	均值	0.168	9.0	33.3	0.20	25.6	71.4	85.0	26.7
	范围	0.039 ~ 0.637	3.8 ~ 43.1	14.4 ~ 55.8	0.06 ~ 0.57	7.5 ~ 70.3	24.2 ~ 121	25.8 ~ 157	6.7 ~ 47.0
	变异系数	0.65	0.73	0.25	0.56	0.37	0.26	0.37	0.34
林地 ($n = 22$)	均值	0.112	11.1	31.3	0.37	23.7	55.0	85.2	19.1
	范围	0.013 ~ 0.573	1.9 ~ 47.5	16.2 ~ 56.3	0.08 ~ 4.34	3.4 ~ 169	15.5 ~ 217	26.2 ~ 371	7.8 ~ 75.5
	变异系数	1.02	0.97	0.28	2.36	1.36	0.74	0.79	0.73

Cu、Cr、Ni；含量均值林地大于耕地的重金属元素为 As 和 Cd；耕地与林地土壤中 Zn 的含量均值几乎相等。

2.2 单因子污染指数评价

土壤中各重金属元素的单因子污染指数计算结果见表 4。由表 4 可见，土壤中 Pb 含量均达标，其余各重金属元素均存在超标现象。总体单因子污染指数均值大小顺序为：Cd>Ni>Hg>Cu = Cr>Zn>As>Pb。变异系数大小顺序为：Cd>As>Hg>Cu>Zn>Ni>

Cr>Pb。各重金属元素超标土壤所占土壤样品总数的比率分别为：Cd (13.5%)、Hg (9.5%)、As (5.3%)、Ni (4.1%)、Cu (1.4%)、Cr (1.4%)、Zn (1.4%)、Pb (0%)，这说明 Cd 和 Hg 的污染相对较严重，Pb 污染程度最低。从土地利用类型来看，林地的重金属含量变化幅度普遍大于耕地。耕地土壤中的 Hg、Cu、Cr、Ni 单因子污染指数均值大于林地；耕地土壤中的 As、Cd、Zn 单因子污染指数均值小于林地；耕地与林地土壤中 Pb 的单因子污染指数均值几乎相等。

表 4 土壤重金属单因子污染指数
Table 4 Single-factor pollution indices of heavy metals in soil

土地类型	统计值	Hg	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Ni
总体 (n = 74)	均值	0.42	0.35	0.12	0.67	0.39	0.39	0.38	0.55
	范围	0.03 ~ 1.91	0.07 ~ 1.90	0.04 ~ 0.23	0.15 ~ 7.23	0.03 ~ 1.69	0.09 ~ 1.08	0.09 ~ 1.48	0.17 ~ 1.51
	变异系数	0.84	0.85	0.28	1.24	0.55	0.41	0.49	0.44
	超标样品比率(%)	9.5	5.3	0	13.5	1.4	1.4	1.4	4.1
耕地 (n = 52)	均值	0.45	0.34	0.12	0.58	0.40	0.41	0.38	0.59
	范围	0.04 ~ 1.27	0.13 ~ 1.44	0.04 ~ 0.22	0.15 ~ 1.65	0.08 ~ 0.77	0.12 ~ 0.67	0.09 ~ 0.79	0.17 ~ 1.15
	变异系数	0.74	0.70	0.27	0.60	0.41	0.31	0.38	0.36
	超标样品比率(%)	11.5	3.8	0	15.4	0	0	0	3.8
林地 (n = 22)	均值	0.34	0.40	0.12	0.88	0.37	0.33	0.40	0.44
	范围	0.03 ~ 1.91	0.07 ~ 1.90	0.05 ~ 0.23	0.27 ~ 7.23	0.03 ~ 1.69	0.09 ~ 1.08	0.10 ~ 1.48	0.19 ~ 1.51
	变异系数	1.11	1.03	0.29	1.61	0.82	0.62	0.66	0.60
	超标样品比率(%)	4.5	9.1	0	9.1	4.5	4.5	4.5	4.5

2.3 内梅罗综合污染指数评价

由表 5 可见，耕地的平均内梅罗污染指数小于林地，变化幅度也比林地小，说明耕地土壤污染程度轻于林地。总体来看，68.9% 的土壤处于安全等级，21.6% 的土壤处于警戒限，轻污染土壤占 8.1%，重污染土壤占 1.4%，无中度污染土壤（表 6）。

表 5 土壤重金属内梅罗综合污染指数
Table 5 Nemerom combined pollution indices of heavy metals in soil

土地类型	统计值	内梅罗综合污染指数 PN
总体 (n = 74)	均值	0.67
	范围	0.17 ~ 5.22
	变异系数	0.88
耕地 (n = 52)	均值	0.63
	范围	0.17 ~ 1.21
	变异系数	0.38
林地 (n = 22)	均值	0.76
	范围	0.24 ~ 5.22
	变异系数	1.32

表 6 不同等级土壤所占份额 (%)

Table 6 Portions of soils at each grade

等级	总体 (n = 74)	耕地 (n = 52)	林地 (n = 22)
PN≤0.7 安全	68.9	63.5	81.8
0.7<PN≤1.0 警戒限	21.6	28.8	4.5
1.0<PN≤2.0 轻污染	8.1	7.7	9.1
2.0<PN≤3.0 中污染	0	0	0
PN>3.0 重污染	1.4	0	4.5

分担率反映了各重金属对综合污染指数的贡献比率，即对土壤污染的贡献大小。由表 7 可见，从各重金属分担率的总体均值来看，土壤中各重金属对污染的贡献大小顺序为：Cd>Ni>Cr>Hg>Zn>Cu>As>Pb。各重金属对耕地污染的贡献大小顺序为：Ni>Cd>Cr>Hg>Cu>Zn>As>Pb。各重金属对林地污染的贡献大小顺序为：Cd>Ni>Zn>Cu>As>Hg>Cr>Pb。

表 7 重金属对综合污染指数分担率 (%)

Table 7 Contributions of heavy metals to combined pollution indices

土地类型	统计值	Hg	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Ni
总体 (n = 74)	均值	12.2	11.2	4.1	19.0	11.9	12.4	12.0	17.2
	范围	0.8 ~ 39.2	3.5 ~ 45.3	1.0 ~ 8.4	6.1 ~ 47.6	3.5 ~ 22.0	4.7 ~ 22.0	5.7 ~ 24.9	6.7 ~ 27.5
	变异系数	0.65	0.64	0.29	0.47	0.27	0.29	0.30	0.28
耕地 (n = 52)	均值	12.7	11.1	3.8	17.3	12.2	13.1	11.5	18.3
	范围	2.5 ~ 34.3	3.6 ~ 45.3	2.4 ~ 8.4	6.1 ~ 43.5	6.3 ~ 21.6	5.0 ~ 22.0	5.9 ~ 18.9	6.7 ~ 27.5
	变异系数	0.61	0.68	0.25	0.44	0.24	0.26	0.22	0.25
林地 (n = 22)	均值	10.9	11.2	4.5	23.3	11.5	10.8	13.2	14.6
	范围	0.8 ~ 39.2	3.5 ~ 27.2	1.0 ~ 6.8	11.9 ~ 47.6	3.5 ~ 22.0	4.7 ~ 17.6	5.7 ~ 24.9	8.3 ~ 26.7
	变异系数	0.75	0.54	0.33	0.44	0.33	0.34	0.39	0.30

2.4 土壤潜在生态风险评价

由表 8 可见,从总体均值来看, Hg 和 Cd 的单项潜在生态风险系数处于中等风险等级,其余各元素均处于低风险等级;潜在生态风险指数均值为 147,处于低风险等级。各重金属元素对土壤潜在生态风险贡献大小顺序为: Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn。耕地各重金属元素对土壤潜在生态风险贡献大小顺序为: Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb

> Cr > Zn。林地各重金属元素对土壤潜在生态风险贡献大小顺序为: Cd > Hg > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn。值得注意的是,耕地中 Hg 单项潜在生态风险系数均值明显大于林地,而林地中 Cd 单项潜在生态风险系数均值明显大于耕地。耕地与林地的潜在生态风险指数均值分别为 145 和 151,差别不大,说明两种土地利用类型土壤的潜在生态风险是大致相等的。

表 8 土壤重金属单项潜在生态风险系数与潜在生态风险指数

Table 8 Indexes of single factor potential ecological risk and potential ecological risk of heavy metals in soil

土地类型	统计值	单项潜在生态风险系数 Er								潜在生态风险指数 RI
		Hg	As	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Ni	
总体 (n = 74)	均值	65.7	13.9	5.7	44.1	7.3	2.7	1.3	6.4	147
	范围	5.7 ~ 276	2.7 ~ 68.4	2.5 ~ 9.8	9.8 ~ 765	1.0 ~ 48.9	0.6 ~ 8.8	0.4 ~ 5.7	1.8 ~ 19.7	33.9 ~ 952
耕地 (n = 52)	均值	72.9	13.0	5.8	35.3	7.4	2.9	1.3	7.0	145
	范围	16.8 ~ 276	5.4 ~ 62.1	2.5 ~ 9.7	9.8 ~ 100	2.2 ~ 20.4	1.0 ~ 4.9	0.4 ~ 2.4	1.8 ~ 12.3	47.8 ~ 365
林地 (n = 22)	均值	48.8	16.1	5.4	65.1	6.9	2.2	1.3	5.0	151
	范围	5.7 ~ 249	2.7 ~ 68.4	2.8 ~ 9.8	14.3 ~ 765	1.0 ~ 48.9	0.6 ~ 8.8	0.4 ~ 5.7	2.0 ~ 19.7	33.9 ~ 952

总体来看,68.9% 的土壤处于低风险等级,27.0% 的土壤处于中等风险等级,强风险等级土壤占 2.7%,很强风险等级土壤占 1.4%,无极强风险土壤(表 9)。

表 9 不同等级土壤所占份额 (%)

Table 9 Portions of soils at each grade

等级	总体 (n = 74)	耕地 (n = 52)	林地 (n = 22)	
				$RI < 150$
$150 \leq RI < 300$	中等	27.0	34.6	9.1
$300 \leq RI < 600$	强	2.7	1.9	4.5
$600 \leq RI < 1200$	很强	1.4	0	4.5
$RI > 1200$	极强	0	0	0

3 结论

湖州市土壤中各重金属元素含量均存在一定的波动。Pb 含量比较平均,变化幅度最小,Cd 含量变化幅度最大。土壤中 Pb 含量均达标,其余各重金属元素均存在超标现象。土壤中各重金属对污染的贡献大小顺序为: Cd > Ni > Cr > Hg > Zn > Cu > As > Pb。从内梅罗综合污染指数的总体均值来看,68.9% 的土壤处于安全等级,21.6% 的土壤处于警戒限,轻污染土壤占 8.1%,重污染土壤占 1.4%,无中度污染土壤。从潜在生态风险指数来看,68.9% 的土壤处于低风险等级,27.0% 的土壤处于中等风险等级,强风险等级土壤占

2.7%, 很强风险等级土壤占 1.4%, 无极强风险土壤。各重金属元素对土壤潜在生态风险贡献大小顺序为: $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$ 。

耕地土壤污染程度轻于林地, 且各重金属含量变化幅度普遍小于林地。耕地与林地土壤的潜在生态风险大致相等。

参考文献:

- [1] 安中华, 董元华, 安琼, 王辉. 苏南某市农田土壤环境质量评价及其分级. 土壤, 2004, 36(6): 631-635
- [2] 刘治国, 王金保, 蒋旭亮, 雍军. 宁夏基本农田保护区土壤环境质量监测与评价. 宁夏农林科技, 2005(2): 28-30, 59
- [3] 吉玉碧, 谢锋, 谭红, 何锦林, 王大霞, 申朝永. 基于 GIS 的贵州省农业土壤环境质量评价. 贵州农业科学, 2006, 34(1): 15-17
- [4] 徐志平. GIS 支持下的区域耕地土壤环境质量评价—以福建省莆田市荔城区为例. 福建农业学报, 2004, 19(3): 169-173
- [5] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115
- [6] Yang QW, Lan CY, Shu WS. Copper and Zinc in a paddy field and their potential ecological impacts affected by wastewater from a lead/zinc mine, P.R.China. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 147: 65
- [7] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 侯青叶, 胡省英, 郭莉. 北京市农田土壤重金属的化学形态及其对生态系统的潜在危害. 土壤, 2009, 41(1): 37-41
- [8] 国家环境保护总局. HJ/T 166-2004《土壤环境监测技术规范》. 北京: 中国环境科学出版社
- [9] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001

Distribution and Evaluation on Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Soils of Huzhou

CHEN Jiang¹, ZHANG Hai-yan¹, HE Xiao-feng², CAO Shui-hua¹, YANG Guo-xiang¹

(1 Huzhou Environmental Monitoring Center, Huzhou, Zhejiang 313000, China;

2 ShangYu Water Treatment Development Co. Ltd, Shangyu, Zhejiang 312300, China)

Abstract: The potential ecological risk of heavy metals in soil was evaluated according to relevant standard and method based on the investigation of heavy metal pollution status in soil of Huzhou. The results showed that the single-factor pollution index of Pb was the lowest while the single-factor pollution index of Cd was the highest. Pb content in soil complied with the standard but the contents of other heavy metals in some soils exceeded the standard. 68.9% of soils were at the level of security, 21.6% of soils were at the alert limit, 8.1% of soils were at the level of light pollution, 1.4% of soils were polluted seriously. 68.9% of soils were at the low risk level, 27.0% of soils were at the middle risk level, 2.7% of soils were at the strong risk level, 1.4% of soils were at the very strong level. The ranges of heavy metal contents in woodland were generally higher than those of paddy land. The degree of soils pollution of paddy fields was lower than that of woodland. The contribution to pollution of heavy metals in soil was in an order of $Cd > Ni > Cr > Hg > Zn > Cu > As > Pb$.

Key words: Soil, Heavy metals, Potential Ecological Risk, Evaluation