

Dynamic and Pollution Characteristics of Soil Mercury of Dahuofang Reservoir Research

Qing Zhang, Sisi Tian, Guiyu Zhou, Lei Liang*

Liaoning University Environmental College, Shenyang Liaoning
Email: syllshenyang@163.com

Received: Oct. 10th, 2015; accepted: Oct. 23rd, 2015; published: Oct. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

To explore the pollution situation and the environmental risk of mercury in Dahuofang reservoir, we choose 10 sampling points, collected 30 soil samples, 20 water samples and 30 air samples to analyze the contents and distribution of mercury in soil, water and air in different areas. We discuss the pollution status and environmental risks of mercury in soil, analyze the biological availability and potential risks and explore the relationship between the atmospheric mercury and the soil mercury enrichment by the geoaccumulation index method and potential ecological risk index method. The results indicated that the average content of mercury in the soil of Dahuofang reservoir were 27.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$, the variation coefficient was 69.32, The maximum was 82.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$, the minimum was 12.49 $\mu\text{g}/\text{kg}$; The average content of mercury in the collected water of Dahuofang reservoir were 19.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$, The variation coefficient was 71.35, the maximum was 53.82 $\mu\text{g}/\text{kg}$, the minimum was 2.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The released mercury flux into the atmosphere was 17.80 - 62.47 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$, the average was 37.76 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$. The correlation coefficient between mercury content in soil and the mercury concentration in atmospheric was 0.81** ($P < 0.01$), they were significantly correlated. The soil mercury enrichment contributed greatly to atmospheric mercury pollution. According to the spatial distribution of mercury, it indicated that the river was slightly polluted. The mercury content in sediment of Hun River and Suzi River was higher, and the content of mercury in water was lower. The evaluation of soil mercury pollution by geoaccumulation index method and the soil mercury ecological risk assessment by potential ecological risk index method. The results showed that the pollution level and the ecological risk of Dahuofang reservoir were low, atmospheric mercury pollution contributed great to soil mercury enrichment.

Keywords

Dahuofang Reservoir, Soil Mercury, Pollution Characteristics, Risk Assessment

*通讯作者。

大伙房水库土壤汞动态与污染特征研究

张庆, 田思思, 周贵宇, 梁雷*

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

Email: syllshenyang@163.com

收稿日期: 2015年10月10日; 录用日期: 2015年10月23日; 发布日期: 2015年10月29日

摘要

为了解大伙房水库汞污染现状和环境风险, 选择10个采样点, 采集了30个土壤样品, 20个水体样品, 30个空气样品, 分析不同区域土壤、水体和大气中的总汞含量及分布, 并采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对比探讨了土壤总汞污染现状和环境风险, 分析其生物可利用性及其潜在风险, 探究大气汞与土壤汞富集的关系。结果表明, 大伙房水库土壤中的汞平均含量分别为27.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 变异系数为69.32, 最大值为82.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 最小值为12.49 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 大伙房水库采集水中的汞平均含量分别为19.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 变异系数为71.35, 最大值为53.82 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 最小值为2.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。向大气释放汞的年排放通量17.80~62.47 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$, 平均37.76 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 。土壤汞含量与大气汞浓度的相关系数为0.81** ($P < 0.01$), 相关显著, 土壤汞富集对大气汞污染的贡献较大。从汞的空间分布表明, 社河流域汞金属污染较低, 浑河苏子河流域沉积物汞金属含量较高, 水中汞含量较低。地累积指数的土壤汞污染评价和潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价, 两种评价结果表明大伙房水库污染水平和生态风险都较低, 大气汞污染对土壤汞富集的贡献较大。

关键词

大伙房水库, 土壤汞, 污染特征, 风险评价

1. 引言

汞在水库生态系统中的环境行为、环境效应研究是评价汞环境风险的重要内容, 也是国内外科学家高度关注的科学问题之一[1]-[6]。近年来国际上许多科学研究发现水库蓄水和淹没周围的土地, 都会引起水库鱼体汞含量显著升高[7] [8]。水库消落带既是汞的汇, 又是汞的源, 汞在水库中的环境效应日益受到关注[9]-[16]。辽河流域大伙房水库是抚顺、沈阳两市生活饮用水的重要水源地, 也是我国最大的生活饮用水水源地, 因其汇水区内的矿山开采而面临严重的重金属污染问题。目前的研究中, 仅有极少数学者就大伙房水库沉积物重金属总量进行了分析[17] [18], 但关于大伙房水库消落带土壤中汞的污染评价主要针对土壤中的总汞, 缺乏对汞的进行风险评价, 特别是有关汞的生物可利用性的潜在风险和大气汞与土壤汞富集的关系研究还很少[19]-[21]。采用土壤和水体中的总汞进行风险评价对研究汞的污染现状更有现实意义。本文以大伙房水库河岸土壤为研究对象, 分析不同区域土壤、水体和大气中的总汞含量及分布, 并采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对比探讨了土壤总汞污染现状和环境风险, 分析其生物可利用性及其潜在风险, 探究大气汞与土壤汞富集的关系, 旨在为大伙房水库土壤重金属防治和库区生态环境保护提供基础数据, 以期为保障水库饮用水安全及合理制订环境政策提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

大伙房水库位于抚顺市区的东部，建成于 1958 年，流域面积 5437 km²，最大水深 37 m，最大库容量 21.87 × 10⁸ m³，是一座集防洪、供水、灌溉、发电和养鱼等多种功能综合利用的大型水利枢纽工程，库区为集中式生活饮用水水源地一级保护区，城市供水能力 5.5 × 10⁸ m³，城市供水服务人口 500 × 10⁴ 人。流域内主要有浑河(清原段)、苏子河和社河 3 条入库河流，其中浑河是大伙房水库的主要供水河流。

2.2. 采样点布设及样品采集

在大伙房水库库区两岸设置 10 个采样点，同时采用 GPS 定位，同时调查记录样地的自然生境。根据库前，库中，库尾同时考虑土壤环境，地理环境，农作物等作为采样依据，选取确定代表性强的采样点。

具体采样点布设如图 1 所示，采样点情况如表 1，采样时间为 2013 年 5 月。

Table 1. Summary of sampling point information

表 1. 采样点信息汇总表

采样点编号	坐标	土壤采集环境
1	N: 41°49'31" E: 124°6'50"	河岸荒地
2	N: 41°48'54" E: 124°7'10"	种植玉米地工作带
3	N: 41°47'27" E: 124°8'4"	河畔
4	N: 41°48'55" E: 124°7'11"	种植玉米地工作带
5	N: 41°53'31" E: 124°10'27"	沼泽、水稻田
6	N: 41°51'32" E: 124°10'21"	库底，林场附近
7	N: 41°55'49" E: 124°12'37"	荒地
8	N: 41°54'54" E: 124°13'57"	荒地
9	N: 41°54'57" E: 124°13'13"	荒地
10	N: 41°56'28" E: 124°17'18"	养殖场



Figure 1. Sampling profile in the Dahuofang reservoir
图 1. 大伙房水库采样点位

采用采样器采取 0~10 cm、10~15 cm、15~30 cm 土样，现场用塑料自封袋密封，置于冷冻箱中保存，采样结束后一并带回实验室。每个样品分出部分湿样留做粒度分析，剩余部分置于冰箱-20℃下冷冻。干燥处理后的样品用磁钵研磨，过 100 目(0.15 mm)尼龙筛，置于塑料自封袋中保存备测。

大气样品用 Q C- II 型便携式空气采样器，以金汞齐富集法，用金膜富集管收集大气汞[22] [23]。

2.3. 分析方法

土壤总汞采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-KMnO}_4$ 水浴消解[24]，使土壤中的重金属离子游离出来，进而进行测定的原理，然后采用冷原子荧光法进行测定。

称取 1 g 样品放入 50 ml 烧杯中，分别加入 3 ml 浓硫酸、3 ml 浓硝酸及 2 ml 5% 高锰酸钾溶液，加盖表面皿，放于水浴加热 30 min，高锰酸钾如退色则需补充滴加，冷却后滴加 20% 盐酸羟胺至高锰酸钾褪色，移至 50 ml 容量瓶中定容。从容量瓶中取 5 ml 溶液在圆形反应瓶中，加入 1 ml 10% 氯化亚锡，测定含量。土壤和水体中的总汞采用 F732-V 冷原子吸收测汞仪测定，检出限为 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

大气样品用 Q C- II 型便携式空气采样器，以金汞齐富集法，用金膜富管收集大气汞。所采大气样的汞用冷原子荧光法(CVAFS)测定[25]。使用仪器为 FLURCE-II 型冷原子荧光测汞仪。

2.4. 基于地累积指数的土壤汞污染评价

目前，国内外学者常采用地累积指数(geoaccumulation index) [26]来评价重金属的污染现状。本研究也采用该方法来分析大伙房水库土壤中总汞及其赋存形态的污染程度，其计算方法为：

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / kB_i]$$

式中， I_{geo} 为 Hg 的地累积指数， C_i 为土壤中 Hg 的实测值， B_i 为土壤中 Hg 的地球化学背景值，本研究选取辽宁省土壤汞背景值($37.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) [27]作为汞的地球化学背景值， k 为考虑到造岩运动可能引起的背景值变动而取的系数，一般取 1.5。根据 I_{geo} 值的计算结果，土壤中重金属的污染程度分为 7 级(0~6 级)，见表 2。

2.5. 基于潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价

目前，大多数学者常采用 Hkanson [28]提出的潜在生态危害指数法(potential ecological risk factor)评价土壤或沉积物中重金属的生态风险。本研究也采用该方法对大伙房水库土壤中汞及其赋存形态的潜在生

Table 2. Geo-accumulation index and degree of heavy metal pollution
表 2. 地累积指数与重金属污染程度

I_{geo}	0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无~中	中	中~强	强	强~极强	极强

态危害进行评价。计算方法如下：

$$E_r = T_r \cdot C_i / C_0$$

式中, E_r 为 Hg 的潜在生态危害系数, C_i 为土壤中汞的测定值, C_0 为汞的参比值, T_r 为汞的毒性系数。本研究采用大伙房水库土壤环境汞的自然背景含量($37.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) [27] 为参比值, 汞的毒性系数取 $T_r = 40$ 。汞的潜在生态危害系数和污染程度的关系见表 3。

2.6. 质量控制与数据处理

采用标准物质 GBW07406 (GSS-6) 进行质量控制, 标准土样测定结果显示汞的平均回收率为 89.8%~106.5%。所用化学试剂 HNO_3 、 H_2SO_4 为优级纯, 其它为分析纯, 水为超纯水。采用 Excel2003 和 SPSS 17.0 软件对数据进行处理和分析。

3. 结果与分析

3.1. 大伙房水库汞金属分布特征

大伙房水库采集土壤中的汞平均含量分别为 $27.7619 \mu\text{g}/\text{kg}$, 变异系数为 69.32, 最大值为 $82.4789 \mu\text{g}/\text{kg}$, 最小值为 $12.4965 \mu\text{g}/\text{kg}$; 大伙房水库采集水中的汞平均含量分别为 $19.8707 \mu\text{g}/\text{kg}$, 变异系数为 71.35, 最大值为 $53.8232 \mu\text{g}/\text{kg}$, 最小值为 $2.9288 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。表 4 给出了大伙房水库表层沉积物中汞含量的指标值, 并与辽宁省土壤重金属背景值、辽河水系沉积物平均值进行比较。由表 4 可知, 大伙房水库土壤中汞元素的含量最大值高于辽宁省土壤元素背景值, 均值低于辽河水系沉积物平均值。大伙房水库水体中汞元素的含量最大值高于辽宁省土壤元素背景值, 均值低于辽河水系沉积物平均值。

由大伙房水库土壤和水中汞含量空间分布图(图 2)可以看出, 土壤汞元素最低值均出现在采样点 1, 土壤中汞元素的高值均出现在采样点 7, 水体中汞元素最低值出现在采样点 7, 水体中的汞含量最高值出现在采样点 10。采样点 2 到采样点 5 均属于社河流域, 采样点 10 属于浑河流域, 采样点 7 属于苏子河和浑河混合流域, 和由此可以看出, 社河流域汞金属污染较低, 浑河苏子河流域沉积物汞金属含量较高, 水中汞含量较低。

3.2. 基于地累积指数的土壤汞污染评价

大伙房水库土壤中汞的地累积污染指数图 3。从中可以看出, 大伙房水库土壤中, 汞的地累积指数多数都小于 0, 属于无污染。采样点 7 地质累计指数接近 1 级, 中轻度污染, 其对库区的水生生物和动物的危害很小。在土壤深度比较中, 发现, 多数的采样点表层土壤地质累积指数高于底层土壤。

3.3. 基于潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价

大伙房水库土壤中汞的潜在生态危害指数见图 4。从中可以看出, 大伙房水库土壤中的汞的潜在生态危害指数都小于 40, 最大值略高于 80, 处于低生态风险。大部分采样点的汞都小于 40, 处于低生态风险, 但采样点 7 的指数达到了中等程度潜在生态危害。总体来说, 采用汞的评价结果显示, 大伙房水

Table 3. Ranking of potential ecological risk
表 3. 潜在生态风险分级

E_i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
潜在生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强

Table 4. Mercury content of soil and water in dahuofang reservoir
表 4. 大伙房水库土壤和水中汞含量统计结果

	土壤中的 Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	水体中的 Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	来源
最大值	82.47	53.82	本研究
最小值	12.49	2.92	本研究
均值	27.76	19.87	本研究
标准差	19.24	14.18	本研究
变异系数(%)	69.32	71.35	本研究
中国土壤环境质量标准值(I 级土壤)	150	150	GB15618-1995 [28]
辽宁省土壤背景值	37	37	
辽河水系表层沉积物含量	140	140	[29]

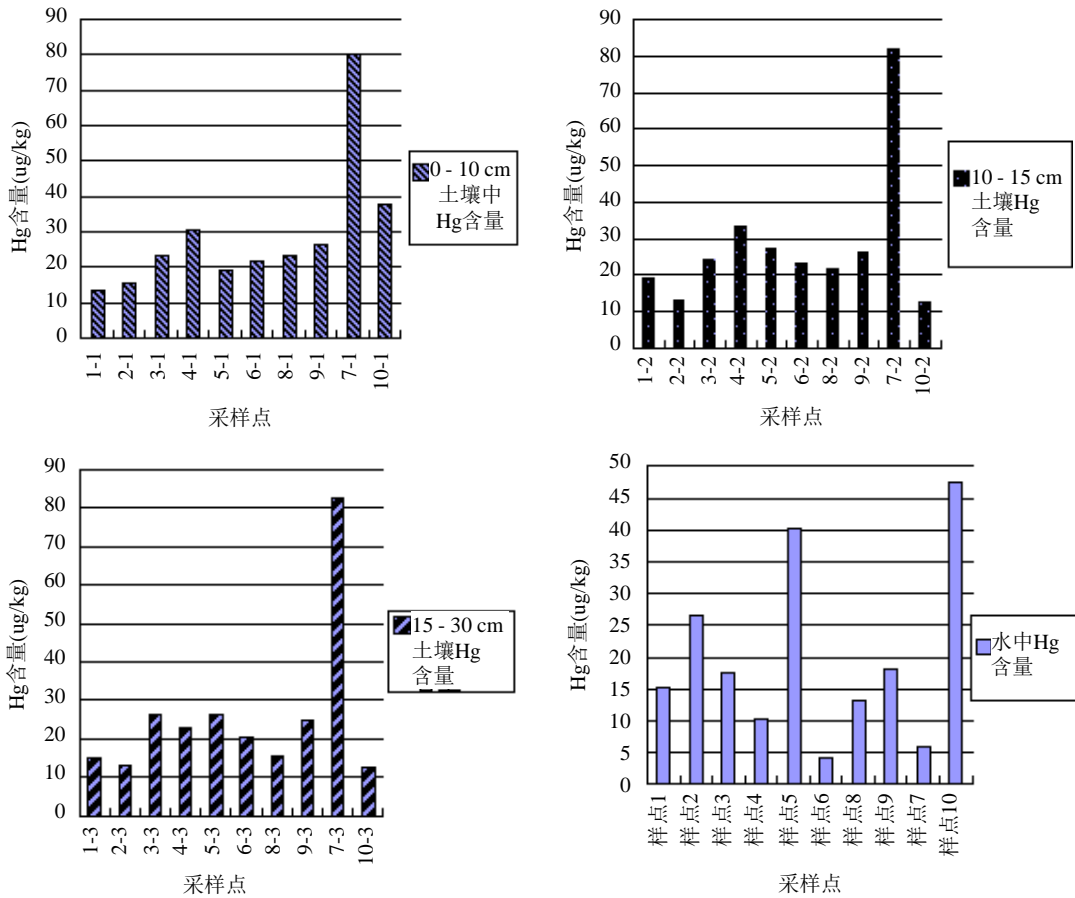


Figure 2. Spatial distribution maps of the mercury content of Soil and water in Dahuofang reservoir
图 2. 大伙房水库土壤和水中汞含量空间分布图

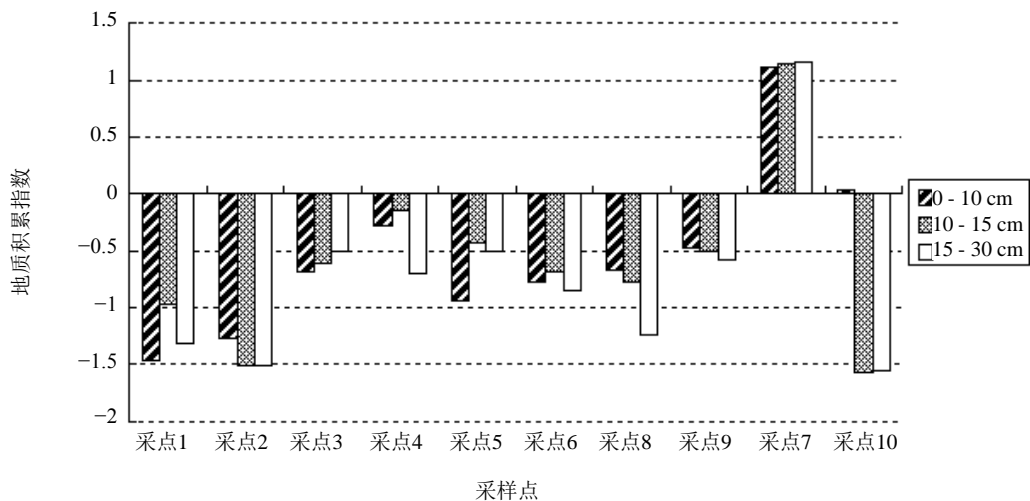


Figure 3. Geoaccumulation index of mercury in the Dahuofang reservoir soil
图 3. 大伙房水库土壤中汞的地累积指数

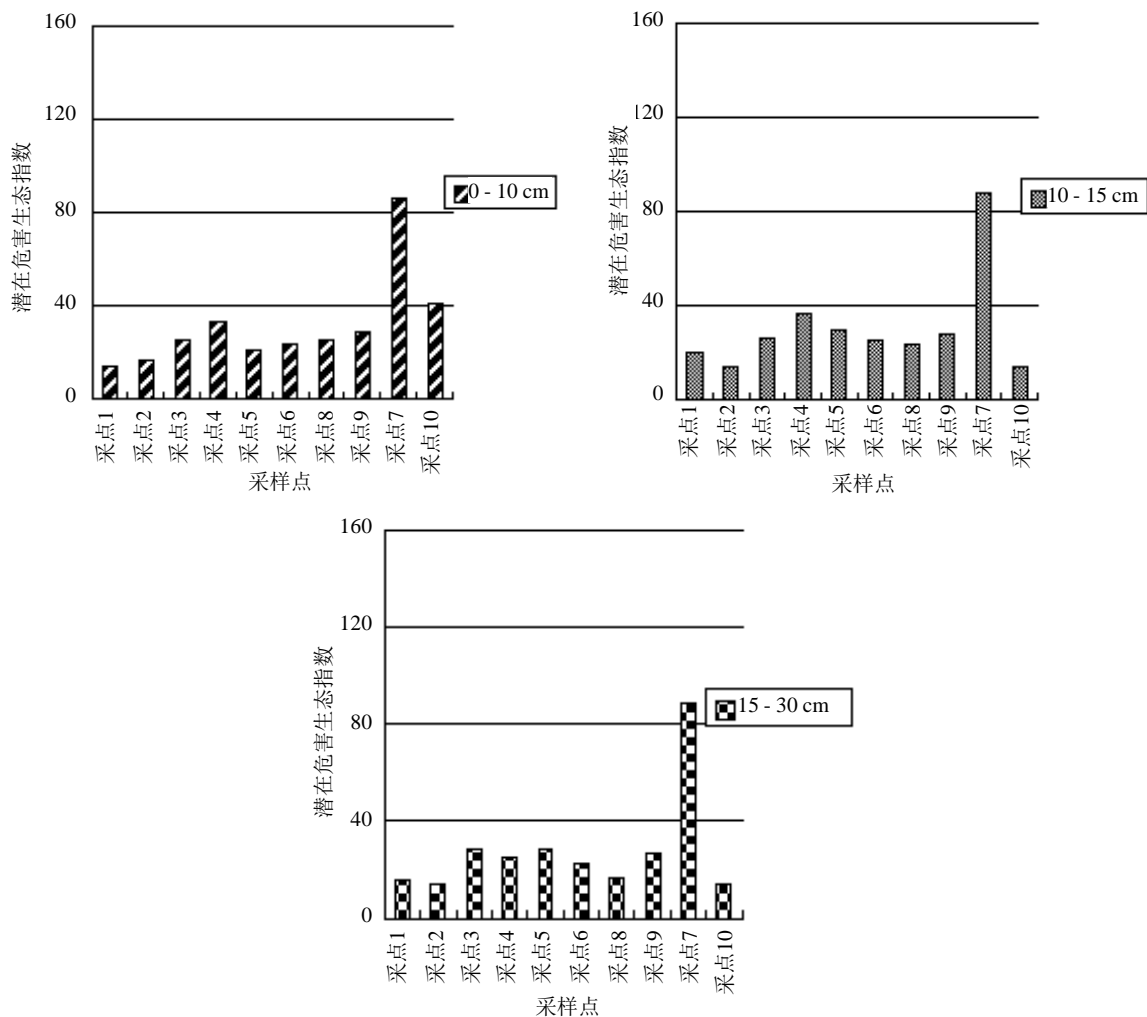


Figure 4. Potential ecological risk index of mercury in the Dahuofang reservoir soil
图 4. 大伙房水库土壤中汞的潜在生态危害指数

库土壤中汞的潜在生态风险较低。

3.4. 大气汞对土壤汞富集的影响

测得调查区土壤汞含量范围为 12.49~82.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，平均 27.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。向大气释放汞的年排放通量 17.80~62.47 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ，平均 37.76 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 。经统计分析得出土壤汞含量与大气汞浓度的相关系数为 0.89** ($P < 0.01$)，相关显著。由此可见，大气汞污染对土壤汞富集的贡献较大。就点污染源而言，随着距距离的变化，土壤汞含量相应变化(图 5)。这与大气汞浓度变化趋势一致(图 6)，这进一步证明，大气汞对土壤汞富集的贡献明显。

4. 结论

1) 大伙房水库采集土壤中的汞平均含量分别为 27.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，变异系数为 69.32，最大值为 82.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，最小值为 12.49 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；大伙房水库采集水中的汞平均含量分别为 19.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，变异系数为 71.35，最大值为 53.82 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，最小值为 2.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

从汞的空间分布表明，社河流域汞金属污染较低，浑河苏子河流域沉积物汞金属含量较高，水中汞含量较低。

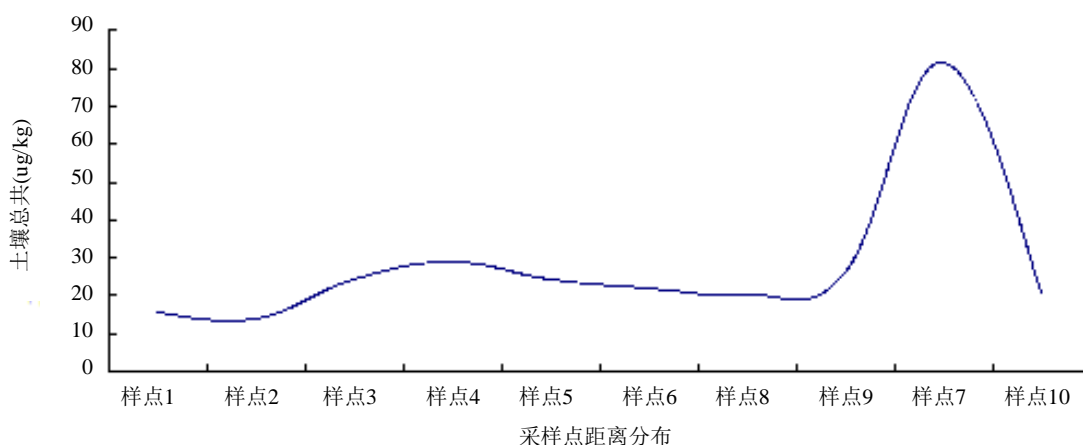


Figure 5. Mercury content in soil varying with the distance

图 5. 土壤汞含量与距离的关系

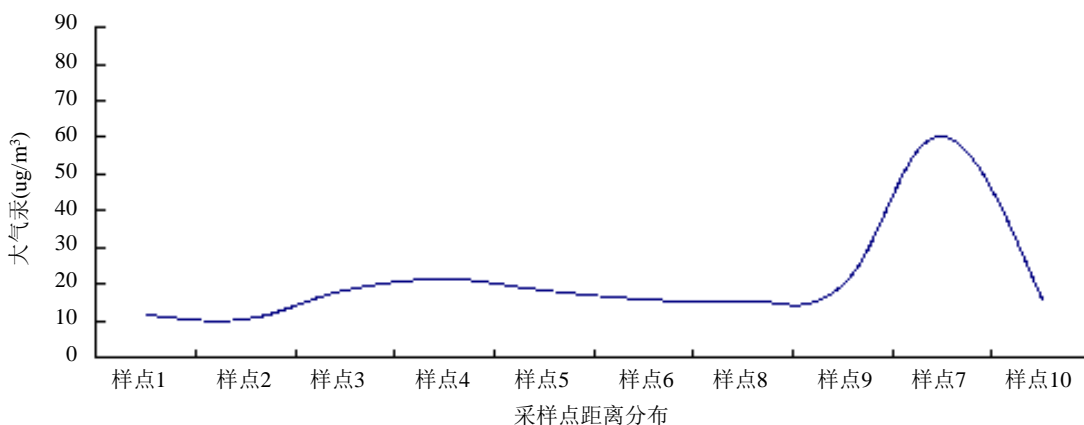


Figure 6. Mercury content in air varying with the distance

图 6. 不同距离处大气汞浓度

2) 基于地累积指数的土壤汞污染评价, 除采样点 7 接近中度污染, 其他采样点均属于无污染。

3) 基于潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价, 采样点 7 的指数达到了中等程度潜在生态危害, 其他采样点均处于低生态风险。

4) 向大气释放汞的年排放通量 17.80~62.47 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$, 平均 37.76 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 。土壤汞含量与大气汞浓度的相关系数为 0.81** ($P < 0.01$), 相关显著, 土壤汞富集对大气汞污染的贡献较大。

5) 总的来说, 地累积指数的土壤汞污染评价和潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价, 两种评价结果均显示大伙房水库污染水平和生态风险都较低。大气汞污染对土壤汞富集的贡献较大。

基金项目

沈阳市科技攻关项目(F12-178-9-00)干湿交替环境下土壤氮磷动态与通量研究。

参考文献 (References)

- [1] Huguet, L., Castelle, S., Schäfer, J., et al. (2010) Mercury methylation rates of biofilm and plankton microorganisms from a hydroelectric reservoir in French Guiana. *Science of the Total Environment*, **408**, 1338-1348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.058>
- [2] Khoshnamvand, M., Kaboodvandpour, S. and Ghiasi, F. (2013) A comparative study of accumulated total mercury among white muscle, red muscle and liver tissues of common carp and silver carp from the Sanandaj Gheshlagh Reservoir in Iran. *Chemosphere*, **90**, 1236-1241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.061>
- [3] Feng, X.B., Bai, W.Y., Shang, L.H., et al. (2011) Mercury speciation and distribution in Aha Reservoir which was contaminated by coal mining activities in Guiyang, Guizhou, China. *Applied Geochemistry*, **26**, 213-221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.11.021>
- [4] He, T.R., Feng, X.B., Guo, Y.N., et al. (2008) The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: A case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China. *Environmental Pollution*, **154**, 56-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.11.013>
- [5] Bravo, A.G., Loizeau, J.L., Bouchet, S., et al. (2010) Mercury human exposure through fish consumption in a reservoir contaminated by a chlor-alkali plant: Babeni reservoir (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, **17**, 1422-1432. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-010-0328-9>
- [6] Atta, A., Voegborlo, R.B. and Agorku, E.S. (2012) Total mercury distribution in different tissues of six species of freshwater fish from the Kpong hydroelectric reservoir in Ghana. *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**, 3259-3265. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2186-4>
- [7] Jackson, T.A. (1988) The problem in recently formed reservoirs of northern Manitoba (Canada): Effects of impoundment and other factors on the production of methyl mercury by microorganisms in sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 97-121. <http://dx.doi.org/10.1139/f88-012>
- [8] Meister, C.I., et al. (1979) Source and level of mercury in a new impoundment. *Journal (American Water Works Association)*, **71**, 574-576.
- [9] Gray, J.E. and Hines, M.E. (2009) Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA. *Chemical Geology*, **258**, 157-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.09.023>
- [10] Wang, Q., Feng, X.B., Yang, Y.F., et al. (2011) Spatial and temporal variations of total and methylmercury concentrations in plankton from a mercury-contaminated and eutrophic reservoir in Guizhou Province, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **30**, 2739-2747. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.696>
- [11] Ahn, M.C., Kim, B., Holsen, T.M., Yi, S.M. and Han, Y.J. (2010) Factors influencing concentrations of dissolved gaseous mercury (DGM) and total mercury (TM) in an artificial reservoir. *Environmental Pollution*, **158**, 347-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.08.036>
- [12] 王健康, 高博, 周怀东, 陆瑾, 王雨春, 殷淑华, 郝红, 袁浩 (2012) 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价. *环境科学*, **5**, 1693-1699.
- [13] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 何强, 叶姜瑜, 黎司, 曹琳 (2009) 三峡库区消落区水体-沉积物重金属迁移转化特征. *环境科学*, **12**, 3481-3487.
- [14] 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (2012) 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价. *环境科学*, **2**,

612-617.

- [15] 张雷, 秦延文, 赵艳明, 马应群, 曹伟, 贾静 (2012) 三峡澎溪河回水区消落带岸边土壤重金属污染分布特征. *环境科学学报*, **12**, 3021-3029.
- [16] 储立民, 常超, 谢宗强, 熊高明 (2011) 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响. *土壤学报*, **1**, 192-196.
- [17] 贺斌, 郭海英 (2010) 大伙房水库底质重金属污染分析. *现代农业科技*, **5**, 259-260.
- [18] 齐晓君, 王恩德, 付建飞 (2008) 大伙房水库底质重金属污染评价. In: 中国环境科学学会, Ed., *中国环境科学学会学术年会优秀论文集(上卷)*, 中国环境科学学会, 北京, 480-483.
- [19] 单孝全, 王仲文 (2001) 形态分析与生物可给性. *分析试验室*, **6**, 103-108.
- [20] 靳永卿 (2007) 汞的形态分析及汞环境污染的评价. 硕士论文, 陕西师范大学, 西安.
- [21] 赵健 (2011) 长江口滨岸潮滩汞的环境地球化学研究. 博士论文, 华东师范大学, 上海.
- [22] Brosset, C. and Iverfeldt, Å. (1989) Interaction of solid gold with mercury in ambient air. *Water, Air, and Soil Pollution*, **43**, 147-168. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00175590>
- [23] Dumarey, R., Dams, R. and Hoste, J. (1985) Comparison of the collection and adsorption efficiency of activated charcoal, silver, and gold for the determination of vapor phase atmospheric mercury. *Analytical Chemistry*, **57**, 2638-2643. <http://dx.doi.org/10.1021/ac00290a047>
- [24] 丁振华, 王文华 (2003) 不同消解方法对土壤样品中汞含量测定的影响. *生态环境*, **1**, 1-3.
- [25] Temmerman, E., Vandecasteele, C., Vermeir, G., Leyman, R. and Dams, R. (1990) Sensitive determination of gaseous mercury in air by cold vapour atomic fluorescence spectrometry after amalgamation. *Analytica Chimica Acta*, **236**, 371-376.
- [26] Müller, G. (1969) Index of geo ac cumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, **2**, 108-118.
- [27] 唐将, 钟远平, 王力 (2008) 三峡库区土壤重金属背景值研究. *中国生态农业学报*, **4**, 848-852.
- [28] 国家环境保护局 (1995) 土壤环境质量标准(GB15618-1995). 中国环境科学出版社, 北京.
- [29] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 王幸福, 盛向军, 陈吉平 (2008) 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究. *环境科学*, **9**, 2413-2418.