

# 小湾水库水质指标差异及其关联分析

彭万辉<sup>1</sup>, 傅开道<sup>1\*</sup>, 杨福平<sup>2,3</sup>, 周艳和<sup>2,3</sup>, 黄凯<sup>1</sup>, 宁梅<sup>1</sup>, 薛瑞敏<sup>1</sup>, 朱玘<sup>1</sup>

<sup>1</sup>云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明

<sup>2</sup>华能澜沧江水电股份有限公司小湾水电厂, 云南 大理

<sup>3</sup>华能龙开口水电有限公司, 云南 大理

Email: 1447978254@qq.com, \*kdfu@ynu.edu.cn

收稿日期: 2020年12月30日; 录用日期: 2021年2月24日; 发布日期: 2021年3月18日

## 摘要

为了探究澜沧江建坝对水质时空变化及其相互关联效应, 采集2019年枯水期和丰水期小湾水库坝上坝下水体, 分析常规指标水温(Temp)、pH、氧化还原电位(ORP)、电导率(EC)、浊度(Turb)、溶解氧(DO)及总氮(TN)、总磷(TP)和重金属的时空分布特征及其关联效应。结果表明: 1) 坝上下水体酸碱性无差异且呈中性, 水温变化范围是15.86℃~25.17℃, DO介于7.12~14.14 mg·L<sup>-1</sup>之间, Turb介于141~211 NTU之间, EC介于33.60~41.67 uS·cm<sup>-1</sup>之间, ORP介于198~470 mV之间, 总体水质良好。2) TN变化范围在0.19~0.72 mg·L<sup>-1</sup>、TP变化范围在0.011~0.033 mg·L<sup>-1</sup>, 发生水体富营养化风险较低, TN和TP均是坝上高于坝下, 枯水期高于丰水期; 小湾水体中重金属大多达到了II类水标准要求。3) 水质中NTU、TDS、TP和TN与水体重金属含量相关性显著, 水体中重金属Hg与Ni呈显著正相关关系。

## 关键词

小湾水库, 水质, 时空变化, 相关性分析

# Difference and Correlation Analysis of Water Quality Indexes of the Xiaowan Reservoir

Wanhui Peng<sup>1</sup>, Kaidao Fu<sup>1\*</sup>, Fuping Yang<sup>2,3</sup>, Yanhe Zhou<sup>2,3</sup>, Kai Huang<sup>1</sup>, Mei Ning<sup>1</sup>, Ruimin Xue<sup>1</sup>, Qi Zhu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of International River and Ecological Security, Yunnan University; Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Xiaowan Hydropower Plant, Dali Yunnan

<sup>3</sup>Huaneng Longkaikou Hydropower Co., Ltd., Dali Yunnan

Email: 1447978254@qq.com, \*kdfu@ynu.edu.cn

Received: Dec. 30<sup>th</sup>, 2020; accepted: Feb. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 18<sup>th</sup>, 2021

作者简介: 彭万辉, 出生于1996年3月, 云南文山人, 硕士研究生, 从事河流水环境变化效应研究。

\*通讯作者。

文章引用: 彭万辉, 傅开道, 杨福平, 周艳和, 黄凯, 宁梅, 薛瑞敏, 朱玘. 小湾水库水质指标差异及其关联分析[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 147-156. DOI: 10.12677/jwrr.2021.102015

## Abstract

In order to explore the temporal and spatial effects of dam construction on water quality change and its correlation, the water sampling at up and down of the Xiaowan Reservoir in 2019 wet and dry seasons was carried out. The conventional water temperature (Temp), pH, REDOX potential (ORP), electrical conductivity (EC), turbidity (Turb), dissolved oxygen (DO) and total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and the space-time distribution characteristics of heavy metals and their associated effects were analyzed. The results show that: 1) The water temperature is varied from 15.86°C to 25.17°C, DO from 7.12 to 14.14 mg·L<sup>-1</sup>, Turb from 141 to 211 NTU, EC from 33.60 to 41.67 uS·cm<sup>-1</sup> and ORP from 198 to 470 mV, and the water quality is generally good. 2) The TN and TP are ranged from 0.19 to 0.72 mg·L<sup>-1</sup>, 0.011 to 0.033 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. The risk of water eutrophication is relatively low. Both TN and TP are higher up the dam than down the dam, and the dry season is higher than the wet season. Most of heavy metals in water body have reached the II class water standards. 3) The NTU, TDS, TP and TN are significantly correlated with heavy metal content, while Hg and Ni are significantly positively correlated.

## Keywords

The Xiaowan Reservoir, Water Quality, Temporal and Spatial Variation, Correlation Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

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

河流是人类最可直接利用的淡水资源,河流水质是河流生态系统健康的重要指标[1][2],其好坏对于流域内用水以及流域发展有着重要的意义[3]。河流的水质主要受到地质、水文、气象等自然因素周期性波动以及受污染排放、兴水利设施等人类活动而导致的随机波动两方面的影响[4]。水电工程在带来经济效益的同时,又会破坏河流生态系统的平衡[5]。澜沧江湄公河作为一条国际河流,其流域矿产与水能资源开发对下游河道水沙及其水域生态环境影响的议题,一直倍受国际社会关注。大型水库建成之后,改变了河流水文、水力学性质,形成了小湾库区河道型水库与坝下天然河道两种形态,使其水质因子也呈现出不同的变化特征,水质问题关系着小湾水库工程的安全运行与库区社会经济的可持续发展。

因澜沧江支流沱江蕴藏有亚洲最大铅锌矿——兰坪铅锌矿,所以关注流域重金属污染的研究由来已久。张继来[6]在对澜沧江中下游水沙鱼重金属研究中发现,水体中 Hg 的含量超过了渔业水质标准,宋静宜等人[7]发现小湾水库干流库尾多种重金属属于重度污染,支流黑惠江 As、Cd 属于中度污染,而水体重金属作为一类毒性大、持久性强、富集性高且降解难的环境污染物,进入水体后不但易积累、不可降解,而且积累到一定程度就会对水生生态系统产生严重危害,甚至会通过饮水、食物链等途径低剂量威胁人体健康[8]。目前,针对小湾水库的研究,主要集中在水质常规指标现状评价、水体富营养化、泥沙或沉积物重金属污染评价方面,对小湾水库水体中重金属的研究鲜有报道,拦坝效应对重金属的时空变异特征研究更是缺乏。

因此,本文选取小湾水库坝上坝下水体为研究对象,在监测分析水体中水温(Temp)、pH、氧化还原电位(ORP)、电导率(EC)、浊度(Turb)、溶解氧(DO)等常规指标及总氮(TN)、总磷(TP)和 Hg、Zn、As、Cd、Ni、Mn、Cu、Cr、Pb 等 9 种重金属含量在时空变异特征的基础上,揭示拦坝效应对水质因子与重金属含量变化及其关联效应,以期对小湾水库环境管理提供理论依据。

## 2. 研究区域及研究方法

### 2.1. 研究区概况

小湾水电站于 2010 年正式投产, 系澜沧江中下游河段的“龙头水库”, 为“两库八级”中的第二级, 以发电为主兼防洪、灌溉、拦沙及航运等效益, 水库正常蓄水位 1240 m, 汛限制水位 1236 m, 死水位 1166 m, 装机容量 4200 MW, 总库容量 150 亿  $\text{m}^3$ , 调节库容约 100 亿  $\text{m}^3$ , 为不完全多年调节水库[9], 坝高 294.5 m, 世界第三高坝, 干流澜沧江库区回水末端距坝址 178 km, 支流黑惠江库区回水末端距坝址 123.7 km。小湾水库年降水量在 770~1330 mm 之间, 相对湿度在 63% 至 85% 之间。夏秋季降雨丰富, 冬春季降雨减少, 日照时间长, 雨季一般出现在 5 月至 10 月, 旱季出现在 11 月至次年 4 月[10]。

### 2.2. 研究方法

#### 2.2.1. 样品采集与现场水质检测

本研究共布置了两个采样断面如图, 坝上断面为小湾电站前 200 米处库区干流与支流黑惠江交界处, 坝下断面为小湾大桥(图 1)。分别于 2019 年 3 月和 11 月(枯水期), 同年 6~8 月(丰水期)进行水样采集。每个样点采集水面以下 0.5 m 处的水样于润洗过三次原水样的 1 L 聚乙烯塑料瓶中, 标记好时间和地点, 样品采集后防止暴晒, 低温保存运送回实验室待测。同时利用便携式 Horiba U-50 多参数水质分析仪现场测定水温、pH、氧化还原电位、电导率、浊度、溶解氧等水质常规指标。

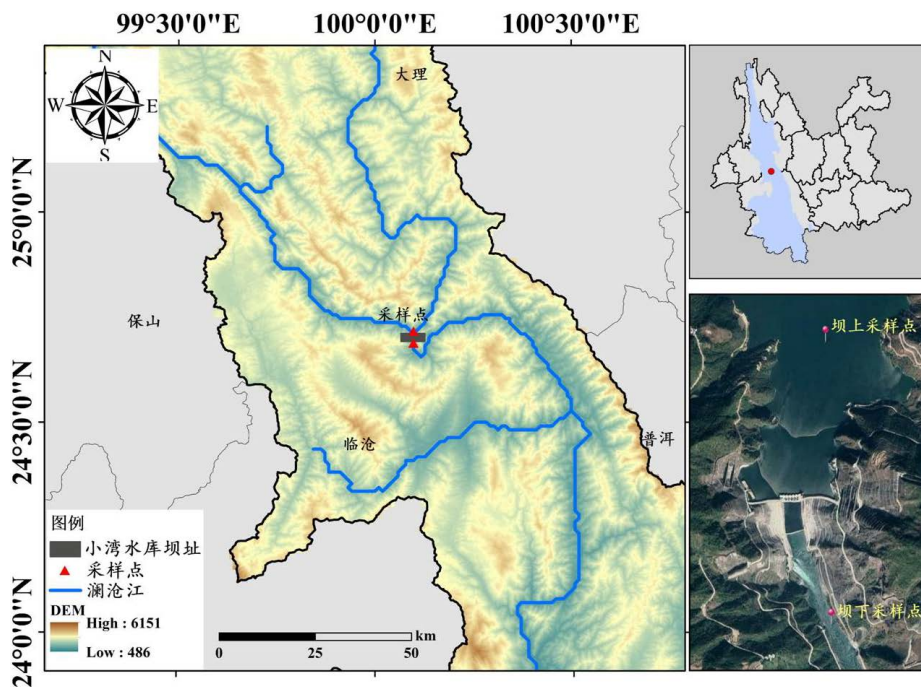


Figure 1. Schematic diagram of sampling point

图 1. 采样点示意图

#### 2.2.2. 实验室测定

水质总氮(TN)、总磷(TP)均采用国家标准测定; 所有未经酸化的水样, 经 0.45 mm 滤膜过滤后采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS7900, 美国 Agilent)检测水样中 Hg、Zn、As、Cd、Ni、Mn、Cu、Cr、Pb 等 9 种重金属的含量(云南大学现代分析测试中心)。实验所用试剂均为优级纯, 所有玻璃器皿使用前均用浓度为 5% 的硝

酸浸泡 24 h, 用去离子水冲洗干净后烘干备用。分经检验, 待测元素相对标准偏差(RSD)均低于 15%, 符合美国环境保护署 USEPA 要求(RSD < 30%)。

### 2.3. 数据处理与分析

采用 ArcGIS10.2、Excel 2016、R 语言和 Origin 2019 软件进行制图与数据的统计处理。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 水环境因子空间分布与季节变化特征

结合 2019 年研究区域水质因子实测范围(图 2), 对水质因子空间差异特征分析可知, 小湾水体呈弱酸偏中性, 坝上坝下酸碱性无显著差异; 坝上监测月份水温变化范围在 17.70℃~25.17℃之间, 坝下监测月份水温变化范围在 15.86℃~20.59℃之间。由于中下层取水发电, 坝上水体表层水温高于坝下; 坝上监测月份 DO 变化范围在 7.12~8.76 mg·L<sup>-1</sup>之间, 坝下监测月份 DO 变化范围在 8.21~14.14 mg·L<sup>-1</sup>之间, 根据《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》, 除了 11 月坝上 DO 值未达到 I 类水 7.5 mg·L<sup>-1</sup> 以为均达到了 I 类水标准。拦坝蓄水发电过程伴随着坝下河流水体得到充氧的发生, 同时溶解氧还受到温度的影响, 坝下水体中的溶解氧要高于坝上相对静止水体的溶解氧; 坝上监测月份 Turb 变化范围在 165~209 NTU 之间, 坝下监测月份 Turb 变化范围在 141~211 NTU 之间。浊度主要与水体中的悬浮物有关, 由于河流筑坝蓄水, 会降低水流流速, 增加水力停留时间, 对河流中的悬移质泥沙及其他悬浮物具有拦截效应[11], 故坝上水体 Turb 较高于坝下; 坝上监测月份 EC 变化范围在 33.60~38.80 uS·cm<sup>-1</sup>之间, 坝下监测月份 EC 变化范围在 38.03~41.67 uS·cm<sup>-1</sup>之间。坝下水体中 EC 高于坝上水体, 主要与水体中的 TDS 含量高低有关。坝上监测月份 ORP 变化范围在 273~470 mV 之间, 坝下监测月份 ORP 变化范围在 198~442 mV 之间。

坝上监测月份 TN 变化范围在 0.31~0.72 mg·L<sup>-1</sup>之间, 坝下监测月份 TN 变化范围在 0.19~0.68 mg·L<sup>-1</sup>之间, 全监测时段水体中 TN 含量值整体处于 III 类水标准之下, 未达到中国湖泊富营养化阈值。坝上监测月份 TP 变化范围在 0.015~0.026 mg·L<sup>-1</sup>之间, 坝下监测月份 TP 变化范围在 0.011~0.033 mg·L<sup>-1</sup>之间。全监测时段水体中 TP 值整体处于 II 类水标准值之下, 极少数月份处于 III 类水标准值之下, 也未达到中国湖泊富营养化阈值。总体上, 坝上水体中 TN、TP 含量均是高于坝下的。综合分析, 建坝对河流水体的水温、DO、TN 和 TP 影响较大。

结合图 3 对水质因子时间差异特征进行分析可知, 小湾水体酸碱性受季节影响较小, 枯水期水质 pH 值略大于丰水期; 枯水期水温低于丰水期水温, 表层 1~3 m 水深范围内水温受气候因素影响较大, 变化幅度较大[12]; 枯水期 DO 变化范围在 7.12~9.15 mg·L<sup>-1</sup>之间, 丰水期 DO 变化范围在 6.86~14.14 mg·L<sup>-1</sup>之间。由于受到雨量及流速的影响, 枯水期水体中 DO 总体要低于丰水期; 枯水期 Turb 变化范围在 141~187 NTU 之间, 丰水期 Turb 变化范围在 165~211 NTU 之间。枯水期水体中 Turb 低于丰水期, 主要原因是雨季河流泥沙含量高, 悬浮物较多; 枯水期 EC 变化范围在 33.60~40.30 uS·cm<sup>-1</sup>之间, 丰水期 EC 变化范围在 38.03~41.67 uS·cm<sup>-1</sup>之间。枯水期水体的 EC 低于丰水期, 电导率既可以反映水体可溶性固体的总量, 也可作为水体盐度的度量指标, 在本流域内丰水期的农业活动要较多于枯水期, 再加上雨季雨量充沛, 会提高水体中的 TDS 及盐度的含量; 枯水期 ORP 变化范围在 198~470 mV 之间, 坝下监测月份 ORP 变化范围在 334~442 mV 之间。

枯水期 TN 变化范围在 0.46~0.72 mg·L<sup>-1</sup>之间, 丰水期 TN 变化范围在 0.19~0.68 mg·L<sup>-1</sup>之间。枯水期 TP 变化范围在 0.015~0.033 mg·L<sup>-1</sup>之间, 丰水期 TP 变化范围在 0.011~0.023 mg·L<sup>-1</sup>之间。枯水期水体中 TN、TP 高于丰水期的, 枯水期发生富营养化的风险更高。从时间尺度上来看, 水体中的溶解氧和氮磷含量季节性变化较为显著。

### 3.2. 水体重金属空间分布与季节变化特征

小湾水库水体重金属含量统计分析结果(图 4)可知, 水体中重金属 Mn 的含量均值为 0.00055 mg·L<sup>-1</sup>; 水体

中重金属 As、Cd、Cu 的含量均值分别为 0.0041、0.0000051、0.0006  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均达到了 I 类水标准；水体中重金属 Ni、Zn 的含量均值分别为 0.00015  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.0025  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均达到了 II 类水标准；水体中重金属 Hg 的含量均值为 0.00175  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，各月份中 Hg 含量均高于 IV 类标准 0.001  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的限值要求，且部分月份 Hg 值远高于 V 类水标准 0.01  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的限值要求；水体中重金属 Cr 和 Pb 的含量低于 ICP-MS 的检测限未检出，也表明其达到了 I 类水的要求。

水体重金属除了 As 含量水库坝上低于坝下以外，其余的重金属含量总体上都呈现出坝上高于坝下，水动力条件的改变，河流中的泥沙及其他悬浮物随之被拦截下来，且重金属易附着在泥沙表面，通过水动力条件的改变或者生物活动等各种途径再次向水生态环境中释放；除了重金属 Mn 以外，其他的均表现出枯水期水体重金属含量高于丰水期，这是因为丰水期雨水冲刷的过程中带入受污染和未受污染的水，稀释了水体中重金属的浓度，而在枯水期，干旱和蒸发量大造成水位下降，在水体中的重金属含量被浓缩，故水体中重金属含量增高[13]。

### 3.3. 水质指标的相关性分析

相关性是一种无参数(与分布无关)检验方法，用于度量变量之间联系的强弱，对于不服从正态分布的原始数据有较好的适用性[14]。为了解小湾水库水质因子之间的相互关联效应，进行了相关性分析(图 5)。坝上水体中 Mn 与 ORP、NTU、TP、TN 呈显著相关性( $p < 0.05$ )，坝下水体中 Ni 与 EC、Zn 与 TP 呈极显著正相关性( $p < 0.01$ )，

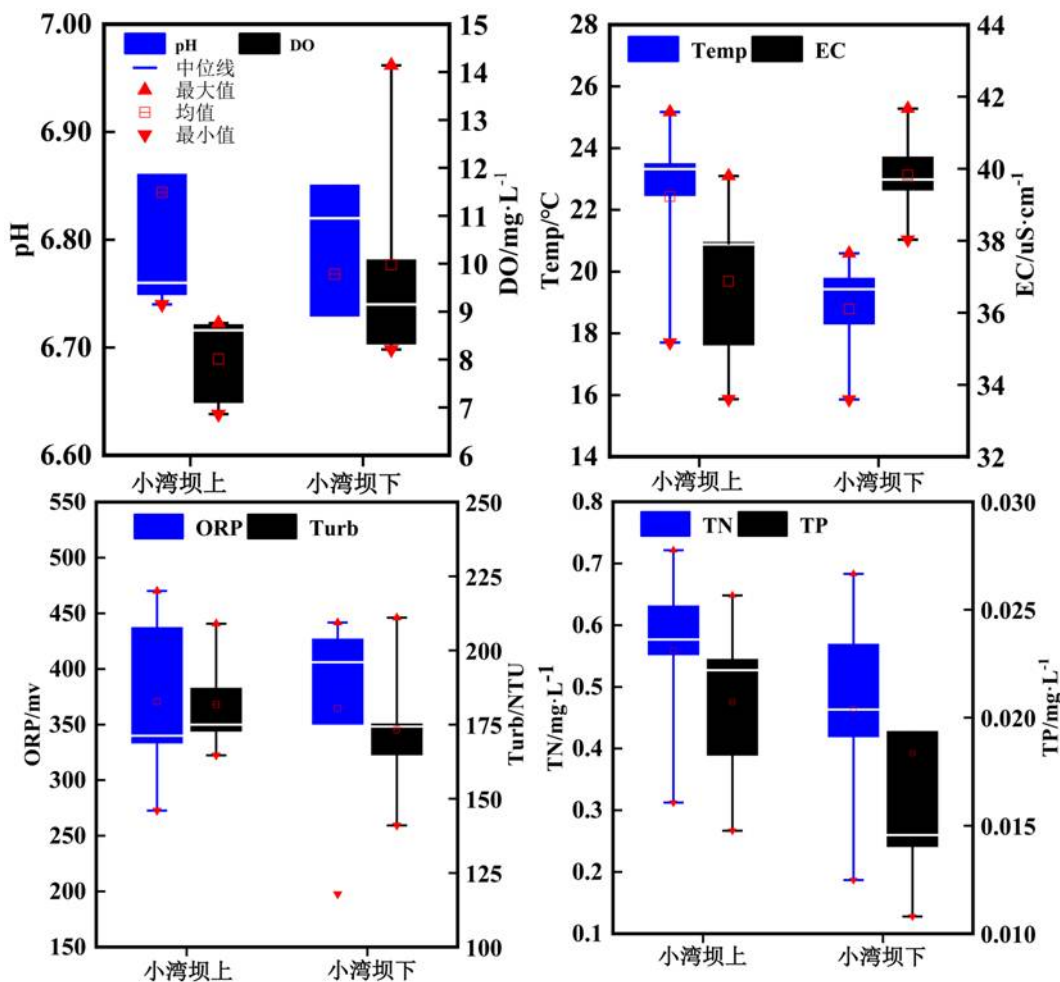


Figure 2. Spatial variations of water quality factors  
图 2. 水质因子的空间差异

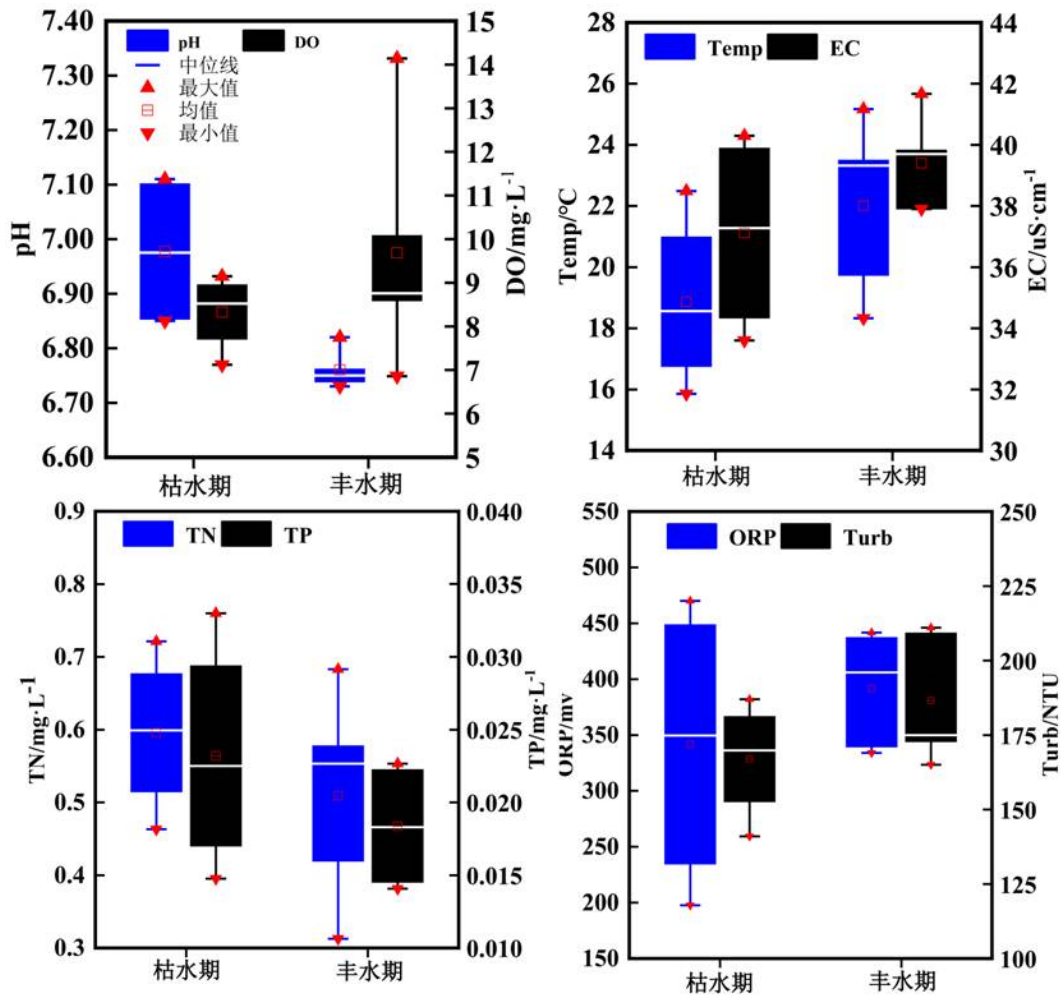


Figure 3. Temporal variations of water quality factors  
图3 水质因子的季节差异

坝下水体中 Zn、Cu 与 pH 呈显著正相关性。与文献[15]研究结果一样，温度与小湾水体重金属含量的相关性最弱。电导率受重金属影响最大，这是由于电导率与水体的离子强度呈现显著的正相关关系[16]。坝上坝下水体中 Mn 与总氮总磷均呈显著负相关性，As、Zn、Cu 与总氮总磷均呈正相关性，藻类对水体中重金属有极高的富集性[17]，部分水体重金属也会对微生物起抑制作用，而营养物质丰富程度影响微生物量及活性。水体中 Hg 与 Ni 呈显著正相关性，地表水中其含量是很低的，镍和汞可作为采矿、冶炼、电镀等行业排放的工业废水、废渣等污染的标志性元素，表明小湾水体中重金属 Hg 与 Ni 的来源应该一致。EC 与 TDS 呈极显著正相关性，同上文水质因子空间分布结果一致。水中生物体、颗粒物和有机大分子等是重金属及营养盐的共同载体，综上所述，水质中 NTU、TDS、TP、TN 与水体重金属含量关系显著。

#### 4. 讨论

小湾水库蓄水拦坝上下游水质空间差异主要表现在河流的理化特性(Temp、DO、TN 和 TP)。据报道，韩国锦江建坝后加速了水体的富营养化[18]，南非的 Bospoot 大坝，水库坝前水域出现了明显的水温分层、盐度和电导率随时间升高等问题[19]。在本文中坝上水温总是高于坝下水温大致 4℃~5℃，主要原因是建坝高水位导致的水温分层和上层取水共同产生了空间显著差异。水体中 TN 和 TP 大致呈现出坝上高于坝下的规律，拦水筑坝会

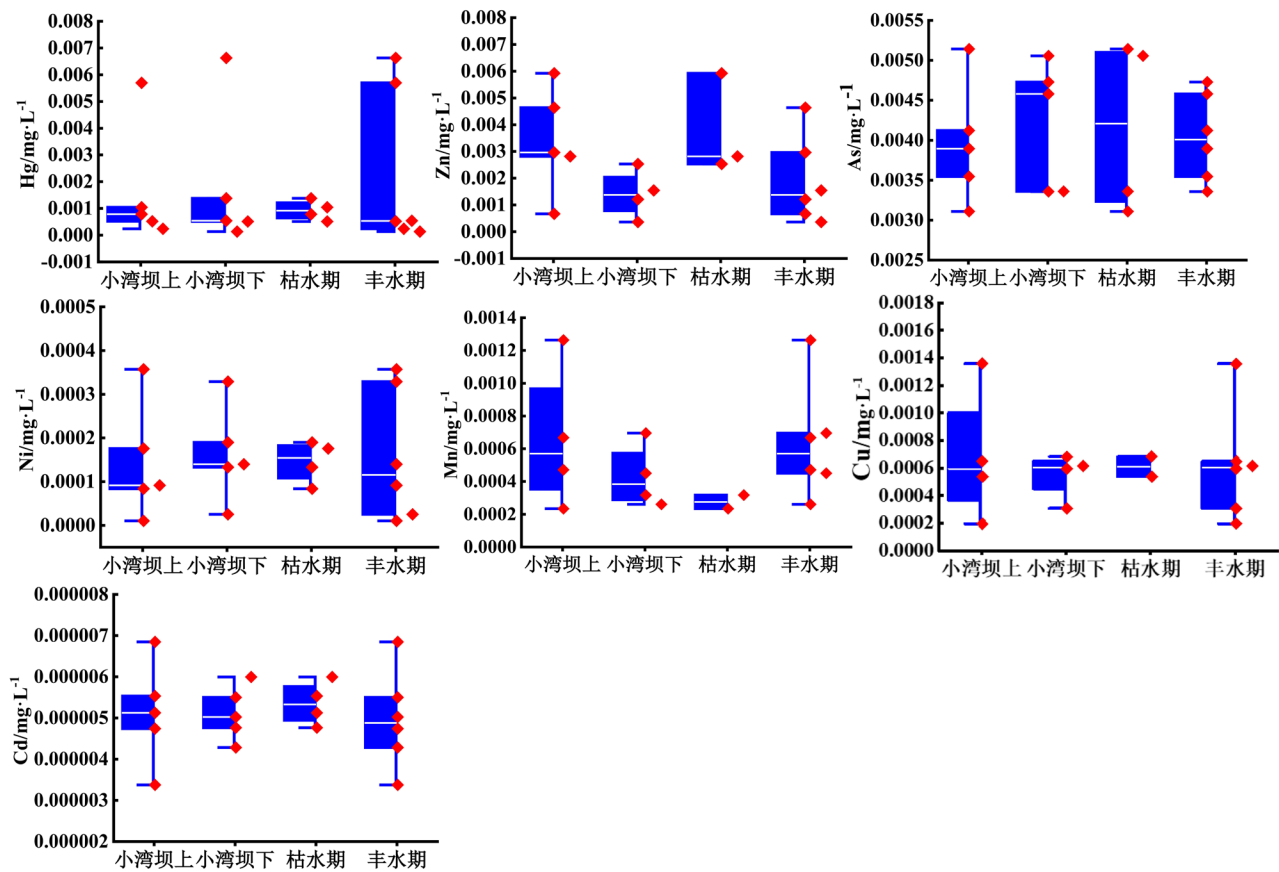


Figure 4. Spatial and temporal distribution range of heavy metal content in water  
图 4. 水体重金属含量的时空分布范围

导致水位上升, 水体流速减缓, 水体的滞留时间显著增加, 导致河输送流营养盐的能力受阻, 氮素会在坝上水域中积累下来[20], 小湾水库的建设对氮素的迁移与转化会产生显著的影响, 由于水库的拦截效应和浮游植物及其微生物的相互作用从而会影响到库区氮形态的相互转化。另外, 河流沉积物内源性污染源, 会向水体中释放氮磷等营养盐, 坝上河段中沉积物多于坝下河段。研究表明, 在冬季更容易发生水体富营养化, 可得枯水期水体 TN 和 TP 的含量大致高于丰水期, 进入枯水期后, 雨量减少, 小湾水库不断蓄水, 水位不断升高, 水动力条件较稳定, 更有利于氮磷的滞留。枯水期坝上水体的 ORP 值高于坝下水体的, 而丰水期坝上水体的 ORP 却低于坝下水体的。氧化还原电位是水质中一个重要指标, 它虽然不能独立反应水质的好坏, 但是能够综合其他水质指标来反映水族系统中的生态环境, 氧化还原电位受水体的温度、pH 及化学反应可逆性等因素影响。

随着社会经济的快速发展以及城镇化进程的不断加快, 人类活动所产生的大量重金属通过各种途径进入地表水体, 在汇集到河流湖泊中大量富集, 会对水生态环境造成巨大的危害。澜沧江流域主要污染源来自于澜沧江沿岸有色金属冶炼企业所排放出来的工业废水和日益增多的人口所产生的生活污水, Bastos 等[21]在对亚马逊流域 Hg 污染研究中也发现了相似结果, 污染源来自于当地矿业开采和冶炼排放的废气之后随大气迁移进入流域中。研究表明, 很多生活垃圾都含有 Hg, 其受到微生物和雨水淋溶作用, Hg 会伴随着垃圾渗滤液进入河流中[22]。且部分农村地区会通过焚烧的方式销毁垃圾, 这是大气 Hg 的直接排放源[23]。水体中重金属 Hg 具体的污染来源不详, 有待查明原因并加强对重金属 Hg 的污染源头控制和管理。

水体重金属相关性较高时, 表明重金属之间可能具有某种同源关系或者相同的迁移转化过程[24]。Cu 与 As 之间存在极显著正相关关系, Hg 与 Ni、Mn 与 Cd 之间存在极显著正相关关系, 说明这些重金属具有相似的污

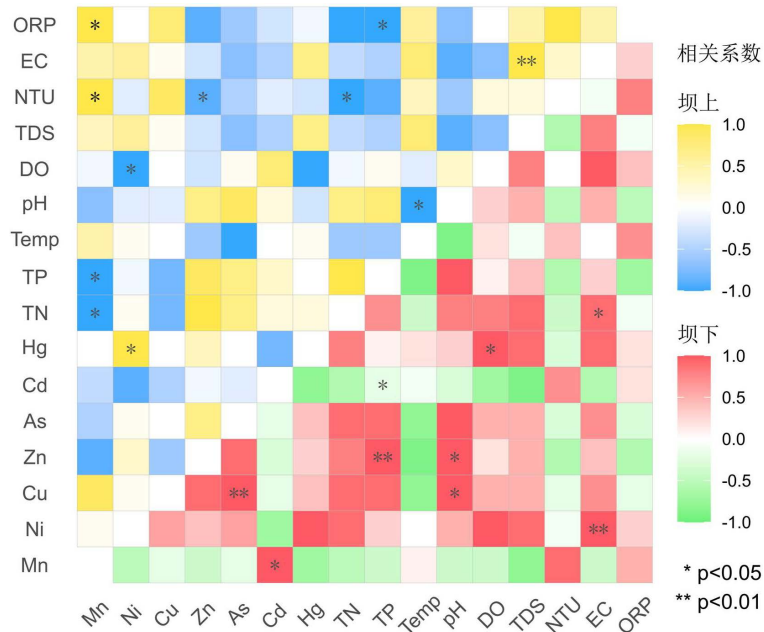


Figure 5. The degree of correlation between water quality indicators  
图 5. 水质指标间的相关程度

染来源或迁移转化过程。Zn 与其他 6 种重金属之间不存在显著相关性，表明重金属污染具有多源性。对比坝上与坝下水质因子间相关性可知，其关联效应存在着较大的差异，表明蓄水建坝极可能改变了水体理化特性及重金属迁移转化过程。

### 5. 结论

1) 研究区域水质全年均达到 I 类水标准，水体中 TN、TP 整体处于 III 类水标准之下，未达到中国湖泊富营养化阈值，总体水质良好。水体中 Temp、DO、TN 和 TP 时空差异性显著。

2) 坝上坝下水体中 As、Cd、Cu、Cr 和 Pb 这 5 种重金属均符合 I 类水标准，水体中重金属 Ni、Zn 均达到了 II 类水标准，水体中重金属 Hg 超过 IV 类水标准，且部分月份 Hg 值远高于 V 类水标准，水体中重金属含量坝上高于坝下，枯水期高于丰水期，应加强对重金属 Hg 的污染源头控制和管理。

3) 分析水质因子与水体重金属之间的相关性可得，小湾水库水体中重金属 - 水环境因子间的关系较为密切，其中电导率受重金属含量的影响最大，温度与重金属含量相关性最弱，水质中 NTU、TDS、TP、TN 与水体重金属含量相关性显著，水体中重金属 Hg 与 Ni 呈显著正相关关系。

### 基金项目

国家自然科学基金项目(编号：42061006，41561144012)。

### 参考文献

[1] 于松延, 徐宗学, 武玮, 李艳利. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(5): 1309-1315.  
YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei and LI Yanli. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River basin. Journal of Environmental Science, 2014, 34(5): 1309-1315. (in Chinese)

[2] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 谢世友, 陈春秀. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. 地球与环境, 2018, 46(4): 364-372.  
TANG Lian, HU Xiaohui, QUAN Guanzhong, XIE Shiyong and CHEN Chunxiu. Spatiotemporal distribution of water quality in



- the Tanjiang River and its correlation with the land use. *Earth and Environment*, 2012, 46(4): 364-372. (in Chinese)
- [3] LOPES, L. F. G., ANTUNES DO CARMO, J. S., CORTES, R. M. V., *et al.* Hydrodynamics and water quality modelling in a regulated river segment: Application on the instream flow definition. *Ecological Modelling*, 2004, 173(2-3): 197-218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.07.009>
- [4] 张馨月, 马沛明, 高千红, 严海涛, 钱宝. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 633-645. ZHANG Xinyue, MA Peiming, GAO Qianhong, YAN Haitao and QIAN Bao. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam. *Journal of Lake Science*, 2019, 31(3): 633-645. (in Chinese)
- [5] 魏国良, 崔保山, 董世魁, 杨志峰. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. 环境科学学报, 2008(2): 235-242. WEI Guoliang, CUI Baoshan, DONG Shikui and YANG Zhifeng. Impact of hydropower development on river ecosystem service: A case study from the Manwan Hydropower Project. *Journal of Environmental Science*, 2008(2): 235-242. (in Chinese)
- [6] 张继来. 澜沧江中下游水沙和鱼中重金属分布及其生态风险评价[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2015. ZHANG Jilai. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in water, sand and fish in the middle and lower reaches of Lancang River. Master's Thesis, Kunming: Yunnan University, 2015. (in Chinese)
- [7] 宋静宜, 傅开道, 苏斌, 黄启胜, 黄江成, 张继来. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 389-397. SONG Jingyi, FU Kaidao, SU Bin, HUANG Qisheng, HUANG Jiangcheng and ZHANG Jilai. Spatial distribution of heavy metal concentrations and pollution assessment in the bed loads of the Lancang River System. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 389-397. (in Chinese)
- [8] WU, W., WU, P., YANG, F., *et al.* Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *The Science of the Total Environment*, 2018, 630: 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183>
- [9] 尹云坤, 刘金山, 陈维东. 小湾水电站水库蓄水与库岸稳定[J]. 水力发电, 2015, 41(10): 79-81+86. YIN Yunkun, LIU Jinshan and CHEN Weidong. Reservoir impoundment of Xiaowan hydropower station and the stability of reservoir bank. *Hydraulic Power Generation*, 2015, 41(10): 79-81+86. (in Chinese)
- [10] 李晋鹏, 彭明春, 董世魁, 李春青, 王丽珍. 澜沧江小湾水坝运行前后大型底栖动物群落及水质评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1900-1908. LI Jinpeng, PENG Mingchun, DONG Shikui, LI Chunqing and WANG Lizhen. Assessment of benthic macroinvertebrate assemblages and water quality in Xiaowan reservoir before and after dam operation, Lancang River. *Environmental Science Research*, 2018, 31(11): 1900-1908. (in Chinese)
- [11] 傅开道, 何大明. 澜沧江干流水库拦沙效应分析与预测[J]. 科学通报, 2007, 52(S2): 117-122. FU Kaidao, HE Daming. Analysis and prediction of sediment containment effect of Lancang River reservoir. *Science Bulletin*, 2007, 52(S2): 117-122. (in Chinese)
- [12] 梁斯琦, 陆颖, 杨福平, 赵著燕, 肖复晋, 蒋永健. 澜沧江小湾水电站坝前水温垂向分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 156-162. LIANG Siqi, LU Ying, YANG Fuping, ZHAO Zhuyan, XIAO Fujin and JIANG Yongjian. Vertical distribution characteristics of water temperature in front of Xiaowan Hydropower Plant on Lancang River. *South-to-North Water Diversion Project and Water Conservancy Technology*, 2019, 17(6): 156-162. (in Chinese)
- [13] COLLVIN, L. Effects of copper on growth and starvation in perch, *Perca fluviatilis* L. *Journal of Fish Biology*, 1985, 27(6): 757-764. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1985.tb03218.x>
- [14] 王桢, 张建强, 渡边泉, 等. 铁路和道路沿线土壤重金属含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 364-372. WANG Zhen, ZHANG Jianqiang, DUBIAN Quan, *et al.* Concentrations and sources of heavy metals in soil near railway and road. *Journal of Ecological Environment*, 2018, 27(2): 364-372. (in Chinese)
- [15] 侯凤兰, 吕光辉, 金淑聪, 陈悦, 滕德雄. 青格达湖重金属分布特征及健康风险水平[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 218-225. HOU Fenglan, LV Guanghui, JIN Shucong, CHEN Yue and TENG Dexiong. Spatial characteristics of heavy metal in Qinggeda Lake and related health risk assessment. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(1): 218-225. (in Chinese)
- [16] 史香爽. 海河干流水体中重金属元素地球化学及时空分布特征[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津师范大学, 2014. SHI Xiangshuang. Geochemical and spatial and temporal distribution characteristics of heavy metal elements in the water of Haihe River trunk stream. Master's Thesis, Tianjin: Tianjin Normal University, 2014. (in Chinese)
- [17] 郑蒙蒙, 邵鲁泽, 管幼青, 周思齐, 李非里. 藻类富集水体重金属的机理及应用[J]. 环境科技, 2017, 30(6): 66-70. ZHENG Meng, SHAO Luze, GUAN Youqing, ZHOU Siqi and LI Feili. Mechanism and application of algae enrichment of heavy metals in water. *Environmental Science and Technology*, 2017, 30(6): 66-70. (in Chinese)
- [18] JEONG, Y. H., YANG, J. S. and PARK, K. Changes in water quality after the construction of an estuary dam in the Geum

- River estuary dam system, Korea. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(6): 1278-1286.  
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00081.1>
- [19] MOGAKABE, D. E., GINKEL, C. V. The water quality of Bospoort Dam. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry, 2008.
- [20] 李俊龙, 郑丙辉, 张铃松, 金小伟, 胡序朋, 刘方, 邵君波. 中国主要河口海湾富营养化特征及差异分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 506-516.  
LI Junlong, ZHENG Binghui, ZHANG Lingsong, JIN Xiaowei, HU Xupeng, LIU Fang and SHAO Junbo. Eutrophication characteristics and variation analysis of estuaries in China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2016, 36(2): 506-516. (in Chinese)
- [21] RODRIGUES, B. W., OLIVEIRA, G. J. P., CAVALCANTE, O. R., *et al.* Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 344-351.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.048>
- [22] 李政, 滕柯延, 吴晗. 城市垃圾填埋场中汞污染的来源与归趋[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S1): 311-317.  
LI Zheng, TENG Keyan and WU Han. Mercury pollution from municipal landfills: Resources and fate. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(S1): 311-317. (in Chinese)
- [23] 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 等. 生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究[J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 3766-3773.  
DUAN Zhenya, SU Haitao, WANG Fengyang, *et al.* Mercury emission characteristics and mercury concentrations of municipal solid waste in waste in waste in cineration plants. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3766-3773. (in Chinese)
- [24] ZAHARESCU, D. G., HOODA, P. S., SOLER, A. P., *et al.* Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Resposuso, 18 Central Pyrenees. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(11): 3546-3553.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.026>