

仙山湖湿地土壤重金属空间分布特征与生态风险评价

张 华¹, 李贺鹏^{1*}, 王 泳¹, 岳春雷¹, 刘 政², 朱 培²

(1. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江省长兴县林业局, 浙江 长兴 313100)

摘要: 2014年4月, 在浙江省长兴县仙山湖周边设置了15个采样点, 共采集了45个土壤样品, 分析Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, As及Hg的含量水平及其分布特征, 采用地累积指数、潜在生态危害指数法, 对仙山湖土壤重金属污染进行评价。结果表明, 在仙山湖周边各层土壤中, 大部分所测元素含量低于国家土壤环境一级标准, 部分样点Hg, Zn和Cd含量超标。在不同土地利用类型中, 公路沿线的Cu及Cd含量较高; 湖区下游土壤的Cu, Pb, Hg含量较高, Cd含量较低; 湿地边滩、苗圃的土壤重金属含量变化不明显。在土壤垂直分布中, 多数所测元素无明显变化规律。地累积指数表明, 7种元素污染程度均属于无污染; 潜在生态风险指数表明, 部分样地的Hg潜在生态风险等级为中等及较强级别, 应引起重视。

关键词: 仙山湖; 湿地; 重金属; 土壤分布; 风险评价

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Seven Elements in Soil of Xianshanhu Wetland

ZHANG Hua¹, LI He-peng^{1*}, WANG Yong¹, YUE Chun-lei¹, LIU Zheng², ZHU Pei²

(1. Zhejiang Forestry Academy, Hangzhou 310023, China; 2. Changxing Forestry Bureau of Zhejiang, Changxing 313100, China)

Abstract: Determinations on content of 7 element, namely Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, As and Hg were implemented in the soils from different layers in 15 sampling points around Xianshanhu Wetland of Changxing, Zhejiang province in April, 2014. Contamination of above-mentioned elements was assessed by index of geoaccumulation and potential ecological risk index. The result demonstrated that contents of most tested elements at different layers in the soil around Xianshanhu were lower than national soil environmental standards, only Hg, Zn and Cd content was over-limit at some of the points. The content of Cu and Cd was higher in the soil of roadside, the content of Cu, Pb and Hg was higher in the downstream of the lake, while the content of Cd was lower. The content of tested elements had no obvious variation in the nursery and the marginal bank of the wetland. Most of tested elements had no obvious regularity in the vertical distribution of soil. Index of geoaccumulation showed that the soil was not polluted by these elements. Potential ecological risk index showed that Hg had medium to high risk index at some points, which was need to be paid attention.

Key words: Xianshanhu; wetland; heavy metal; soil distribution; risk assessment

土壤重金属作为持久性和生物累积性污染物, 由于其具有不可逆累积、易于富集、不易降解的特性, 其含量高直接反映土壤优劣^[1], 同时重金属能通过食物链传递危害人类健康^[2~3]。铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)等重金属元素和砷(As)是城市和工业发展过程中产生的典型“污染元素”,

收稿日期: 2016-04-20; 修回日期: 2016-10-28

基金项目: 浙江省省属科研院所专项计划项目(2015F30001)资助

作者简介: 张华(1980-), 男, 湖北黄石人, 工程师, 从事湿地保护研究; *通讯作者。

这些元素在湖库区环境研究中越来越多地受到关注。目前,在浙江省湖库区重金属污染方面的研究仅限于临安青山湖表层沉积物和杭州西溪湿地土壤中重金属的相关报道^[4-5],而有关水体、底泥、农业面源等湖库区重金属污染方面的系统研究鲜有报道。本文以饮用水源地仙山湖水库为例,通过对仙山湖周边土壤重金属的检测和分析,研究不同土地利用类型对土壤重金属含量的影响,确定饮用水源地重金属污染的潜在生态风险,并对库区周围土壤重金属污染状况进行综合评价。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长兴仙山湖国家湿地公园,地处苏、浙、皖三省交界处,位于浙江省长兴县泗安镇。119° 33′ 51″ ~ 119° 38′ 38″ E, 30° 52′ 08″ ~ 30° 55′ 25″ N,面积 2 269.2 hm²,其中湿地 1 395.3 hm²^[6],是浙北面积最大的湿地之一。仙山湖湿地是长三角地区典型的人工湖泊湿地^[7],是泗安镇周边居民重要的水源地,总库容为 0.5 × 10⁸ m³^[8]。

1.2 样点设置

根据仙山湖周边植被类型,选取 15 个具有代表性的采样点(图 1,表 1)。仙山湖湿地区域没有工业区,周边农地上绝大部分种植苗木,取样点主要设在苗圃地、湿地边滩、河岸边、公路边,其中采样点 S4, S7, S14, S15 位于河岸边; S8, S11 为湿地边滩; S13, S14, S15 位于泗安水库下游,其它采样点位于水库上游; S4, S5, S11, S12 靠近公路(其中 S4 附近有河流和公路穿插而过)。

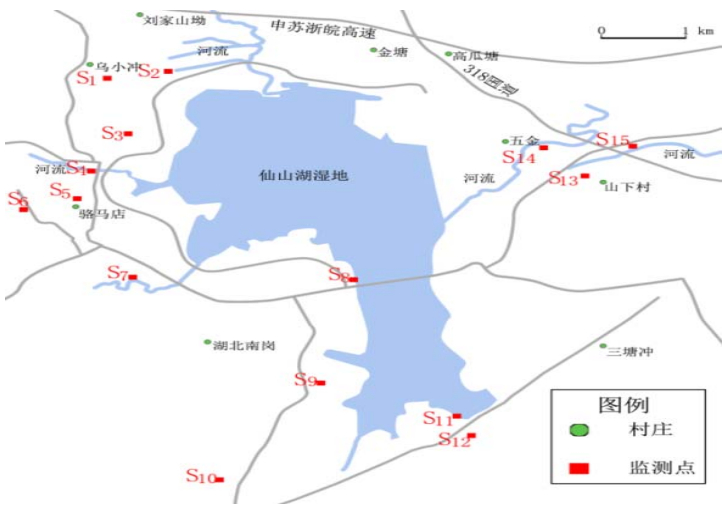


图 1 研究区域及采样点位置

Figure 1 Location of sampling points

表 1 仙山湖周边土壤采样点基本情况
Table 1 Basic information of the sampling spots around Xianshanhu

采样点	采样地基本情况	采样点	采样地基本情况
S1	山坡, 坡度 10~15°, 樟 (Cinnamomum camphora) 林	S9	山坡上大樟下
S2	平地苗圃内, 木屋 (Osmanthus fragrans) 林, 底层见水	S10	樟林下
S3	养殖塘岸边, 樟林下	S11	湿地公园边滩, 火烧迹地
S4	河岸边坡, 刚刚种植垂柳 (Salix babylonica)	S12	河岸边垂柳林下, 位于公路南侧
S5	路旁苗圃地, 垂柳林下	S13	苗圃地樟林下, 水库下游
S6	苗木地, 刚种的无患子 (Sapindus mukorossi) 林、香椿 (Toona sinensis) 树下	S14	河岸边上樟林下, 水库下游
S7	山坡下平地, 樟林下	S15	樟林下, 水库下游, 104 国道旁
S8	湿地边滩, 杂草		

1.3 样品采集与前处理

2014 年 4 月,在选定的 15 个样点进行取样。为了研究重金属在土壤中垂直分布情况,对 15 个采样点不同层次的土壤分别取样,表层 0 cm < d ≤ 10 cm,中层 10 cm < d ≤ 20 cm,深层 20 cm < d ≤ 30 cm。每个采样点 3 个土壤层次各采集 1 个样品,每个样品质量约 1 kg,去除大的石块和异物后,装入聚乙烯自封袋,于实验室内自然风干,研磨过 100 目筛,存于干燥容器中备用。

1.4 测定方法

铜、锌依据 GB/T 17138-1997;镉、铅依据 GB/T 17141-1997;铬依据 HJ 491-2009;砷依据 GB/T 22105.2-2008;

汞依据 GB/T 22105.1-2008 方法进行测定。

1.5 重金属生态风险评价方法

选用变异系数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法, 评价仙山湖周边土壤环境质量状况。

1.5.1 变异系数法 为了定量反映仙山湖湿地土壤重金属含量空间波动程度的大小差异, 选用变异系数来表示它们变化程度的大小^[7]。变异系数计算公式如下:

$$CV = S^2 / \bar{X}$$

式中, CV 为变异系数; S^2 为重金属元素空间分布的标准偏差; \bar{X} 为各重金属元素空间分布的平均值。

1.5.2 地累积指数法 地累积指数 (I_{geo}) 是一种研究环境沉积物中重金属污染程度的定量指标^[9], 近年来已被国内外学者广泛应用于人为活动产生的重金属对土壤污染的评价^[10~12]。

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_n)$$

式中, C_n 为元素 n 在土壤中的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_n 为普通页岩中该元素的地球化学背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。采用土壤一类标准值^[13]作为参照标准。1.5 用于校正区域背景值差异。按照数值可将重金属污染划分为 7 个等级 (表 2)。

1.5.3 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数是瑞典科学家 Hakanson^[14]提出的以定量的方法划分出重金属潜在的危害程度, 可以综合反映沉积物中重金属对生态环境的潜在影响。潜在生态风险指数计算公式为:

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

式中, RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; C^i 为单一元素实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_n^i 为单一元素参比值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 采用土壤一类标准值作为参照标准。 T_r 为重金属 i 的毒性系数; E_r 为重金属 i 的潜在生态危害系数。毒性系数及参比值见表 3, 生态危害程度划分标准如表 4 所示。

表 3 所测元素的参比值和毒性系数
Table 3 Reference and toxic factor of tested heavy metals

项目	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg
参比值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	35	100	90	35	0.20	15	0.15
毒性系数	5	1	2	5	30	10	40

2 结果与分析

2.1 仙山湖周边土壤中重金属的空间分布

为了研究不同类型样地对土壤重金属含量的影响, 对样地类型进行区分, 其中 S1, S2, S3, S5, S6, S7, S9, S10, S12, S13, S14, S15 为苗圃地 (S4, S12 主要种植垂柳, 为护岸林, 没有归入苗圃地类型)。苗圃地 12 个样地中 S1, S2, S3 处于湿地上游, S13, S14, S15 位于湿地下游, S5, S12 靠近公路。S8, S11 位于湿地边滩, 其中 S11 靠近公路。S4, S5, S11, S12 位于公路旁。

表 2 地累积指数分级与污染程度的关系
Table 2 Relationship between index of geoaccumulation and degree of pollution

级别	I_{geo}	污染程度
0	<0	无污染
1	0~1	无污染到中度污染
2	1~2	中度污染
3	2~3	中度污染到强污染
4	3~4	强污染
5	4~5	强污染到极强污染
6	>5	极强污染

表 4 重金属 E_r^i 与 RI 危害指数的关系
Table 4 Relationship between potential ecological risk factor and potential ecological risk index

单项潜在生态风险系数(E_r^i)	潜在生态风险指数(RI)	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害

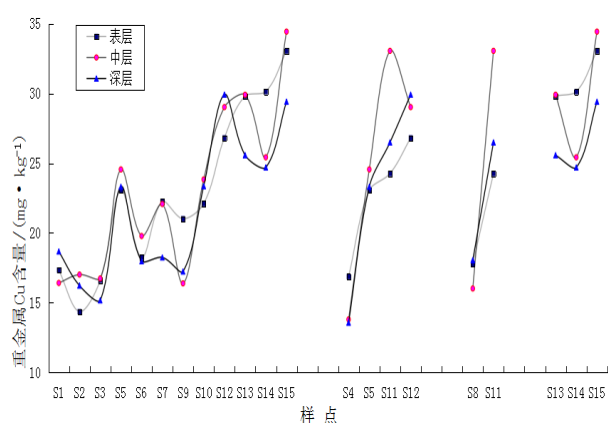


图 2 仙山湖周边土壤 Cu 含量的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of Cu content in the soil around Xianshanhu

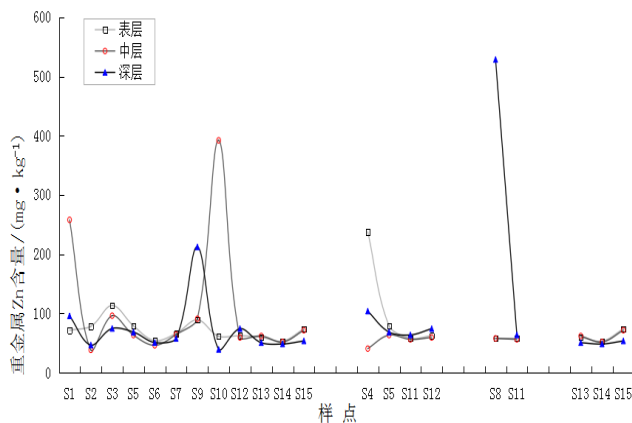


图 3 仙山湖周边土壤 Zn 含量的空间分布

Figure 3 Spatial distribution of Zn content in the soil around Xianshanhu

从图 2 中可以看出,湿地公园范围内 Cu 含量都在 $35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,属于饮用水源地的优质水平,未受到 Cu 污染。从土地利用类型来看,苗圃地中 Cu 含量未明显上升。湿地上游 S1, S2, S3 土壤各层 Cu 含量较低,均在 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下游 S13, S14, S15 相对较高,基本在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,高于上游。公路旁 S5, S11, S12 土壤中 Cu 含量较高,湿地样地中靠近公路的 S11 样点土壤 Cu 含量高于未靠近公路的 S8。从土层垂直分布来看,土壤不同深度的 Cu 含量分布没有明显规律。

从图 3 可知,大部分样地的 Zn 含量都在背景值 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,个别样地 Zn 含量波动较大,如 S4 的表层、S1 和 S10 的中层、S8 的深层土壤中, Zn 含量远远超出土壤背景值。特别是 S8 样地,是背景值的 5.3 倍。上游的 Zn 含量超标率远远大于下游。

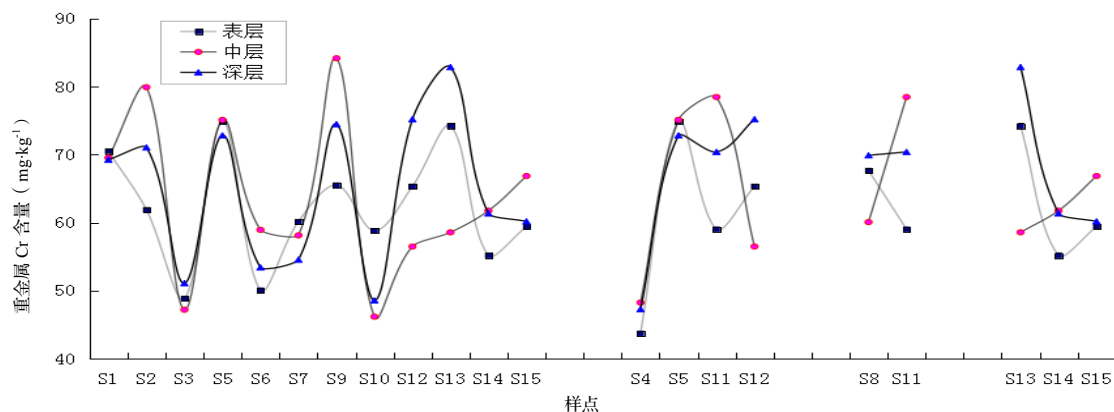


图 4 仙山湖周边土壤 Cr 含量的空间分布

Figure 4 Spatial distribution of Cr content in the soil around Xianshanhu

由图 4 可看出,土壤各层 Cr 含量均在背景值 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,表明土壤未受到 Cr 污染。S3 和 S4 样地的 Cr 含量低于其他点位。湿地 S8, S11 样地中,靠近公路的 S11 土壤 Cr 含量较高。Cr 含量在各样地的土壤垂直分布中无明显规律,样地之间的 Cr 含量差异不大。需进行差异性分析。

从图 5 可看出, Pb 的变动范围 $3.7 \sim 32.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于背景值 $35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 说明湿地公园内土壤未受到 Pb 污染。从空间分布来看,湿地上游 S2, S3, S4 土壤中 Pb 含量明显低于其他点位。下游 S13, S14, S15 土壤中 Pb 含量较高。湿地 S8, S11 对比看, S11 样点土壤 Pb 含量略高。土壤垂直分布中, 深层土壤 Pb 含量低于表层和中层。

由图 6 可知, 重金属 Cd 含量变化范围在 $0.008 \sim 0.251 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, S10 土壤 Cd 含量较高, 表层, 中层和深层土壤 Cd 含量分别为 $0.249 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.251 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层、中层的略微超过背景值 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

说明土壤受到一定污染。从土地利用类型看, 下游 S13, S14, S15 的土壤 Cd 含量较低, 其他样地类型之间 Cd 含量差异较小。S11Cd 含量大于 S8。从土壤垂直分布来看, 苗圃地样地类型中, 表层土壤的 Cd 含量高于中层, 深层土壤。

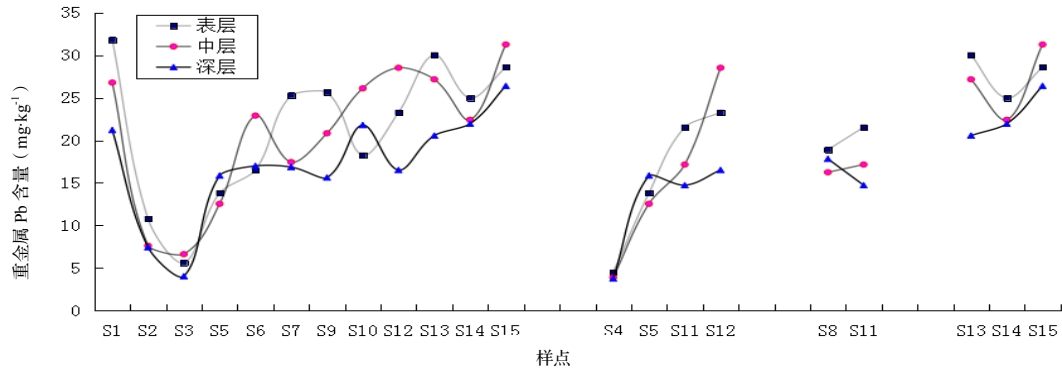


图 5 仙山湖周边土壤 Pb 含量的空间分布

Figure 5 Spatial distribution of Pb content in the soil around Xianshanhu

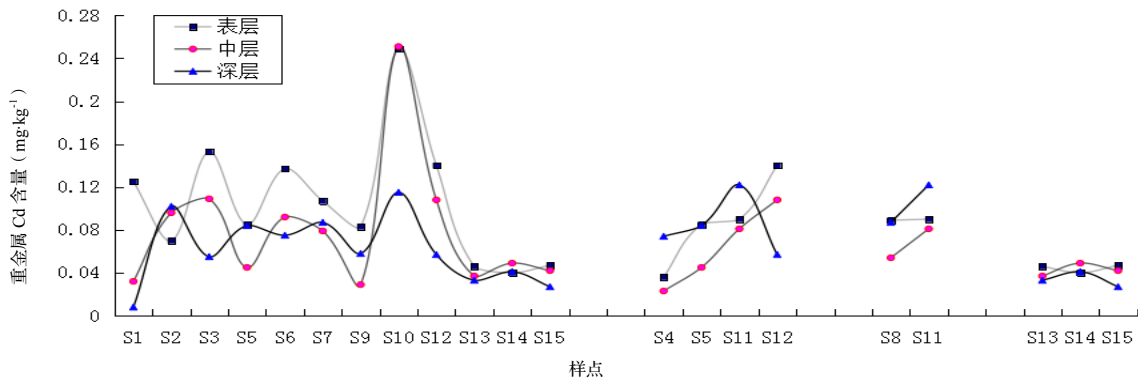


图 6 仙山湖周边土壤 Cd 含量的空间分布

Figure 6 Spatial distribution of Cd content in the soil around Xianshanhu

从图 7 可看出, 仙山湖湿地公园土壤 As 的变化范围在 $1.29\sim 13.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于背景值 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。湿地边滩样地 S11 土壤中层 As 含量为 $13.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 湿地下游样地 S15 深层土壤 As 含量为 $13.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为所有样点的最高值, 可能过去受到过一定的干扰所致。土地利用类型、垂直分布未看出明显规律。

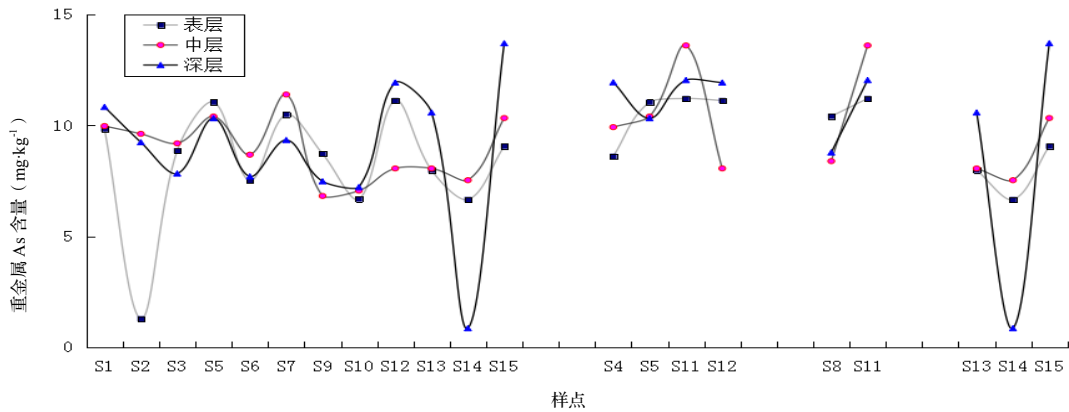


图 7 仙山湖周边土壤 As 含量的空间分布

Figure 7 Spatial distribution of As content in the soil around Xianshanhu

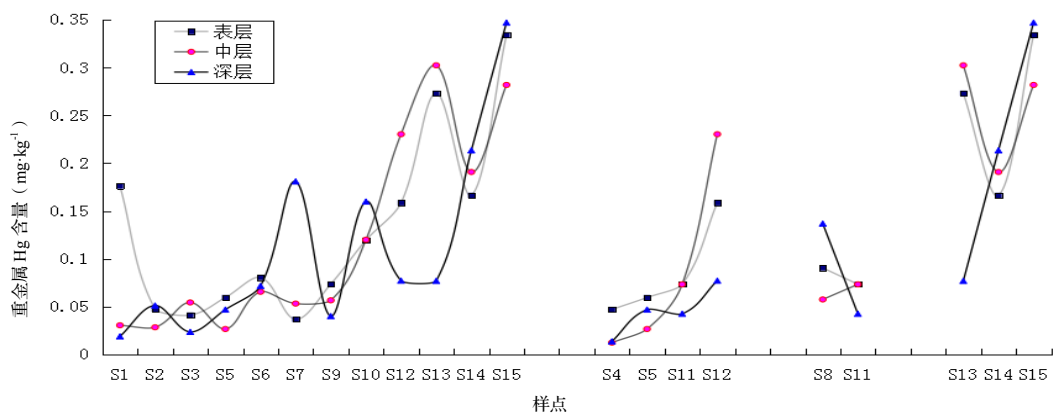


图 8 仙山湖周边土壤 Hg 含量的空间分布
Figure 8 Spatial distribution of Hg content in the soil around Xianshanhu

从图 8 可知，相对于背景值 $0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，仙山湖湿地公园上游土壤的 Hg 含量有 13 个样点超标，占比为 28.9%。下游 S13，S14，S15 的 Hg 超出背景值 1 倍以上。深层土壤的 Hg 含量波动较大，部分深层土壤含量明显小于表层、中层。

在仙山湖 0~30 cm 土层检测的 7 种重金属中，Cu，Cr，Pb，As 含量均低于国家土壤环境一级标准。Zn、Cd、Hg 在部分点位含量超标，其中 Hg 超标率最高，45 个样品中有 13 个超标，超标率 28.9%，下游 S13，S14，S15 的含量超出背景值 1 倍以上。Zn 的超标率为 15.6%，S8 深层、S10 中层、S4 表层以及 S1 中层土壤分别超标 5 倍、4 倍和 2 倍以上。Cd 在 S10 样地略有超标。

从土地利用类型来看，下游的 S13，S14，S15 样点中，Pb，Cu，Hg 含量较高，Cd 含量低。靠近公路的 S5，S11 和 S12 样点，Cu，Cd 含量增加；S4 虽然靠近公路，但是 Cu，Cr，Pb，Cd 和 Hg 含量为所有样点中最低值或较低值，推断该处为多条河流交汇处，水流的冲刷有较大影响。2 块湿地样地点中，靠近公路的 S11 的 Cu，Cd 及 As 含量均高于不靠近公路的 S8，Cr，Pb 含量也略高于 S8。苗圃地对土壤重金属含量的影响不明显。

检测显示，多数重金属元素在土壤垂直深度中分布无明显规律，只有 Cd 在表层土壤中含量高于中层及深层土壤，苗圃地类型中 Pb 在深层土壤中含量低于表层、中层土壤含量。

2.2 仙山湖周边土壤重金属的生态风险评价

从表 5 中可以看出，表层土壤中重金属变异系数排序依次为： $\text{Hg}>\text{Zn}>\text{Cd}>\text{Pb}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Cr}$ ；中层土壤的重金属变异系数依次为： $\text{Zn}>\text{Hg}>\text{Cd}>\text{Pb}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Cr}$ ；深层土壤的重金属变异系数依次为： $\text{Zn}>\text{Hg}>\text{Cd}>\text{Pb}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Cr}$ 。Zn，Hg，Cd 在各土层的变异系数均较大。这与前文中提到的重金属超标情况具有一致性。特别是 Zn，在中、深土层中变异系数 >1 。其他的重金属变异系数均 <0.5 ，Cr 的变异系数在 3 个土壤层中均最小。说明仙山湖周边土壤中 Zn，Hg，Cd 的空间分布不均，离散性相对较大，或者说明部分样点有人为扰动；其他 4 种重金属的含量空间分布较均匀，离散性较小，波动程度不大。

从表 6 中可以看出，所有土层中的所测元素地累积指数均为负值，属于无污染。

表 5 仙山湖周边土壤重金属含量与变异系数

Table 5 Content and coefficient of variation of tested elements at different soil layers around Xianshanhu						
测定项目	0 ~ 10 cm		> 10 ~ 20 cm		> 20 ~ 30 cm	
	平均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	变异系数/%	平均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	变异系数/%	平均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	变异系数/%
Cu	22.25	0.25	22.57	0.30	21.19	0.25
Zn	81.01	0.57	96.55	1.01	104.53	1.19
Cr	61.03	0.15	63.31	0.19	64.16	0.17
Pb	19.98	0.42	19.18	0.44	16.11	0.41
Cd	0.10	0.56	0.08	0.75	0.07	0.48
As	8.63	0.29	9.27	0.19	9.32	0.33
Hg	0.12	0.75	0.11	0.92	0.10	0.92

表 6 仙山湖周边土壤中 7 种重金属的累积指数 I_{geo}
Table 6 Index of geo accumulation I_{geo} of 7 heavy metals in soil around XianShan lake

土层/cm	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg
0 ~ 10	-1.24	-0.89	-1.15	-1.39	-1.59	-1.38	-0.92
> 10 ~ 20	-1.22	-0.64	-1.09	-1.45	-2.00	-1.28	-1.09
> 20 ~ 30	-1.31	-0.52	-1.07	-1.70	-2.13	-1.27	-1.17

根据潜在生态风险指数法计算仙山湖周边不同深度土壤中所测元素 E_i 和 RI , 结果见表 7、表 8、表 9。对照表 4 中的评价标准可以看出, 除 Hg 以外, 其他重金属的 E_i 均小于 40, 处于轻微的生态风险等级, 无潜在生态风险影响。与其他元素比较, Hg 的 E_i 最大, 尤其下游的 S13, S14, S15 以及 S12 的均大于 40, 部分大于 80, 处于中等及较强的生态风险等级。Hg 的污染应引起湿地管理部门的重视。 RI 显示各样地处于轻微生态风险等级。

表 7 仙山湖周边土壤 0 ~ 10 cm 土层中重金属单项潜在生态风险系数 (E_i') 和综合潜在生态风险指数 (RI)
Table 7 Potential ecological risk factor and index of single element at 0 cm < d ≤ 10 cm soil layer around Xianshanhu

样点	单项潜在生态风险系数 (E_i')							RI
	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg	
S1	2.48	0.72	1.57	4.55	18.68	6.56	46.97	81.52
S2	2.05	0.78	1.38	1.54	10.46	0.86	12.70	29.77
S3	2.37	1.13	1.09	0.80	22.91	5.90	11.01	45.22
S4	2.41	2.38	0.97	0.64	5.47	5.74	12.57	30.19
S5	3.30	0.79	1.66	1.97	12.77	7.37	15.89	43.75
S6	2.61	0.54	1.11	2.36	20.49	5.01	21.48	53.59
S7	3.18	0.66	1.34	3.62	16.11	6.99	9.83	41.73
S8	2.54	0.58	1.50	2.70	13.31	6.94	24.15	51.73
S9	3.00	0.89	1.46	3.67	12.51	5.81	19.64	46.98
S10	3.16	0.61	1.31	2.61	37.29	4.46	31.86	81.29
S11	3.47	0.58	1.31	3.08	13.49	7.48	19.59	48.99
S12	3.83	0.62	1.45	3.33	21.06	7.41	42.28	79.99
S13	4.26	0.60	1.65	4.29	6.97	5.32	72.83	95.92
S14	4.31	0.53	1.23	3.57	5.94	4.44	44.37	64.38
S15	4.72	0.74	1.32	4.09	7.10	6.04	89.10	113.11

表 8 仙山湖周边土壤 > 10 ~ 20 cm 土层中重金属单项潜在生态风险系数 (E_i') 和综合潜在生态风险指数 (RI)
Table 8 Potential ecological risk factor and index of single element at 10 cm < d ≤ 20 cm soil layer around Xianshanhu

样点	单项潜在生态风险系数 (E_i')							RI
	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg	
S1	2.34	2.58	1.55	3.83	4.87	6.65	8.16	29.97
S2	2.43	0.38	1.78	1.09	14.38	6.41	7.59	34.05
S3	2.39	0.96	1.05	0.95	16.40	6.13	14.53	42.40
S4	1.97	0.41	1.07	0.55	3.48	6.61	3.34	17.43
S5	3.51	0.63	1.67	1.79	6.78	6.93	7.13	28.44
S6	2.83	0.46	1.31	3.27	13.78	5.79	17.50	44.94
S7	3.15	0.64	1.29	2.49	11.83	7.59	14.20	41.21
S8	2.29	0.58	1.34	2.32	8.06	5.59	15.36	35.53
S9	2.34	0.91	1.87	2.98	4.39	4.54	15.12	32.15
S10	3.41	3.92	1.03	3.73	37.66	4.71	32.00	86.45
S11	4.72	0.56	1.74	2.45	12.19	9.07	19.58	50.33
S12	4.15	0.59	1.26	4.08	16.14	5.37	61.41	93.00
S13	4.27	0.62	1.30	3.88	5.60	5.37	80.63	101.67
S14	3.63	0.52	1.37	3.20	7.40	5.02	50.88	72.03
S15	4.92	0.72	1.49	4.47	6.32	6.89	75.15	99.95

3 讨论与结论

(1) 仙山湖周边 0 ~ 30 cm 土层中, 检测的 7 种元素铜 (Cu)、锌 (Zn)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、

表 9 仙山湖周边土壤 > 20 ~ 30 cm 土层中重金属单项潜在生态风险系数 (E_r^i) 和综合潜在生态风险指数 (RI)
Table 9 Potential ecological risk factor and index of single element at 20 cm < d ≤ 30 cm soil layer around Xianshanhu

样点	单项潜在生态风险系数 (E_r^i)							RI
	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg	
S1	2.67	0.96	1.54	3.03	1.26	7.22	5.06	21.73
S2	2.32	0.47	1.58	1.06	15.24	6.16	13.68	40.51
S3	2.17	0.75	1.14	0.57	8.26	5.22	6.32	24.42
S4	1.94	1.04	1.05	0.54	11.09	7.96	3.68	27.29
S5	3.33	0.68	1.62	2.27	12.64	6.88	12.54	39.96
S6	2.57	0.51	1.19	2.43	11.32	5.14	19.11	42.27
S7	2.61	0.58	1.21	2.41	12.98	6.22	48.25	74.26
S8	2.58	5.29	1.55	2.55	13.10	5.85	36.51	67.43
S9	2.46	2.12	1.66	2.23	8.77	4.99	10.73	32.96
S10	3.34	0.39	1.08	3.11	17.18	4.81	42.64	72.56
S11	3.79	0.64	1.56	2.10	18.33	8.03	11.36	45.81
S12	4.28	0.74	1.67	2.36	8.54	7.95	20.59	46.13
S13	3.65	0.51	1.84	2.94	4.96	7.05	20.54	41.49
S14	3.53	0.48	1.36	3.14	6.13	0.58	56.91	72.13
S15	4.20	0.53	1.34	3.77	3.98	9.13	92.51	115.47

砷 (As)、汞 (Hg)，有 4 种元素含量低于国家土壤环境一级标准，分别为 Cu、Cr、Pb、As；Zn、Cd、Hg 在部分点位含量超标，其中 Hg 超标率最高，为 28.9%，Zn 的超标率为 15.6%，Cd 在 S10 点位略有超标；从元素的变异系数来看，重金属 Zn、Hg、Cd 的离散性相对较大；S10 点位的 Cd、Zn 含量超标，S8 点位的 Zn 含量超标，可能存在人为扰动痕迹。

(2) 湿地受不同的自然环境和人类活动影响，土壤重金属在水平方向上分布差异显著。人类活动频繁的湿地边缘地带和河流中下游地区的土壤重金属污染相对严重^[15~17]。湿地道路土壤污染受交通流量影响较大，多集中于道路沿线和交通密集区^[16]。本文也可以看出，靠近公路的 S5、S11、S12 的 Cu、Cd 含量较高，下游的 S13、S14、S15 的 Pb、Cu、Hg 含量较高。在 2 块样地对比中，靠近公路的 S11 的 Cu、Cd 及 As 含量也均高于不靠近公路的 S8，说明公路行车、人类活动对土壤的重金属含量会造成影响。此外，S4 为上游河流边，其 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 含量为全部样点中最低值或较低值。苗圃地、湿地岸边等土地利用类型对土壤重金属含量的影响不明显。

(3) 土壤质地是影响重金属剖面变化的重要因素。人类活动对湿地土壤重金属剖面变化影响也日益显著。土地利用方式不同会影响土壤重金属剖面变化^[18]。但在本次研究中，多数元素的土壤垂直分布无明显规律，只有 Cd 在表层土壤中含量高于中层及深层土壤，苗圃地类型中 Pb 在深层土壤中含量低于表层、中层土壤含量。

(4) 仙山湖周边土壤重金属地累积指数均为负值，属于无污染。

(5) 根据 RI ，在仙山湖周边三层土壤中，除重金属 Hg 外的其他元素均处于轻微的生态风险等级，无潜在生态风险影响。S12、S13、S14、S15 样点 Hg 的生态风险等级为中等或较强，Hg 的污染应该引起当地管理部门的重视。在本研究中，Zn 的超标量最高，最高值超过背景值 5 倍，但其 RI 基本小于 1，为全部测定重金属元素中的最低值，这与邵学新等^[4]的研究结果一致，主要是由于 Zn 作为植物的必需营养元素，其对生物的毒性响应因子较小。

(6) 仙山湖湿地公园周边土壤测定结果表明，湿地公园周边土壤总体处于健康状态。公路行车、湖区下游对土壤重金属含量有一定影响，苗圃地等农业经营活动及湿地边岸对土壤重金属指标影响不明显。

参考文献:

[1] Bocher P, Caurant F, Miramand P, et al. Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zooplankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean[J]. Polar Biol, 2003, 26: 759 – 767.

[2] Jara-Marinime M E, Soto-Jimenez M F, Paez-Osuna F. Trophic relationships and transference of cadmium, copper, lead and zinc in a subtropical coastal lagoon food web from S E Gulf of California[J]. Chemosphere, 2009, 77 (10) : 1366 – 1373.

- [3] Adhikari S, Ghosh, L Giri B S, et al. Distributions of metals in the food web of fishponds of Kolleru Lake, India[J]. *Ecotoxicol EnvironSafe*, 2009, 72 (4): 1242 – 1248.
- [4] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *湿地科学*, 2007, 5 (3): 253 – 259.
- [5] 张芬, 杨长明, 潘睿捷. 青山水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 (9): 2625 – 2630.
- [6] 张华, 李贺鹏, 岳春雷, 等. 仙山湖国家湿地公园生态系统服务功能价值评估[J]. *广东林业科技*, 2015, 31 (5): 41 – 46.
- [7] 张华, 傅宇, 朱培, 等. 长兴仙山湖国家湿地公园湿地资源及其保护研究[J]. *华东森林经理*, 2014, 28 (4): 44 – 47.
- [8] 王正祥, 白炳书, 程伟. 长兴泗安水库水能计算和水电站装机容量的选择[J]. *浙江水利科技*, 1998, (4): 57 – 58.
- [9] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo J*, 1969, 2 (3): 108 – 118.
- [10] 胡恭任, 于瑞莲. 应用地积累指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染[J]. *中国矿业*, 2008, 17 (4): 47 – 51.
- [11] Loska K. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environ Int*, 2004, 30: 159 – 165.
- [12] 李倩, 秦飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (12): 2384 – 2394.
- [13] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].北京: 国家环境保护局、国家技术监督局, 1995.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment ecological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14 (8): 975 – 1001.
- [15] Bai J H, Cui B S, Yang Z F, et al. Heavy metal contamination of cultivated wetland soils along a typical plateau lake from southwest China[J]. *Environ Earth Sci*, 2010, 59: 1781 – 1788.
- [16] Su L Y, Liu J L, Christensen P. Spatial distribution and ecological risk assessment of metals in sediments of Baiyangdian wetland ecosystem [J]. *Ecotoxicology*, 2010, 20: 1107 – 1116.
- [17] Liu G N, Tao L, Liu X H, et al. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China [J]. *J Geochem Explor*, 2013, 132: 156 – 163.
- [18] 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (3): 763 – 768.