



# 扬州市职业大学

## 毕业论文

扬州市集中式饮用水源地土壤重金属污染分布研究团队

论文题目：扬州集中式饮用水源地土壤重金属  
污染状况、评价与源解析

学 院：	生物与化工工程学院
专 业：	应用化工技术
班 级：	化工 1301
姓 名：	杨如梦 肖 蓉 王 庭 周天浩
学 号：	130702138 130702134 130702128 130702143
指导教师：	马武生 张睿 曹展梅
完成时间：	2016.6

# 生物与化工工程学院优秀毕业论文团队

## 总 报 告

团队毕业论文题目：扬州集中式饮用水源地土壤重金属污染状况、评价与源解析

### 一、团队论文的主要内容

(1) 通过采集饮用水源地土壤样品，获取土壤中不同重金属元素的含量及分布现状。

本研究选择江苏扬州地区三处大型地表水饮用水源地作为研究对象，即长江瓜洲水源地、入江水道廖家沟水源地和长江三江营江都水源地。选取水源地一级保护区陆域作为布点范围，按照等距离均匀法进行布点，每个区域设置 30 个以上采样点，采集 0~20cm 表层土壤作为样本。分析项目包括：土壤 pH，重金属元素：Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、Co、Hg、As 和 Se 全量分析。

(2) 重金属污染水平评价。

将《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 中一级标准值和江苏省土壤背景值调查数据作为研究元素的环境背景值，采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对重金属污染状况进行评价，为该地区饮用水水源地的风险管理与保护提供科学依据；

(3) 基于文献数据比对与多元统计分析，提取潜在污染源和污染效应方面的有用信息，对水源地土壤中重金属的源进行解析。

采用层次聚类分析法对水源地土壤重金属的来源进行初步的分析，探究水源地土壤中 10 种元素的来源归因，如：燃煤因素、施肥因素、污灌因素、内燃机尾气排放因素、交通和工业污染因素和农药因素等。

### 二、团队详细分工

(1) 杨如梦：扬州廖家沟饮用水源地土壤重金属污染调查与评价

(2) 肖 蓉：扬州瓜洲饮用水源地土壤重金属污染调查与评价

(3) 周天浩：扬州三江营饮用水源地土壤重金属污染调查与评价

(4) 王 庭：扬州集中式饮用水源地土壤重金属的源解析

### 三、指导老师承担指导任务与工作分工

马武生：总指导，实验安排、采样、分析、数据处理等指导。

张睿：样品采集、预处理与实验分析等。

曹展梅：样品采集、预处理与实验分析等。

#### 四、团队的整体水平与特色

(1) 团队成员态度认真、刻苦努力。研究期间，小组成员查阅近 30 篇英文文献，与指导老师认真讨论研究中遇到的问题，得到学院领导、答辩组老师和实验室老师的一致好评。团队成员分工明确、密切合作。团队成员的分工细致而明确，遇到学科边缘问题时，共同讨论、查阅文献，或请教指导老师。整个研究过程中，自始至终群策群力、协同攻关。团队具有较高的技术水平。团队成员用 OriginPro、IBM SPSS 22.0、Visio 2016 等工具软件进行绘图或分析。污染评价结果与重金属源解析结果科学、实事求是，符合真实的现状，具有重要的参考价值。

(2) 随着我国经济的快速发展、工业化进程的加快和城市化水平的不断提高，产生的废气和废渣势必对周边环境产生影响，如重金属、多环芳烃污染物以干、湿沉降的形式对水体和土壤造成污染，这将对饮用水带来潜在安全问题。另外，地表径流以及饮用水水源地土壤的历史工、农业生产，均可向环境输入大量重金属，造成水源地土壤重金属的富集。这些重金属元素在土壤中重新分布，使得土壤介质既是重金属的汇，又是重金属污染的源。由于重金属具有持久性、可累积性和生态毒性等特点，可从土壤迁移到植物和水生态系统中，并且进一步通过饮用水和食物链的传递和富集危害到人类健康。因此，加强饮用水源地周边土壤重金属的分析和监控十分必要，具有重要的环境指示意义。扬州地区作为经济社会快速发展的地区之一，河流、湖库等地表水源土壤存在环境污染和生态系统破坏的威胁，且作为南水北调东线源头，水源地土壤的生态安全对社会经济的可持续发展具有重大意义。

#### 五、研究成果

见附件。

附件：

## 扬州集中式饮用水源地土壤重金属污染状况、评价与源解析

**摘 要：**为获取某地区集中式饮用水源地土壤中重金属元素的含量及分布，分析了瓜洲水源地、廖家沟水源地和三江营江都水源地土壤中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、Co、Hg、As 和 Se 的含量，采用单因子指数法、尼梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法对水源地土壤中重金属污染水平进行了评价，并利用聚类分析对其来源进行了初步的解析。结果表明：3 处水源地土壤中 Cd 含量超过二级标准的样品数最多，超标比分别为 73%（平均含量  $0.441 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、47%（平均含量  $0.273 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 89%（平均含量  $0.407 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），其次是 Zn（平均超标比 30%）、Pb（平均超标比 20%）和 Cu（平均超标比 18%），而 Cr 和 Ni 超过二级标准的样品数比例为 10% 左右。土壤中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Se 平均含量均超过环境背景值，存在污染的表层积累。Ni、Co 和 As 平均含量与环境背景值相当，但由于变异系数较大，故均有点位超过环境背景值。三江营江都水源地的金属 Hg 平均含量为瓜洲水源地和廖家沟水源地的 2 倍，存在不同的污染物来源。分别选用 GB 15618-1995 一级标准、二级标准和江苏省土壤背景值为评价参照值，结果显示，3 水源地土壤存在一定程度的重金属累积情况，处于轻微-中等程度的污染水平，尤其是 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn，已接近或已处于预警水平。潜在生态风险指数法结果表明，瓜州和三江营江都水源地潜在生态风险已达到中等水平，而廖家沟水源地较好处于轻微水平。源解析的结果表明，瓜洲水源地和廖家沟水源地土壤中第 I 类元素（Cd、Se、Hg、Co 和 As）来源可归因于“燃煤因素”、“施肥因素”和“污灌因素”；II 类元素（Pb、Ni 和 Cu）符合“内燃机尾气排放因素”的特征，代表了交通和工业污染；Cr 和 Zn 和其他任何元素的相关性都不显著，推断来源分别为“农药因素”和“施肥因素”；与之相比，三江营江都水源地 Ni 聚为第 I 类，说明该水源地土壤中 Ni 和 Cd 等 6 种元素具有较好的伴生关系，而与 Pb 和 Cu 具有不同的来源。本研究为该地区饮用水水源地的风险管理与保护提供科学依据。

**关键词：**重金属；集中式饮用水源地；污染评价；土壤

# Heavy Metal Contents, Evaluation and Source Analysis of Centralized Drinking Water Source Soils in Yangzhou City

**Abstract:** In order to obtain the concentrations and distribution of heavy metal elements in soil of Guazhou water sources, Liaojiagou water sources and Jiangdu Sanjiangying water sources soil, such as Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni, Co, Hg, As and Se were measured. The degree of heavy metals concentrations were assessed based on single factor indices and Nemerо comprehensive indices methods and potential ecological risk index, and the source of heavy metal pollution in the soil was analyzed by cluster analysis. The results showed that the proportion of soils samples exceeding the Grade II of environmental quality standard for soil(GB 15618-1995) of Cd was the largest in three water sources were 73% ( $0.441 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and 47% ( $0.273 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and 89% ( $0.407 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), respectively, followed by Zn (30%), Pb (20%) and Cu (18%). And the proportion of soils samples exceeding secondary standards of Cr and Ni is about 10%. The average contents of Pb, Cr, Cd, Cu, Zn and Se in all water sources were higher than the background values and exist the surface accumulation of contamination. The average contents of Ni, Co and As is equal to the environmental background and presence of sampling points over the environmental background values because the coefficient of variation is larger. The average content of metal Hg in Jiangdu Sanjiangying water source is 2 times of Guazhou water source and Liaojiagou water source, so presence of different pollutant sources compared with the other two water sources. In this study, the pollution situation of heavy metals in three water sources was evaluated against references of the Grade I and II of environmental quality standard for soil national standard limits and background values of Jiangsu province soil respectively. The result showed that three water sources exist heavy metal accumulation and reached minor - moderate pollution levels, in particular, Cd, Pb, Cr, Cu and Zn has been close to or has been at the level of early warning. Potential ecological risk assessment show that Guazhou and Sanjiangying Jiangdu water sources potential ecological risk has reached the middle level, and Liaojiagou water sources in a slightly better level. Source analysis results show that class I elements of Guazhou water source and Liaojiagou water source including Cd, Se,

Hg, Co and As, the source can be attributed to the coal-fired factor, fertilization factors and sewage irrigation factors. The features of class II elements (Pb, Ni and Cu) accord with emission factors, on behalf of the transportation and industrial pollution. It is concluded that the source of Cr and Zn are pesticide factor and fertilizer factor, respectively, due to the correlation between them and any other elements are not significant. Compared with this, the Ni of Jiangdu Sanjiangying water source belongs to class I, which indicates that the water source soil Ni and Cd and so on 6 elements have a better associated relationship, and with Cu and Pb have different sources. This study provides a scientific basis for the risk management and protection of drinking water sources in the area.

**Key words:** heavy metal; centralized drinking water source; pollution evaluation; soils

# 目 录

引言.....	1
<b>1 材料和方法.....</b>	<b>2</b>
1.1 研究区域概况.....	2
1.2 布点和样品采集.....	2
1.3 实验仪器.....	2
1.4 样品处理与分析.....	3
1.5 污染水平评价.....	4
1.5.1 评价标准.....	4
1.5.2 评价方法.....	4
1.5 元素间关联度的聚类分析.....	5
<b>2 结果与讨论.....</b>	<b>5</b>
2.1 重金属在土壤中的含量.....	5
2.2 重金属污染现状评价.....	8
2.3 土壤潜在生态风险评价.....	9
2.4 重金属的来源与聚类解析.....	9
2.4.1 重金属来源分析.....	10
2.4.2 重金属元素间关联度的聚类.....	11
2.4.3 主成分分析.....	12
<b>3 结论.....</b>	<b>14</b>
参考文献.....	16
致谢.....	18

## 引言

饮用水是人类和谐生存的最基本需求，饮用水水质优劣则直接关系到人民群众的身体和社会稳定，也是社会文明程度的重要指标之一。2015 年联合国千年发展目标会议上最大的主题是解决农村社区饮用水问题<sup>[1]</sup>，可见保障饮用水安全，就是保障人们基本生存权，也是“以人为本”最直接的体现。然而随着我国经济的快速发展、工业化进程的加快和城市化水平的不断提高，产生的废气和废渣势必对周边环境产生影响，如重金属、多环芳烃污染物以干沉降或湿沉降的形式对水体和土壤造成污染，这将对饮用水带来潜在安全问题<sup>[2,3]</sup>。另外，地表径流以及饮用水水源地土壤的历史工、农业生产，如农药施用、固体废弃物积聚及畜、禽、鱼养殖等社会活动，均可向环境输入大量重金属，造成水源地土壤中重金属的富集<sup>[4]</sup>。这些重金属元素在土壤中重新分布，使得土壤介质既是重金属的汇，又是重金属污染的源<sup>[5]</sup>。由于重金属具有持久性、可累积性和生态毒性等特点，可从土壤迁移到植物和水生态系统中，并且进一步通过饮用水和食物链的传递和富集危害到人类健康<sup>[6]</sup>。因此，加强饮用水源地周边土壤重金属的分析和监控十分必要，具有重要的环境指示意义。

扬州作为经济社会快速发展的地区之一，河流、湖库等地表水源土壤存在环境污染和生态系统破坏的威胁，且作为南水北调东线源头，水源地土壤的生态安全对社会经济的可持续发展具有重大意义。鉴于此，该市 2008 年印发《扬州市城市饮用水水源地安全保障规划》（扬府办发[2008]47 号），为改善城市饮用水源地水环境质量和保障饮用水安全提供了依据，2016 年初该市 8 个饮用水源地通过江苏省验收，并可互为备用。鉴于此，本研究对该市 3 个具有代表性的大型集中式饮用水源地土壤中重金属的分布开展了专门研究，主要目的有：

（1）通过采集饮用水源地土壤样品，获取土壤中不同重金属元素的含量及分布现状；

（2）重金属污染水平评价。以《土壤环境质量标准》（GB15618-1995）中一级标准限值和江苏省土壤背景值作为调查元素的环境背景值，采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对重金属污染状况进行评价，为该地区饮用水水源地的风险管理与保护提供科学依据；

（3）基于文献数据比对与多元统计分析，提取潜在污染源和污染效应方面的有

用信息，对土壤中重金属的源进行解析。如土壤表层中 Pb 元素含量可以作为是否受到周边工业污染的指标<sup>[7]</sup>，Cr、Cu、Pb 和 Zn 可归结于机动车辆在运行过程中向环境的释放<sup>[8]</sup>等。考虑到 Se 可以作为工业燃煤的标识元素，健康效应阈值窄<sup>[9, 10]</sup>，同时对土壤中的 Se 元素进行了测定分析。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

选取江苏扬州地区三处大型集中式地表水饮用水源地土壤作为研究对象，即长江瓜洲水源地、入江水道廖家沟水源地和长江三江营江都水源地。其中瓜洲水源地和三江营江都水源地为沿江区，林地和水域比例较高，园地和耕地比例较低，廖家沟水源地一级保护区位于城镇区，居民点用地所占比重大，耕地相对较低，草地、林地和未利用土地很少。基本信息如表 1 所示。

表 1 扬州地区三处饮用水源地基本信息

水源地名称	供水水源	涵盖水厂	年供水量/ 万 t/a	供水人口/ 万人
长江瓜洲水源地	长江	第四水厂	3944	40.7
入江水道廖家沟水源地	淮河入江水道	第一、第三水厂	5332	45.0
长江三江营江都水源地	长江	第五水厂	3525	36.4

### 1.2 布点和样品采集

选取水源地一级保护区陆域作为采样范围，采样区域内无违章建筑、无排污口、无规模化畜禽养殖。按照棋盘式布点法进行布点，每个区域设置 30 个以上采样点（如图 1），采集 0~20cm 表层土壤作为样本。各样点采集平行 3 份样品，均匀混合后，用四分法处理并制得 1~2kg 混合样。混合样品室温风干，去石块、落叶和根茎，玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛，自封袋密封备用。

### 1.3 实验仪器

精密酸度计：雷磁 PHSJ-4F 型，上海仪电科学仪器股份有限公司；重金属消解仪：SH230N 型，济南海能仪器股份有限公司；电子分析天平：PL-S 型，瑞士梅特勒-托利多国际股份有限公司；原子荧光光度计：AFS-933 型，北京吉天仪器有限公司；原子吸收分光光度计，TAS-990 型，北京普析通用仪器有限责任公司。

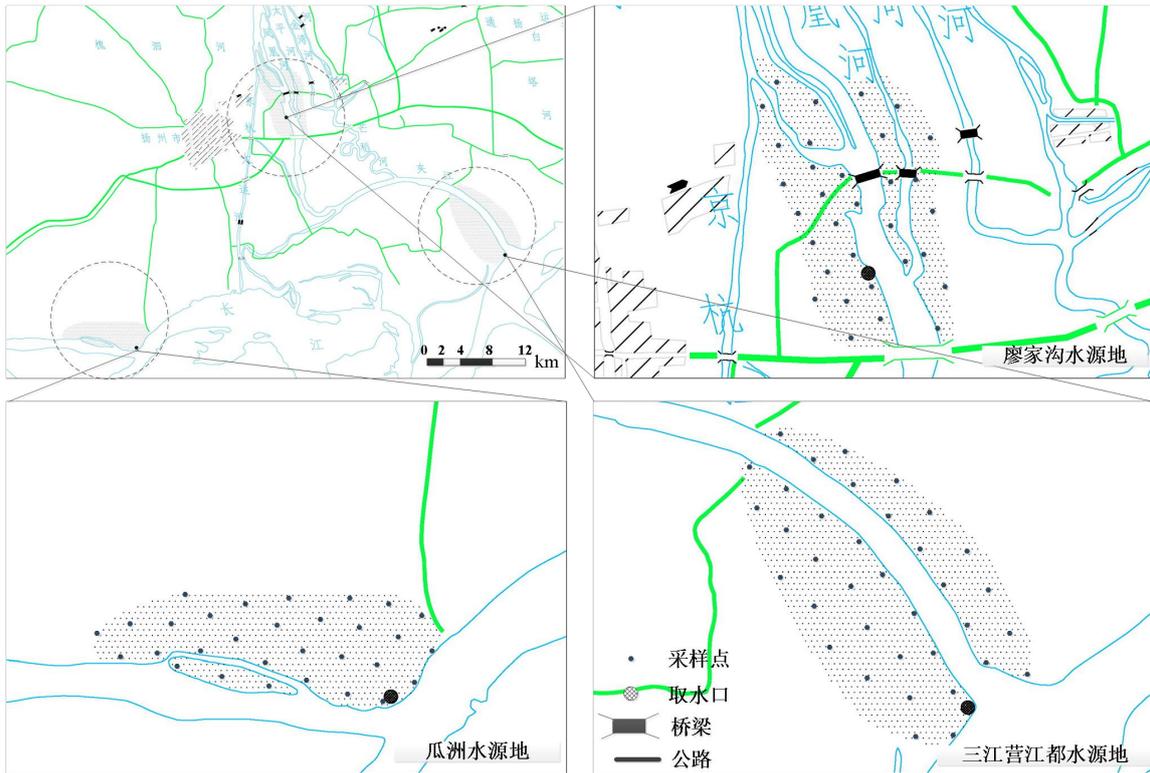


图 1 水源地土壤调查采样点分布示意

## 1.4 样品处理与分析

(1) 土壤 pH。参照《土壤 pH 的测定》(NY-T 1377-2007) 中方法进行。土水比为 1:2.5 混合后, 剧烈搅拌 5min, 静置 2h, 采用 pH 计法测定 (PHS-3 型 pH 酸度计)。

(2) 土壤 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 和 Co 全量分析。仪消解, 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消解体系, 程序升温至冒浓厚白烟, 并蒸发至内容物呈粘稠状<sup>[9, 11, 12]</sup>。Cd 和 Pb 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定, Cr、Cu、Zn、Ni 和 Co 采用火焰型测定。

(3) 土壤 Hg 和 As 全量分析。样品采用王水法 (1:1) 于沸水浴中消解 2h<sup>[13, 14]</sup>, 原子荧光法测定。

(4) 土壤 Se 全量分析。采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 体系、SH230 型石墨消解仪 165~175℃ 消煮<sup>[9]</sup>, 原子荧光法测定。

(5) 质量控制。测定全过程按照质量控制要求操作, 制备全过程空白溶液, 同步测定标准物质或加标回收, 测定误差范围 ≤2%。实验药剂均与标准方法一致, 未标注试剂类型均选择优级纯, 实验用水为 MiliQ 纯水。

## 1.5 污染水平评价

### 1.5.1 评价标准

鉴于《土壤环境质量标准》（GB15618-1995）中一级标准值是依据全国 4095 个样点的统计资料所制定<sup>[15]</sup>，故该标准中的一级限值可作为当地土壤环境背景值参考依据之一。该标准中的二级标准值为土壤受到污染的警示值，故此将标准中二级标准值作为是否受到污染的评价依据。对于 GB 15618-1995 中没有的评价标准则执行《全国土壤污染状况评价技术规定》（环发[2008]39 号）中规定限值。另外还选取江苏省土壤背景值调查数据作为参考<sup>[16]</sup>。

### 1.5.2 评价方法

采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害评价法分别对饮用水源地土壤中重金属污染状况进行评价。

#### (1) 单项污染指数法

单项污染指数法计算公式为： $P_i=C_i/S_i$

式中： $P_i$ 为污染物的单项污染指数； $C_i$ 为调查点位土壤中污染物的实测浓度值； $S_i$ 为污染物  $i$  的评价标准值或参考值。

#### (2) 尼梅罗综合污染指数法

尼梅罗综合污染指数 ( $P_N$ ) 计算公式为：
$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{ave}^2 + (C_i/S_i)_{max}^2}{2}}$$

式中： $(C_i/S_i)_{ave}$  为污染物各单向污染指数的平均值， $(C_i/S_i)_{max}$  为污染物中单向污染指数的最大值。 $P_N$  不仅考虑了各种污染物的平均污染水平，同时兼顾污染物中最严重污染所造成的危害。

尼梅罗综合污染指数法所用分级标准如表 2 所示。

表 2 土壤综合污染指数分级标准

分级	综合污染指数( $P_N$ )	污染等级	污染水平
I	$P_{综} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻污染	土壤已受到污染
IV	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中污染	土壤已受到中度污染
V	$P_{综} > 3.0$	重污染	土壤已受到严重污染

#### (3) 重金属潜在生态危害评价法

潜在生态危害指数法是应用沉积学原理，从而评价重金属污染及生态危害的方

法。潜在生态风险指数可以定量评价单一元素的风险等级。潜在生态危害指数法的计算公式为<sup>[34-35]</sup>：

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i, \quad C_f^i = \frac{C_n^i}{C_0^i}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot \frac{C_n^i}{C_0^i}$$

式中： $E_r^i$ 为重金属潜在生态危险系数、 $T_r^i$ 为单一重金属的毒性系数，具体为Zn=1<Cr=2<Cu=Ni=Pb=Co=5<Cd=30<Hg=40<sup>[36]</sup>。 $C_f^i$ 为单一金属污染系数、 $C_n^i$ 为样品实验浓度、 $C_0^i$ 为土壤背景参考值、RI为潜在生态危险指数。潜在生态危险指数与污染程度的关系如表3所示。

表3 潜在生态危害指数评价标准

$E_r^i$	单一重金属的生态风险程度	RI	生态风险程度
<40	轻微	<150	轻微
40-80	中等	150-300	中等
80-160	较高	300-600	较高
160-320	高	≥600	高
≥320	极高		

## 1.5 元素间关联度的聚类分析

统计学方法经常被用于土壤重金属污染的来源解析，如元素间的相关分析（Correlation Analysis）、聚类分析（Cluster Analysis）和主成分分析（Principal Component Analysis）等<sup>[17, 18]</sup>。其中，聚类分析是一种探索性的模式识别技术<sup>[19]</sup>，在实际应用中，层次聚类分析（Hierarchical Cluster Analysis）应用最为广泛，其原理是将所有变量（或指标）各自看成一类，选择相似程度最大的（距离系数最小或相似系数最大）两类合并为一个小类，并逐步扩大至所有的变量（或指标），最终形成一个谱系图，最终达到分类的目的<sup>[20, 21]</sup>。本文采用层次聚类分析法对水源地土壤重金属的来源进行初步的分析。

层次聚类分析采用 SPSS 22.0 软件完成，OriginPro 9.1 用于图形绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属在土壤中的含量

三处地表水饮用水源地土壤中的重金属含量分析结果如表 4 所示。结果表明，不同样点间的重金属含量分布较为离散，如瓜洲水源地最小变异系数为 16.2%（Cr），最大变异系数为 39.8%（Cd），说明土壤中重金属含量受外界干扰显著。不同水源地间金属的变异系数又具有区域性，如三江营江都水源地 Hg 元素变异系数为 36.1%，明显高于瓜洲和廖家沟水源地，说明三江营江都水源地受污染程度与其他水源地不同。

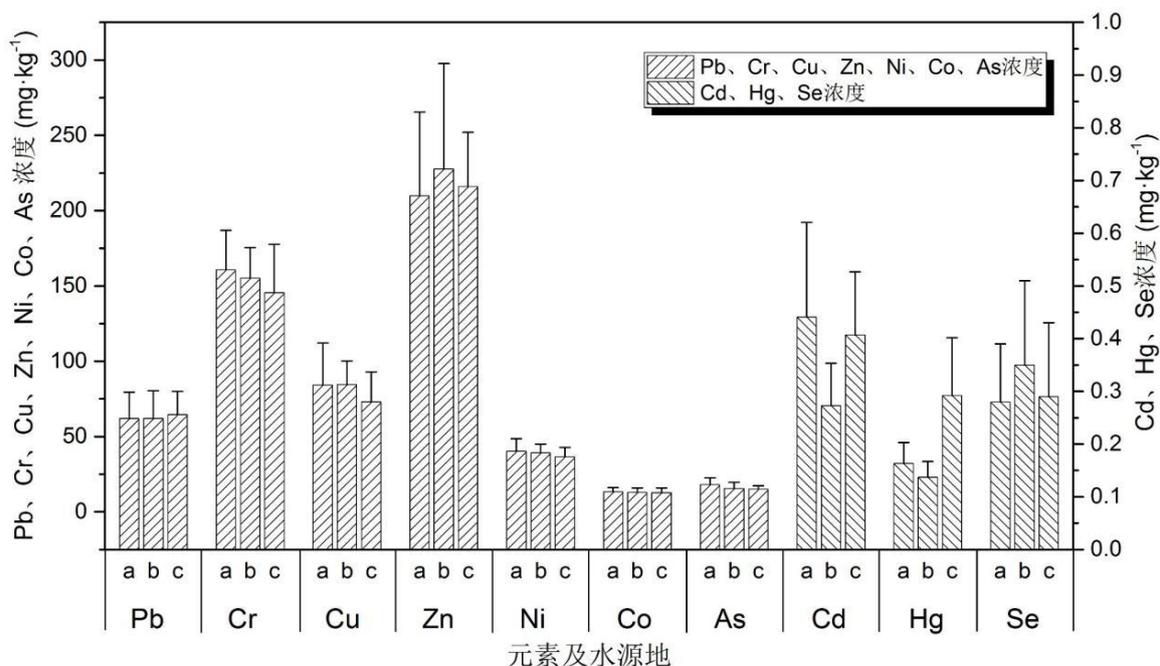
通过与环境背景值（以《土壤环境质量标准》中一级标准为主要参考依据，江苏省土壤背景值为辅）对比可知，除 Hg 外，其他 8 种重金属在 3 处水源地具有共性，即：Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 元素平均含量均超过了其环境背景值（环境背景值的 1.4~2.4 倍），如瓜洲水源地土壤中该 5 种重金属的平均含量分别是环境背景值的 2.2、1.8、1.8、2.4 和 2.1 倍；Ni、Co 和 As 平均含量位于环境背景值上下，但由于 3 元素变异系数较大，如瓜洲水源地和廖家沟水源地 As 的变异系数分别为 26.0%（浓度范围为 6.3~24.4 mg·kg<sup>-1</sup>）和 25.8%（浓度范围为 9.1~27.2 mg·kg<sup>-1</sup>），故此 Ni、Co 和 As 均有采样点位超过环境背景值；Se 是煤中除 S、N、F、Cl、Br、Hg 外极易挥发的微量元素，是煤中潜在的有毒微量元素之一，也是燃煤污染排放的标识元素。在对样品 Se 检测结果可知，三水源地土壤 Se 平均含量均超过环境背景值，揭示 3 区域存在 Se 污染的表层积累。金属 Hg 在 3 处水源地土壤中的平均含量具有较大差异性，瓜洲水源地和廖家沟水源地 Hg 平均含量接近环境背景值，而三江营江都水源地 Hg 的平均含量为环境背景值近 2 倍，且均超过环境背景值。若以江苏省土壤背景值作为评价依据，则该水源地土壤 Hg 与背景值相当，但从该区域 Hg 含量二级标准超标点位比例（14%）可知，明显存在点源污染，故此三江营江都水源地具有不同于另外两处的污染物来源。

表 4 三处饮用水源地土壤中重金属与硒的含量（单位：mg·kg<sup>-1</sup>）

元素	长江瓜洲水源地(n=30)			入江水道廖家沟水源地(n=32)			长江三江营江都水源地(n=36)			环境背景值	
	含量范围	CV%	平均值	含量范围	CV%	平均值	含量范围	CV%	平均值	一级标准	文献[12]*
Cd	0.158~0.723	39.8	0.441	0.156~0.41	29.6	0.273	0.241~0.828	30.2	0.407	0.2	0.13
Pb	31.3~94.1	27.9	62.1	38.8~92.0	29.8	62.0	36.6~95.5	23.9	64.6	35.0	26.2
Cr	100.8~206.3	16.2	160.9	121.6~200.3	13.0	155.2	80.6~205.3	22.1	145.5	90.0	77.8
Cu	36.6~124.9	33.2	84.2	60.6~122.4	18.6	84.5	38.8~103.4	27.2	73.1	35.0	22.3
Zn	112.3~332.5	26.5	209.9	129.7~382.5	30.8	227.7	149.3~290.6	16.7	215.9	100.0	62.6
Ni	23.8~55.1	20.6	40.3	30.5~50.1	15.0	39.2	27.6~51.5	17.5	36.5	40.0	26.7
Co	8.7~19.0	19.5	13.4	8.9~20.2	23.2	12.9	8.7~20.2	23.9	12.8	-	12.6
Hg	0.052~0.226	26.1	0.163	0.083~0.189	24.2	0.138	0.152~0.565	36.1	0.292	0.15	0.29
As	6.3~24.4	26.0	18.0	9.1~27.2	25.8	15.6	10.2~19.8	15.1	15.1	15.0	10.0
Se	0.12~0.62	39.7	0.28	0.13~0.75	45.9	0.35	0.13~0.67	46.2	0.29	-	0.22

\*注：选用 A 层土壤数据。

图 2 中，Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、Co、As 从左边浓度坐标看。Cd、Hg、Se 从右边浓度坐标看。从图中我们可以看出三处水源地中重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、CO 含量较高，重金属 Cd、Hg、Se 的含量较低，但由于它们毒性系数大，因此潜在环境危害较大，其发展趋势也应引起关注。



(a、b 和 c 分别指瓜州水源地、廖家沟水源地和三江营江都水源地)

图 2 饮用水源地土壤中重金属的含量

结合相应各采样点位样品的 pH 值，将金属含量与《土壤环境质量标准》中一级标准和二级标准限值进行比对，获得各金属含量在三区间的占比，如图 3 所示。由图可知，水源地土壤中金属 Cd 含量超过二级标准的样品数最多，瓜洲、廖家沟和三江营江都水源地 Cd 超标比分别为 73%（平均含量为 0.441 mg·kg<sup>-1</sup>）、47%（平均含量为 0.273 mg·kg<sup>-1</sup>）和 89%（平均含量为 0.407 mg·kg<sup>-1</sup>），其次是 Zn、Pb 和 Cu，平均超标率分别为 30%、20%和 18%，而 Cr 和 Ni 超过二级标准的样品数比例为 10%左右。Co、As 和 Se 含量均未超二级标准，相反，3 水源地土壤中的 Co 和 As 相当比例尚未超过环境本底值，这可能与该区域土壤的形成年代有关。

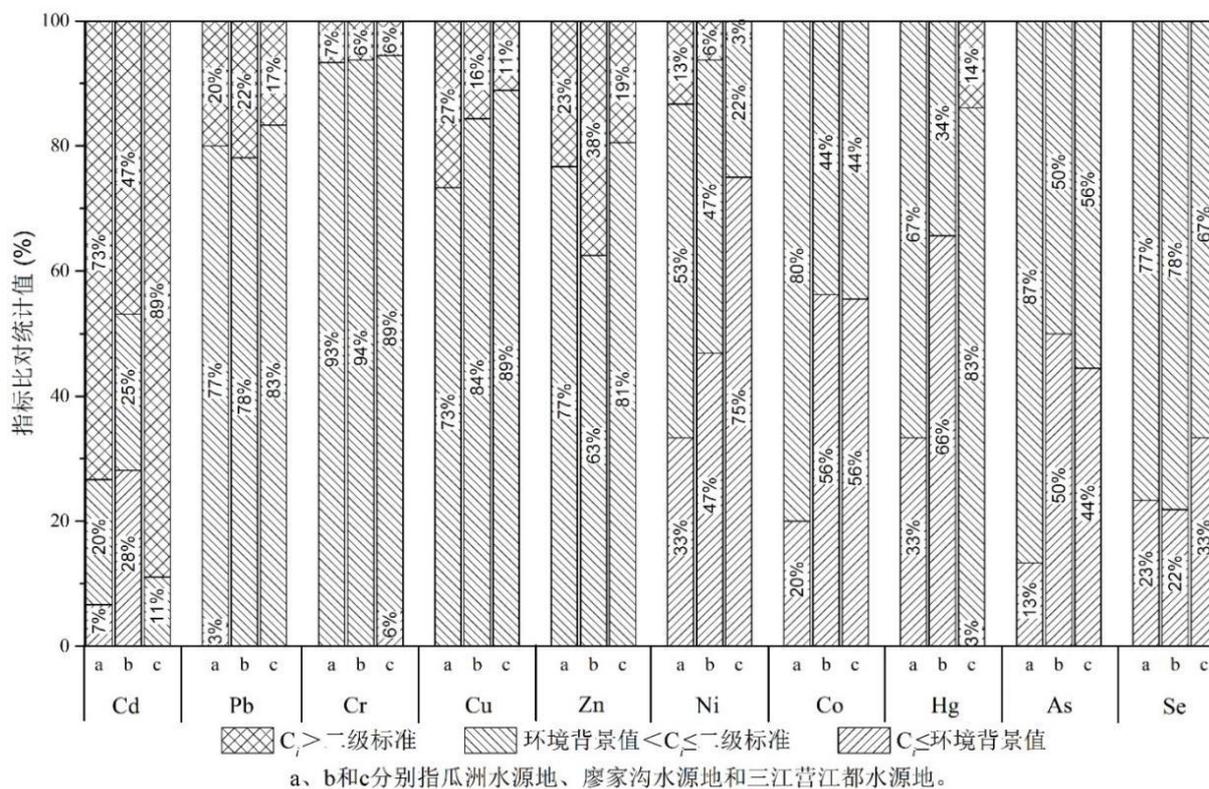


图 3 水源地采样点位样品金属含量与环境背景值和二级标准比对比例

## 2.2 重金属污染现状评价

根据单项污染指数和尼梅罗综合污染指数的计算方法，分别选取《土壤环境质量标准》一级标准、二级标准和江苏省土壤背景值作为评价参照值，计算结果见表 5。结果表明，按照一级标准作为评价参照值，3 水源地土壤中 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的单因子污染指数范围位于 1.4~2.4 之间，说明水源地土壤重金属表现为富集现象，尤其是 Cd、Cu 和 Zn，属于中等程度污染-重污染。水源地土壤中 Ni、Co、Hg、As 单因子污染指数处于 0.9~1.2 范围之内（三江营江都水源地 Hg 除外），属于非污染-轻污染状态。虽然 Hg 和 As 处于污染较轻，但由于它们毒性系数大，因此潜在环境危害较大，其发展趋势也应引起关注。不同水源地之间又具有自身特点，如廖家沟水源地 Cd 污染指数低于另外两水源地，三江营江都水源地 Hg 污染指数 ( $P_i=1.9$ ) 则明显高于其他水源地，结合上文分析讨论可知，该区域 Hg 处于中等程度污染。Se 作为动物体必需的营养元素和植物有益的营养元素，且含量远远低于《全国土壤污染状况评价技术规定》中土壤污染物的干预值 ( $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )，故 Se 不参与评价。对于尼梅罗综合污染指数，3 水源地土壤  $P_N$  位于 2 左右，进一步说明土壤已受到轻微污染或中等程度污染。若取江苏省土壤背景值作为参照，则 3 水源地  $P_N$  位于 3 左右，说明土

壤已受到较严重污染。若取二级标准作为评价参照值，则廖家沟水源地尚处于清洁状态，而瓜洲和三江营江都水源地土壤均已受到轻度污染。

总的来说，3 水源地土壤存在一定程度的重金属累积情况，处于轻度-中等程度的污染水平，尤其是 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn，已接近或已处于预警水平。

表 5 三处饮用水源地土壤中重金属污染指数

水源地	评价参照值	单因子污染指数 ( $P_i$ )										$P_N$
		Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Co	Hg	As		
长江瓜洲水源地	GB 15618-1995 一级标准	2.2	1.8	1.8	2.4	2.1	1.0	-	1.1	1.2	2.1	
	江苏省土壤背景值	3.4	2.4	2.1	3.8	3.4	1.5	1.1	0.6	1.8	3.1	
	GB 15618-1995 二级标准	1.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.3	0.3	0.6	1.2	
入江水道廖家沟水源地	GB 15618-1995 一级标准	1.4	1.8	1.7	2.4	2.3	1.0	-	0.9	1.0	2.0	
	江苏省土壤背景值	2.1	2.4	2.0	3.8	3.6	1.5	1.0	0.5	1.6	3.0	
	GB 15618-1995 二级标准	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.3	0.3	0.5	0.8	
长江三江营江都水源地	GB 15618-1995 一级标准	2.0	1.8	1.6	2.1	2.2	0.9	-	1.9	1.0	1.9	
	江苏省土壤背景值	3.1	2.5	1.9	3.3	3.4	1.4	1.0	1.0	1.5	2.9	
	GB 15618-1995 二级标准	1.4	0.8	0.7	0.7	0.9	0.7	0.3	0.6	0.5	1.1	

## 2.3 土壤潜在生态风险评价

以环境背景值（以《土壤环境质量标准》中一级标准为主要参考依据，从表 6 可以看出从表中我们看出瓜州水源地和三江营江都水源地的重金属 Hg 的单项潜在生态污染系数已达到中等污染水平，瓜州水源地的重金属 Cd 也达到中等污染水平。从总体上看廖家沟水源地最好，处于轻微污染等级，其他两处水源地已达到中等污染水平。

表 6 水源地土壤中重金属元素潜在生态污染系数

水源地	系数	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Co	Hg	As	RI
长江瓜洲水源地	最小值	23.7	5.24	2.74	5.23	1.12	3.18	3.45	13.87	4.47	63.00
	最大值	108.5	13.66	4.81	4.81	3.33	6.81	8.02	57.87	16.27	273.09
	平均值	66.15	8.87	3.57	3.57	2.10	5.04	5.33	43.47	12.07	158.63
	危害程度	中等	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	中等	轻微
入江水道廖家沟水源地	最小值	24.00	5.71	2.70	8.66	1.30	3.80	3.53	22.13	6.80	78.63
	最大值	61.50	13.14	4.46	17.49	3.83	6.26	7.94	50.40	18.00	183.02
	平均值	40.95	8.86	3.45	12.07	2.28	4.90	5.13	36.53	10.38	124.45
	危害程度	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
长江三江营江都水源地	最小值	36.00	5.23	1.79	5.54	1.49	3.46	3.45	27.20	6.80	90.96
	最大值	124.5	13.64	4.57	14.79	2.91	6.44	8.02	150.7	13.22	338.76
	平均值	61.05	9.22	3.23	10.44	2.16	4.56	5.07	77.87	10.07	183.67
	危害程度	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	中等	轻微

## 2.4 重金属的来源与聚类解析

#### 2.4.1 重金属来源分析

综上可知，所有检测项目中重金属 Cd 污染最为严重。结合水源地地理位置与土壤历史发展，可能有如下原因：（1）研究区域均存在农业种植情况，耕种中施用磷肥、含磷复合肥及农业秸秆和垃圾为原料有机肥的现象较为普遍。据报道<sup>[3, 22-24]</sup>，这些肥料中混杂微量 Cd 和 Cr，因此可以将水源地土壤中 Cd 和 Cr 积累解释为“施肥因素”。（2）可能存在土壤历史污水灌溉或地表径流造成的 Cd 累积。如我国学者通过对污灌区重金属分布的研究，表明土壤中 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 等重金属富集趋势明显<sup>[7, 25-27]</sup>，马成玲等<sup>[28]</sup>对常熟市某农田土壤调查发现，电镀企业污染可致使周围农田土壤遭受 Zn 和 Cd 污染。（3）内燃机尾气以及机械磨损产生的重金属贡献。骆永明等<sup>[29]</sup>通过土壤磁化率解析重金属来源认为，土壤中 Cd 污染与机动车尾气排放的相关性较强。

水源地土壤中 Pb 平均含量接近环境本底值的 2 倍，原因有：（1）取样区域位于城镇区域或者存在居民生活用地历史，生产和生活所产生废弃物分解所造成的污染贡献。（2）水源地存在道路或临近航道，存在机动车、船只尾气污染的可能。研究认为<sup>[30, 31]</sup>，土壤中 Pb 的积聚与交通业密切相关，来源于汽油和柴油燃烧后废气的扩散和沉降，并将 Pb 作为机动车污染源的标志性元素。因此可以将水源地土壤中 Pb 积累解释为“内燃机尾气排放因素”。

水源地土壤中 Zn 平均含量为环境本底值的 2 倍以上，原因可能包括“农药因素”、“施肥因素”和工业地表径流污染等。如含 Zn 的化肥主要有过磷酸钙和复合肥，代森锰锌、代森锌和丙森锌则是含 Zn 农药的典型代表。

3 水源地土壤 Cu 含量均比较高 ( $P_{\geq 2.1}$ )，这可能与该区域历史发展中鱼禽养殖有关，据报道，含 Cu 添加剂的动物饲料可导致土壤或水体沉积物 Cu 含量偏高<sup>[8]</sup>。邵学新等<sup>[7]</sup>通过研究工业企业对土壤中重金属的贡献，得出工业和养殖业将导致 Cu、Cd、Pb、Hg 等重金属在周边土壤的积累。

刘宏莲等<sup>[9]</sup>通过对贵金属冶炼厂附近土壤中 Se 的调查分析，认为 Se 与 Cd、Pb 和 Hg 等重金属污染存在较大相关性，并将之归结为“燃煤因素”。在本研究中，3 水源地土壤中 Se 元素均高于环境背景值，存在较高的表层积累，而 Se 作为燃煤污染排放的标识元素，故可将水源地土壤中 Cd、Pb 和 Hg 等重金属元素的污染原因部分解释为“燃煤因素”。这与水源地周边分布多家大装机量燃煤电厂实情相符。另外，Rodríguez Martínez 等人<sup>[32]</sup>对燃煤电厂周边土壤 Hg 含量进行了系统研究，认为燃煤电

厂是人为 Hg 排放的最重要来源之一，源自颗粒污染物的沉降。三江营江都水源地土壤 Hg 平均含量为环境背景值的两倍以上，除上述燃煤因素外，也有可能来源于该区域的农业生产活动，如一些含 Hg 农药和除草剂的使用<sup>[33]</sup>

### 2.4.2 重金属元素间关联度的聚类

采用聚类分析对水源地土壤重金属进行层次聚类分析，并进一步进行来源判别。

10 种元素聚类结果如图 4 所示。

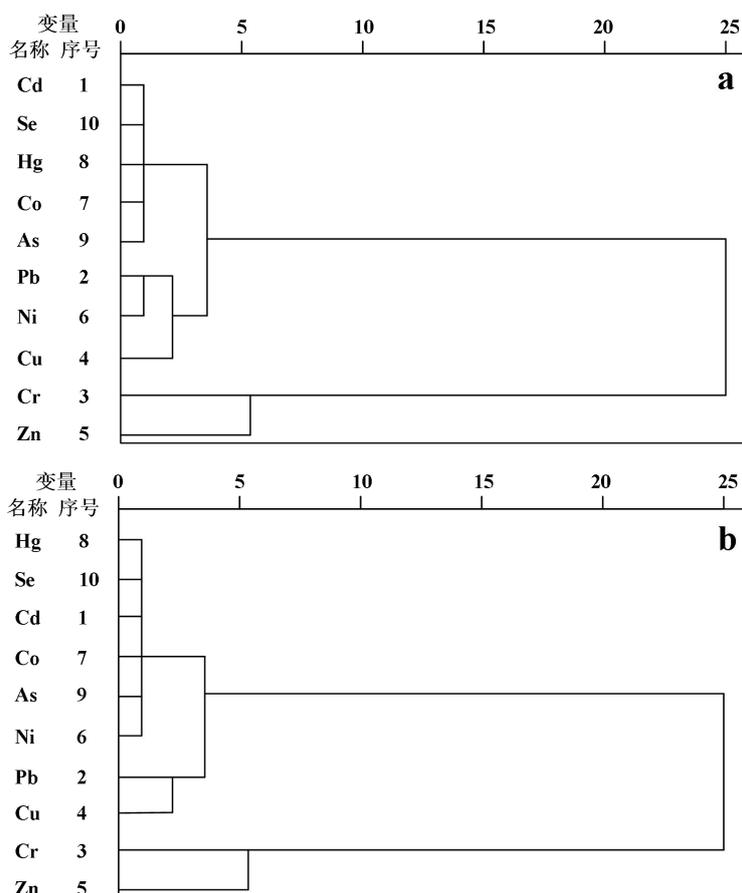


图 4 水源地土壤重金属分层聚类树形图

(a 代表瓜洲水源地，廖家沟水源地与瓜洲水源地相同；b 代表三江营江都水源地)

从图 4 中可以看出，瓜洲和廖家沟水源地土壤中的 10 种元素可分为差异明显的 4 类：第 I 类为 Cd、Se、Hg、Co 和 As；第 II 类为 Pb、Ni 和 Cu；第 III 和第 IV 类分别为单一元素 Cr 和 Zn。I 类中 Se 是燃煤污染排放的标识元素，且土壤中超过环境背景值的 Se 样品数比例大于 70%，受到较重的人为因素，推断 I 类元素来源以燃煤、内燃机尾气造成的重金属干、湿沉降为主。另外，金属 Cd 含量异常偏高，可推断 I 类元素来源还存在其他因素的叠加，如“施肥因素”、“污灌因素”等。II 类元素中，Pb 含量几乎全部超过环境本底值，且平均浓度较高，符合“内燃机尾气排放因素”的推断，

Cu 则归因于工业和养殖业的贡献，所以 II 类元素代表了交通和工业污染。Zn、Cr 和其他任何元素的相关性都不显著，并且具有面源污染和轻微-中等程度污染的特征，推断 Zn 元素来源为“农药因素”、Cr 元素来源为“施肥因素”及其他因素。与图 3-2a 相比，图 3-2b 将 Ni 聚为第 I 类，即为 Hg、Se、Cd、Co、As 和 Ni，说明三江营江都水源地土壤中这些元素具有较好的伴生关系，Ni 和 II 类元素（Pb 和 Cu）具有不同的来源。

### 2.4.3 主成分分析

通过主成分分析对水源地土壤重金属的趋势进行初步来源判析。10 种重金属共提出 3 个主成分。通过 3 个主成分进行绘制三维图（见图 5~7）。重金属的位置映射在三个面上，重金属位置越接近，说明他们的污染来源越相似。

瓜洲水源地：主成分 1 中 Pb 和 Co 的数值相近说明了主成分 1 主要反映的是 Pb 和 Co 的污染来源也说明了它们的来源较为相近，可能来源于内燃机尾气排放、燃煤。主成分 2 中主要表示 Se 的污染来源。主成分 3 中主要表示 Hg 的主要污染来源。

廖家沟水源地：主成分 1 中主要反映的是 Cd 和 Hg 的污染来源，可能来源于污水灌溉或地表径流造成的 Cd 累积、内燃机尾气以及机械磨损产生的重金属贡献及“燃煤因素”。主成分 2 中 Pb 和 Zn 的来源较为相近，可能来源于“燃煤因素”、“农药因素”及“施肥因素”。主成分 3 中说明 As 和其他元素的来源不同。

江都水源地：主成分 1 中 As 的载荷量最高，说明主成分 1 主要表示 As 的污染来源。主成分 2 中 Cd 的载荷量最高，说明主成分 2 主要表示 Cd 的污染来源。主成分 3 中 Ni 的载荷量最高，说明主成分 3 主要表示 Ni 的污染来源。

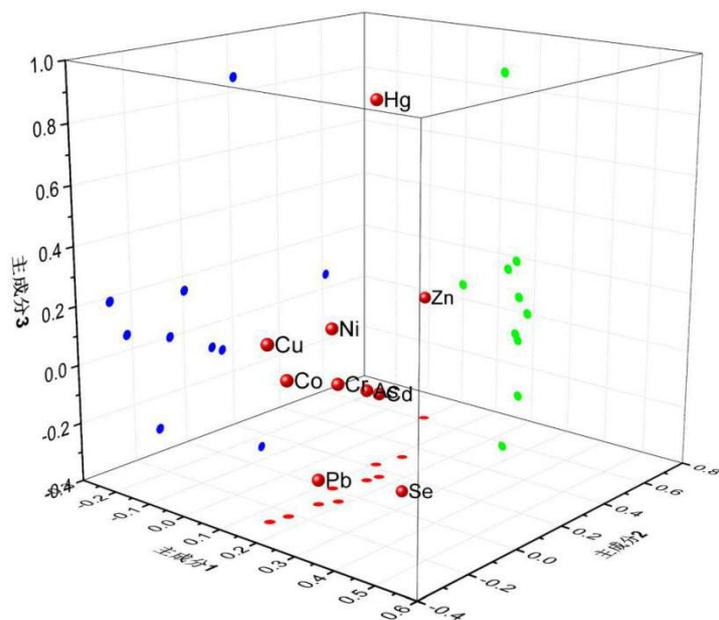


图 5 水源地土壤重金属因子载荷散点图（长江瓜洲水源地）

表 7 重金属在因子变量上的载荷量（长江瓜洲水源地）

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cd	-0.161	0.526	0.208
Pb	0.524	-0.072	-0.33
Cr	0.162	0.039	0.013
Cu	0.208	-0.159	0.118
Zn	0.144	-0.162	-0.023
Ni	-0.171	-0.151	-0.138
Co	0.5	-0.244	0.003
Hg	-0.129	-0.107	0.949
As	0.011	0.224	0.021
Se	-0.226	0.7	-0.218
特征值	5.132	1.421	0.846
贡献率/%	51.321	14.21	8.459
累计贡献率/%	51.321	65.531	73.991

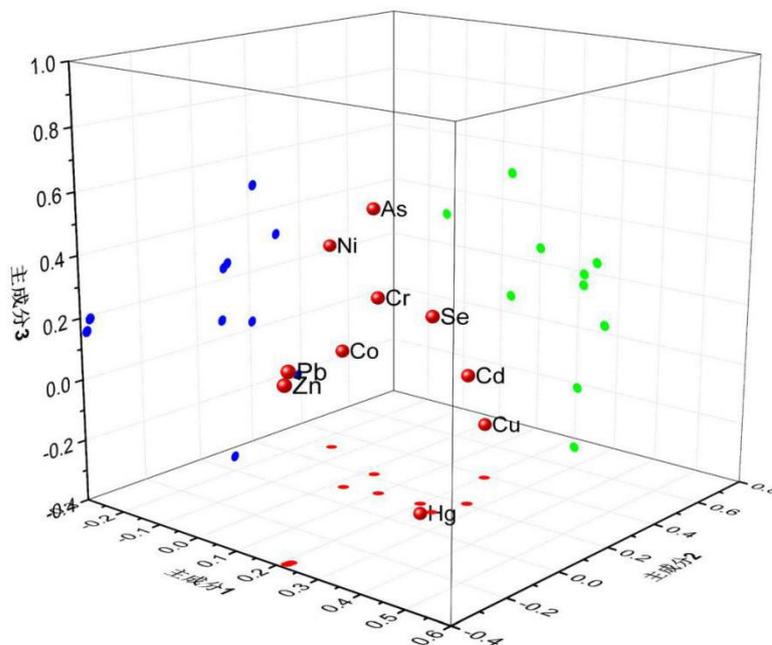


图 6 水源地土壤重金属因子载荷散点图（廖家沟水源地）

表 8 重金属在因子变量上的载荷量（廖家沟水源地）

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cd	0.31	0.056	0.07
Pb	-0.123	0.492	-0.132
Cr	-0.038	-0.072	0.009
Cu	0.446	-0.255	0.133
Zn	-0.125	0.411	0.06
Ni	-0.005	0.056	-0.119
Co	-0.006	0.076	-0.093
Hg	0.371	-0.061	-0.347
As	-0.008	-0.066	0.864

Se	0.208	0.357	0.07
特征值	2.98	1.504	1.32
贡献率/%	29.797	15.042	13.203
累计贡献率/%	29.797	44.838	58.041

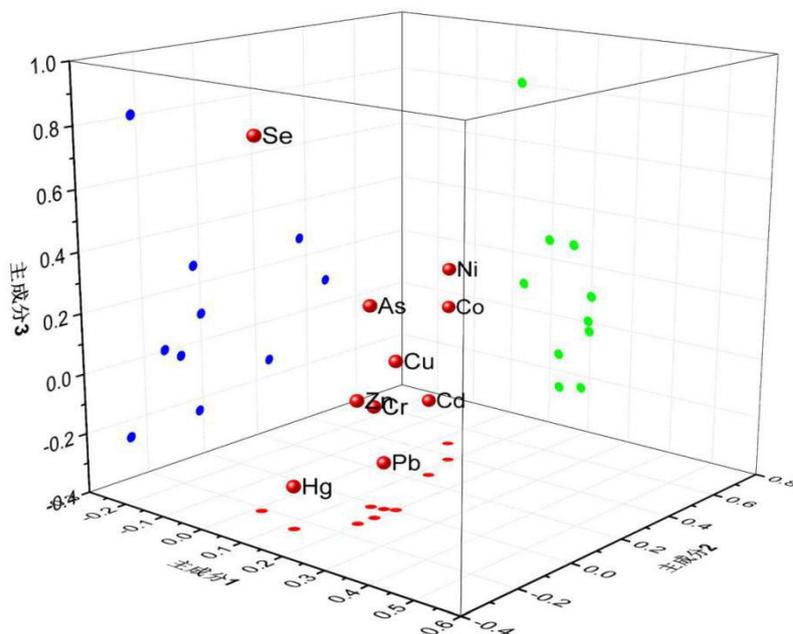


图 7 水源地土壤重金属因子载荷散点图（三江营江都水源地）

表 9 重金属在因子变量上的载荷量（三江营江都水源地）

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cd	-0.145	0.72	-0.068
Pb	-0.077	0.294	-0.027
Cr	0.102	0.23	-0.092
Cu	0.293	-0.043	0.055
Zn	0.339	0.075	-0.204
Ni	-0.238	0.021	0.663
Co	0.132	-0.187	0.503
Hg	-0.159	-0.244	0.121
As	0.551	-0.346	0.049
Se	-0.01	-0.008	0.065
特征值	4.709	1.777	1.052
贡献率/%	47.095	17.77	10.521
累计贡献率/%	47.095	64.864	75.385

### 3 结论

(1) 3 水源地土壤中重金属含量分布较为分散，受外界干扰比较显著。水源地土壤中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Se 平均含量均超过环境背景值，Ni、Co 和 As 均有点位超过环境背景值。三江营江都水源地土壤中的 Hg 存在不同于另外两水源地的污染

物来源。

(2) 采用一级标准做评价参照值，3 水源地已受到污染或中等程度污染，若取二级标准作参照，则廖家沟水源地尚处于清洁状态，而瓜洲和三江营江都水源地土壤均已受到轻度污染。总体来说，3 水源地土壤都处于轻度-中等程度的污染水平，其中 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 已接近或已处于预警水平。其含量由高到低的顺序为：Cd > Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > Hg > Co > As > Se。

(3) 采用潜在生态危害指数法得出瓜洲水源地和三江营江都水源地的重金属 Hg 的单项潜在生态污染系数已达到中等污染水平，瓜洲水源地的重金属 Cd 也达到中等污染水平。从总体上看廖家沟水源地最好，处于轻微污染等级，其他两处水源地已达到中等污染水平。

(4) 经层次聚类分析，水源地土壤中 10 种元素可分为 4 类：I 类元素来源归因于燃煤、施肥因素和污灌等混合因素；II 类元素符合“内燃机尾气排放因素”的特征，代表了交通和工业污染；II 类元素和 IV 类分别为 Cr、Zn 它们和其他任何元素的相关性都不显著，推断其来源分别为“农药因素”、“施肥因素”及其他因素。

(5) 经过主成分分析得到以下结论：瓜洲水源地：主成分 1 中 Pb 和 Co 的数值相近说明了主成分 1 主要反映的是 Pb 和 Co 的污染来源也说明了它们的来源较为相近，可能来源于内燃机尾气排放、燃煤。主成分 2 中 Se 的载荷量大，说明主成分 2 主要表示 Se 的污染来源。主成分 3 中 Hg 的载荷量最高，说明主成分 3 主要表示 Hg 的主要污染来源。廖家沟水源地：主成分 1 中 Cd 和 Hg 的数值相近说明主成分 1 主要反映的是 Cd 和 Hg 的污染来源，可能来源于污水灌溉或地表径流造成的 Cd 累积、内燃机尾气以及机械磨损产生的重金属贡献及“燃煤因素”。主成分 2 中 Pb 和 Zn 的来源较为相近，可能来源于“燃煤因素”、“农药因素”及“施肥因素”。主成分 3 中 As 的载荷量最高，说明 As 和其他元素的来源不同。江都水源地：主成分 1 中 As 的载荷量最高，说明主成分 1 主要表示 As 的污染来源。主成分 2 中 Cd 的载荷量最高，说明主成分 2 主要表示 Cd 的污染来源。主成分 3 中 Ni 的载荷量最高，说明主成分 3 主要表示 Ni 的污染来源。

## 参考文献

- [1] 王璐. 千年发展目标的回顾与展望[J]. 中国卫生政策研究, 2015, 8 (10): 40-40.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] García, M. J. M., Moreno-Grau, S., García, J. J. M., et al. Distribution of the Metals Lead, Cadmium, Copper, and Zinc in the Top Soil of Cartagena, Spain[J]. Water Air & Soil Pollution, 2001, 131 (1-4): 329-347.
- [6] McLaughlin, M. J., Parker, D., Clarke, J. Metals and micronutrients—food safety issues[J]. Field crops research, 1999, 60 (1): 143-163.
- [7] 邵学新, 黄标, 孙维侠, 等. 长江三角洲典型地区工业企业的分布对土壤重金属污染的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43 (3): 397-404.
- [8] 林健, 邱卿如, 陈建安, 等. 公路旁土壤中重金属和类金属污染评价[J]. 环境与健康杂志, 2000, 17 (5): 284-286.
- [9] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6 (5): 60-63.
- [10] 徐文东, 曾荣树, 叶大年, 等. 电厂煤燃烧后元素硒的分布及对环境的贡献[J]. 环境科学, 2005, 26 (02): 64-68.
- [11] Rice, E., Bridgewater, L. Association APH: Standard methods for the examination of water and wastewater[J]. American Public Health Association, 2012.
- [12] 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室. 环境监测方法标准实用手册(第3册):土壤、固体废物和生物监测方法(第1版)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [13] 赵振平, 张怀成, 冷家峰, 等. 王水消解蒸气发生——原子荧光光谱法测定土壤中的砷、镉和汞[J]. 中国环境监测, 2004, 20 (1): 44-46.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22105-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [17] Xiaoping, L. I., Wang, X. Contamination assessment and distributions of heavy metals from Weinan typical industrial urban soil,P.R.China[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2010, 24 (10): 100-104.
- [18] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 2010, 31 (3): 768-774.

- [19] J, L., D, C., P, G. Analyzing Multivariate Data[M]. New York: Duxbury Press, 2003.
- [20] Deng, J. J., Huang, X. F., Hu, J. W., et al. Distribution of several microorganisms and activity of alkaline phosphatase in sediments from Baihua Lake[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2009, 4 (5): 711-716.
- [21] Feng, Z., Yong, L., Guo, H. Application of Multivariate Statistical Methods to Water Quality Assessment of the Watercourses in Northwestern New Territories, Hong Kong[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2007, 132 (1-3): 1-13.
- [22] Zhang, M.-K., Ke, Z.-X. Heavy metals, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou City, China[J]. Pedosphere, 2004, 14 (2): 177-185.
- [23] Wong, S., Li, X., Zhang, G., et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Pollution, 2002, 119 (1): 33-44.
- [24] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28 (3): 647-653.
- [25] Fu, C., Guo, J., Jie, P., et al. Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yangtze River Within the Wanzhou Section, China[J]. Biological Trace Element Research, 2009, 129 (1-3): 270-277.
- [26] 李政红, 张胜, 马琳娜, 等. 污灌区土壤重金属污染分布及其影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24 (11): 166-169.
- [27] 杨继松, 孙丽娜, 杨晓波, 等. 沈阳市细河沿岸农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (5): 1933-1936.
- [28] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (3): 751-755.
- [29] 骆永明, 刘五星, 吴龙华, 等. 长江、珠江三角洲土壤及其环境[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [30] Banerjee, A. D. K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. Environmental Pollution, 2003, 123 (1): 95-105.
- [31] 马建华, 谷蕾, 李文军. 连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险[J]. 环境科学, 2009, 30 (3): 894-899.
- [32] Rodríguez Martín, J. A., Nanos, N. Soil as an archive of coal-fired power plant mercury deposition[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 131-138.
- [33] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [34] 宁小波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰林地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. 生态学报, 2009, 29 (4): 2169-2177.
- [35] 邵学新, 黄标, 赵永存, 等. 长江三角湖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.
- [36] 徐争启, 倪师军, 张成江, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31 (2): 112-115.

## 致 谢

本论文工作是在马武生、张睿和曹展梅老师的精心指导和亲切关怀下完成的。指导老师从毕业论文的选题、研究方向的确立、目标要求、基础文献资料等多方面提供了悉心的指导，为论文研究工作顺利开展指明方向，并提供了良好的研究条件。在遇到问题的时候都会耐心的给我们讲解，每次聆听与思考的过程中都使我们受益匪浅，老师们的谆谆教诲也一直在我们耳边萦绕。同时也感谢实习单位张瑜蓉等工程师对我们的指导，与她交谈中让我们明白许多专业知识。

指导老师在学业上是我们的良师，生活中更是我们的益友。指导老师在平时的交谈中总是把我们引向思考问题的深处，提升了我对催化问题的认识，不仅如此，导师还用他特有的人格魅力感染着我，将使我们终生受益。

“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”本次研究也使我们受益匪浅，在以后的学习中我们要更加知难而进，勇往直前。感谢一如既往地关心与支持我们的人，我们的进步也凝聚着你们的汗水，衷心地谢谢你们！

**2016年6月于扬州**