

# 昆明城市湖、库水体重金属分布特征及来源解析

朱梦峰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学地理学部, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2021年12月31日; 录用日期: 2022年2月7日; 发布日期: 2022年2月14日

## 摘要

以昆明市城区13个湖、库为研究对象, 对城市中心与城市边缘区域典型湖泊、水库水体重金属分布特征及其来源进行解析。利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)对城市湖泊、水库水体中的铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)等重金属的浓度进行检测, 并使用主成分分析方法对水体中的重金属来源进行分析。结果显示研究区域湖、库水体中铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)含量均未超过地表水I类质量标准, 其中位于城市中心的湖、库水体锌(Zn)、镉(Cd)、钼(Mo)的含量均大于位于城市边缘的水体; 而镍(Ni)与铜(Cu)元素含量则是位于城市边缘的湖、库水体大于位于城市中心的水体。分析结果表明, 锌(Zn)与钼(Mo)、镉(Cd)元素主要来源于城市生活污水, 而镍(Ni)与铜(Cu)元素则来自于农业化肥的使用。

## 关键词

城市水体, 重金属, 分布特征, 主成分分析, 来源解析

# Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban Lake and Reservoir Water Bodies in Kunming

Mengfeng Zhu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Kunming Yunnan

Received: Dec. 31<sup>st</sup>, 2021; accepted: Feb. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 14<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The distribution characteristics and sources of heavy metals in 13 lakes and reservoirs water bo-

dies in Kunming city were analyzed. The concentrations of copper (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), cadmium (Cd) and molybdenum (Mo) in urban lakes and reservoirs water bodies were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and the sources of heavy metals in water were analyzed by principal component analysis (PCA). The results showed that the contents of copper (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), cadmium (Cd) and molybdenum (Mo) in lake and reservoir water bodies did not exceed the grade I quality standard of surface water. The contents of zinc (Zn), cadmium (Cd) and molybdenum (Mo) in the lake and reservoir water bodies at the center of the city were higher than those in the edge of the city, while the contents of nickel (Ni) and copper (Cu) in the urban marginal water were higher than those in center areas. Principal component analysis showed that zinc (Zn), molybdenum (Mo) and cadmium (Cd) were mainly derived from municipal sewage, while nickel (Ni) and copper (Cu) were derived from agricultural fertilizer.

## Keywords

Urban Water Bodies, Heavy Metal, Distribution Feature, PCA, Source Apportionment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

水体中的重金属是指密度大于  $5 \text{ g/cm}^3$  的金属元素, 如: 铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)等金属元素[1]。水体重金属一方面对生物体具有毒性, 其进入水体后可以通过食物链在生物体内富集和放大, 最终会对人体健康产生危害[2]; 另一方面进入水体的重金属难以降解, 因此威胁着水生生态系统的安全[3][4]。例如发生于 20 世纪 50 年代日本的水俣病事件就是由于含汞(Hg)的工业废水未经处理直接排入海水, 在物理化学的作用下转化成为毒性更强的甲基汞; 然后通过食物链被生物富集, 最终危害当地人民的健康[5]。目前我国众多江、河、湖、库等水体仍然受到重金属污染, 学者们也积极得开展对水体重金属污染分布特征以及污染来源的相关研究。周巧巧等人通过整理我国 35 条河流和 64 个湖泊水体中 5 种重金属污染的文献, 分析得出在空间上, 我国东北和中部地区重金属浓度含量较西部地区高, 污染来源主要是生活废弃的排放[6]。岳霞等人对我国七大水系主要重金属污染现况进行研究发现, 七大水系受不同程度的重金属污染[7]。

城市的湖、库具有防洪排涝、蓄水灌溉、景观欣赏等功能, 但其换水周期长、水体流动性差, 受人类影响大[8]。尤其是近年来随着城市化进程的不断加快, 使得水体重金属污染日益加重。目前, 学者们对水体重金属的研究主要集中在对长江、黄河、滇池、巢湖等大江大湖以及水源地所在区域, 而对城市中的湖泊、水库水体重金属污染的研究则相对较少[9][10]。为了解昆明市城区湖泊、水库水体的重金属污染现状以及分布特征, 调查了昆明城市中心与城市边缘区域 13 个典型湖泊、水库, 以水体中铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo) 5 种重金属元素浓度为测定目标; 研究目前城市湖、库水体重金属污染现状以及分布特征, 为日后城市湖、库水体的科学治理提供基础资料。

## 2. 材料与方法

湖泊、水库水体样品采集于 2021 年 4 月份, 该研究区域共 13 个湖、库, 位于昆明市主城区, 包括位于城市边缘呈贡区洛龙河子流域(白龙潭、洛龙湖、泛春湖、沐春湖)与捞鱼河子流域(马金铺塘水库、月角水库、中庄鱼塘水库、大渔公园、关山水库), 以及位于中心城区的盘龙江子流域(龟龙湖、翠湖、莲

花池、月牙潭)。按照地表水监测采样点布设要求,每个湖、库水体采集3个水样。采样前使用GPS定位确定湖泊采样点的具体位置,采样时使用皮划艇划到采样点,使用5 L有机玻璃采水器在水面下50 cm处采集水样。采集好的水样由纯水清洗干净的2 L聚乙烯瓶采样瓶装集。为了获得较为准确的水质指标数据,采样完成后需将水样放入4℃保温箱保存,然后带回实验室进行分析。

在使用仪器检测水体重金属浓度前,使用0.22 μm孔径滤膜对水样进行过滤,去除水样中的杂质,而后进行酸化、静置等预处理。为了保证检测结果的准确性,每个水样设置两个平行样。水样中重金属铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)浓度的检测使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)进行测定。使用Pearson相关性对水体中5种重金属的检测结果进行分析;使用主成分分析对水体重金属污染源进行分析,步骤如下:首先对所使用的重金属原始浓度数据进行标准化处理,其次利用Bartlett球形度和KMO检验对数据相关性进行判别,以确定原始数据是否适合使用主成分分析,当KMO值大于0.5且Bartlett球形度检验结果为 $P < 0.05$ 时可以使用主成分分析[11]。以上分析均在SPSS 21.0软件中进行。

### 3. 实验结果与讨论

#### 3.1. 昆明市城区湖、库水体重金属含量特征

对主城区13个湖泊、水库水样中5种重金属浓度进行检测,其中铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)5种重金属全部被检出。13个水体分别属于3个河流子流域,水样浓度如表1所示。盘龙江流域湖、库水体中检测出锌(Zn)的平均浓度最高,为5.182 μg/L。研究区湖、库水体中5种重金属的平均浓度顺序为:  $Zn > Mo > Ni > Cu > Cd$ ,参照《地表水环境质量标准》(GB2828-2002),使用单因子评价法对湖、库水体重金属污染进行评价。结果表明,所有检测的湖、库水体中铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)均未超过地表水I类质量标准。三个子流域水体中锌(Zn)、镉(Cd)、钼(Mo)平均浓度均为盘龙江子流域 > 洛龙河子流域 > 捞鱼河子流域,而水体中铜(Cu)和镍(Ni)平均浓度为洛龙河子流域 > 盘龙江子流域 > 捞鱼河流域。3个子流域湖、库水体重金属含量铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)变异系数分别是16.14%~94.60%、26.54%~50.66%、13.78%~43.07%、34.29%~40.01%、18.50%~53.66%之间,三个子流域5种重金属元素的变异系数均超过10%,说明在同一个流域内不同采样点重金属浓度存在较大差异。洛龙河子流域水体中铜(Cu)的变异系数相对较大,钼(Mo)的变异系数相对较小,说明铜(Cu)在洛龙河子流域湖、库水体间的差异最显著。而捞鱼河和盘龙江子流域水体中钼(Mo)的变异系数相对较大,说明钼(Mo)在捞鱼河和盘龙江子流域湖、库水体间的差异最显著。捞鱼河和盘龙江子流域水体中变异系数相对较小的分别为铜(Cu)和镍(Ni)。

研究区域湖、库水体5种重金属浓度检测结果见表1。

**Table 1.** Concentrations of heavy metals in lakes and reservoirs water bodies (unit: μg/L)

**表 1.** 各流域湖、库水体中重金属浓度(单位: μg/L)

| 采样点    |       | Cu    | Zn    | Ni     | Cd     | Mo     |
|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|        | 最小值   | 0.516 | 1.399 | 0.465  | 0.003  | 0.672  |
|        | 最大值   | 0.761 | 4.803 | 1.308  | 0.013  | 3.354  |
| 捞鱼河子流域 | 均值    | 0.609 | 2.873 | 0.755  | 0.0086 | 1.814  |
|        | 标准差   | 0.098 | 1.259 | 0.325  | 0.003  | 0.973  |
|        | 变异系数% | 16.14 | 43.83 | 43.067 | 40.011 | 53.655 |

Continued

|        |       |       |       |       |        |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 洛龙河子流域 | 最小值   | 0.62  | 1.814 | 0.846 | 0.006  | 0.846 |
|        | 最大值   | 6.126 | 6.195 | 1.657 | 0.015  | 1.657 |
|        | 均值    | 2.366 | 3.978 | 1.243 | 0.0095 | 2.079 |
|        | 标准差   | 2.238 | 2.015 | 0.368 | 0.003  | 0.385 |
|        | 变异系数% | 94.60 | 50.66 | 29.59 | 35.31  | 18.50 |
| 盘龙江子流域 | 最小值   | 1.109 | 3.879 | 0.923 | 0.012  | 2.149 |
|        | 最大值   | 2.829 | 7.446 | 1.361 | 0.027  | 6.375 |
|        | 均值    | 1.961 | 5.182 | 1.158 | 0.0188 | 3.745 |
|        | 标准差   | 0.666 | 1.375 | 0.159 | 0.0064 | 1.649 |
|        | 变异系数% | 33.96 | 26.54 | 13.78 | 34.29  | 44.04 |

对三个子流域水体的 5 种重金属含量进行单因子方差分析。结果表明,研究的湖、库水体中铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、钼(Mo)含量在三个子流域间无显著差异;而镉(Cd)含量在三个子流域间差异显著( $P < 0.05$ ),这可能与湖、库所处环境、入湖污染物的排放等因素有关。进一步对子流域间差异显著的重金属镉(Cd)进行多重比较,发现镉(Cd)含量在捞鱼河子流域和洛龙河子流域之间无显著差异,在洛龙河子流域与盘龙江子流域间也无显著差异,而镉(Cd)含量在盘龙江子流域与捞鱼河子流域间则存在显著差异。

### 3.2. 昆明市城区湖、库水体重金属含量相关性分析

对水体重金属浓度的相关性进行分析可以判断水体重金属的来源是否相同,若水体重金属浓度之间具有显著的相关关系,说明重金属来源可能相同[12]。对研究区各湖、库水体重金属进行相关性分析,结果如表 2 所示。结果表明,镍(Ni)与铜(Cu)、锌(Zn)含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),说明这三种重金属污染之间具有一定的同源性;锌(Zn)与钼(Mo)、镉(Cd)呈显著正相关( $P < 0.05$ ),而钼(Mo)与镉(Cd)呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明这三种重金属也同样具有一定的同源性。

**Table 2.** Pearson correlation of five heavy metal elements in lakes and reservoirs water bodies

**表 2.** 湖、库水体 5 种重金属元素 Pearson 相关性

| 元素 | 镍      | 铜     | 锌      | 钼       | 镉     |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|
| 镍  | -      | 0.014 | 0.025  | 0.490   | 0.180 |
| 铜  | 0.659* | -     | 0.092  | 0.693   | 0.486 |
| 锌  | 0.617* | 0.487 | -      | 0.022   | 0.021 |
| 钼  | 0.211  | 0.121 | 0.626* | -       | 0.000 |
| 镉  | 0.396  | 0.212 | 0.632* | 0.830** | -     |

注: \*在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\*在 0.1 水平(双侧)上显著相关。

### 3.3. 昆明市城区湖、库水体重金属含量主成分分析

为了进一步分析湖泊、水库水体中重金属污染源,采用主成分分析方法对其来源进行分析[13] [14]。统计结果如表 3 所示,从表中可以发现湖、库水体中 5 种重金属可以分为 2 个主成分,各累计平方和贡献分别为 45.297%和 39.429%;总累计平方和为 84.726%,能够较好的反映重金属主成分特征。

**Table 3.** Eigenvalue and variance contribution rate  
**表 3.** 特征值与方差贡献率

| 成分 | 初始值   |        |         | 旋转后    |        |
|----|-------|--------|---------|--------|--------|
|    | 特征值   | 方差%    | 累计%     | 方差%    | 累计%    |
| 1  | 2.953 | 59.050 | 59.050  | 45.297 | 45.297 |
| 2  | 1.284 | 25.676 | 84.726  | 39.429 | 84.726 |
| 3  | 0.344 | 6.881  | 91.608  | -      | -      |
| 4  | 0.293 | 5.850  | 97.458  | -      | -      |
| 5  | 0.127 | 2.542  | 100.000 | -      | -      |

第一主成分方差贡献率为 45.297%，特征表现因子变量在锌(Zn)与钼(Mo)、镉(Cd)元素的浓度上具有较高的载荷，这与水样重金属浓度相关性分析结果具有一致性。锌(Zn)、钼(Mo)、镉(Cd)元素主要来源于生活污水、金属冶炼、微电子业、矿产资源的燃烧等[15]。从空间大小分布上看，锌(Zn)与钼(Mo)、镉(Cd)含量高值都出现在盘龙江子流域，即在中心城区。该区域人口密度大，城市生活污水量大，且该区域存在一些工业资源；如金属冶炼、微电子业发达等，因此该区域湖、库水体重金属污染可能直接或者间接与这些因素有关。第一主成分来源可能为城市生活排放源。

第二主成分贡献率为 39.429%，特征表现因子变量在镍(Ni)与铜(Cu)元素的浓度上具有较高的载荷。镍(Ni)与铜(Cu)元素主要来源于水泥沥青、以及农业化肥、金属冶炼等[16]。镍(Ni)与铜(Cu)元素高值都出现在洛龙河子流域，该区域属于昆明市呈贡区。洛龙河流经农业区域，农田大量肥料的使用，可能使水体中的重金属浓度增加。第二主成分污染来源与农业化肥污染排放有关。

通过对昆明市主城区典型湖泊、水库水体重金属污染现状及污染特征进行分析，发现位于城市中心区域的湖、库水体重金属浓度高于城市边缘的水体，且处于城市中心和城市边缘水体的主要重金属污染元素存在差别。根据重金属分布特征及污染来源分析，建议在中心城区重视对城市生活污水排放的管理与处理。而在城市边缘地区，一方面要重视控制城市的生活污水，另一方面也要合理的使用农药化肥；从而确保进入湖、库的水质达标。由于这些湖、库水体位于昆明市城区，也是人们休闲、娱乐的主要场所；因此在人们的游览之时，提醒市民朋友不乱扔垃圾入湖、库，增强人民的环保意识也十分必要。

#### 4. 结论

1) 昆明市主城区三个子流域湖、库水体的铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、镉(Cd)、钼(Mo)5种重金属元素含量均未超过地表水 I 类质量标准。

2) 镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)三种重金属污染之间具有一定的同源性，锌(Zn)、钼(Mo)、镉(Cd)三种重金属也同样具有一定的同源性。其中，城市生活污水是 Zn、Mo、Cd 元素的主要来源，农业化肥的使用使得水体的 Ni、Cu 元素含量增加。

3) 位于城市中心的湖、库水体锌(Zn)、镉(Cd)、钼(Mo)含量大于位于城市边缘的水体，而位于城市边缘湖、库水体的镍(Ni)与铜(Cu)元素含量均大于位于城市中心的水体。为了提高城市水体水质，城市中心区域要重视生活污水的治理，而城市边缘区域则需要控制化肥和农药的使用。

#### 参考文献

- [1] 王宏铤, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 596-605.

- 
- [2] 欧异斌, 刘忠义, 娄敏, 秦普丰. 重金属在水体中的化学状态、危害及其防治对策[J]. 中国环境管理, 2013, 5(6): 50-53.
- [3] 姜楠. 浅析水体重金属污染的生态效应与防治技术[J]. 科学技术创新, 2020(14): 161-162.
- [4] 王海东, 方凤满, 谢宏芳. 中国水体重金属污染现状研究与展望[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(1): 14-18.
- [5] 原田正纯, 王柏祥, 冯佳永. 世界汞环境污染事件[J]. 环境科学与技术, 1983(4): 45-47+37.
- [6] 周巧巧, 任勃, 李有志, 牛艳东, 丁小慧, 姚欣, 边华林. 中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析[J]. 环境化学, 2020, 39(8): 2044-2054.
- [7] 岳霞, 刘魁, 林夏露. 中国七大主要水系重金属污染现状[J]. 预防医学论坛, 2014, 20(3): 209-213+223.
- [8] 刘畅, 赵瑞一, 孟祥东, 罗维维. 农业区水库水体重金属分布特征及来源解析[J]. 四川建材, 2021, 47(6): 36-37.
- [9] 王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2016.
- [10] 刘总堂, 李春海, 章钢娅. 运用主成分分析法研究云南湖库水体中重金属分布[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 459-466.
- [11] 张明明, 陈刚, 刘耿伟, 腾祥帅, 华勇. 基于主成分分析和水质标识指数的地下水评价[J]. 水利信息化, 2021(4): 47-51+59.
- [12] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷. 浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 108-116.
- [13] 刘静, 马克明, 曲来叶. 湛江红树林湿地水体重金属污染评价及来源解析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(1): 22-31.
- [14] 刘志奇, 王华, 冯翔宇, 闫怀宇, 夏琨. 无锡滨湖河网重金属时空分布特征研究[J]. 四川环境, 2021, 40(3): 105-111.
- [15] 耿雅妮, 王国华, 金梓函, 杨宁宁, 张军. 渭河宝鸡段及其支流和水渠水体中八种重金属元素含量的空间分布特征[J]. 湿地科学, 2021, 19(4): 414-422.
- [16] 徐金英, 邹辉, 王经波, 郭宇菲, 王晓龙. 长江干流主要重金属污染状况及其来源解析[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 21-28.