

# 基于多元统计分析的澜沧江下游水质时空分布研究

黄凯<sup>1</sup>, 傅开道<sup>1\*</sup>, 朱润<sup>2</sup>, 赵培双<sup>2</sup>, 王丽媛<sup>1,2</sup>, 胡奇玮<sup>3</sup>, 彭万辉<sup>1</sup>, 宁梅<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糯扎渡水电厂, 云南 普洱

<sup>3</sup>华能澜沧江水电股份有限公司景洪水电厂, 云南 景洪

Email: huangkaiynu@163.com, \*kdfu@ynu.edu.cn

收稿日期: 2020年12月21日; 录用日期: 2021年1月26日; 发布日期: 2021年2月18日

## 摘要

本文选取澜沧江下游糯扎渡、景洪库区至出境前关累河段8个断面, 于2018年分丰平枯三季对该河段水体进行水质采样和实验检测, 结果数据采用综合污染指数法和聚类分析进行水质评价以及时空差异研究。结论认为: 1) 澜沧江下游水质达到Ⅲ类水环境标准, 高锰酸钾指数、COD及BOD<sub>5</sub>浓度枯水期大于丰水期, 氨氮、总氮和总磷浓度丰水期大于枯水期。空间聚类分析将8个断面分为三个聚类组, 分别为景洪库区、糯扎渡库区及关累断面, 其中景洪库区水质优于糯扎渡库区, 关累断面水质最差, 表明大坝对污染物具有一定的阻拦效应, 关累断面水质受人类活动及经济社会发展影响较大。2) 季节分布上, 澜沧江下游水质状况枯水期最优, 丰水期最差, COD与BOD<sub>5</sub>可能是水质的主要限制因子。对比建坝前后水质状况, 说明梯级电站建设不会导致水质恶化。以上结果可为水库环境管理及调控提供科学依据, 亦可作为国际河流环境外交的文献参考。

## 关键词

多元统计分析, 水质, 时空变化, 澜沧江, 综合污染指数法

# Spatial-Temporal Distribution of Water Quality in the Lower Lancang River Based on Multivariate Statistical Analysis

Kai Huang<sup>1</sup>, Kaidao Fu<sup>1\*</sup>, Run Zhu<sup>2</sup>, Peishuang Zhao<sup>2</sup>, Liyuan Wang<sup>1,2</sup>, Qiwei Hu<sup>3</sup>, Wanhui Peng<sup>1</sup>, Mei Ning<sup>1</sup>

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

作者简介: 黄凯(1996-), 湖北随州人, 硕士研究生, 从事河流水环境及其效应研究。

\*通讯作者。

文章引用: 黄凯, 傅开道, 朱润, 赵培双, 王丽媛, 胡奇玮, 彭万辉, 宁梅. 基于多元统计分析的澜沧江下游水质时空分布研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(1): 53-62. DOI: 10.12677/jwrr.2021.101006

<sup>2</sup>Nuozhadu Hydropower Plant of Huaneng Lancang River Hydropower Co., LTD., Puer Yunnan

<sup>3</sup>Jinghong Hydropower Plant of Huaneng Lancang River Hydropower Co., LTD., Jinghong Yunnan

Email: huangkaiynu@163.com, \*kdfu@ynu.edu.cn

Received: Dec. 21<sup>st</sup>, 2020; accepted: Jan. 26<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 18<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, eight sections were selected from Nuozhadu, Jinghong reservoir area to Guanlei in the lower reaches of the Lancang River to conduct water quality sampling and experimental detection for the high, normal, low flow seasons in 2018. The result data were evaluated by using the Comprehensive Pollution Index method and Cluster Analysis as well as the spatiotemporal difference study. Results show that: 1) the water quality reaches the standard III in the downstream of Lancang River; Potassium Permanganate Index, COD and BOD<sub>5</sub> concentrations in dry season were higher than those in wet season, and Ammonia Nitrogen, Total Nitrogen and Total Phosphorus concentrations in wet season were higher than those in dry season. The GuanLei section has the worst water quality and the dam has a certain blocking effect on pollutants, which are greatly influenced by human activities and the economic and social development. 2) The water quality in the lower reaches of Lancang River is the best in the dry season and the worst in the wet season, and COD and BOD<sub>5</sub> may be the main limiting factors of water quality. Comparison of water quality before and after dam construction shows that cascade hydropower station construction will not lead to deterioration of water quality. The above results could act as scientific basis for reservoir control and management, and also as a reference for international river environmental diplomacy.

## Keywords

Multivariate Statistical Analysis, Water Quality, Temporal-Spatial Variation, Lancang River, Comprehensive Pollution Index Method

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

水作为最重要的自然资源之一，为流域的社会经济发展提供了条件[1]，水污染、水资源短缺、水生态安全等水资源问题严重制约了我国经济社会可持续发展，并威胁到人类和生态安全[2]。河流水质状况有明显空间依赖性，不同时空尺度上水质数据之间存在不一样的相关性[3]。

水质分析方法众多，研究表明多元统计分析方法是最有效的分析方法之一。Chitrakar 等运用多元统计分析对马斯喀特沿海水域进行水质评价，发现海水总溶解固体、氧水平和化学需氧量等因子是影响海水水质的主要水体参数[4]。Varol 运用多元统计分析结合水质指数评估多种因素影响下的苏尔古河水质，发现除水温外，其他参数均表现出明显季节变化，引起水质变化的参数主要与悬浮物、可溶性盐和营养物和有机物有关[5]。彭福利等运用多元统计方法对官厅水库入库断面进行水质多指标评价，发现总磷仍是入库河流的重要污染指标[6]。刘贤梅等利用主成分分析法对贵州省张维河进行了水质评价与时空特征分析，得出上游水质优于下游，枯水期污染情况比丰水期严重的结论[7]。景朝霞等应用综合污染指数和层次聚类分析法探讨了汉江中下游水质时空变化规律，发现汉江中下游污染严重，营养盐尤其丰富[8]。研究河流水质的时空变化特征能够为水环境有效管理提

供动态信息,因此需要对河流系统进行长期监测和评价,以获得可靠信息,防止和控制河流污染。

澜沧江是全长 4880 公里澜沧江-湄公河的上游,随着澜沧江梯级水电站的修建、工业发展以及农业化肥的使用,澜沧江流域出现了水质下降等水环境问题[9]。澜沧江流域人口、工业企业、城镇都集中在中下游地区,因此对下游水环境质量的监测评价有着重要意义。本文以澜沧江下游河段为研究区域。对澜沧江下游河段八个采样断面的丰水期、平水期、枯水期的 6 个水质指标进行测定分析,运用综合污染指数法与多元统计方法对其进行水质评价以及时空差异研究。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

澜沧江-湄公河发源于青海省唐古拉山脉,流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南 6 国,最终汇入南海,干流全长 4880 km,流域面积 81 万 km<sup>2</sup>,是东南亚地区最重要的国际河流,在中国境内长度约为 2354 km [10]。本文研究区域为澜沧江下游糯扎渡电站库尾断面至出境前的关累断面,共设置 8 个采样断面,具体位置见图 1。研究区属热带及亚热带湿润季风气候区,长夏无冬,干湿季分明,日温差大,年温差小,基本无霜。年平均气温在 18.6℃~21.9℃之间,年平均降水量 1200~1700 mm,沟壑纵横,海拔差异大[11]。

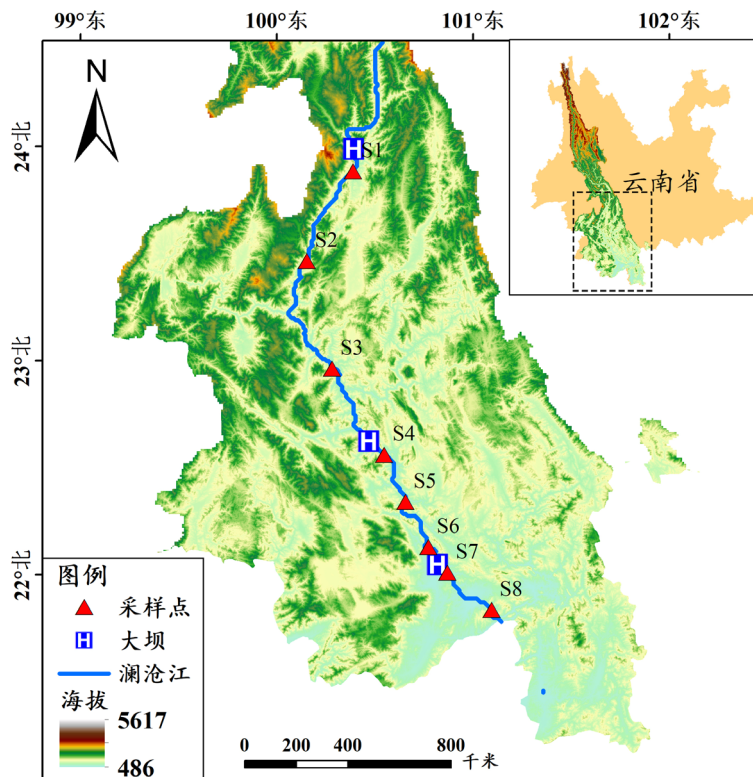


Figure 1. Study area and sampling plot

图 1. 研究区及采样点图

### 2.2. 样品采集与分析

研究区域河段流经糯扎渡电站和景洪电站大坝,在研究区内选取 8 个采样断面。于 2018 年 3 月、7 月和 10 月分季度对研究区进行样品采集,使用水质采样器采集表层水样品,并装入聚乙烯瓶中,运回实验室在 4℃下保存。选取高锰酸钾指数、COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、总氮、总磷六项水质指标进行测定分析。其中,高锰酸钾指数

采用酸滴定法进行测定(GB11892-89), 化学需氧量采用快速消解分光光度法(HJ/T399-2007), 五日生化需氧量采用稀释与接种法(GB7488-87), 氨氮采用纳式试剂分光光度法(HJ535-2009), 总磷采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89), 总氮采用碱性过硫酸钾消解分光光度法进行测定(HJ636-2012) [12]。

## 2.3. 分析方法

### 2.3.1. 综合污染指数法

综合污染指数法可对各污染指标的浓度值无量纲化并加和, 便于对不同空间, 不同时间的河流水质进行比较[13]。综合污染指数法先对各污染指标的相对污染指数进行统计, 据此算出污染物的污染指数, 根据污染指数可以判断出水体的污染程度及主要污染物[14]。综合污染指数法的计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

式中,  $P_i$  为水质因子  $i$  的污染指数;  $C_i$  为水质因子  $i$  的实测浓度, mg/L;  $S_i$  为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中水质因子  $i$  的 III 类标准值, mg/L;  $P$  为综合污染指数;  $n$  为参评指标个数。

### 2.3.2. 聚类分析

系统聚类方法是一门多元统计分类法, 是以欧式距离来衡量评价指标之间的差异性, 将各指标分类并建立最小数据集[15]。水质评价中常通过聚类监测时间或监测断面的位置, 来分析流域水质的时空变化特征[16]。本文利用 origin 软件采用系统聚类进行空间尺度的聚类分析, 聚类方式采用 ward 法, 距离测量方式采用平方欧式距离。

## 3. 结果与分析

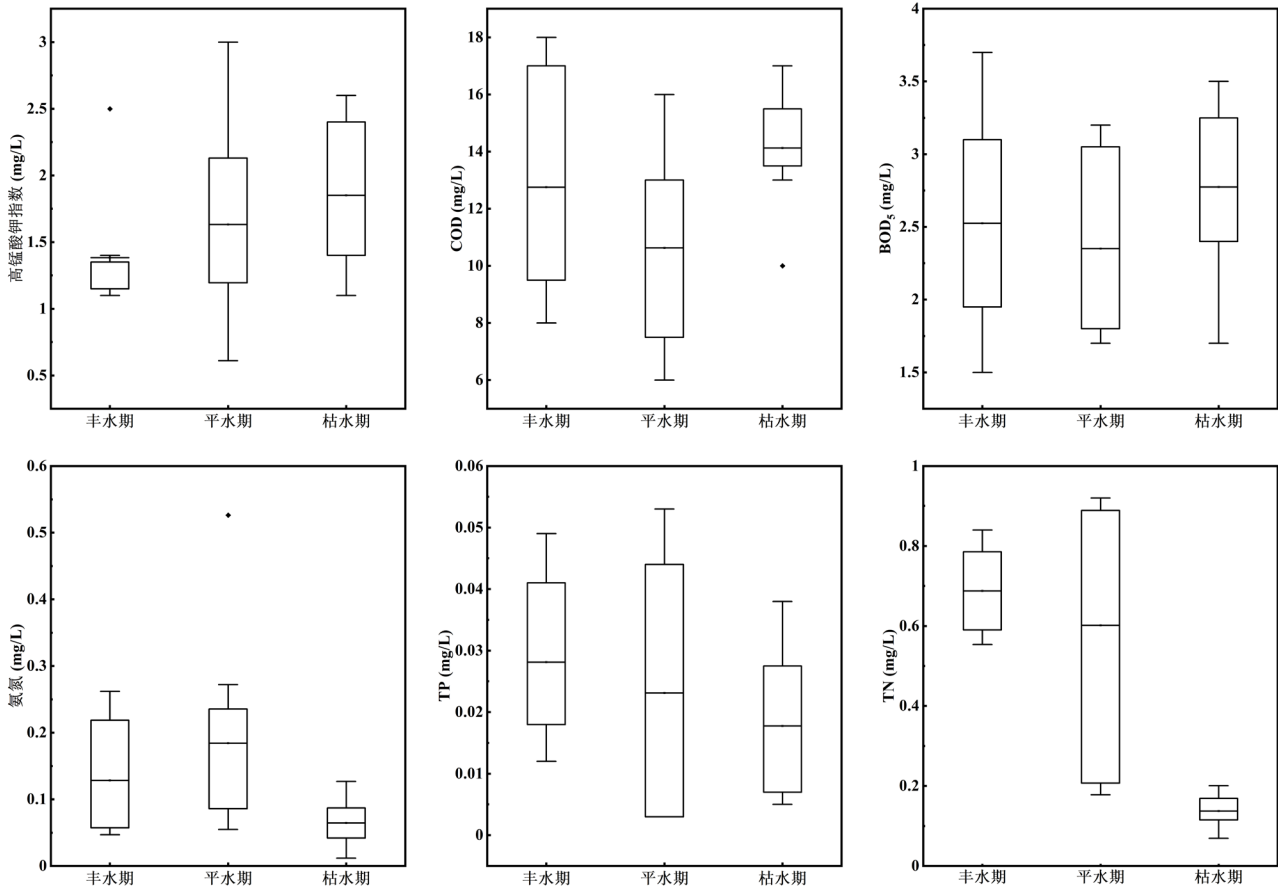
### 3.1. 水质特征

图 2 显示了澜沧江下游丰水期、平水期及枯水期的水质数据特征。由图可以看出, 丰、平、枯三期高锰酸钾指数平均值分别为 1.4、1.6、1.9 mg/L, 季节性差异不大, 最大和最小值均在平水期, 分别为 0.61、1.6 mg/L; 丰、平、枯三期 COD 的平均值分别为 14、13、14 mg/L, 最大值出现在丰水期, 最小值出现在平水期, 分别为 18、10 mg/L; 丰、平、枯三期 BOD<sub>5</sub> 的平均值分别为 2.5、2.4、2.8 mg/L, 季节性差异不大, 最大值最小值均出现在丰水期, 分别为 3.7、1.5 mg/L; 丰、平、枯三期氨氮平均值分别为 0.128、0.184、0.065 mg/L, 季节性变化显著, 最大值出现在平水期, 最小值出现在枯水期, 分别为 0.526、0.012 mg/L; 丰、平、枯三期总磷的平均值分别为 0.028、0.023、0.018 mg/L, 季节性差异不大, 最大值最小值都出现在平水期, 分别为 0.053、0.003 mg/L; 丰、平、枯三期总氮的平均值分别为 0.688、0.602、0.137 mg/L, 季节性差异显著, 最大值出现在平水期, 最小值出现在枯水期, 分别为 0.920、0.069 mg/L。总的来说, 高锰酸钾指数、COD、BOD<sub>5</sub> 时间上表现为枯水期大于丰水期的规律, 氨氮、总氮、总磷则在时间上体现为丰水期大于枯水期的变化规律。

### 3.2. 结合综合污染指数法的空间聚类分析

将不同采样时期和断面的高锰酸钾指数、COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、总氮、总磷水质指标数据运用综合污染指数法进行水质评价, 综合污染指数分级标准见表 1 [17], 评价结果见表 2。发现各时期各断面的水质状况都达到了地表水 III 类水质标准(GB3838-2002)。从各断面不同时期 P 值平均值可以看出, 八个断面中, 景洪坝上断面水质最好, 关累断面水质最差。结合综合污染指数法与空间聚类分析的结果(见图 3)可以看出, 在平方欧式距离为 15 时可将采样断面在空间上分为 3 组, 第一组为思茅港、景洪坝上、景洪坝下断面, 属于景洪库区, 综合污染

指数平均值 0.327；第二组为糯扎渡库尾、糯坝上、糯坝下，景临桥，都属于糯扎渡库区，综合污染指数平均值 0.393；第三组为关累断面，综合污染指数平均值为 0.447，属于澜沧江出境前断面。可以看出，景洪库区水质优于糯扎渡库区水质，关累断面水质最差。



**Figure 2.** Characteristics of water quality in lower reaches of the Lancang River  
**图 2.** 澜沧江下游水质特征

**Table 1.** Comprehensive pollution index classification standard  
**表 1.** 综合污染指数分级标准

综合污染指数	水质分级	水质状况阐述
$P < 0.8$	合格	多数项目未检出，个别检出也在范围内
$0.8 \leq P \leq 1.0$	基本合格	个别项目检出值超标
$1.0 < P \leq 2.0$	污染	相当一部分检出值超标
$P > 2.0$	重污染	相当一部分项目检出值超过标准数倍

**Table 2.** Comprehensive pollution index evaluation results  
**表 2.** 综合污染指数评价结果

采样断面	综合污染指数 P 值			
	丰水期	平水期	枯水期	平均值
糯扎渡库尾	0.421	0.264	0.394	0.360

Continued

景临桥	0.528	0.292	0.434	0.418
糯坝上	0.424	0.309	0.380	0.371
糯坝下	0.495	0.429	0.341	0.422
思茅港	0.314	0.383	0.317	0.338
景洪坝上	0.332	0.387	0.206	0.308
景洪坝下	0.300	0.395	0.312	0.336
关累	0.462	0.598	0.282	0.447

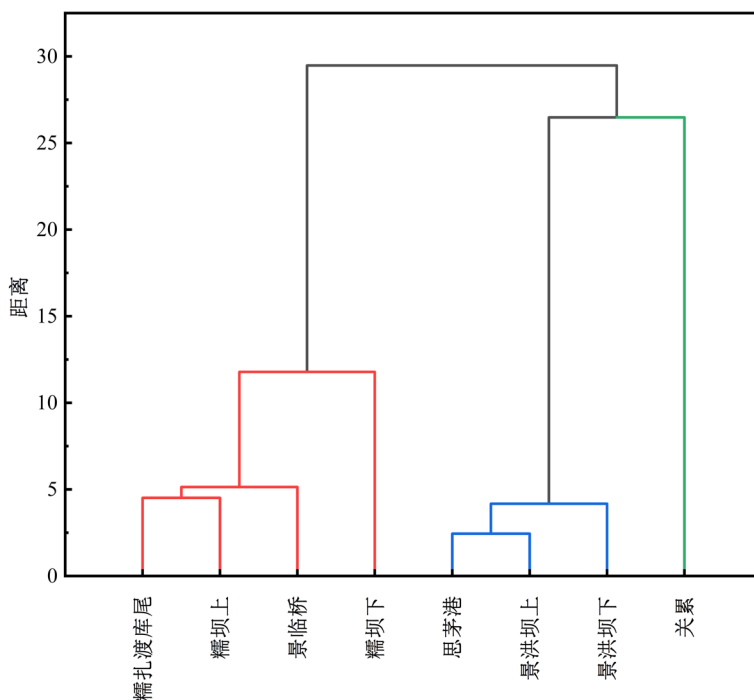


Figure 3. Spatial clustering analysis results of sampling section  
图 3. 采样断面空间聚类分析结果

### 3.3. 季节分布特征

以往对澜沧江下游污染物时空分布特征都是对单个指标进行时间上的分析[18] [19]。表 3 分析了在丰水期、平水期、枯水期三个不同阶段澜沧江主要污染物的 P 值。由表 4 可以看出，整体上来说，澜沧江下游水质状况枯水期最优，丰水期最差，同时可以发现 COD 与 BOD<sub>5</sub> 是水质的主要限制因子。可能是由于丰水期时降雨量增加，许多污染物随着地表径流进入水体中，同时雨水径流的汇聚提高了水体的流动性，增加了水体的紊动程度，使得底部泥沙再悬浮，释放了部分污染物，导致丰水期时水质较差。

Table 3. P values of each index in each sampling period  
表 3. 各采样时期各指标 P 值

指标	综合污染指数 P 值			Σp <sub>i</sub>
	丰水期	平水期	枯水期	
高锰酸钾指数	0.230	0.272	0.308	0.81

Continued

COD	0.638	0.531	0.706	1.875
BOD <sub>5</sub>	0.631	0.588	0.694	1.913
氨氮	0.128	0.184	0.065	0.377
总磷	0.141	0.116	0.089	0.346
总氮	0.688	0.602	0.137	1.427
$\Sigma p_i$	2.456	2.293	1.999	

## 4. 讨论与结论

### 4.1. 讨论

从上述分析结果看来,澜沧江下游水质具有一定的时空差异性。高锰酸钾指数、COD、BOD<sub>5</sub> 时间上表现为枯水期大于丰水期的规律,这三个指标常用来反应有机耗氧类物质污染程度,不同季节水质变化主要受降水、温度、水文条件、水库运行方式等因素影响[20]。枯水期时水库换水频率减弱,水力停留时间变长,且温度较低,微生物活动较弱,使得有机污染物不易被降解[21]。而氨氮、总氮、总磷则在时间上体现为丰水期大于枯水期的变化规律,这些指标反映了水体的富营养化程度。水稻是澜沧江流域云南段的主要粮食作物之一[22],且主要种植时间在丰水期,残余的农药化肥在地表径流作用下汇入河流,导致营养盐浓度升高。

可以看出景洪库区水质优于糯扎渡库区水质,关累断面水质最差。而逐个分析两个大坝的坝上坝下断面水质时,发现坝上水质比坝下水质好,可能是由于坝上泥沙吸附污染物沉降至库底致使水体中浓度降低,而大坝在放水时会造成泥沙的再悬浮造成污染物的释放,导致坝下水体的水质相对坝上来说较差,说明糯扎渡大坝对污染物有着一定的阻拦效应[23] [24],这种阻拦作用可能是由于泥沙对污染物的吸附引起的。结合聚类分析和综合污染指数评价结果可知,关累断面的水质是三组中最差,可能是由于景洪大坝断面后的河段周边城市发展、人口增多、工农业发展所造成的[25] [26]。

澜沧江拥有丰富的水电资源,水电的梯级开发对流域的水质产生了一定的影响。糯扎渡大坝和景洪大坝建设前,澜沧江下游多数年份水质为 IV 类和 V 类。出境处水质达不到 III 类标准,水质污染严重,恶化趋势显著[27] (见表 4)。本文研究发现澜沧江下游水质达到了 III 类水环境标准,说明梯级电站的建设不会导致干流水质恶化,且近年来,在政府及相关部门的努力下,外源污染物得到减少,水质状况得到改善。但大坝建成后阻挡了河流自由流动,破坏河流连续性,使得水力停留时间变长,容易导致库区水体富营养化[28]。因此必须对流域干、支流给予充分的关注和控制,注意监测水库本身的水质变化,防止因累积效应形成二次污染。

### 4.2. 结论

1) 综合污染指数法的结果表明澜沧江下游水质整体上达到了地表水国家标准 III 类水水质要求。高锰酸钾指数、COD、BOD<sub>5</sub> 时间上表现为枯水期大于丰水期的规律,而氨氮、总氮、总磷则在时间上体现为丰水期大于枯水期的变化规律。

2) 空间聚类分析将八个采样断面分为三组,第一组为景洪库区,第二组为糯扎渡库区,第三组为关累断面。结合综合污染指数结果,发现景洪库区水质优于糯扎渡库区,关累断面水质最差。表明糯扎渡大坝对污染物具有一定的阻拦作用,这种阻拦作用可能是由于泥沙对污染物的吸附引起的。关累断面水质较差可能由于景洪大坝断面后的河段周边城市发展、人口增多、工农业发展所造成的。

3) 整体上来说,澜沧江下游水质状况为枯水期优于平水期优于丰水期。COD 与 BOD<sub>5</sub> 可能是水质的主要限制因子。

4) 大坝建设后, 水质由 IV、V 类水质改善为 III 类水质, 说明梯级电站的建设不会导致干流水质恶化, 且近年来, 在政府及相关部门的努力下, 外源污染物得到减少, 水质状况得到改善。但仍要注意库区水质变化情况, 防止因累积效应形成二次污染。

**Table 4.** Water quality before and after dam construction in the lower reaches of Lancang River

**表 4.** 澜沧江下游建坝前后水质状况

年份	水质状况	年份	水质状况
建坝前		1998	IV
1988	V	2000	>V
1990	IV	2002	IV
1992	V	建坝后	
1994	IV	2016	III
1996	V	2018	III

注: 建坝前水质数据: 张榆霞(2005); 建坝后 2016 年水质数据: 李明月(2017)。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(42061006, 41561144012)。

## 参考文献

- [1] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学, 2007(5): 712-716.  
MENG Wei. The strategy of comprehensive pollution prevention and cure of water environment in Chinese watershe. China Environmental Science, 2007(5): 712-716. (in Chinese)
- [2] 邓渠成, 尹娟, 许桂苹, 等. 基于三角模糊数-贝叶斯方法的九洲江水环境质量评价[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 14-19.  
DENG Qucheng, YIN Juan, XU Guiping, *et al.* Water quality assessment of Jiuzhou River based on the integrated method of triangular fuzzy numbers. Journal of Hydroecology, 2019, 40(2): 14-19. (in Chinese)
- [3] 王刚, 李兆富, 万荣荣, 等. 基于多元统计分析方法的西苕溪流域水质时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1797-1803.  
WANG Gang, LI Zhaofu, WAN Rongrong, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations in water quality of Xitiaoxi watershed using multivariat. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(9): 1797-1803. (in Chinese)
- [4] CHITRAKAR, P. Multivariate statistical technique in the assessment of the coastal water quality. Journal of Environmental Engineering and Science, 2020, 15(3): 141-153. <https://doi.org/10.1680/jenes.19.00038>
- [5] VAROL, M. Use of water quality index and multivariate statistical methods for the evaluation of water quality of a stream affected by multiple stressors: A case study. Environmental Pollution, 2020, 266(Pt 3): 115417. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115417>
- [6] 彭福利, 张永勇, 李茜, 等. 官厅水库入库断面水质多指标评价与演变特征分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(1): 65-74.  
PENG Fuli, ZHANG Yonyon, LI Qian, *et al.* Multi-index evaluation and evolution characteristic analysis of water quality at inlet section of Guting Reservoir. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(1): 65-74. (in Chinese)
- [7] 刘贤梅, 周忠发, 张昊天, 等. 基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析: 以贵州省张维河为例[J]. 环境工程, 2019, 37(10): 49-54+132.  
LIU Xianmei, ZHOU Zhongfa, ZHANG Haotian, *et al.* Assessment of water quality and its spatial and temparol characteristics of river sand karst mountain area based on principal component analysis: A case study on Zhangwei River in Guizhou Province. Environmental Engineering, 2019, 37(10): 49-54+132. (in Chinese)
- [8] 景朝霞, 夏军, 张翔, 等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 104-115.  
JING Zhaoxia, XIA Jun, ZHANG Xiang, *et al.* Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 104-115. (in Chinese)
- [9] 张继来, 傅开道, 王波, 等. 澜沧江河床沉积物重金属污染评价[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1136-1144.  
ZHANG Jilai, FU Kaidao, WANG Bo, *et al.* Assessment of heavy metal pollution of bed sediment in the Lancang River.



- Progress in Geography, 2014, 33(8): 1136-1144. (in Chinese)
- [10] 何大明, 冯彦, 甘淑, 等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. 科学通报, 2006(S2): 14-20.  
HE Daming, FENG Yan, GAN Shu, *et al.* Cross-border hydrological effects of hydropower development in Lancang River. Chinese Science Bulletin, 2006(S2): 14-20. (in Chinese)
- [11] 雷凯旋. 澜沧江下游水库发电生态风险调度研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
LEI Kaixuan. Study on power generation and ecological risk operation of reservoir in the lower Lancang River. Master's Thesis, Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method (fourth edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 花瑞祥, 张永勇, 刘威, 等. 不同评价方法对水库水质评价的适应性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 183-189.  
HUA Ruixiang, ZHANG Yonyon, LIU Wei, *et al.* Adaptability analysis of multiple evaluation methods in reservoir water quality evaluation. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 183-189. (in Chinese)
- [14] 蒋火华, 朱建平, 梁德华, 等. 综合污染指数评价与水质类别判定的关系[J]. 中国环境监测, 1999(6): 46-48.  
JIANG Huohua, ZHU Jianping, LIANG Dehua, *et al.* The relationship between comprehensive pollution index assessment and water quality type distinguish. Environmental Monitoring in China, 1999(6): 46-48. (in Chinese)
- [15] 胡冰涛, 陈玉东. 基于聚类分析和主成分分析的长江下游稻田氮磷监测指标筛选[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1-23.  
HU Bintao, CHENG Yudong. Optimization of monitoring indexes of nitrogen and phosphorus in rice fields in the lower reaches of the Yangtze River based on cluster analysis and principal component analysis. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(11): 1-23. (in Chinese)
- [16] 朱琳, 王雅南, 韩美, 等. 武水河水质时空分布特征及污染成因的解析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2150-2156.  
ZHU Lin, WANG Yanan, HAN Mei, *et al.* Spatio-temporal distribution of water quality and source identification of pollution in Wushui River. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2150-2156. (in Chinese)
- [17] 孙甲, 韩品磊, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 17(6): 102-112.  
SUN Jia, HAN Pinlei, WANG Chao, *et al.* Study on the comprehensive evaluation of water quality status of the middle route main channel of the South-to-North Water Diversion Project. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 17(6): 102-112. (in Chinese)
- [18] 巴重振, 李爱军, 潘瑛, 等. 澜沧江梯级水电站库区水环境时空差异性研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(2): 35-40+55.  
BA Chongzhen, LI Aijun, PAN Yin, *et al.* Study on the spatiotemporal differences in the reservoir of cascade hydropower of Lancang River. Environmental Science Survey, 2015, 34(2): 35-40+55. (in Chinese)
- [19] 李明月. 澜沧江下游氮磷营养盐时空差异性对水库建设的响应[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2017.  
LI Mingyue. Response of spatial and temporal difference of nitrogen and phosphorus nutrients to reservoir construction in lower Lancang River. Master's Thesis, Kunming: Yunnan University, 2017. (in Chinese)
- [20] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 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, *et al.* Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3): 633-645. (in Chinese)
- [21] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1539-1551.  
WANG Yu, LU Shiguo, FENG Qi, *et al.* Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1539-1551. (in Chinese)
- [22] 顾世祥, 何大明, 崔远来, 等. 近 50 多年来澜沧江流域农业灌溉需水的时空变化[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1355-1362.  
GU Shixiang, HE Daming, CUI Yuanlai, *et al.* Variations of agricultural water requirements in Lancang River basin in last 50 years. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11): 1355-1362. (in Chinese)
- [23] 程豹, 望雪, 马金川, 等. 澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1779-1787.  
CHEN Bao, WANG Xue, MA Jinchuan, *et al.* Spatial distribution characteristics of nutrients and chlorophyll A in the Lancang River basin under. Environmental Science, 2019, 40(4): 1779-1787. (in Chinese)
- [24] 向鹏, 王仕禄, 卢玮琦, 等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. 地球与环境, 2016, 44(5): 492-501.  
XIANG Peng, WANG Shilu, LU Weiqi, *et al.* Distribution and retention efficiency of nitrogen and phosphorus in cascade reservoirs in Wujiang River basin. Earth and Environment, 2016, 44(5): 492-501. (in Chinese)
- [25] 李丽娟. 澜沧江水环境质量评价与成因分析[J]. 地理学报, 1999(S1): 127-132.  
LI Lijuan. Water environment quality assessment and cause analysis of Lancang River. Acta Geographica Sinica, 1999(S1): 127-132. (in Chinese)

- [26] 高天明, 沈镛, 刘立涛, 等. 橡胶种植对景洪市经济社会和生态环境的影响[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1200-1206.  
GAO Tianming, SHEN Lei, LIU Litao, *et al.* The impacts of rubber plantation on society, economy and eco-environment in Jinghong City. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1200-1206. (in Chinese)
- [27] 李丽娟, 李海滨, 王娟. 澜沧江水文与水环境特征及其时空分异[J]. 地理科学, 2002(1): 49-56.  
LI Lijuan, LI Haibing and WANG Juan. Analysis on hydrological and water quality character and their spatial and temporal distribution in. *Scientia Geographica Sinica*, 2002(1): 49-56. (in Chinese)
- [28] 李丽娟, 李九一, 张凯, 等. 澜沧江流域水资源与水环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
LI Lijuan, LI Jiuyi, ZHANG Kai, *et al.* Study on water resources and water environment of Lancang River basin. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)