

长株潭地区集中式饮用水水源地周边 土壤环境质量监测与评价

杨海君¹, 张海涛¹, 许云海¹, 刘亚宾¹, 金红玉¹, 王雅玲¹, 刑宏霖^{1,2}

(1. 湖南农业大学 植物保护学院, 长沙 410128; 2. 湖南省环境监测中心站, 长沙 410014)

摘要: 为了解长株潭地区集中式饮用水水源地周边土壤环境质量情况, 以长株潭地区 6 处具有代表性的集中式饮用水水源地周边土壤为监测对象, 对采集土壤样品中的 pH 值、阳离子交换量、有机质含量及典型污染物进行了测定与分析。结果表明: 长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量存在差异; 30 个监测点位土壤中 Cd、Pb、Zn、As 和 Ni 平均含量超标率分别为 63.33%、63.33%、73.33%、33.33%、13.33%, Hg、Cr、Cu 平均含量超标率均为 16.67%, 六氯环己烷、滴滴涕及苯并[a]芘含量均未超标; 单因子评价和综合评价得出, 水源地周边土壤主要以无机污染为主, 只有 3 个监测点位存在有机污染, 所有监测点位的土壤均受到无机有机复合污染; 主成分分析得出, Cr、Cu、Ni、Zn、六氯环己烷、Cd、As、苯并[a]芘、Hg 等污染物所占比重较大, 构成了监测点位土壤污染的主要成分; 聚类分析发现, 水源地周边土壤中苯并[a]芘、六氯环己烷及滴滴涕可归为一类, Cr、Ni、Cu 可归为一类, Pb、Zn 可归为一类, 而 As、Hg、Cd 各单独归为一类, 并对饮用水水源地周边土壤中污染物来源及防治措施进行分析与讨论。研究结果为保护长株潭地区集中式饮用水水源地安全提供了理论依据。

关键词: 长株潭地区; 集中式饮用水水源地; 土壤; 环境质量; 评价

中图分类号: X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0150-07

Monitoring and Evaluation of Soil Environmental Quality Around the Concentrated Drinking Water Source in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Area

YANG Haijun¹, ZHANG Haitao¹, XU Yunhai¹, LIU Yabin¹,

JIN Hongyu¹, WANG Yaling¹, XING Honglin^{1,2}

(1. Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Environmental Monitoring Station of Hunan Province, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to understand the environmental quality of the surrounding drinking water source in Changsha—Zhuzhou—Xiangtan area, The pH value, cation exchange capacity, organic matter content and typical pollutants in the collected soil samples from the surrounding soil of the centralized drinking water source area in Changsha—Zhuzhou—Xiangtan area were measured and analyzed. The results showed that there were differences in pH value, cation exchange capacities and organic matter contents in the surrounding soil of six centralized drinking water sources in Changsha—Zhuzhou—Xiangtan area; the average exceeding rates of contents of Cd, Pb, Zn, As and Ni in the 30 monitoring sites were 63.33%, 63.33%, 73.33%, 33.33% and 13.33%, respectively, the average exceeding rates of Hg, Cr, Cu were 16.67%, Hexachlorocyclohexane, DDT and benzo [a] pyrene did not exceed the standard values; single factor evaluation and comprehensive evaluation showed that the surrounding soil of drinking water sources area was mainly polluted by inorganic pollutants, and only 3 monitoring points had organic pollution. All the soils at the monitoring sites were subjected to the combined inorganic-organic pollution; the principal component analysis showed that Cr, Cu, Ni, Zn, Hexachlorocyclohexane, Cd, As, Benzo [a] pyrene and Hg accounted for the large proportion of

收稿日期: 2017-07-20

修回日期: 2017-08-08

资助项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ5015); 2016 年湖南省环保专项资金(湘财建指[2016]49 号)

第一作者: 杨海君(1974—), 男, 湖南长沙县人, 教授, 博士, 主要研究方向为环境污染与治理。E-mail: 1227677453@qq.com

通信作者: 刑宏霖(1974—), 男, 湖南长沙市人, 高级工程师, 主要从事环境监测与分析研究。E-mail: 825593561@qq.com

2011 年全国土壤环境质量例行监测工作方案的通知 >》(总站生字[2011]161 号),没有列入项目的监测方法参照《全国土壤污染状况调查样品分析测试技术规定》(国家环保总局,2006 年)(详见表 1)。

表 1 土壤样品制备及分析方法

| 序号 | 检测项目 | 样品制备方法 | 样品前处理方法 | 分析方法 | 检出限/(mg·kg ⁻¹) |
|----|--------|------------|-------------|-------------|--|
| 1 | pH | 风干研磨 20 目 | 水浸提 | 玻璃电极法 | 0.01~0.1 |
| 2 | 有机质含量 | 风干研磨 20 目 | 重铬酸钾—硫酸 | 重铬酸钾容量法 | — |
| 3 | 阳离子交换量 | 风干研磨 20 目 | 蒸馏、离心、乙酸铵交换 | 容量法 | 0.10~2.5 (cmol·kg ⁻¹) |
| 4 | 镉 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱法 | 0.001~0.030 |
| 5 | 汞 | 风干研磨 100 目 | 1+1 王水消解 | 冷原子吸收分光光度法 | 0.0004~0.005 |
| 6 | 铜 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱法 | 0.001~1.0 |
| 7 | 锌 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱 | 0.002~2.0 |
| 8 | 镍 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱法 | 0.002~0.60 |
| 9 | 砷 | 风干研磨 100 目 | 1+1 王水消解 | 原子荧光光谱法 | 0.001~1.0 |
| 10 | 铅 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱法 | 0.002~2.0 |
| 11 | 铬 | 风干研磨 100 目 | 四酸消解 | 电感耦合等离子体质谱法 | 0.0030~5.0 |
| 12 | 苯并[a]芘 | 新鲜土壤样品 | 加速溶剂索氏提取 | 高效液相色谱法 | 0.020×10 ⁻³ ~4.0×10 ⁻³ |
| 13 | 六氯环己烷 | 新鲜土壤样品 | 加速溶剂索氏提取 | 气相色谱—质谱法 | 0.02×10 ⁻³ ~5.0×10 ⁻³ |
| 14 | DDT | 新鲜土壤样品 | 加速溶剂索氏提取 | 气相色谱—质谱法 | 0.02×10 ⁻³ ~5.0×10 ⁻³ |

1.3 评价方法

土壤样品监测结果按照每个饮用水水源地 5 个采样点做算术平均,监测结果采用土壤单项污染指数进行单因子评价^[12]和内梅罗污染指数进行综合评价^[13]。土壤单项污染指数计算及单因子评价方法参考《全国土壤污染状况调查技术规范》中土壤环境质量评价分级,内梅罗污染指数的计算及土壤污染程度分级评价参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)中评价方法。相关计算公式和分级标准如下:

1.3.1 土壤环境质量评价标准值 土壤环境质量评价标准执行《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)一级标准进行评价,对于 GB15618 没有的评价标准执行《全国土壤污染状况评价技术规定》(环发[2008]39 号),有机氯农药评价标准参照《加拿大土壤环境质量标准农用地标准值》^[14]。

1.3.2 土壤单因子评价法

$$P_{ip}=\frac{C_i}{S_{ip}}$$

(1)

式中: P_{ip} 为土壤单项污染指数; C_i 为土壤污染物实测浓度; S_{ip} 为土壤污染物评价标准。根据 P_{ip} 的大小将土壤污染程度划分为 5 级,详见表 2。

1.3.3 土壤综合评价法

$$P_z=\sqrt{\frac{P_{ave}^2+P_{i,max}^2}{2}}$$

(2)

式中: P_z 为内梅罗综合污染指数; $P_{i,max}$ 为污染物 i 的单因子污染指数中的最大值; P_{ave} 为污染物 i 的单因

子污染指数平均值。根据 P_z 的大小,将土壤污染程度划分为 5 级(见表 3)。

表 2 土壤单因子污染指数及对应污染程度等级

| 等级 | P_{ip} 值大小 | 污染评价 |
|-----|---------------------|------|
| I | $P_{ip} \leq 1$ | 无污染 |
| II | $1 < P_{ip} \leq 2$ | 轻微污染 |
| III | $2 < P_{ip} \leq 3$ | 轻度污染 |
| IV | $3 < P_{ip} \leq 5$ | 中度污染 |
| V | $P_{ip} > 5$ | 重度污染 |

表 3 内梅罗污染指数评价标准及对应污染程度等级

| 等级 | 内梅罗污染指数(P_z) | 污染等级 |
|-----|----------------------|----------|
| I | $P_z \leq 0.7$ | 清洁(安全) |
| II | $0.7 < P_z \leq 1.0$ | 尚清洁(警戒限) |
| III | $1 < P_z \leq 2.0$ | 轻度污染 |
| IV | $2 < P_z \leq 3.0$ | 中度污染 |
| V | $P_z > 3$ | 重污染 |

1.4 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Excel 进行数据统计分析,对饮用水水源地周边土壤中各种污染物的监测值进行相关性分析、主成分分析及聚类分析等^[15-16]。

2 结果与分析

2.1 饮用水源地周边土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量监测结果

长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量监测结果见表 4,由表 4 可知,长沙市 A、B 水源地周边土壤平均 pH

值分别为 5.892,7.174,说明长沙市 A 水源地周边土壤平均 pH 值偏酸性,B 水源地周边土壤平均 pH 值偏中性;A,B 水源地周边土壤中平均离子交换量分别为 8.201 cmol/kg,11.832 cmol/kg,有机质含量分别为 0.562 g/kg,2.018 g/kg。株洲市 A,B 水源地周边土壤平均 pH 值分别为 5.409,5.057,说明株洲市 A,B 水源地周边土壤平均 pH 值偏酸性;A,B 水源地周边土壤中阳离子交换量分别为 6.401 cmol/kg,6.952 cmol/kg,有机质含量分别为 0.868 g/kg,1.151 g/kg。湘潭市 A,B 水源地周边土壤平均 pH 值分别为 5.371,4.373,说明湘潭市 A,B 水源地周边土壤平均 pH 值偏酸性;A,B 水源地周边土壤中阳

离子交换量分别为 13.501 cmol/kg,10.401 cmol/kg,有机质含量分别为 4.182 g/kg,12.101 g/kg。
综上可知,长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量存在差异,其中长沙市 B 水源地周边土壤平均 pH 值最高,湘潭市 B 水源地周边土壤平均 pH 值最低,湘潭市 A 水源地周边土壤阳离子交换量与有机质含量均最高。研究表明,土壤 pH 值是控制土壤中重金属有效态的主要因素之一,而土壤阳离子交换量和有机质含量代表土壤可能保持的养分数量^[17-18]。张建龙等^[17]研究发现,土壤理化性质的差异对土壤健康风险评价结果、风险评估精度及制订修复决策具有重要意义。

表 4 土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量

| 理化性质 | | 长沙市 | | 株洲市 | | 湘潭市 | |
|-------------------------------------|----|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) |
| pH 值 | 范围 | 4.428~8.202 | 5.962~8.719 | 5.177~5.561 | 4.653~5.441 | 4.983~6.07 | 4.121~5.181 |
| | 均值 | 5.892±1.901 | 7.174±1.383 | 5.409±0.192 | 5.057±0.401 | 5.371±0.550 | 4.373±0.552 |
| 阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹) | 范围 | 7.171~10.342 | 8.403~17.381 | 2.913~8.597 | 3.419~14.693 | 7.308~16.80 | 5.802~13.204 |
| | 均值 | 8.201±1.621 | 11.832±4.532 | 6.401±2.861 | 6.952±5.815 | 13.501±4.82 | 10.401±3.743 |
| 有机质含量/ (g·kg ⁻¹) | 范围 | 0.05 L~1.031 | 1.358~3.072 | 0.533~1.156 | 0.544~1.637 | 2.803~5.101 | 3.502~19.801 |
| | 均值 | 0.562±0.292 | 2.018±0.863 | 0.868±0.311 | 1.151±0.541 | 4.182±1.162 | 12.101±8.511 |

2.2 饮用水水源地周边土壤中典型污染物监测结果

长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中 Cd,Hg,As,Pb,Cr,Cu,Zn,Ni,六氯环己烷、滴滴涕及苯并[a]芘的监测结果见表 5 和图 2,由表 5 可知,长沙市 A 水源地周边土壤中 As,Pb,Cr,Cu,Zn 平均含量及 B 水源地周边土壤中 Cd,Hg,As,Pb,Zn 平均含量均超过国家一级标准;株洲市 A 水源地周边土壤中 Cd 平均含量及 B 水源地周边土壤中 Cd,Pb 平均含量均超过国家一级标准;湘潭市 A 水源地

周边土壤中 Cd,Hg,As,Pb,Zn 平均含量及 B 水源地周边土壤中 Cd,As,Pb,Zn 平均含量均超过国家一级标准。长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤的 30 个监测点位中 Cd,Pb,Zn 平均含量超标率均大于 50%,分别为 63.33%,63.33%和 73.33%,Hg,Cr,Cu 平均含量超标率均为 16.67%,As 和 Ni 平均含量超标率分别为 33.33%,13.33%,六氯环己烷、滴滴涕及苯并[a]芘含量均未超标。

表 5 土壤中典型污染物监测结果

| 所在地 | | 长沙市 | | 株洲市 | | 湘潭市 | | mg/kg |
|--------|----|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|--------|
| | | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) | A 水源地(n=5) | B 水源地(n=5) | 国家一级标准 |
| Cd | 均值 | 0.10±0.062 | 0.47±0.31 | 0.83±0.20 | 0.45±0.13 | 0.23±0.20 | 0.28±0.37 | 0.20 |
| | 范围 | 0.06±0.031 | 0.19±0.05 | 0.068±0.05 | 0.094±0.02 | 0.15±0.04 | 0.10±0.09 | 0.15 |
| Hg | 均值 | 24.0±12.19 | 20.0±1.59 | 10.1±2.85 | 9.8±3.60 | 21.7±2.58 | 15.7±5.46 | 15 |
| | 范围 | 50.52±14.25 | 60.20±8.93 | 32.91±5.59 | 38.23±6.77 | 130.01±131.27 | 127.03±85.28 | 35 |
| As | 均值 | 128.03±19.49 | 54.60±6.06 | 26.3±6.60 | 27.0±5.86 | 70.0±9.72 | 51.0±11.97 | 90 |
| | 范围 | 40.01±5.87 | 29.30±3.37 | 17.2±4.94 | 15.2±4.29 | 27.0±3.0 | 21.0±4.60 | 35 |
| Pb | 均值 | 149.02±25.63 | 150.0±27.81 | 98.0±30.84 | 79.0±13.64 | 133.0±41.66 | 122.0±51.49 | 100 |
| | 范围 | 45.09±8.63 | 22.60±2.63 | 13.6±1.64 | 15.1±2.24 | 21.0±2.39 | 23.0±22.74 | 40 |
| Cr | 均值 | 0.00059±0.0004 | 0.00665±0.0094 | 0.0131±0.0049 | 0.0226±0.0137 | 0.0049±0.011 | 0.102±0.135 | 0.10 |
| | 范围 | 0.0033±0.0019 | 0.0164±0.0223 | 0.0332±0.0153 | 0.0391±0.0267 | 0.003±0.006 | 0.0002 L±0.024 | 0.10 |
| Cu | 均值 | 0.0085±0.0095 | 0.0057±0.0066 | 0.0002±0 | 0.0002±0 | 0.0002 L±0 | 0.0002 L±0 | 0.10 |
| | 范围 | | | | | | | |
| Zn | 均值 | | | | | | | |
| | 范围 | | | | | | | |
| Ni | 均值 | | | | | | | |
| | 范围 | | | | | | | |
| 六氯环己烷 | 均值 | | | | | | | |
| | 范围 | | | | | | | |
| 滴滴涕 | 均值 | | | | | | | |
| | 范围 | | | | | | | |
| 苯并[a]芘 | 均值 | | | | | | | |
| | 范围 | | | | | | | |

注:n 表示各水源地监测点位数。

2.3 饮用水水源地周边土壤污染指数评价

长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤单项污染指数和内梅罗综合污染指数评价结果见表 6 所示,由表 6 可知,长沙市 A,B 水源地周边土壤无机有机综合值评价均处于轻度污染状态;株洲市 A 水源地周边土壤无机有机综合值评价处于重度污染状态,B 水源地周边土壤处于中度污染状态;湘潭市 A,B 水源地周边土壤无机有机综合值评价均处于中度污染状态。

长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤

30 个点位中主要以无机污染为主,只有 3 个点位存在有机污染。30 个监测点位均受到无机有机复合污染,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位数量分别为 0 个、16 个、6 个和 8 个,所占比例分别 0%,53.33%,20.0%和 26.67%;30 个监测点位均受到无机污染,其中轻度、中度和重度污染点位数量分别为 16 个、5 个和 9 个,所占比例分别 53.33%,16.67%和 30.0%;受到有机污染的点位有 3 个,轻微、轻度污染点位数量分别为 1 个和 2 个,所占比例分别为 3.33%,6.67%。

表 6 土壤中典型污染物单项及综合污染指数

| 监测点位 | | 单项污染指数(P_i) | | | | | | | | | | | 综合污染指数(PN) | | | 评价等级 |
|------|--------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|------------|-------|--------|------|
| | | Cd | Hg | As | Pb | Cr | Cu | Zn | Ni | 六氯环己烷 | 滴滴涕 | 苯并[a]芘 | 无机 | 有机 | 无机有机复合 | |
| 长沙市 | A 水源地($n=5$) 平均值 | 0.49 | 0.39 | 1.6 | 1.44 | 1.42 | 1.14 | 1.49 | 1.13 | 0.006 | 0.033 | 0.085 | 1.39 | 0.067 | 1.28 | 轻度污染 |
| | B 水源地($n=5$) 平均值 | 2.34 | 1.3 | 1.33 | 1.72 | 0.61 | 0.84 | 1.5 | 0.57 | 0.066 | 0.164 | 0.057 | 1.88 | 0.134 | 1.79 | 轻度污染 |
| 株洲市 | A 水源地($n=5$) 平均值 | 4.78 | 0.55 | 0.79 | 1.09 | 0.34 | 0.56 | 1.12 | 0.41 | 0.131 | 0.332 | 0.002 | 3.49 | 0.259 | 3.44 | 重度污染 |
| | B 水源地($n=5$) 平均值 | 3.37 | 0.84 | 0.85 | 1.52 | 0.42 | 0.6 | 1.11 | 0.53 | 0.226 | 0.391 | 0.002 | 2.52 | 0.312 | 2.47 | 中度污染 |
| 湘潭市 | A 水源地($n=5$) 平均值 | 1.17 | 0.99 | 1.45 | 3.71 | 0.78 | 0.77 | 1.33 | 0.53 | 0.049 | 0.029 | 0.001 | 2.79 | 0.04 | 2.71 | 中度污染 |
| | B 水源地($n=5$) 平均值 | 1.4 | 0.68 | 1.04 | 3.62 | 0.57 | 0.61 | 1.22 | 0.57 | 1.026 | 0.107 | 0.001 | 2.7 | 0.773 | 2.65 | 中度污染 |

2.4 饮用水水源地周边土壤中污染物相关性分析

长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中典型污染物相关性分析见表 7,由表 7 可知,集中式饮用水水源地周边土壤中 Cd,Hg,As,Pb,Cr,Cu,Zn,Ni,六氯环己烷,滴滴涕,苯并[a]芘等污染物相

互之间存在联系,其中 Cr 与 Cu,Ni,Cu 与 Ni 在 $p=0.01$ 水平上显著正相关;Hg 与 Cr,Ni 在 $p=0.01$ 水平上显著负相关;Hg 与 Cd、六氯环己烷,Cd 与 Pb 在 $p=0.05$ 水平上显著正相关;Cd 与 Cr,Ni,Pb 与 Ni,Hg 与 Cu 在 $p=0.05$ 水平上显著负相关。

表 7 土壤中典型污染物相关性分析

| 成分 | Cd | Hg | As | Pb | Cr | Cu | Zn | Ni | 六氯环己烷 | 滴滴涕 | 苯并[a]芘 |
|--------|----------|-----------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Cd | 1 | | | | | | | | | | |
| Hg | 0.567 * | 1 | | | | | | | | | |
| As | -0.108 | -0.349 | 1 | | | | | | | | |
| Pb | 0.556 * | 0.424 | 0.237 | 1 | | | | | | | |
| Cr | -0.643 * | -0.793 ** | 0.023 | -0.502 | 1 | | | | | | |
| Cu | -0.487 | -0.637 * | 0.110 | -0.313 | 0.816 ** | 1 | | | | | |
| Ni | -0.641 * | -0.760 ** | -0.005 | -0.637 * | 0.978 ** | 0.808 ** | 0.208 | 1 | | | |
| 六氯环己烷 | 0.290 | 0.663 * | -0.110 | 0.343 | -0.427 | -0.178 | 0.460 | -0.415 | 1 | | |
| 滴滴涕 | 0.248 | 0.371 | 0.077 | 0.257 | -0.439 | -0.292 | -0.050 | -0.408 | -0.081 | 1 | |
| 苯并[a]芘 | 0.298 | -0.240 | 0.504 | 0.158 | 0.220 | 0.106 | 0.529 | 0.236 | -0.095 | 0.008 | 1 |

注:“*”表示在 0.05 水平上显著相关;“**”表示在 0.01 水平上显著相关。

2.5 饮用水水源地周边土壤中污染物主成分分析

长株潭地区集中式饮用水水源地周边土壤中污染物主成分分析见表 8。由表 8 可知,土壤中污染物主要有 3 个主成分,3 个主成分合计贡献率为 76.055%,其中第一主成分贡献率为 40.144%、第二主成分的贡献了为 18.467%、第三主成分的贡献率为 17.444%。结合主成分相关系数(表 9)可知,第一主成分包含的信息量最大,它的主要代表为 Cr,Cu,Ni,其权重系数分别为 0.943,0.839,0.970;第

二主成分的主要代表为 Zn、六氯环己烷、Cd,其权重系数分别为 0.885,0.751,0.507;第三主成分的主要代表为 As、苯并[a]芘,Hg,其权重系数分别为 0.807,0.852,-0.397。

2.6 饮用水水源地周边土壤中典型污染物聚类分析

利用 SPSS 20.0 软件将长株潭地区集中式饮用水水源地周边土壤中 Cd,Hg,As,Pb,Cr,Cu,Zn,Ni、苯并[a]芘、六氯环己烷及滴滴涕等 11 种污染物进行聚类分析,将数据标准化到(0,1)范围,对距离的测度方法选择

欧氏距离法(Euclidean distance method),以离差平方和法(Ward's method)进行变量(Q 型)聚类^[19],得到的聚类过程见表 10,聚类过程共有 9 阶,在第 1 阶,集群 1 与集群 2 的距离最近,系数小于 0.121,因此,首先聚成一个类型,其余集群依次类推。

长株潭地区集中式饮用水水源地周边土壤中主要污染的聚类树形见表 11,11 种化合物可大致归为 6 类,具体如下:苯并[a]芘,六氯环己烷及滴滴涕可归为一类,Cr,Ni,Cu 可归为一类,Pb,Zn 可归为一类,As,Hg,Cd 各单独归为一类。

表 8 土壤中典型污染物主成分分析

| 成分 | 初始特征值 | | | 提取平方和载入 | | | 旋转平方和载入 | | |
|----|------------|------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 合计 | 方差/% | 累积/% | 合计 | 方差/% | 累积/% | 合计 | 方差/% | 累积/% |
| 1 | 4.702 | 42.742 | 42.742 | 4.702 | 42.742 | 42.742 | 4.416 | 40.144 | 40.144 |
| 2 | 2.062 | 18.741 | 61.483 | 2.062 | 18.741 | 61.483 | 2.031 | 18.466 | 58.611 |
| 3 | 1.603 | 14.572 | 76.055 | 1.603 | 14.572 | 76.055 | 1.919 | 17.444 | 76.055 |
| 4 | 0.915 | 8.320 | 84.375 | | | | | | |
| 5 | 0.749 | 6.813 | 91.188 | | | | | | |
| 6 | 0.563 | 5.118 | 96.306 | | | | | | |
| 7 | 0.294 | 2.675 | 98.982 | | | | | | |
| 8 | 0.080 | 0.732 | 99.714 | | | | | | |
| 9 | 0.032 | 0.286 | 100.000 | | | | | | |
| 10 | 1.004E-13 | 1.036E-13 | 100.000 | | | | | | |
| 11 | -1.001E-13 | -1.009E-13 | 100.000 | | | | | | |

表 9 主成分相关系数

| 苯并[a]芘 | | Cd | Hg | As | Pb | Cr | Cu | Zn | Ni | 六氯环己烷 | 滴滴涕 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | -0.655 | -0.741 | -0.064 | -0.671 | 0.943 | 0.839 | 0.237 | 0.970 | -0.299 | -0.543 | 0.101 |
| 成分 2 | 0.507 | 0.435 | -0.197 | 0.189 | -0.125 | 0.125 | 0.885 | -0.070 | 0.751 | -0.153 | 0.322 |
| 3 | 0.183 | -0.397 | 0.807 | 0.311 | 0.163 | 0.181 | 0.274 | 0.133 | -0.270 | 0.171 | 0.852 |

通过对各饮用水源地周边环境进行调查发现,各水源地作为保护区,污染控制措施较为严格,并无工业生产及排污情况,但存在一定规模的农业区和人类活动,因此可以推测,各饮用水源地污染无主要由农业活动、生活污水排放、支流带入、大气沉降及成土母质等造成的。结合相关性分析、主成分分析和聚类分析结果可知,各水源地周边土壤中苯并[a]芘、六氯环己烷,滴滴涕,Hg 和 As 等主要来自于农田的化肥、农药的使用、生活污水排放、支流带入以及大气沉降,而 Pb,Zn,Cd,Cr,Ni,Cu 等主要来自于生活污水排放、支流带入、大气沉降及成土母质。

水源地周边土壤中所含的污染物可以通过不同途径进入水体,从而对人体健康产生严重危害,因此,人们应该采取多种措施综合防止和治理饮用水源地周边土壤的污染问题^[20]。首先,防止饮用水水源地周边土壤中污染物的加剧,避免农药、化肥的过度使用及污水灌溉,取缔甚至关停具有严重污染能力的企业;其次,提高人们对土壤污染的认识,完善我国土壤环境质量标准体系,健全法律法规,从各个方面将土壤污染的防治工作做到位。

表 10 土壤中典型污染物聚类分析

| 阶 | 群集组合 | | 系数 | 首次出现阶群集 | | 下一阶 |
|---|------|------|--------|---------|------|-----|
| | 群集 1 | 群集 2 | | 群集 1 | 群集 2 | |
| 1 | 9 | 11 | 0.121 | 0 | 0 | 2 |
| 2 | 9 | 10 | 0.324 | 1 | 0 | 9 |
| 3 | 5 | 8 | 0.463 | 0 | 0 | 4 |
| 4 | 5 | 6 | 0.725 | 3 | 0 | 7 |
| 5 | 4 | 7 | 1.813 | 0 | 0 | 6 |
| 6 | 3 | 4 | 3.345 | 0 | 5 | 7 |
| 7 | 3 | 5 | 6.092 | 6 | 4 | 8 |
| 8 | 2 | 3 | 7.594 | 0 | 7 | 9 |
| 9 | 2 | 9 | 14.779 | 8 | 2 | 10 |

表 11 土壤中典型污染物聚类情况统计

| 类 别 | 污染物名称 |
|-------|------------------|
| 第 1 类 | 苯并[a]芘、六氯环己烷、滴滴涕 |
| 第 2 类 | Cr,Ni,Cu |
| 第 3 类 | Pb,Zn |
| 第 4 类 | As |
| 第 5 类 | Hg |
| 第 6 类 | Cd |

3 结论

(1) 长株潭地区 6 个集中式饮用水水源地周边土壤中 pH 值、阳离子交换量及有机质含量存在一定差异,其中长沙市 B 水源地周边土壤平均 pH 值最高,湘潭市 B 水源地周边土壤平均 pH 值最低,湘潭市 A 水源地周边土壤阳离子交换量与有机质含量均最高。

(2) 水源地周边土壤 30 个监测点位中 Cd、Pb、Zn 平均含量超标率分别为 63.33%, 63.33% 和 73.33%, Hg、Cr、Cu 平均含量超标率均为 16.67%, As 和 Ni 平均含量超标率分别为 33.33%, 13.33%, 六氯环己烷、滴滴涕及苯并[a]芘含量均未超标。

(3) 水源地周边土壤主要以无机污染为主,少量点位存在有机污染;30 个点位均受到无机有机复合污染,其中轻度、中度和重度污染点位所占比例分别 53.33%, 20.0% 和 26.67%。

(4) 水源地周边土壤中污染物主成分分析得出,第一主成分为 Cr、Cu、Ni,其贡献率为 40.144%,第二主成分为 Zn、六氯环己烷、Cd,其贡献率为 18.467%,第三主成分为 As、苯并[a]芘、Hg,其贡献率为 17.444%,三大主成分贡献率达到 76.055%,是构成监测点位污染问题的主要成分。

(5) 水源地周边土壤中污染物聚类分析发现,监测点位土壤中 Cd、Hg、As 等 11 种污染物可大致为 6 类,苯并[a]芘、六氯环己烷及滴滴涕可归为一类, Cr、Ni、Cu 可归为一类, Pb、Zn 可归为一类, As、Hg、Cd 各单独归为一类。

参考文献:

- [1] 马武生,金根娣,薛梅,等.某地区集中式饮用水水源地土壤重金属污染状况、评价与源解析[J].环境工程,2016,34(12):141-146.
- [2] 陆泗进,王业耀,何立环.某集中式饮用水源地保护区土壤重金属监测与评价[J].中国环境监测,2017,33(3):1-7.
- [3] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007,66(2):258-266.
- [4] 常惠丽,李云玲,刘瑞祥.长治市主要集中式饮用水水源地周边土壤环境质量调查[J].环境监测管理与技术,2015,27(4):40-43.
- [5] Li X, Lee S L, Wong S C, et al. The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach[J]. Environmental Pollution, 2004,129(1):113-124.
- [6] Imperato M, Adamo P, Naimo D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city(Italy)[J]. Environmental Pollution, 2003,124(2):247-256.
- [7] 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.
- [8] 赵健.饮用水水源地沉积物重金属风险评价[D].辽宁大连:大连理工大学,2016.
- [9] 刘兵,张凯,唐红军,等.遂宁城乡集中式饮用水水源地钼分布特征及健康风险评价[J].中国环境监测,2016,32(6):13-19.
- [10] Chen Z, Zhu Z, Yin L, et al. The changing water quality characteristics from urban drinking water sources in Guangdong, China[J]. Water Resources Management, 2015,29(4):987-1002.
- [11] Steyer A, Torkar K G, Gutiérrezaguirre I, et al. High prevalence of enteric viruses in untreated individual drinking water sources and surface water in Slovenia. [J]. International Journal of Hygiene & Environmental Health, 2011,214(5):392-398.
- [12] 陈峰,尹春芹.基于 GIS 的南京市典型蔬菜基地土壤重金属污染现状与评价[J].中国环境监测,2008,2(24):40-44.
- [13] Vosough A, Saeedi M, Lak R. Metal fractionation and pollution risk assessment of different sediment sizes in three major southwestern rivers of Caspian Sea[J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(7):292.
- [14] Council C. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines [R]. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006.
- [15] 许兴斌,焦黎,王勇辉.夏尔西里自然保护区土壤重金属相关性分析及污染风险评价[J].水土保持研究,2015,22(5):336-341.
- [16] 江敏,阮慧慧,梅卫平.滴水湖沉积物重金属生态风险评价及主成分分析[J].安全与环境学报,2013,13(3):151-156.
- [17] 张建龙,解建仓,汪妮,等.基于改进蒙特卡罗方法的再生水回用健康风险评价[J].环境科学学报,2010,30(11):2353-2360.
- [18] 杨秀敏,任广荫,李立新,等.土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J].中国矿业,2017,26(6):79-83.
- [19] Law S A, Diamond M L, Helm P A, et al. Factors affecting the occurrence and enantiomeric degradation of hexachlorocyclohexane isomers in northern and temperate aquatic systems[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001,20(12):2690-2698.
- [20] 张进.东江湖铅锌矿渣堆场土壤重金属污染评价及治理方法研究[D].湖南湘潭:湘潭大学,2015.