

## 2015-2024 年丹江口水库库湾水质及营养状态时空特征\*

柳根<sup>1,2</sup>, 倪雪峰<sup>3</sup>, 张成玉<sup>3</sup>, 廖沛涵<sup>1,2</sup>, 贾海燕<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 尹炜<sup>4,5\*\*</sup>

(1: 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

(2: 长江水利委员会湖库水源地面源污染生态调控重点实验室, 武汉 430051)

(3: 南水北调中线水源有限责任公司, 丹江口 442700)

(4: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430014)

(5: 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014)

**摘要:** 库湾作为丹江口水库水质安全的关键敏感区域, 已成为库区水质安全保障工作的重点关注对象。研究基于 2015~2024 年的长序列监测数据, 系统剖析了库湾主要水质指标及综合营养状态指数 TLI ( $\Sigma$ ) 的时空分布特征, 并深入探讨了库湾营养状态与藻类增殖强度的相关关系及其二者与水环境因子的关联特征。研究结果表明: 近十年来, 丹江口水库库湾主要水质指标浓度变化呈现分异特征, 其中历次监测 TN、TP 浓度均值范围分别为 1.08~2.34mg/L、0.019~0.132mg/L, TLI( $\Sigma$ ) 均值在 31.05~51.26 之间, 库湾营养状态总体呈现中营养, 趋势分析的结果显示, 库湾 TP 浓度与 TLI ( $\Sigma$ ) 呈现显著下降趋势, 其中 TLI ( $\Sigma$ ) 在 2018 年 5~10 月间存在突变点, 这与库区及上游长期推行水质安全保障工作以及高水位条件对库湾水质的调控作用密切相关; 季节变化上, 冬季库湾各水质指标浓度普遍处于较低水平, 部分年份秋汛期遭遇多次极端降雨事件, 水库水位大幅抬升, 库湾 TN 与 COD<sub>Mn</sub> 等指标浓度呈现明显升高现象, 但 TP 浓度降幅明显; 空间分布上, 汉库及丹库库尾区域库湾水质相对较差, 局部库湾富营养化风险较高。相关性分析与方差分解结果显示, 库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 主要与污染输入过程密切相关, 库湾藻类生长受水体理化指标尤其是 WT 的影响更显著。本研究成果可为丹江口水库库湾富营养化及藻类水华防控提供科学依据与决策参考。

**关键词:** 库湾; 水质; 营养状态; 时空分布; 藻类; 丹江口水库

### Research on the Spatiotemporal Distribution Characteristics of Water Quality and Trophic Status in the Reservoir Bays of Danjiangkou Reservoir\*

Liu Gen<sup>1,2</sup>, Ni Xuefeng<sup>3</sup>, Zhang Chengyu<sup>3</sup>, Liao Peihan<sup>1,2</sup>, Jia Haiyan<sup>1,2</sup>, Wang Chao<sup>1,2</sup> & Yin Wei<sup>\*\*</sup>

(1: Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R. China)

(2: Key Laboratory of Ecological Regulation of Nonpoint Source Pollution in Lake and Reservoir Water Sources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, P.R. China)

(3: South to North Water Diversion Middle Route Water Source Corporation Limited, Danjiangkou 442700, P.R. China)

(4: China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, P.R. China)

\* 2025-07-01 收稿; 2025-12-17 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2024YFD1702004)、南水北调中线水源有限责任公司科研专项(ZSY/YG-ZX (2023) 022)和湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202402)联合资助。

\*\* 通讯作者; E-mail: 2000yinwei@163.com。

(5: National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014, P.R. China)

**Abstract:** As a critical zone for water quality security in the Danjiangkou Reservoir, its bays have become a focal point for water quality management in the reservoir area. Using long-term monitoring data from 2015 to 2024, this study systematically analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of water quality indicators and the comprehensive trophic level index TLI( $\Sigma$ ) in the reservoir bays, and explored the correlations between trophic status and algal proliferation intensity, as well as their relationships with water environmental factors. Results indicate that over the past decade, changes in the concentrations of major water quality indicators in the bays of Danjiangkou Reservoir exhibited distinct characteristics. The average concentrations of TN and TP ranged from 1.08 to 2.34 mg/L and 0.019 to 0.132 mg/L, respectively, while the mean TLI( $\Sigma$ ) values varied between 31.05 and 51.26, indicating a generally mesotrophic state in the reservoir bays. Trend analysis revealed a significant decreasing trend in TP concentration and TLI( $\Sigma$ ). A mutation point in TLI( $\Sigma$ ) was identified between May and October 2018, which is associated with the long-term implementation of water quality management measures in the reservoir area and upstream regions, as well as the regulatory effect of high water level conditions on reservoir bay water quality. Seasonally, water quality indicator concentrations were generally lowest in winter. During the autumn flood season in some years, extreme rainfall events occurred frequently, leading to a sharp rise in reservoir water level, which significantly increased TN and COD<sub>Mn</sub> concentrations but decreased TP concentration in the bays. Spatially, water quality was relatively poor in the tail areas of both the Hanjiang and Danjiang sections of the reservoir, with a high risk of eutrophication in local bays. Correlation analysis and variance decomposition results demonstrated that TLI( $\Sigma$ ) was closely associated with pollution input processes, while algal growth was more significantly influenced by physicochemical indicators of the water body, particularly water temperature. These findings provide a scientific basis and decision-making reference for eutrophication and algal bloom prevention and control in the Danjiangkou Reservoir bays.

**Key words:** bay; water quality; trophic status; spatiotemporal distribution; algae; Danjiangkou Reservoir

在全球气候变化与人类活动加剧的双重压力下,水体富营养化已成为威胁湖库水资源安全的主要环境问题之一。氮、磷等营养盐的过量输入,易引发藻类异常增殖、水体透明度下降及溶解氧失衡等连锁反应,不仅破坏水生生态系统结构功能,更直接影响饮用水安全与水资源可持续利用<sup>[1-2]</sup>。生态环境部公开数据显示,2023年度全国开展营养状况监测的205个重要湖库中,富营养化状态湖库占比达27.3%<sup>[3]</sup>。我国湖库富营养化防治长期面临严峻挑战,特别是在大型调水工程水源地,局部区域的营养盐累积风险可能对整个供水系统的水质安全构成潜在威胁。因此开展湖库富营养化调查监测,剖析其时空分布特征,对掌握湖库富营养化本底情况与变化趋势,支撑富营养化防治工作具有重要意义。

南水北调工程作为国家重大战略性基础设施,是构建国家水网的主骨架和大动脉,在缓解我国北方地区水资源短缺、促进区域协调发展中发挥着关键支撑作用。自2014年12月12日中线一期工程正式通水以来,截至2025年2月24日,工程累计供水量已突破700亿立方米,惠及河南、河北、天津、北京近1.14亿人。作为中线工程核心水源地,丹江口水库的水质安全直接关系到工程综合效益的发挥。党和国家高度重视库区水质保障工作,2006年以来国务院先后批复实施四轮丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划,持续推进水源地水源涵养能力提升与水生态环境质量改善。目前,丹江口水库水质总体保持在地表水I~II类标准<sup>[4]</sup>,但局部库湾存在氮磷营养盐浓度偏高、富营养化风险及藻类异常增殖隐患等问题<sup>[5-7]</sup>,成为库区水环境管理的重点关注领域之一。

库湾作为连接水库主体与周边陆域的重要过渡带,具有水流速度缓慢、污染物扩散能力差、生态系统

相对脆弱等特征，易形成营养盐富集效应，其水生态环境演变过程对水库整体水质安全具有重要影响。国内外关于库湾水质的研究对象早期以半封闭海湾为核心，后逐步延伸至内陆河口库湾，从最初聚焦水质演变过程，逐步转向富营养化发生机制与水生态系统整体演变过程的综合探究<sup>[8-10]</sup>。长序列水质监测数据是系统解析水体污染源、揭示污染物迁移转化规律及评估生态风险的重要科学依据<sup>[11]</sup>，当前水利、生态环境部门及地方政府在丹江口水库建成了较为完善的水质监测网络，在水库主体水域、主要入库河流及陶岔取水口等重点区域开展了大量研究工作<sup>[12-17]</sup>，然而，针对库湾这一典型水陆交错带半封闭区域的长序列监测及系统性研究仍相对匮乏。基于此，本文通过整理 2015~2024 年库湾区域水质监测数据，系统分析水质参数与营养状态的时空分布特征，探究关键环境因子对库湾营养状态及藻类生长的影响机制，以期为库区水环境保护与污染防治提供数据支持和决策参考。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

丹江口水库（32°36' N ~ 33°48' N, 110°49' E ~ 110°59' E）位于汉江中上游，横跨鄂豫两省，由湖北省境内的汉江库区（汉库）以及河南省境内的丹江库区（丹库）组成，水库初期工程于 1973 年底建成，2013 年丹江口大坝完成加高工程建设，水库正常蓄水位由初期工程的 157m 抬升至 170m，水面面积达 1050km<sup>2</sup>，2014 年南水北调中线一期工程通水以来，水库于 2021 年与 2023 年秋季两次蓄满至正常蓄水位。水库多年平均入库流量 394.8 亿 m<sup>3</sup>，主要入库河流 16 条，其中汉库 12 条，丹库 4 条，其中汉江、堵河、丹江和老灌河的入库水量占比达 80% 以上。库区属典型的亚热带季风气候，雨热同期，汛期降雨频繁且多暴雨。

库湾多分布于支流河口及地势低洼区域，形成鸡爪状或喇叭状地貌，与主库区相比，库湾水深浅、水体交换周期长，大坝加高后，原有库湾水深增加、规模变大，回水顶托作用增强，诸多新库湾形成，水质风险进一步凸显。综合考虑库湾汇水区水文、地形、土地利用等环境因素，并遵循代表性、均匀性、可行性原则，选取了 20 个典型库湾作为调查对象，详见图 1 所示。

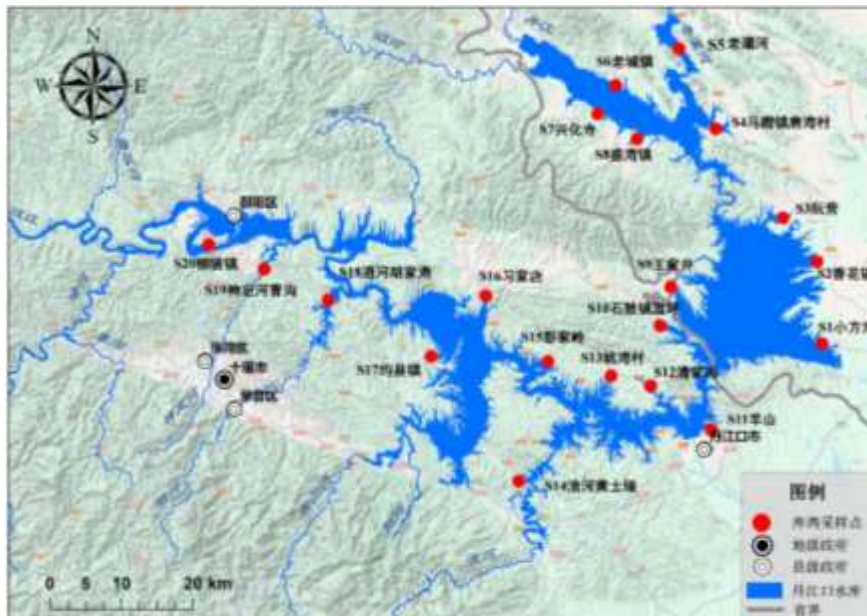


图 1 丹江口水库库湾采样点位图

Fig.1 Sampling point map of Danjiangkou reservoir bays

## 1.2 数据来源

本研究数据来源于丹江口水库 20 个典型库湾 2015~2024 年监测数据，其中丹库 9 个 (S1~S9)，汉库 11 个 (S10~S20)，具体点位及监测信息如图 1 和表 1 所示。监测指标包括水温 (WT)、pH、溶解氧 (DO)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素 a (Chl.a)、浊度 (Turb)、藻密度 (AD) 等，其中 WT、pH、DO、Chl.a 以及 Turb 指标采用便携式多参数水质分析仪现场测定，AD 采用显微计数法测定，其余监测指标测定方法参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定，TP 采用钼酸铵分光光度法测定，COD<sub>Mn</sub> 采用酸性法测定。

表 1 采样时段信息表

Tab.1 Sampling period information table

序号	采样期	采样时段	采样时段平均 水位 (m)	序号	采样期	采样时段	采样时段平均 水位 (m)
1	2015 年秋	09/20~09/27	153.45	12	2021 年秋	10/11~10/14	170.00
2	2016 年春	05/04~05/10	150.71	13	2022 年春	04/27~04/28	160.90
3	2017 年春	05/17~05/23	155.63	14	2022 年秋	09/20~09/23	156.44
4	2017 年秋	09/19~09/25	161.88	15	2023 年春	04/18~04/21	154.33
5	2018 年春	05/15~05/21	161.24	16	2023 年夏	08/01~08/04	161.78
6	2018 年秋	10/09~10/15	160.92	17	2023 年秋	10/23~10/26	170.00
7	2019 年春	05/07~05/13	150.97	18	2024 年春	03/26~03/28	161.44
8	2019 年秋	10/09~10/15	165.30	19	2024 年夏	07/29~08/01	162.92
9	2020 年秋	09/25~09/30	163.81	20	2024 年秋	10/14~10/17	160.42
10	2021 年春	04/20~04/23	159.52	21	2024 年冬	12/11~12/13	158.12
11	2021 年夏	07/05~07/09	159.95				

## 1.3 研究方法

### (1) 综合营养状态指数

库湾营养状态采用《地表水环境质量评价办法 (试行)》规定的综合营养状态指数法进行评价<sup>[18]</sup>，受库湾采样现场条件限制加之部分库湾透明度难以测量，准确的透明度数据获取难度较大，为保证数据对比的一致性，本研究使用 TN、TP、Chl.a、COD<sub>Mn</sub> 等 4 个指标参与评价，其计算公式如下：

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中, TLI (Σ) 表示综合营养状态指数;  $m$  代表参与评价水质指标数量; TLI ( $j$ ) 代表第  $j$  种水质参数的营养状态指数;  $W_j$  为第  $j$  种水质指标的营养状态指数的相关权重, 各指标权重参考金相灿等著《中国湖泊环境》进行调整<sup>[19]</sup>。TLI (Σ) < 30 为贫营养; 30 ≤ TLI (Σ) ≤ 50 为中营养; 50 < TLI (Σ) ≤ 60 为轻度富营养; 60 < TLI (Σ) ≤ 70 为中度富营养; TLI (Σ) > 70 为重度富营养。

### (2) Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall (M-K) 趋势检验由 Mann 和 Kendall 提出<sup>[20-21]</sup>, 广泛应用于时间序列趋势分析, 对于非正态的水文、水质等数据具有较好的适用性, 检验结果基本不受样本中异常值的影响, 其表达式为:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

式中,  $S$  为 M-K 趋势检验的统计量,  $x_i$ 、 $x_j$  分别是时间序列的第  $i$ 、 $j$  个数据值,  $n$  为样本数量。统计量  $S$  的方差  $Var(S)$  计算公式如下:

$$Var(S) = n(n-1)(2n-5)/18 \quad (3)$$

统计量  $Z$  为 Kendall 秩次相关系数, 当  $Z > 0$  时, 序列呈上升趋势,  $Z < 0$  时, 序列呈下降趋势, 在双边趋势检验中, 当统计量  $Z$  的绝对值大于等于 1.64、1.96、2.58 时, 分别通过置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。统计量  $Z$  的计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{Var(S)}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{Var(S)}, S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

### (3) Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验是一种非参数序列变化趋势和突变的方法。基于时间序列  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 构造一秩序列  $S_k$ ,  $S_k$  为时间序列  $x_i$  中第  $i$  个样本中  $x_i > x_j$  的累计数, 计算式为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k a_{ij} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1,2,\dots,i) \quad (6)$$

计算  $S_k$  的均值和方差, 分别为:

$$E(S_k) = n(n+1)/4 \quad (7)$$

$$Var(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72 \quad (8)$$

统计量  $UF_k$  公式定义为:

$$UF_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

$UF_k$  为标准正态分布, 给定显著性水平  $\alpha$ , 若  $|UF_k| > U_\alpha$ , 则表明序列存在明显的趋势变化, 将时间序列  $x_i$  逆序, 重复上述过程, 使得  $UB_k = -UF_k$ , 若  $UF_k$  值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势。当他们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是序列发生突变的时间点。

### (4) Kruskal-Wallis 非参数检验

Kruskal-Wallis 非参数检验适用于非正态分布的多组独立数据比较, 其基本原理是构建  $H$  检验统计量, 计算公式如下:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{N_i} - 3(N+1) \quad (10)$$

式中,  $k$  是样本组数,  $N$  为样本总量,  $N_i$  为第  $i$  组的样本量,  $R_i$  是第  $i$  组样本的秩总和。对于大样本, 统计量  $H$  近似服从自由度为  $N-1$  的  $\chi^2$  分布, 在此基础上判断是否接受原假设  $H_0$ 。

### (5) Spearman 相关分析

Spearman 相关分析也是一种非参数统计方法, 是一种使用广泛的衡量分级定序变量之间的相关程度的分析方法, 相关系数  $r$  反映变量之间的相关程度, 计算原理为:

$$r = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / n(n^2 - 1) \quad (11)$$

### (6) 方差分解

方差分解 (VPA) 本质是量化多组解释变量对响应变量总方差的贡献比例, 核心是通过“分解方差”明确不同因素的驱动权重, 解析解释变量的独立贡献、交互贡献与未解释量。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要水质指标多年变化和季节差异

丹江口水库典型库湾主要水质指标变化情况如图 2 所示。2015~2024 年, 历次监测库湾 TN 浓度变化范围为 1.08~2.34mg/L, 平均浓度为 1.57mg/L, 2018 年 5 月与 2021 年 10 月 TN 浓度均值较高, 分别达到 2.34mg/L、2.12mg/L; TP 浓度变化范围为 0.019~0.132mg/L, 平均浓度为 0.065mg/L, 2015~2018 年 TP 浓度相对较高, 均值在 0.100mg/L 上下波动; COD<sub>Mn</sub> 浓度变化范围为 2.13~5.22mg/L, 平均浓度为 3.05mg/L, 2017 年 COD<sub>Mn</sub> 浓度明显较高; Turb 变化范围为 3.59~13.54NTU, 平均值为 7.38NTU, 2015 年 9 月~2019 年 5 月 Turb 较高, 随后明显降低, 2021 年秋汛后 Turb 又有所上升; Chl.a 浓度变化范围为 3.31~12.64μg/L, 平均浓度为 6.98μg/L, 2015~2017 年 Chl.a 浓度较高; AD 自 2020 年开始监测, 变化范围为 7.86×10<sup>5</sup>~3.43×10<sup>7</sup> 个/L, 平均值为 8.67×10<sup>6</sup> 个/L。Mann-Kendall 趋势检验的结果显示 (表 2), 2015~2024 年丹库库湾 TP、Turb 与 Chl.a 均显著降低, 汉库库湾 TP 存在显著降低趋势, 丹江口水库典型库湾 TP 浓度总体呈显著降低的趋势 ( $P < 0.001$ )。

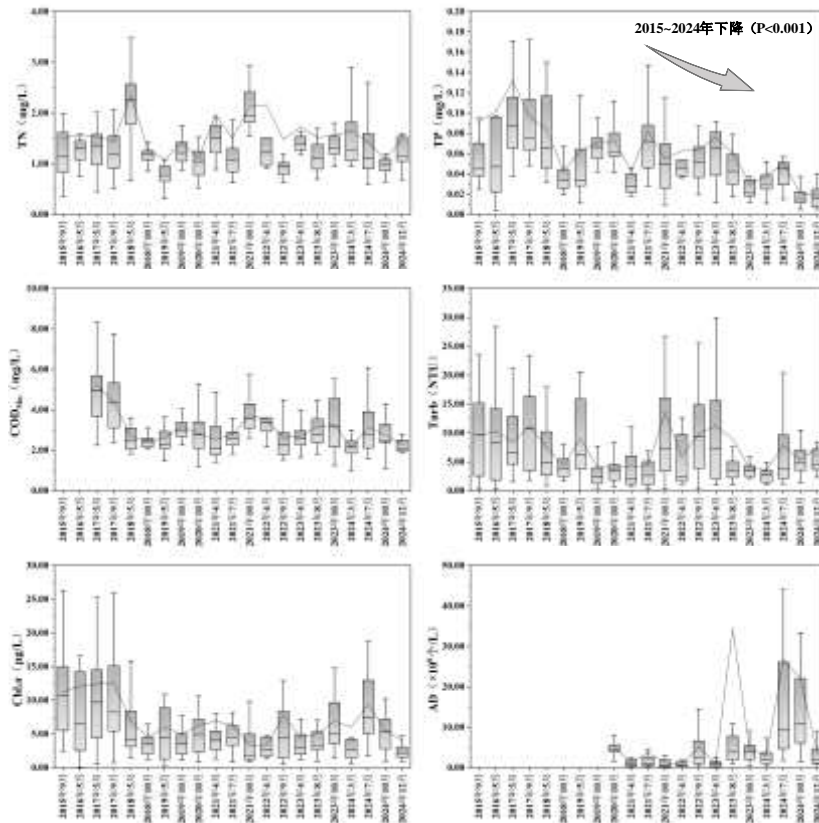


图 2 2015~2024 年丹江口水库典型库湾主要水质指标变化趋势图

Fig.2 Trend chart of main water quality indexes in typical bay of Danjiangkou Reservoir, 2015-2024

表 2 2015~2024 年丹江口水库典型库湾主要水质指标 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table.2 Mann-Kendall trend test results of main water quality indexes in typical bays of Danjiangkou Reservoir from 2015 to 2024

指标	丹库库湾		汉库库湾		丹江口水库库湾	
	Z	P	Z	P	Z	P
TN	0.0324	0.9741	-0.3322	0.7398	-0.2718	0.7858
TP	-3.9258	<b>0.0001***</b>	-3.0499	<b>0.0023**</b>	-3.7142	<b>0.0002***</b>
COD <sub>Mn</sub>	-0.6060	0.5445	-1.3994	0.1617	-1.1195	0.2629
Turb	-2.044	<b>0.0410*</b>	1.2381	0.2157	-1.1777	0.2389
Chl.a	-2.1738	<b>0.0297*</b>	-1.3589	0.1742	-1.7816	0.0748
AD	1.5772	0.1148	1.2812	0.2157	0.7931	0.4277

选取数据系列相对完整的 2021~2024 年监测数据,开展库湾主要水质指标的季节性差异特征分析,结果如图 3 所示。库湾 TN 浓度春夏秋冬季节均值分别为 1.80、1.48、1.56、1.49mg/L,各季节间没有显著性差异;TP 浓度春夏秋冬季节均值分别为 0.053、0.065、0.043、0.019mg/L,冬季 TP 浓度总体显著低于其他季节 ( $P<0.01$ );COD<sub>Mn</sub>春夏秋冬季节均值分别为 2.59、3.03、3.10、2.30mg/L,冬季 COD<sub>Mn</sub>总体显著低于夏秋季节 ( $P<0.05$ );Turb 春夏秋冬季节均值分别为 6.44、7.06、8.17、7.64NTU,各季节间没有显著性差异;Chl.a 浓度春夏秋冬季节均值分别为 5.39、6.94、5.93、4.07μg/L,冬季 Chl.a 浓度显著低于夏秋季节 ( $P<0.01$ );AD 春夏秋冬季节均值分别为  $1.67\times 10^6$ 、 $2.15\times 10^7$ 、 $8.26\times 10^6$ 、 $3.71\times 10^6$ 个/L,夏秋季节 AD 显著高于春冬季节 ( $P<0.05$ ),各季节库湾藻类组成也存在较大差异,春季藻类以硅藻门为主,夏秋季节藻类以蓝藻门为主,优势种多为微囊藻、假鱼腥藻、束丝藻等,冬季蓝藻门占比下降,硅藻门比例上升。

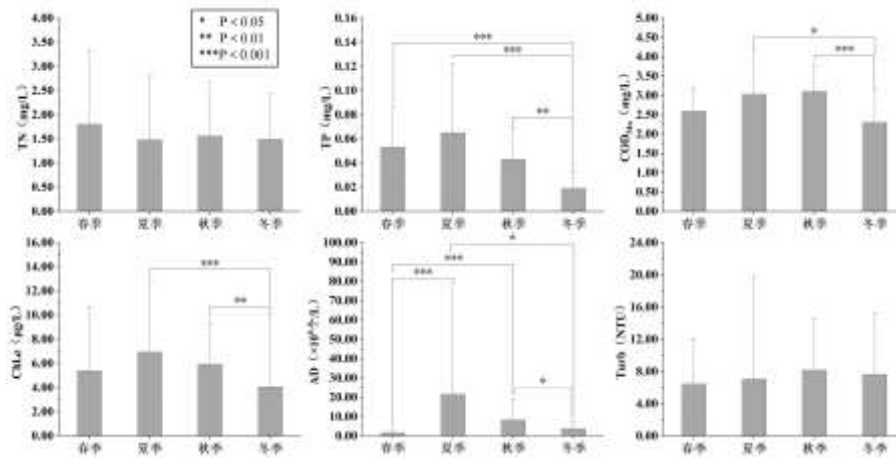


图 3 丹江口水库典型库湾主要水质指标季节性差异 (基于 2021~2024 年数据)

Fig.3 Seasonal differences of main water quality indexes in typical bays of Danjiangkou Reservoir

( based on data from 2021 to 2024 )

## 2.2 主要水质指标空间分布特征

进一步分析各库湾主要水质指标空间特征可知 (图 4), 20 个典型库湾 TN 浓度多处于 1.00~1.40mg/L 之间, 神定河、泗河以及老灌河等支流库湾 TN 浓度较高, 其中神定河曹沟库湾 (S19) TN 浓度均值达到 6.26mg/L; TP 浓度多处于 0.030~0.060mg/L 之间, 马蹬镇唐湾村库湾 (S4) 与 S19 库湾 TP 浓度较高, 分别达到 0.119mg/L、0.244mg/L; COD<sub>Mn</sub>多处于 2.00~3.50mg/L 之间, S4 库湾、老灌河库湾 (S5) 与 S19 库湾 COD<sub>Mn</sub>较高, 分别达到 3.96、3.79、4.89mg/L; Turb 呈现由库湾向大坝方向逐渐降低的趋势, 汉库库尾

的 S19 库湾与柳陂镇库湾 (S20) Turb 较高, 分别为 19.38、16.24NTU; Chl.a 浓度多处于 3.00~8.00 $\mu\text{g/L}$  之间, 丹库库尾及 S19 库湾 Chl.a 浓度相对较高; AD 多处于  $1.00\times 10^6\sim 6.00\times 10^6$  个/L 之间, 丹库库尾及 S19 库湾 AD 相对较高。总体上, 库尾区域库湾污染物浓度相对较高, 其中神定河与马蹬镇周边库湾尤为严重, 这可能与神定河纳污量较高<sup>[22]</sup>以及马蹬镇库湾周边农业耕种强度大有关。

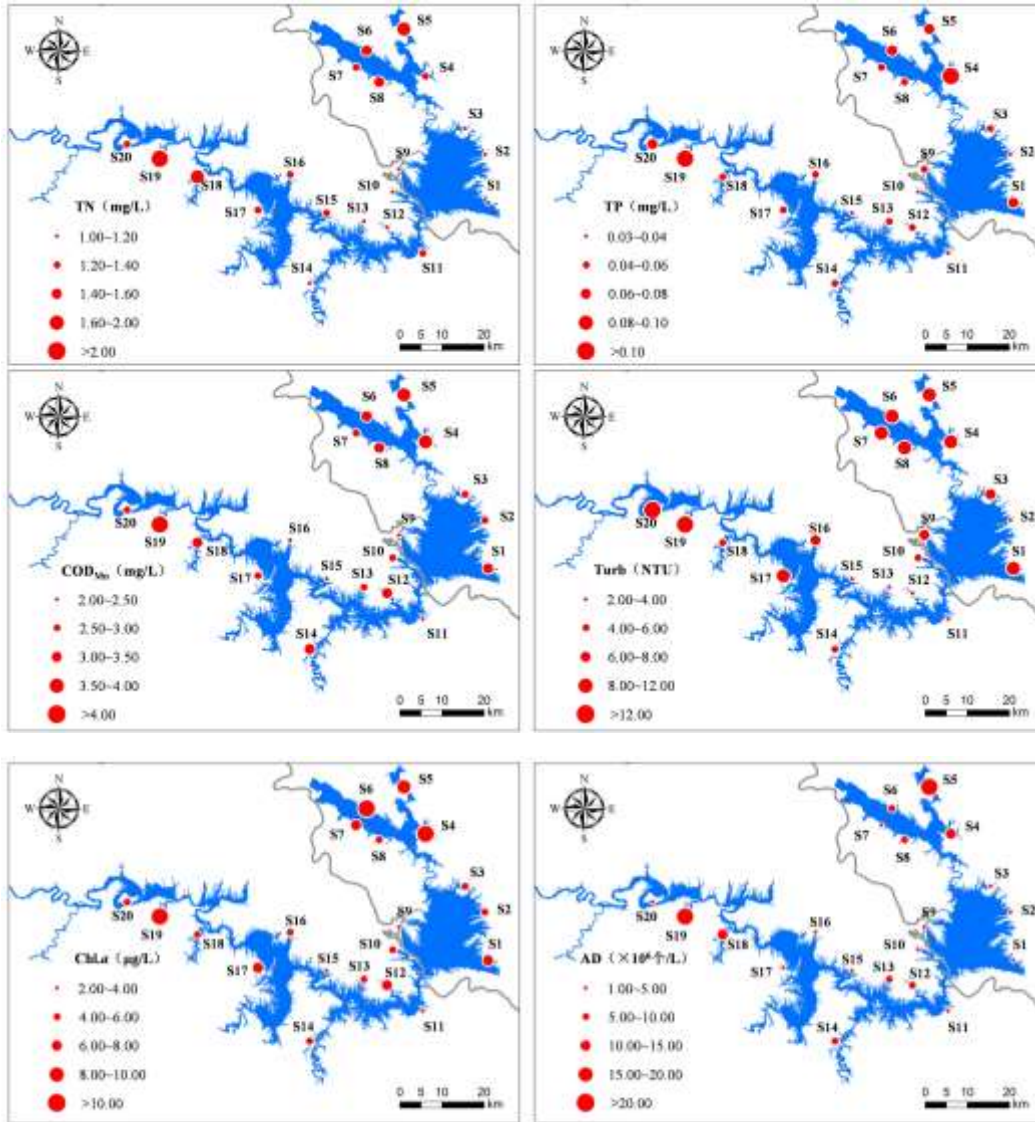


图4 丹江口水库典型库湾主要水质指标现状空间分布图 (2015~2024 年均值)

Fig.4 Spatial distribution of main water quality indexes in typical bays of Danjiangkou Reservoir,2015-2024

### 2.3 综合营养状态指数变化趋势

采用综合营养状态指数法评估库湾营养状态, 由图 5 分析可知, 2015~2024 年丹江口水库库湾 TLI( $\Sigma$ ) 变化范围为 31.05~51.26, 平均为 43.38, 2018 年 5 月后库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 均值基本稳定在 40.00 左右, 从季节上看 (2021-2024 年数据), 春夏秋冬季节 TLI ( $\Sigma$ ) 均值分别为 41.17、43.67、41.29、35.05, 冬季 TLI ( $\Sigma$ ) 显著低于其他季节 ( $P<0.05$ )。从具体库湾来看, 2015~2024 年丹江口水库 20 个库湾水体的 TLI ( $\Sigma$ ) 均值处于 38.19~61.44 之间, 其中王家井库湾 (S9) 最低, 神定河曹沟库湾 (S19) 最高, 总体呈现由库尾

区域向大坝方向逐渐降低的趋势。营养状态的评价结果显示，库湾总体呈现中营养状态，个别库湾呈现富营养化，2015~2024 年共计监测共计出现库湾富营养化 66 次，占总监测数的比例为 16.10%，仅石鼓镇温坪库湾 (S10)、羊山库湾 (S11)、姚湾村库湾 (S13)、彭家岭库湾 (S15) 和习家店库湾 (S16) 等 5 个库湾长期维持在中营养状态，其余库湾出现不同程度富营养化问题，其中 S19 库湾、马蹬镇唐湾村库湾 (S4)、老灌河库湾 (S5) 富营养化次数较多，分别为 20 次、8 次、6 次，S19 库湾常年处于富营养化状态。从时间上看，TLI ( $\Sigma$ ) 总体呈显著下降趋势 ( $P < 0.001$ )，库湾富营养化问题有所改善，由中线工程通水初期每次监测期近半数库湾呈富营养化逐渐减少至当前 1~2 个。

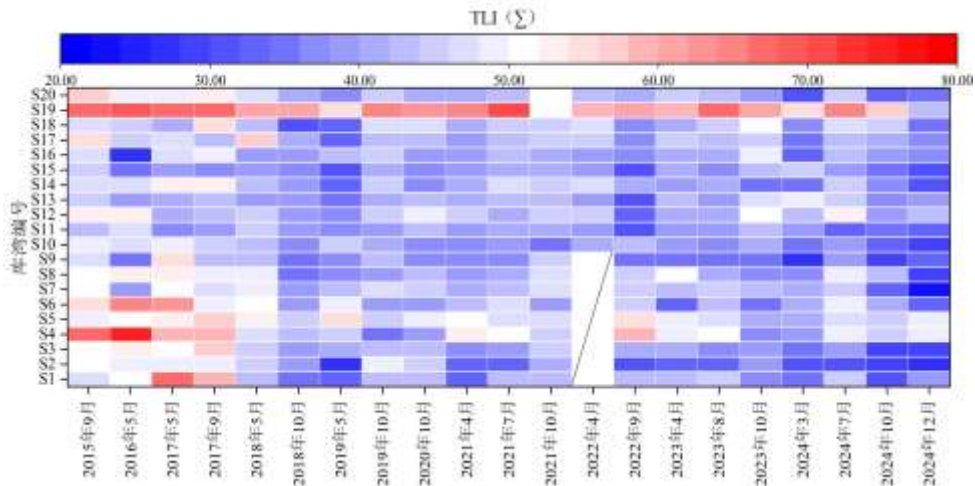


图 5 2015~2024 年丹江口水库典型库湾综合营养状态指数热图

Fig.5 Heatmap of comprehensive trophic level index of typical bays in Danjiangkou Reservoir,2015-2024

基于综合营养状态指数法的计算公式，对库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的贡献率展开解析，结果如图 6 所示。TN 对库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的贡献率在 26.38%~35.12%之间，均值为 30.91%；Chl.a 的贡献率在 26.33%~33.83%之间，均值为 30.94%，与 TN 的贡献率基本相当；TP 与 COD<sub>Mn</sub> 的贡献率相对较低，TP 贡献率在 20.18%~25.95%之间，均值为 23.33%；COD<sub>Mn</sub> 的贡献率在 12.54%~16.72%之间，均值为 14.82%。从空间分布特征开看，各库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 贡献度构成基本一致，因此 Chl.a 与 TN 是影响丹江口水库库湾水体营养程度的两个关键指标。

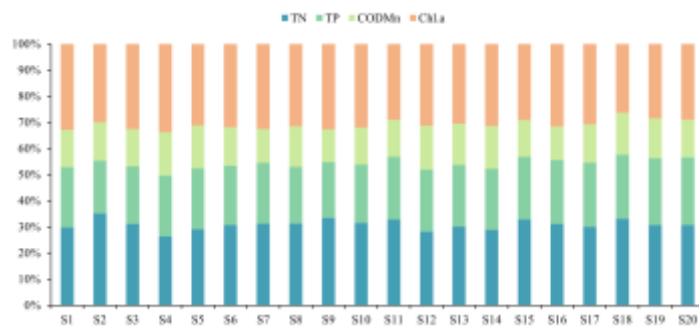


图 6 各计算指标对丹江口水库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的贡献率

Fig.6 The contribution rate of each calculation index to comprehensive trophic level index of Danjiangkou reservoir bay.

进一步采用 Mann-Kendall 突变检验分析库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 突变特点，结果如图 7 显示，丹库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的 UF 值在 2015 年 9 月至 2017 年 9 月间均大于 0，即总体呈现上升趋势，随后 UF 值始终保持小于 0，总体呈下降趋势，汉库库湾与丹江口水库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的 UF 值始终小于 0，均呈下降趋势，从突变点来看，

丹库、汉库及丹江口水库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 的突变点均出现在 2018 年 5~10 月之间, 2018 年 10 月的 TLI ( $\Sigma$ ) 较 2018 年 5 月明显降低, 其中 2018 年 10 月丹江口水库 TLI ( $\Sigma$ ) 均值为 39.74, 较 2018 年 5 月的 46.42 降幅达 16.81%。

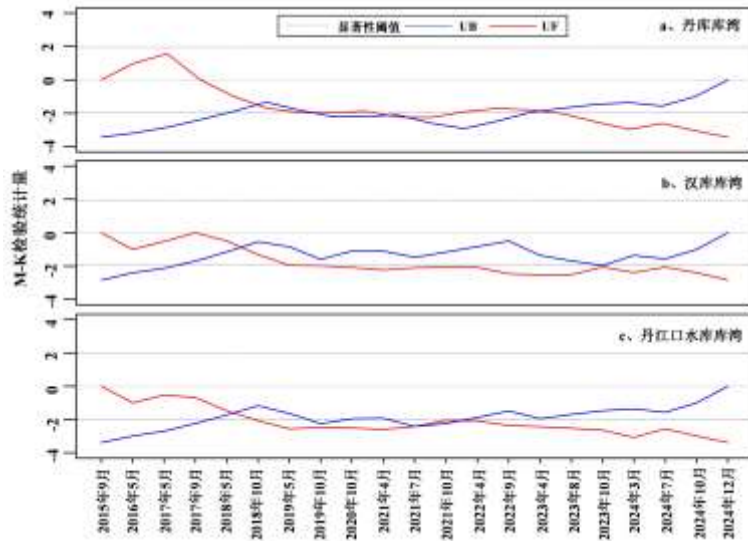


图 7 2015~2024 年丹江口水库典型库湾综合营养状态指数 Mann-Kendall 突变检验结果

Fig.7 Mann-Kendall mutation test results of comprehensive trophic level index of typical bays in Danjiangkou Reservoir, 2015-2024

#### 2.4 水环境因子对营养状态及藻类生长的影响

为探讨水环境因子对水体营养状态及藻类生长的影响, 采用 Spearman 相关分析对 TLI ( $\Sigma$ )、AD 及其他水环境因子开展相关性分析, 结果如图 8 所示。

##### (1) 营养状态与水环境因子的相关关系

丹江口水库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 与 Turb、AD、pH 以及 WT 呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 其中 TLI ( $\Sigma$ ) 与 Turb 相关性系数最高, 达到 0.46, 其余相关系数依次为 0.28、0.16、0.30。Turb 升高通常与降雨径流过程、底泥扰动以及浮游植物生物量变化紧密关联, 相关性分析显示, 丹江口水库库湾 Turb 与氮磷营养盐、COD<sub>Mn</sub> 及 Chl.a 均呈现显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 因此 TLI ( $\Sigma$ ) 与 Turb 的正相关本质上反映了面源输入与内源释放作用下水体营养水平提升的过程。藻类增殖是富营养化水体的核心生物表征。一方面, 藻类大量繁殖时, 其光合作用过程中会持续消耗水体中的 CO<sub>2</sub>, 打破水体碳酸平衡, 进而导致 pH 值升高; 另一方面, 多数淡水藻类的最适生长温度为 15~35°C, 水温升高可能直接加速藻类细胞分裂与生物量积累, 是驱动藻类生长的关键物理因子<sup>[23]</sup>。因此, 库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 与 AD、pH 值及 WT 的显著正相关, 反映出库湾富营养化进程与藻类生长之间相互耦合、协同驱动的动态关系。从区域上看, 丹库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 与 Turb、AD 以及 WT 的相关性明显强于汉库库湾, WL 对丹库库湾与汉库库湾的环境效应存在显著差异, 其中丹库库湾 WL 与 Chl.a 及 TLI ( $\Sigma$ ) 均表现出显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 而汉库库湾 WL 与氮磷营养盐及 COD<sub>Mn</sub> 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 TLI ( $\Sigma$ ) 无显著相关性。

##### (2) 藻密度与水环境因子的相关关系

丹江口水库库湾 AD 与 Turb、pH、WT、WL、Chl.a 以及 COD<sub>Mn</sub> 均呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 TN 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相较于 TLI ( $\Sigma$ ), AD 与氮磷营养盐的相关性较弱。从区域上来看, 丹库库湾 AD 与 TP 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而汉库 AD 与氮磷浓度均无显著相关性, 研究表明<sup>[24]</sup>, 湖库氮磷质量比大于 22.6 时, 磷可能是限制性营养盐, 湖库氮磷质量比小于 9 时, 氮可能是限制性营养盐, 而氮磷质量比介于 9~22.6 之间时, 可能受氮磷限制或其他因素影响, 本研究 410 组监测数据中, 氮磷质量比均值达到 40.42, 其中丹库库湾氮磷质量比均值为 46.86, 汉库库湾氮磷质量比均值为 35.43, 丹库库湾的磷限制潜力大于汉库库湾, 这可能导致 TP 与 AD 的关联性在区域上产生差异。

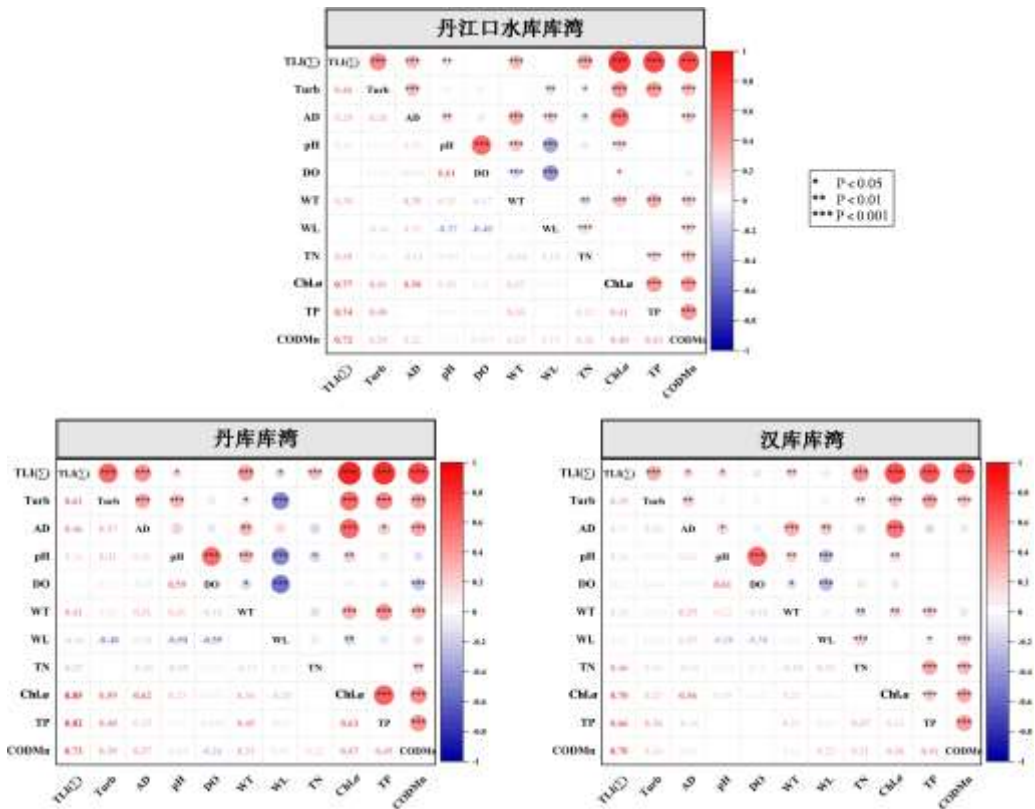


图 8 营养状态及藻类密度与水环境因子相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of nutritional status and algae density with water environmental factors

### 3 讨论

#### 3.1 库湾水质及营养状态变化驱动因素

3.1.1 治理保护工作影响 近十年来，丹江口水库库湾水质与富营养化状况整体呈现持续改善态势，其中 TP 浓度的显著下降，与库区及上游长期推进的水质安全保障工作密切相关。自“十一五”以来，随着多期丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划的系统推进，区域内围绕城镇污水处理效能提升、水土流失综合治理、农业面源污染防治、生态清洁小流域建设等关键领域持续发力，为削减 TP 入库负荷奠定了坚实基础。在城镇污染治理方面，库区及上游集中式污水处理厂尾水排放标准全面优化，整体优于一级 A 标准，其中神定河、泗河等重点污水处理厂通过技术升级，排放标准已严格执行准 IV 类水质要求<sup>[25]</sup>，为削减点源污染输入提供了重要支撑。在水土保持方面，通过持续实施退耕还林、坡耕地整治等生态工程，库区及上游水土流失面积从 2007 年的 3.58 万平方公里降至 2024 年的 1.79 万平方公里，降幅达 50%。在农业面源污染治理方面，逐步推进“源头减量—过程阻控—末端治理”的全链条防控体系建设，面源污染负荷总体呈下降趋势<sup>[26]</sup>，丹江口水库 16 条入库河流中，神定河、泗河、颍河、剑河、老灌河、官山河等河流 TP 浓度总体明显降低。受此影响，外源污染输入的减少对库湾 TP 浓度的显著下降起到了关键作用，与之形成对比的是，丹江口水库库区 TP 浓度近年来总体保持稳定<sup>[27-29]</sup>，这一差异的核心原因在于，水库宽阔的主体水域具备更强的污染缓冲与净化能力，其 TP 浓度本身就显著低于入库河流及库湾水域，因此对外源输入的减少未表现出明显响应；而库湾作为外源污染输入的直接受体，对污染输入量的变化响应更为敏感。总体来看，库湾 TP 浓度的下降，是流域治理效果沿水文路径逐步传导并显现的直接体现。

3.1.2 水文气象因素影响 尽管长期持续推进的水质安全保障措施使库区及上游面源污染防治取得阶段性成效，但农业面源污染仍是威胁丹江口水库水质安全的关键因素。特别是在秋汛期间（8 月 21 日至 10 月

10日), 高强度降雨引发的径流冲刷显著加剧面源污染物入库, 同时水位抬升导致消落区氮磷释放过程强化, 对库湾水质形成双重压力。

本研究基于 2021~2024 年相对完整的季节监测数据, 对库湾水质关键指标的季节特征进行分析研判发现, 库湾冬季 TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、Chl.*a* 及 TLI (Σ) 等指标均值普遍低于其他季节, 尽管冬季采样频次相对有限, 但该特征与库区已有相关研究结论基本一致<sup>[30-31]</sup>, 这与冬季降雨量减少、农业面源污染强度降低密切相关。虽然上述指标在春、夏、秋季节没有呈现统计学显著差异, 但 2017 年、2021 年与 2023 年秋汛监测数据表明, 部分污染物浓度在汛后高水位条件下出现明显波动。具体来看, 上述监测年份秋汛期均遭遇多次高强度降雨事件, 水位大幅抬升, 其中 2017 年水位首次出达到 167m, 2021 年与 2023 年均达到 170m 正常蓄水位 (图 9), 2017 年秋汛后库湾 TN 明显上升, 2021 年及 2023 年秋汛后 TN 和 COD<sub>Mn</sub> 较汛前也明显更高 (图 2)。其中 2021 年秋汛入库水量达 344.7 亿 m<sup>3</sup>, 创历史同期最高水平<sup>[32]</sup>, 受极端来水影响, 该年度秋季库湾 TN、COD<sub>Mn</sub> 增幅显著高于 2023 年同期。值得关注的是, 在入库 TP 负荷显著增加导致水库整体 TP 浓度升高的背景下<sup>[27]</sup>, 2017 年、2021 年与 2023 年秋汛期前后库湾 TP 浓度却呈现下降趋势。这一现象可能与水库快速蓄水后库湾水体滞留时间延长引发的磷沉降作用增强, 以及库湾与库体大规模水体交换产生的稀释效应密切相关<sup>[33]</sup>。

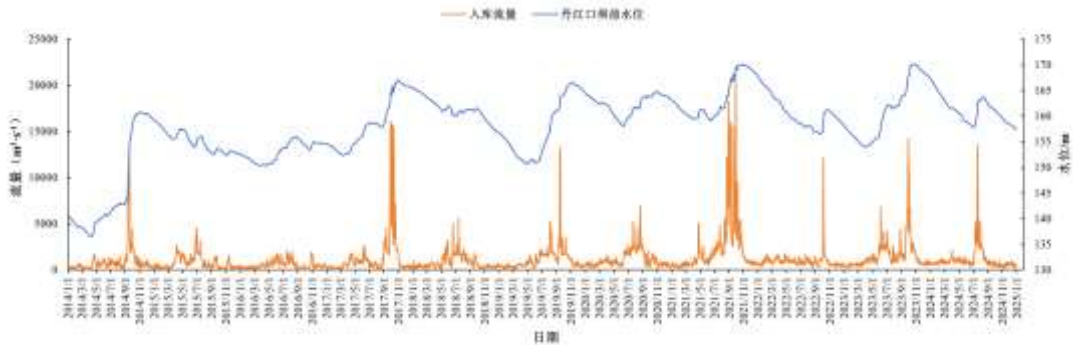


图 9 丹江口水库水位与入库流量多年变化趋势

Fig.9 The multi-year variation trend of water level and inflow of Danjiangkou Reservoir

结合前述分析, 丹江口水库库湾 TLI (Σ) 在 2018 年 5~10 月间出现明显突变点, 该现象或由多重因素共同作用导致。其一, 流域水污染防治与水土保持工作的持续推进使入库河流总磷 (TP) 浓度呈下降趋势, 因库湾对外源营养盐输入的反应敏感性较强, 其自身 TP 浓度也随之同步降低。其二, 高水位条件对库湾水质的调控作用显著。高水位下水体稀释效应突出, 受秋汛期受极端气象影响, TN、COD<sub>Mn</sub> 存在浓度升高风险, 但 TP 浓度因水体混合稀释得以降低, 从长时间尺度观察, 水位消退后上述指标浓度均明显下降。研究表明, 库区水位的抬升会延长营养物质和泥沙的水力停留时间, 从而提高水体自身的净化功能, 起到改善水质的作用<sup>[34]</sup>。具体来看, 2017 年汉江上游发生罕见秋汛, 水库水位迅速抬升至 167m, 至 2018 年 10 月逐渐消退至 160m, TN 浓度虽阶段性升高, 但最终 TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、Chl.*a* 等核心指标浓度均较秋汛前显著降低, 多重因素叠加最终推动 TLI (Σ) 呈现明显拐点。

### 3.2 库湾富营养化与藻类水华关系

水体富营养化是指在人类活动影响下, 氮、磷等营养物质大量输入水体, 致使藻类及浮游生物快速繁殖、水体溶解氧下降、水质恶化的生态退化现象。水华则是淡水水体中藻类在短期内爆发性增殖, 大量聚集于水体表面, 引发水色显著改变的特殊生态事件, 被视作水体富营养化的典型外在表现。这两种现象相互交织、彼此作用, 深刻影响着水生态系统的结构与功能稳定<sup>[35]</sup>。

自 2020 年库湾启动藻类监测以来, 库湾区域藻类异常增殖 (AD 突破水华阈值  $1.00 \times 10^7$  个/L) 事件累计发生 31 次, 主要集中于夏秋季节。尽管富营养化通常被认为与藻类异常增殖及水华暴发紧密相关, 但实际情况更为复杂: 并非所有处于富营养化状态的库湾都会出现藻类异常增殖现象, 藻类异常增殖也非必然导致水华暴发。采用方差分解 (VPA) 量化营养盐指标、理化指标及水文指标对藻密度变化的独立贡献

与综合影响，其中营养盐指标包括 TN、TP 与  $COD_{Mn}$ ；理化指标包括 WT、pH、DO、Turb；水文指标为 WL。结果显示，上述指标共同解释了 54% 的丹江口水库库湾藻密度变化，其中理化指标对藻密度变化的单独解释度最高，达到 23%，营养盐指标及水文指标的单独解释度较低，分别为 2%、1%。从区域上看，营养盐指标、理化指标及水文指标对汉库库湾藻密度变化的综合解释度较高，达到 68%，丹库区域水面宽阔且坡度较缓，而汉库区域多呈峡谷型特征，支流较多且坡度较陡，蓄水后汉库库湾水体流动性差，藻类生长对理化因子的变化更为敏感。

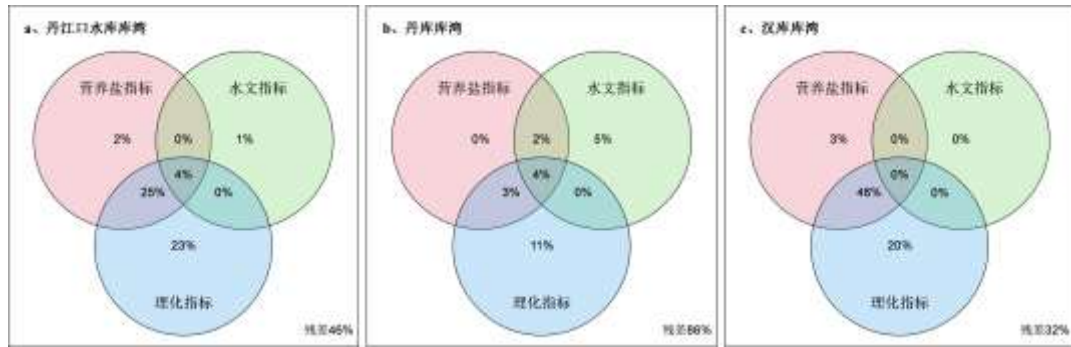


图 10 不同指标对库湾藻密度变化的独立贡献和综合影响

Fig.10 The independent contribution and comprehensive influence of different indexes on the density change of algae in the bay.

大量研究指出，藻类生长与水华形成除了依赖氮、磷等营养物质基础，还受到光照时长、气温变化、水动力条件等多维度环境因素的共同调控<sup>[36-37]</sup>。只有当藻类过量增殖，并在水面高度聚集形成肉眼可见的悬浮颗粒，致使水体表面颜色发生明显改变时，才能被界定为典型的水华暴发事件。本研究发现，相较于氮磷营养盐，水体理化指标尤其是 WT 对丹江口水库库湾藻类生长的影响更显著，WT 作为藻类生长的重要环境因子，可直接影响藻类代谢强度、生长能力以及群落结构<sup>[23,38-39]</sup>。

综上所述，水体富营养化与藻类水华之间的关系呈现明显的复杂性与动态性。后续研究可进一步深化库湾营养状态季节性特征研究，聚焦氮磷物质配比、光照强度、温度梯度、水体流速及分层特征等环境要素，系统开展富营养化与水华暴发环境阈值的定量分析，为库湾富营养化与水华的科学认识与精准防控提供依据。

#### 4 结论

(1) 2015~2024 年，丹江口水库库湾 TP 浓度呈现出显著下降趋势；从季节变化特征分析，除 AD 指标外，主要水质指标浓度普遍呈现冬季相对较低、其他季节差异不显著的特点，但部分年份秋汛后水位大幅抬升，库湾 TN 与  $COD_{Mn}$  浓度出现显著升高，TP 浓度明显下降的情况较为突出；空间分布上，库尾区域库湾污染物浓度相对较高。

(2) 2015~2024 年，丹江口水库库湾整体处于中营养状态，TLI ( $\Sigma$ ) 总体呈显著下降趋势，其中 2018 年 5~10 月间出现明显拐点，这主要得益于库区及上游流域长期实施的水质安全保障措施与高水位下水库净化作用增强的综合影响；从季节分布特征分析，冬季 TLI ( $\Sigma$ ) 显著低于其他季节；空间分布上，神定河曹沟库湾 (S19)、马蹬镇唐湾村库湾 (S4)、老灌河库湾 (S5) 富营养化风险较为突出；从因子贡献度来看，Chl.a 与 TN 是影响库湾水体营养程度的关键指标。

(3) 相关分析与方差分解结果表明：丹江口水库库湾 TLI ( $\Sigma$ ) 主要与污染输入过程密切相关，库湾藻类生长受水体理化指标尤其是 WT 的影响更显著，尽管二者密切相关，但水体富营养化与藻类水华仍呈现明显的复杂性与动态性。本研究因采样频次的客观限制，对部分库湾水环境变化的关键节点捕捉可能存在不足，后续研究可通过融合多元监测数据，一方面深化对库湾营养状态变化过程的认知，另一方面明确其与优势藻种的关联机制及阈值范围。

## 5 参考文献

- [1] Qin BQ, Gao G, Zhu GW, *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58** (10): 855-864.[秦伯强,高光,朱广伟,等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **58** (10): 855-864.]
- [2] Zhao YH, Li T, Huang B, *et al.* Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020. *J Lake Sci*, 2022, **34** (05): 1441-1451. DOI: 10.18307/2022.0503.[赵晏慧,李韬,黄波,等. 2016—2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素. 湖泊科学, 2022, **34** (05): 1441-1451.]
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2023 年中国生态环境状况公告. 2024.
- [4] Jing LX, Ma LK, Xu YX, *et al.* Study on the Ecological Environment Protection of Danjiangkou Reservoir Area and its Upper Reaches During the 14th Five-Year Plan Period. *Environmental Protection*, 2021,**49**(14):59-62.DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.14.008.[井柳新,马乐宽,续衍雪,等.“十四五”丹江口库区及上游生态环境保护思路研究. 环境保护, 2021, **49** (14): 59-62.]
- [5] Wang CH, Tan Y, Li Z *et al.* Assessment on eutrophication in typical bays and tributaries of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2012, **43** (08): 61-64+75. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2012.08.016.[汪朝辉,谭勇,李喆,等. 丹江口水库典型库湾及支流富营养化评价研究. 人民长江, 2012, **43** (08): 61-64+75.]
- [6] Li NX, Xu JF, Yin W, *et al.* Effect of local watershed landscapes on the nitrogen and phosphorus concentrations in the waterbodies of reservoir bays. *Science of The Total Environment*, 2020, **716**:137132. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137132.
- [7] Xin XK, Xu JF. Countermeasures for total nitrogen pollution control in water source area of Middle Route Project of South to North Water Diversion. *Yangtze River*, 2018, **49** (15): 7-12. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.15.002.[辛小康,徐建锋. 南水北调中线水源区总氮污染系统治理对策研究. 人民长江, 2018, **49** (15): 7-12.]
- [8] Hagy J D , Boynton W R , Keefe C W, *et al.* Hypoxia in Chesapeake Bay, 1950-2001: Long-term change in relation to nutrient loading and river flow. *Estuaries*, 2004, 27(4):634-658. DOI:10.1007/bf02907650.
- [9] Zhao L, WEI H, FENG SZ. Annual Cycle and Budgets of Nutrients in the Bohai Sea. *Environmental Science*, 2002,(01): 78-81. DOI:10.13227/j.hjcx.2002.01.019. [赵亮,魏皓,冯士筌渤海氮磷营养盐的循环和收支. 环境科学, 2002, (01): 78-81.]
- [10]Fang LC, Mi WJ, Li Y, *et al.* Water level fluctuations shape phytoplankton community in the Xiangxi Bay from Three Gorges Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*, 2025,**157**:111-122. DOI:10.1016/j.jes.2025.01.004.
- [11]Huang YK, Wang XY, Xiang WJ, *et al.* Forward-Looking Roadmaps for Long-Term Continuous Water Quality Monitoring: Bottlenecks, Innovations, and Prospects in a Critical Review. *Environmental science & technology*, 2022, **56**(9): 5334-5354. DOI: 10.1021/ACS.EST.1C07857.
- [12] Zhao KP, Yang WJ, Sha J, *et al.* Spatial Characteristics of Nutrient Status in Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43** (03): 51-58. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.03.007.[赵康平,杨文杰,沙健,等. 丹江口水库水体营养状态空间特征分析. 环境科学与技术, 2020, **43** (03): 51-58.]
- [13]Zhang YQ, Fu X, Bai FP. Influence of representative input tributaries on total nitrogen in Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2020, **51** (07): 40-45. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.007.[张乐群,付昕,白凤朋. 丹江口水库典型支流对水库浓度的影响. 人民长江, 2020, **51** (07): 40-45.]
- [14]Liu FL, Huang XM, Pan L, *et al.* Analysis on variation characteristics and influencing factors of water quality in flood season of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2024, **55** (S2): 33-37. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.S2.006.[刘付立,黄玄敏,潘璐,等. 丹江口水库洪水期水质变化特征及影响因素分析.人民长江, 2024, **55** (S2): 33-37.]
- [15]李盼,王顺钦,李玉英. 基于模糊综合评价法对丹江口水库陶盆水质的富营养化评价. 南阳师范学院学报, 2017, **16** (09): 21-24.
- [16]Xiao CY, Sun YM, Zhao TQ, *et al.* Assessment major NOx sources to nitrate of TSP around the Danjiangkou reservoir using isotopes and a Bayesian isotope mixing model. *Atmospheric Pollution Research*, 2024, **15** (7): 102151. DOI: 10.1016/J.APR.2024.102151.
- [17]Chen M, Jin XW, Liu Y, *et al.* Human activities induce potential aquatic threats of micropollutants in Danjiangkou Reservoir, the largest artificial freshwater lake in Asia. *Science of The Total Environment*, 2022, **850**:157843. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157843.
- [18]环境保护部办公厅.地表水环境质量评价办法 (试行). 北京: 环境保护部, 2011.

- [19]金相灿.中国湖泊环境. 北京:海洋出版社,1995:243-278.
- [20]Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, **13** (3): 245-259. DOI:10.2307/1907187.
- [21]Kendall M G. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 1938, **30**(1/2):81-93. DOI: 10.2307/2332226.
- [22]Hu Y, Shuang Y, Du Y, *et al.* Causal analysis of water pollution of Shending River in Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2019, **50** (11): 44-48. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.11.006.[胡玉,帅钰,杜永,等. 丹江口库区神定河水质污染成因分析. 人民长江, 2019, **50** (11): 44-48.]
- [23]Xiao YN, Cheng JH, Mo XC, *et al.* Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2023,**35**(3):821-832. DOI:10.18307/2023.0306.[肖玉娜,程靖华,莫晓聪等.丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2023,**35**(3):821-832.]
- [24]Qin BQ, Zhou, J, ELSER, JAMES J, *et al.* Water Depth Underpins the Relative Roles and Fates of Nitrogen and Phosphorus in Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020,**54**(6):3191-3198. DOI:10.1021/acs.est.9b05858.
- [25]Hou XQ, Deng L, Gao HY, *et al.* Application of MBR Process in the Upgrading and Reconstruction Project of Shending River Wastewater Treatment Plant. *China Water & Wastewater*, 2018, **34** (22): 66-70. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.22.014.[侯晓庆,邓磊,高海英,等. MBR 工艺在神定河污水处理厂升级改造中的应用. 中国给水排水, 2018, **34** (22): 66-70.]
- [26]Chu Y, Zhu JL, Fu JB. Temporal and spatial evolution characteristics of agricultural non-point source pollution in water source of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, **21** (04): 800-809. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0078.[褚钰,朱九龙,付景保. 南水北调中线水源地农业面源污染时空演化特征. 南水北调与水利科技, 2023, **21** (04): 800-809.]
- [27]Yin W, Wang C, Wang L, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of total phosphorus in Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2023, **54** (01): 1-7+10. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.01.001.[尹炜,王超,王立,等. 丹江口水库总磷时空分布特征及其影响因素. 人民长江, 2023, **54** (01): 1-7+10.]
- [28]Yu QH, Lin L, Jing HY, *et al.* Features of spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus in the Danjiangkou Reservoir and safeguarding measures for water quality. *China Water Resources*, 2024, (20): 59-66.[余启辉,林莉,金海洋,等. 丹江口水库氮磷时空分布特征及水质安全保障对策. 中国水利, 2024, (20): 59-66.]
- [29]杜永,刘佳,肖琴. 2016 年-2021 年泗河口水质变化分析与评价研究. 环境科学与管理, 2022, **47** (12): 190-194.
- [30]曾俊.南水北调中线水源地水质时空分异规律及其藻类增殖风险预警研究[学位论文].南宁:广西大学,2024.
- [31]Ai L, Shi ZH, Yin W, *et al.* Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: Linkage with landscape characteristics. *Journal of Hydrology*, 2015,523:398-408. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.01.082.
- [32]Chen GY, Zheng J, Zhang X. Flood control and water storage of the Danjiangkou Reservoir in 2021. *China Water Resources*, 2022, (05): 24-27.[陈桂亚,郑静,张潇. 2021 年丹江口水库防洪与蓄水. 中国水利, 2022, (05): 24-27.]
- [33]Liu G, Zhao FX, Ni XF, *et al.* Analysis on characteristics and causes of water quality change in Danjiangkou Reservoir bays during full impoundment period. *Yangtze River*, 2025,**56**(05):31-38+79. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.05.005.[柳根,赵肥西,倪雪峰,等. 丹江口水库满蓄期库湾水质变化特征及成因分析. 人民长江, 2025,**56**(05):31-38+79.]
- [34]Ouyang W, Hao FH, Song KY, Zhang X. Cascade dam-induced hydrological disturbance and environmental impact in the upper stream of the Yellow River. *Water Resource Management*, 2011, 25: 913-927. DOI:10.1007/s11269-010-9733-6.
- [35]Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, (03): 589-595.[孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, (03): 589-595.]
- [36]Chen F, Wang WJ, He T, *et al.* Analysis on status and countermeasures for bloom growth in middle and lower Hanjiang River. *Yangtze River*, 2023, **54**(10): 7-17. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.002.[陈峰,王文静,何涛,等. 汉江中下游水华发展新形势及治理对策分析. 人民长江, 2023, **54**(10): 7-17.]
- [37]Li J, Yin W, Jia HY, *et al.* Study on the ecological regulation of algal bloom control in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. *J Lake Sci*, 2022,**34**(3):740-751. DOI:10.18307/2022.0304. [李建,尹炜,贾海燕等.汉江中下游水华防控生态调度研究. 湖泊科学, 2022,**34**(3):740-751.]
- [38]Jia HY, Xu JF, Lei JS. Relationship of community structure of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir

bay. *Yangtze River*, 2019,**50**(05):52-58. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.05.011.[贾海燕,徐建峰,雷俊山. 丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究. 人民长江, 2019,**50**(05):52-58.]

[39]Huang ZQ, Zhang ZP, Shen J, *et al.* Changes of Phytoplankton Community Structure and Influencing Factors in Erhai Lake. *Environmental Science*, 2025,**46**(06):3393-3405. DOI: 10.13227/j.hjlx.202406175.[黄中情,张志萍,沈剑等. 洱海浮游植物群落结构变化及影响因素. 环境科学, 2025,**46**(06):3393-3405.]