

三峡水库干流与香溪河库湾水体营养状态 及其对水文条件的响应

谭路¹ 申恒伦² 王岚¹ 蔡庆华¹¹

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室,

湖北 武汉 430072;2. 枣庄学院生命科学学院, 山东 枣庄 277160)

【摘要】: 基于三峡水库干流和香溪河库湾 2003 年 7 月至 2013 年 7 月 10 年间的水质数据, 采用 Carlson 营养状态指数及差值二维坐标评价方法, 阐述三峡水库干流和香溪河库湾在蓄水前后 10 年以来的营养水平, 评价其水体营养状态及其限制因素, 通过建立干支流中营养状态与水动力条件的关系, 判断在干支流上水动力条件是否是富营养化的限制因子。结果表明: 蓄水 10 年来, 三峡水库水体营养状态没有出现显著的上升或下降趋势。在三峡水库长江干流水动力条件对营养盐利用几乎没有调控作用。与水库干流不同, 在香溪河支流库湾水动力条件在一定程度上能影响藻类对营养盐的利用, 即可通过调节香溪河支流库湾水动力条件来控制藻类水华的发生。

【关键词】: 三峡水库 香溪河库湾 营养限制 水动力

【中图分类号】: X825;X52 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1488-12

淡水生态系统的富营养化通常被认为是流域内湖泊自然衰退导致的必然结果, 其随着地质年代有规律的深度变浅和生物生产力增加^[1]。关于“水体富营养化”的定义众多, 但从本质上来讲, 营养物质的富集(特别是氮和磷), 是导致水体富营养化的主要因素^[2]。水体富营养化, 即水中碳、氮、磷等生源要素的增加而引起的一系列生态系统异常响应, 其中最突出的标志是水体透明度下降、浮游植物生物量的增加乃至藻类水华的出现^[3], 而水华的发生有时还伴随藻毒素产生^[4]。来自点源和非点源的人为营养盐输入极大地加快了自然湖泊由贫营养向富营养化转化的进程, 水生态系统中生物生产力迅速提升、水体透明度显著降低^[5]。在富营养化研究中, 富营养化与水体生产力^[6]、营养限制^[7-9]、富营养化对食物网结构的影响^[10,11];富营养化对水体生物地球化学的影响^[12];气候变化对富营养化的影响、富营养化水体的管理^[13]等方面是近代科学家们关注的热点问题。

湖泊、水库、溪流、海湾等水体的富营养化已被证明是全世界最重要的环境问题之一^[14], 也是当前我国湖泊和水库面临的主要生态环境问题之一^[15,16]。随着湖沼学理论的发展和研究者们对湖泊、水库、河流、海洋等水生态系统的深入研究, 营养状态已成为了水域生态系统的重要特征参数之一^[17,18]。同时使得营养状态评价成为水域生态系统健康评价、管理和修复的一项重要科学依据^[19]。在对水体富营养化研究中, 湖沼学家们提出了诸如特征法、参数法、生物指标法、磷收支模型法、营养状态指数法和基于模糊数学理论的模糊综合评价法等多种方法对水体进行营养评价和分级^[7,20,21]。其中营养状态指数(TSI)法做为湖泊富营养

作者简介: 谭路(1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为淡水生态学。E-mail:tanlu@ihb.ac.cn

蔡庆华 E-mail:qhcai@ihb.ac.cn

基金项目: 中国科学院战略先导 A 类项目(XDA23040500);国家重点研发计划项目(2017YFC0506406);国家重点实验室专项经费项目(2019FBZ01)

化评价常用方法在近些年来被广泛认可,其可对湖泊的营养状态进行连续的数值化分级,为富营养化机理的定量研究提供坚实基础^[22~24]。其中,Carlson^[7]提出的基于水体透明度、藻类叶绿素 a 和总磷的营养状态指数法(Trophic state index, TSI),克服了以往利用单一因子评价湖泊营养状态方法的片面性,被广泛认可。之后, Kratzer 等^[25]在 Carlson 的基础上提出了基于总氮的营养状态指数,使其更加完善。Carlson^[17]进一步提出了基于营养状态指数的二维坐标差值法。该方法认为,将各营养状态指数差值同时绘制在一个坐标系中,就可以确定它们当中的某些系统偏差^[26]。蔡庆华^[20,27]在将该指数引入中国的同时,利用 Saaty 层次分析法给各指数赋予权重,明确了不同指数的重要性。由于 Carlson 营养状态指数可以被用于描述生物与环境之间的相互关系,计算和解释也相对较为简单,可以直观把握湖泊生态系统的结构特征,并由此推断其生态系统功能^[28]。因此,营养状态指数及其差值被广泛应用于湖泊生态系统营养结构特征和功能变化的评价中^[17,18,29,30]。

水库是一个复杂的动态的生态系统,对水库的某一特定区域进行水体营养状态评价是水库管理与恢复工作的重要组成部分。Wagner 等^[31]的研究表明:水库的水体滞留时间、水位变幅、径流等与富营养化关系密切。在水库生态系统中,入库流量和以水体滞留时间表示的水体扰动程度是浮游植物营养盐关系的重要影响因素,因而成为影响水库营养状态的关键水力学参数^[32,33]。营养盐和入库流量、水体滞留时间是目前与水库生态系统管理最为相关的因素。三峡水库作为一个高度动态的生态系统,受水库运行水位运行方式的影响,三峡水库干流及其支流库湾在不同时段的水文、水生态特点,结合防洪、发电、航道管理、水环境保护,合理进行基于生态系统管理的水库生态调度,可能是控制或减缓三峡水库及其支流水体富营养化发展的一种有效手段。那么三峡水库水文水动力条件是否是对水体富营养化的控制因子呢,在干流和支流上水动力条件的作用是否相同?

本研究基于三峡水库干流和香溪河库湾 2003 年 7 月至 2013 年 7 月每季度的藻类叶绿素 a、透明度、总氮和总磷数据,选用 Carlson^[7]提出并经 Kratzer 等^[25]修正的营养状态指数及 Carlson^[17]在 1991 年拓展的营养状态指数差值二维坐标评价方法,阐述三峡水库干流和香溪河库湾在蓄水前后 10 年以来的营养水平,评价其水体营养状态及其限制因素,并分析了营养状态和限制因子与三峡水库水文水动力特征的关系,来验证水动力条件是否是对期水体富营养化的限制因子,在干支流上是否存在差异。

1 材料和方法

1.1 样点设置

三峡水库位于湖北省和重庆市境内,处于亚热带季风气候区,其正常蓄水水位为 175m,夏季防洪控制水位为 145m,年内水位落差达 30m。香溪河作为三峡水库湖北省境内最大的支流,受三峡工程蓄水的影响,下游 30 多千米的河段形成类似于湖泊的缓流水体,成为支流库湾。本次研究区域包括三峡水库湖北库区长江干流和香溪河库湾(图 1)。在长江干流设置有 CJ01 和 CJ04 两个样点,并在香溪河库湾设置有 XX02、XX05 和 XX083 个样点。采样时间为 2003 年 7 月~2013 年 7 月,采样频率为季度采样:分别为 1(冬季)、4(春季)、7(夏季)、10 月(秋季)。

1.2 采样和分析方法

监测指标包括透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)和藻类叶绿素 a(Chl. a)。各指标测定方法均按照中国生态系统监测网络(CERN)水域生态系统长期监测规范执行^[34],其中使用直径 20cm 的黑白萨氏盘(Secchidisc)现场测定水体透明度。用采水器采集表层 0.5m 的水样,取一定体积的水样保存在干净的塑料瓶,用硫酸酸化至 pH 略小于 2 后带回室内使用连续流动分析仪(SkalarSan++, 荷兰)测定总氮和总磷含量。另取一定已知体积的水样用 WhatmanGF/C 滤膜(0.8 μm)过滤,过滤后的滤膜于黑暗低温(约 4℃)保存带回室内,经 95%的丙酮低温萃取(20~24h)、离心后,取上清液用紫外分光光度法测定藻类叶绿素 a。

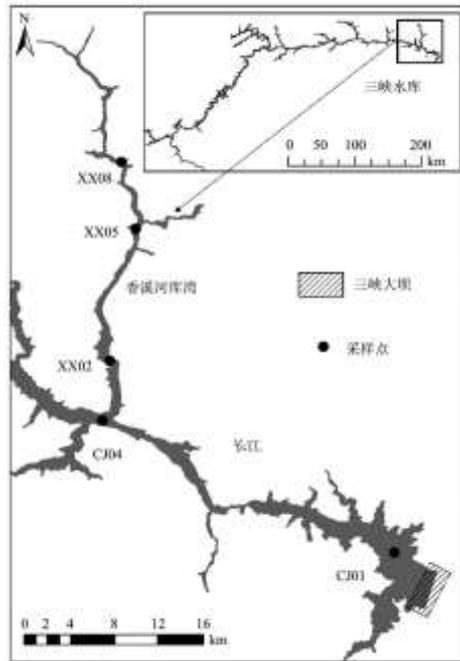


图1 采样点在三峡水库干流与香溪河库湾中的位置

三峡水库长江干流和香溪河库湾营养状态评价依据 Carlson^[7]提出、Kratzer 等^[25]改进的营养状态指数法(Trophic state index, TSI), 计算公式如下:

$$TSI_{SD} = 60 - 14.42 \ln (SD, m) \quad (1)$$

$$TSI_{TP} = 14.42 \ln (TP, \mu g/L) + 4.15 \quad (2)$$

$$TSI_{TN} = 14.43 \ln (TN, mg/L) + 54.45 \quad (3)$$

$$TSI_{CHL} = 9.81 \ln (CHL, \mu g/L) + 30.6 \quad (4)$$

评价标准是: TSI<40 为贫营养, 40≤TSI<50 为中营养, 50≤TSI<70 为富营养, TSI≥70 为超富营养^[7]。

Carlson^[17]推出的 TSICHL、TSISD 和 TSITP 关系的二维坐标法, 用于判断水体营养状态的限制因子, 后来 Haven^[18]将它发展到 TSICHL、TSISD 和 TSITN 上。当 TSICHL-TSITP(TN)>0、TSICHL-TSISD>0 时, 位于第一象限, 磷(氮)是大型藻类生长的限制因子; 当 TSICHL-TSITP(TN)>0、TSICHL-TSISD<0 时, 位于第二象限, 磷(氮)是小型藻类生长的限制因子; 当 TSICHL-TSITP(TN)<0、TSICHL-TSISD<0 时, 位于第三象限, 非藻类浊度或有色物质引起的光衰减, 是藻类生长的限制因子; 当 TSICHL-TSITP(TN)<0、TSICHL-TSISD>0 时, 位于第四象限, 浮游动物的摄食等下行效应是藻类生长的限制因子^[17, 18, 23]。

文中选取的水力学参数包括入库流量(Influence Discharge, ID)和水体滞留时间(τ)^[35]:

$$\tau = \frac{VT}{QT} \quad (5)$$

式中：水体滞留时间(τ)单位为天； V_T 为水库在第 T 天的库容(m^3)； Q_T 为水库在 T 天的入库流量(m^3/d)，其中三峡水库入库流量和水位数据来源于中国长江三峡集团有限公司，不同水位条件下三峡水库库容数据来源于宜昌市防汛抗旱指挥部办公室。香溪河库湾的入库流量数据由上游的水文站及宜昌市防汛抗旱指挥部办公室提供。香溪河特定水位对应的库容数据来源于徐耀阳^[36]，其它水位条件对应的库容通过回归方程估算。

营养状态指数与优势种水力学参数的关系采用线性回归方程进行拟合，回归分析和相关分析均在 IBMSPSS20.0 统计软件上完成，数据统计分析在 Origin8.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 三峡水库长江干流与香溪河支流库湾营养状态评价

使用 TSI_{chl} 、 TSI_{sd} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{TN} 分别从不同的角度评价三峡水库长江干流和香溪河支流库湾营养状态(表 1)，结果表明，基于 TSI_{chl} 的平均值和中位数，长江干流为贫营养水平($TSI < 40$)，而香溪河支流库湾为中营养水平($40 \leq TSI < 50$)；基于 TSI_{sd} 和 TSI_{TN} 的平均值和中位数，长江干流和香溪河支流库湾均为富营养化状态($50 \leq TSI < 70$)；基于 TSI_{TP} 的平均值和中位数，长江干流为富营养化状态($50 \leq TSI < 70$)，而香溪河支流库湾均为超富营养化状态($TSI > 70$)。整个研究区域水体营养状态具有明显的时间异质性，长江干流与香溪河支流库湾的 TSI_{chl} 、 TSI_{sd} 、 TSI_{TP} 和 TSI_{TN} 的标准差分别为 9.4、16.9、3.6、7.4 和 17.0、9.3、5.4、9.2，变化范围分别是 12.4~59.7、39.0~96.4、53.6~71.5、51.1~92.9 和 2.0~77.3、39.0~90.6、28.5~65.7、46.6~97.9。非参数检验表明，长江干流和香溪河支流库湾各营养状态指数(除 TSI_{TP} 外)年际间差异均不显著($p > 0.05$)；而季节间差异显著($p < 0.05$)。总体而言，长江干流 TSI_{chl} 低于香溪河支流库湾，而 TSI_{TN} 高于香溪河支流库湾。

表 1 三峡水库干流和香溪河库湾水体营养状态指数的统计描述

		Mean	Median	Std. D	Min	Max	N
CJ	TSI_{chl}	31.0	29.8	9.4	12.4	59.7	81
	TSI_{sd}	58.6	52.4	16.9	39.0	96.4	82
	TSI_{TN}	62.1	61.9	3.6	53.6	71.5	82
	TSI_{TP}	69.1	68.7	7.4	51.1	92.9	82
	CTSI	47.1	45.5	7.2	34.0	62.0	81
XX	TSI_{chl}	45.8	45.5	17.0	2.0	77.3	123
	TSI_{sd}	56.0	57.4	9.3	39.0	90.6	123
	TSI_{TN}	54.5	54.8	5.4	28.5	65.7	123
	TSI_{TP}	71.1	70.1	9.2	46.6	97.9	123
	CTSI	53.3	52.5	9.5	29.6	72.2	123

图 2 展示了三峡水库长江干流各季度的营养状态变化情况。基于 TSI_{chl} 的平均值，87.8%的时间里为贫营养状态($TSI < 40$)；基于 TSI_{sd} 的平均值，冬春季多为中营养状态($40 \leq TSI < 50$)，夏季为超富营养状态($TSI > 70$)，秋季为富营养状态($50 \leq TSI < 70$)。基于

TSI_{TN} 的平均值, 97.6%的时间为富营养状态 ($50 \leq TSI < 70$), 其他时间为超富营养状态 ($TSI > 70$)。基于 TSI_{TP} 的平均值, 61.0%时间为富营养状态 ($50 \leq TSI < 70$), 其他时间为超富营养状态 ($TSI > 70$)。

图3展示了香溪河支流库湾各季度的营养状态变化。基于 TSI_{chl} 的平均值, 处于贫营养 ($TSI < 40$) 和富营养 ($50 \leq TSI < 70$) 状态的季节均占 39.0%, 其余时间为中营养状态 ($40 \leq TSI < 50$); 基于 TSI_{SD} 的平均值, 2008年三峡水库二期蓄水前多为富营养状态, 蓄水后冬季为中营养状态, 其他季节为富营养状态。基于 TSI_{TN} 的平均值, 95.1%的时间为富营养状态, 基于 TSI_{TP} 的平均值, 富营养状态和超富营养状态的比例各占 50%。

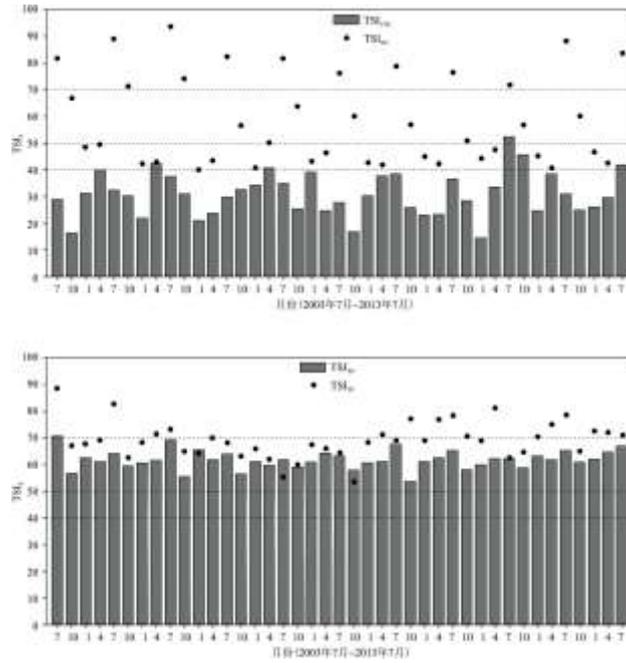


图2 2003~2013年三峡水库干流营养状态指数季节变化

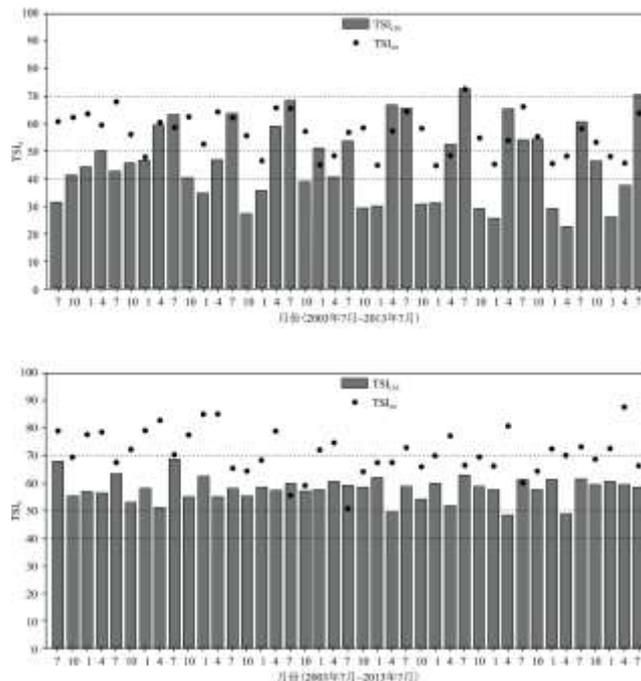


图 3 2003~2013 年香溪河支流库湾营养状态指数的季节变化

2.2 三峡水库长江干流与香溪河支流库湾营养状态限制因子

表 2 列出了整个研究区域 TSI 差值的统计结果。水库长江干流和香溪河支流库湾 $TSI_{CHL}-TSI_{TP}$ 和 $TSI_{CHL}-TSI_{TN}$ 的平均值和中位数均小于 0, 表明研究区域氮磷营养是超过浮游植物生长需求, 因而不是水体营养状态的限制因素。此外, $TSI_{CHL}-TSI_{SD}$ 的平均值和中位数也小于 0, 因此在研究期间水体营养状态总体上受非藻类浊度的限制。标准差和变化范围的数据表明, 营养状态指数差值具有明显的时间差异。在监测时间周期内, 可能在部分时段内水体营养状态受磷、氮和浮游动物摄食的限制, 但总体上这些限制因素在研究区域不占主导地位。非参数检验表明, 三峡水库长江干流营养状态指数差值 (除 $TSI_{CHL}-TSI_{TN}$ 外) 年际间差异和季节间差异均不显著 ($p>0.05$)。香溪河支流库湾营养状态指数差值年际间差异不显著 ($p>0.05$); 而季节间差异显著 ($p<0.05$)。

图 4 显示了三峡水库长江干流水体营养状态指数差值及其限制因素。在整个研究期间, $TSI_{CHL}-TSI_{SD}$ 、 $TSI_{CHL}-TSI_{TP}$ 和 $TSI_{CHL}-TSI_{TN}$ 数值几乎全部小于 0, 绝大部分数据分布在第三象限内, 仅有不到 5% 的数据分布在第四象限, 说明在三峡水库长江干流, 营养盐总体上呈现富余状态, 不是限制藻类生长的因素, 由非藻类浊度引起的光限制是影响藻类生长的主要因素, 不排除个别时候浮游动物摄食影响藻类生长。

表 2 三峡水库长江干流和香溪河支流库湾水体营养状态指数差值的统计描述

		Mean	Median	Std. D	Min	Max	N
CJ	$TSI_{CHL}-TSI_{SD}$	-27.1	-23.2	17.3	-60.0	5.5	81
	$TSI_{CHL}-TSI_{TN}$	-31.0	-31.4	9.5	-47.2	1.1	81
	$TSI_{CHL}-TSI_{TP}$	-38.0	-39.5	11.6	-60.7	-1.2	81
XX	$TSI_{CHL}-TSI_{SD}$	-10.2	-9.4	15.9	-50.4	17.3	123
	$TSI_{CHL}-TSI_{TN}$	-8.8	-8.7	18.2	-56.4	42.5	123
	$TSI_{CHL}-TSI_{TP}$	-25.3	-26.3	19.8	-72.7	15.9	123

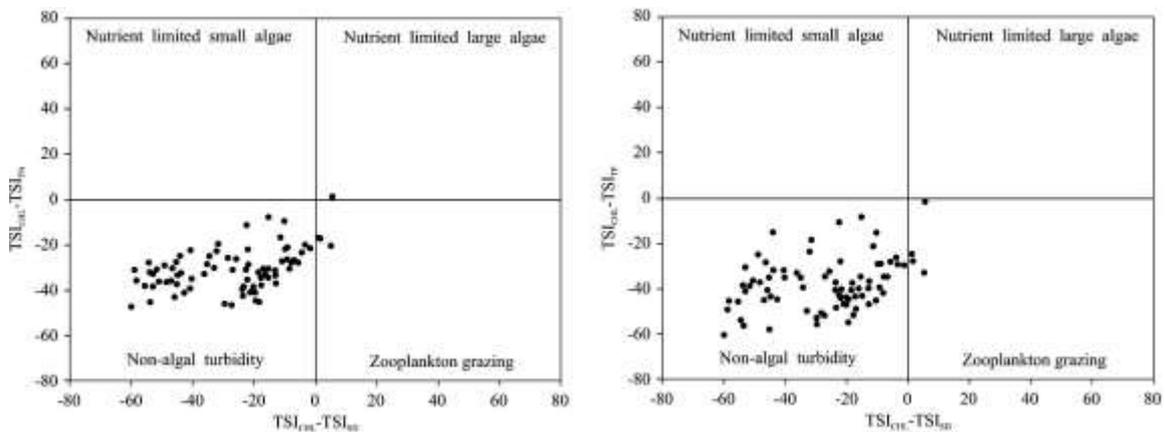


图 4 基于二维坐标的三峡水库长江干流营养状态指数限制因子

图 5 显示了香溪河支流库湾水体营养状态指数差值及其限制因素。与干流不同，支流库湾仅有接近 60%的 $TSI_{chl} - TSI_{SD}$ 、 $TSI_{chl} - TSI_{TP}$ 和 $TSI_{chl} - TSI_{TN}$ 平均值在研究期间小于 0, 分布在第三象限内, 说明在香溪河支流库湾, 大多数时间内由非藻类浊度引起的光限制是影响藻类生长的主要因素; 34%的 $TSI_{chl} - TSI_{TN}$ 和 9%的 $TSI_{chl} - TSI_{TP}$ 差值小于 0, 分布在第一、二象限内, 表明这些时候氮、磷是藻类生长的限制因素, 营养盐不足以满足藻类生长的需要; 其余时段的营养状态指数差值分布在第四象限, 浮游动物摄食压力是藻类生长的限制因素。

从统计结果可以得到, 香溪河支流库湾的 $TSI_{chl} - TSI_{SD}$ 差值通常小于长江干流, 表明香溪支流河库湾营养状态受到非藻类浊度的限制程度低于长江干流; 而香溪河支流库湾的 $TSI_{chl} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{chl} - TSI_{TP}$ 通常也小于长江干流, 表明水库干流氮、磷营养盐的富余程度大于香溪河支流库湾。

2.3 营养状态与水力学参数的关系

水体滞留时间反映了水库水体更新特征及可能的分层情况。滞留时间越长, 表明水库水体更新速度越慢, 水温出现分层的可能性越大; 反之水库水体更新越快, 不易出现水温分层。三峡水库每 10 月开始蓄水, 到 11 月中下旬达 175m, 次年 1 月水位逐渐下降, 至 5 月底达 145m, 并保持最低水位不低于 145m 运行直至 9 月底。三峡水库水位、入库流量和水体滞留时间表现出明显的季节性特征, 年内变化显著, 其月平均入库流量和滞留时间的变化范围分别为 $3360 \sim 42077 m^3/s$ 和 $2 \sim 94d$ (图 6)。蓄水前, 月均水体滞留时间均低于 10d, 属于典型的河流型水体; 蓄水后, 月均水体滞留时间明显延长。总体而言, 在每年 6~9 月份的主汛期, 入库流量较大, 月均流量最大值可达到 $42077 m^3/s$, 水体滞留时间均在 20d 以下, 7 月更是低于 10d, 为典型的河流型水体; 但在每年的 10 月至次年的 5 月, 月均流量减小, 介于 $3369 \sim 18732 m^3/s$, 水体滞留时间介于 9~94d, 滞留时间 84%以上均在 20~90d, 属于中等强度分层水体。综上所述三峡水库长江干流属于混合型水体, 不易出现水温分层现象。

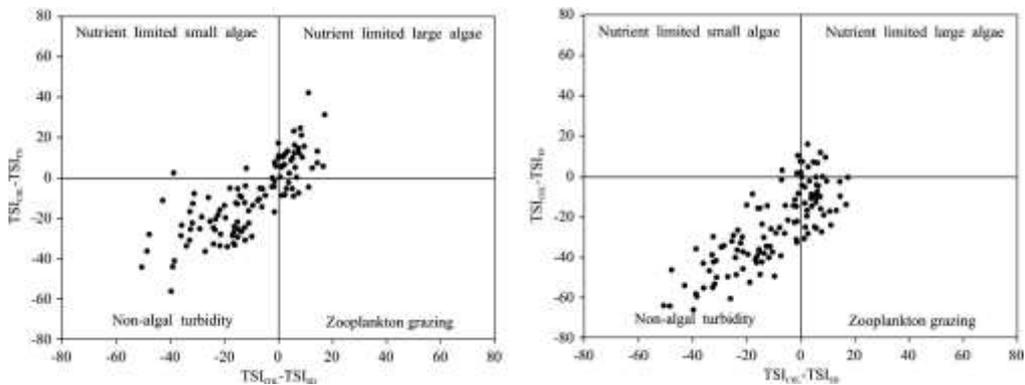


图 5 基于二维坐标的香溪河支流库湾营养状态指数限制因子

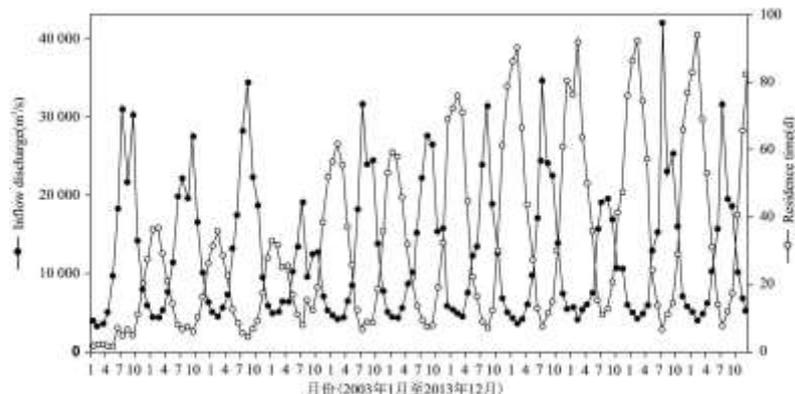


图 6 2003~2013 年三峡水库月均入库流量与水体滞留时间的波动特征

香溪河支流库湾水位、入库流量和水质滞留时间同样也具有明显的季节性变化，其月平均入库流量和滞留时间的变化范围分别为 $10\sim 191\text{m}^3/\text{s}$ 和 $3\sim 1120\text{d}$ (图 7)。蓄水前，香溪河支流库湾月均水质滞留时间均低于 10d,属于典型的河流型水体；蓄水后，月均水质滞留时间显著增加。总体而言，在每年 6~9 月的主汛期，入库流量较大，月均流量最大值可达到 $191\text{m}^3/\text{s}$,水质滞留时间均在 $24\sim 331\text{d}$ 以内，除 2006 年 8 月为 331d 以外，其余月份均小于 300d,为典型的过渡型水体；但在每年的 10 月至次年的 5 月，月均流量减小，介于 $10\sim 97\text{m}^3/\text{s}$,水质滞留时间介于 $64\sim 1120\text{d}$,40%月的滞留时间大于 300d,属于湖泊型水体。这说明香溪河支流库湾也属于混合型水体，但水质滞留时间相对长江干流显著提高，在春夏季易出现水温分层的现象。

表 3 显示了水库干流、香溪河支流库湾营养状态指数(TSI_{chl} 、 TSI_{SD} 、 TSI_{TN} 和 TSI_{TP})与水力学参数的线性关系。长江干流， TSI_{chl} 与入库流量、水质滞留时间均没有显著关系($p>0.05$),回归系数 R^2 均小于 0.100。而在香溪河支流库湾， TSI_{chl} 随入库流量增加而增大($p<0.05$),而随水质滞留时间延长而降低($p<0.01$),回归系数 R^2 分别为 0.918 和 0.464。在长江干流和香溪河支流库湾， TSI_{SD} 均随着入库流量的增加而显著的增加，且长江干流 TSI_{SD} 与水质滞留时间的关系明显强于香溪河支流库湾，回归系数 R^2 分别为 0.114 和 0.266($p<0.01$); TSI_{SD} 均随着水质滞留时间的增加而显著的下降，且长江干流 TSI_{SD} 与水质滞留时间的关系强于香溪河支流库湾，回归系数 R^2 分别为 0.5844 和 0.475($p<0.01$); TSI_{TN} 仅随着入库流量的延长而显著的增加，回归系数 R^2 分别为 0.175 和 0.269($p<0.01$),而与水质滞留时间相关关系不显著($p>0.05$),回归系数 R^2 均小于 0.05。长江干流和香溪河支流库湾的 TSI_{TP} 均与入库流量和水质滞留时间没有显著关系($p>0.05$),回归系数 R^2 极低($R^2<0.05$)。这从总体上表明，具有生物意义的 TSI_{chl} 仅在香溪河支流库湾受到水力学特征的影响；在长江干流和香溪河支流库湾有营养特征的 TSI_{TN} 和 TSI_{TP} 的季节动态不受水质滞留时间的影响，而具有水下光学含义的 TSI_{SD} 受到水力学特征季节动态的强烈干扰。

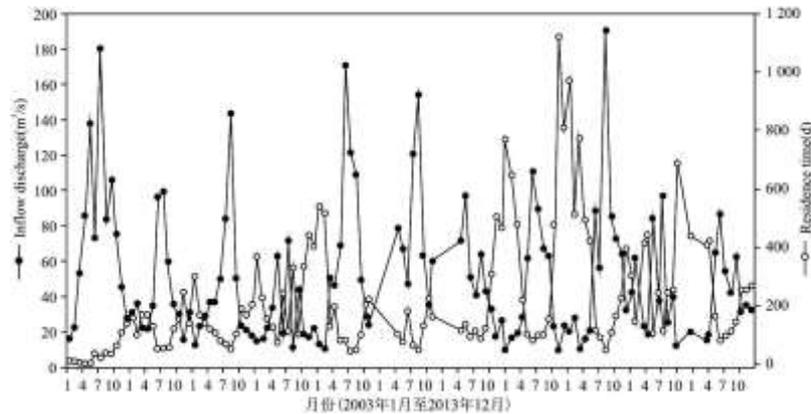


图 7 2003~2013 年香溪河库湾月均入库流量与水体滞留时间的波动特征

表 3 三峡水库长江干流与香溪河支流库湾营养状态与水力学参数的线性关系

Variable		TSI_{chl}	TSI_{SD}	TSI_{TN}	TSI_{TP}	
CJ	ID	R	0.220	0.918	0.418	0.179
		p	0.168	0.000	0.007	0.262
	τ	R	-0.227	-0.764	-0.177	0.044
		p	0.154	0.000	0.268	0.785

XX	ID	R	0.338	0.464	0.509	-0.316
		p	0.038	0.003	0.001	0.053
	τ	R	-0.516	-0.689	-0.173	0.070
		p	0.001	0.000	0.300	0.676

表 4 显示了长江干流、香溪河支流库湾营养状态指数差值与入库流量、水体滞留时间的关系。在水库干流，入库流量和水体滞留时间与仅代表非藻类浊度限制程度的 $TSI_{chl}-TSI_{sd}$ 有紧密的关系 ($p < 0.01$), 对其季节动态变异的解释率分别达 63.7% 和 44.5%; 而与代表营养盐富余程度的 $TSI_{chl}-TSI_{TN}$ 和 $TSI_{chl}-TSI_{TP}$ 没有显著性的相关性 ($p > 0.05$)。在香溪河库湾，入库流量和水体滞留时间与 $TSI_{chl}-TSI_{sd}$ 没有显著性的相关性, 解释率分别仅为 1.7% 和 4.3% ($p > 0.05$)。入库流量与代表氮营养富余程度的 $TSI_{chl}-TSI_{TN}$ 没有显著性的相关性, 解释率仅为 2.9% ($p > 0.05$)。而水体滞留时间与其有显著性的关系, 对其季节变异的解释率达 19.4% ($p < 0.01$)。入库流量和水体滞留时间均与代表磷营养富余程度的 $TSI_{chl}-TSI_{TP}$ 有显著性的关系, 分别可以解释其季节变异的 19.2% 和 22.3% ($p < 0.01$)。这些结果表明, 流域水文因素影响下的水库干流水动力特征对非藻类浊度的限制程度具有明显的控制作用, 对营养富余程度几乎没有任何调控作用; 与水库干流的响应特征不一致, 香溪河库湾非藻类浊度限制程度受到水动力条件的影响很弱, 而营养盐富余程度的季节动态在一定程度上受到水动力条件的影响。

表 4 三峡水库长江干流与香溪河支流库湾营养状态差值与水力学参数的相关分析

Variable		$TSI_{chl}-TSI_{sd}$	$TSI_{chl}-TSI_{TN}$	$TSI_{chl}-TSI_{TP}$	
CJ	ID	R	-0.798	0.042	0.054
		p	0.000	0.796	0.737
	τ	R	0.644	-0.151	-0.207
		p	0.000	0.346	0.194
XX	ID	R	0.129	0.170	0.438
		p	0.441	0.308	0.006
	τ	R	-0.207	-0.440	-0.472
		p	0.212	0.006	0.003

3 讨论

1977 年 Carlsion 提出营养状态指数时指出: 当把所有的参数转化为营养状态尺度时, 应该得到相同的评价结果。任何一个值偏离都需要调查取证。在后来的实际研究中发现, TSI_{chl} 减去任何其它 TSI 指数的差值往往不在零点的附近, 营养状态的评价结果也往往不一致^[23, 36]。本研究中, 采用不同的营养状态指数得到的评价结果差异较大。如: 采用藻类叶绿素 a 状态指数的评价结果表明水库干流为贫营养, 而采用营养盐状态指数或透明度状态指数的评价结果表明水体为富营养化或超富营养化状态。在营养盐状态应用实践中, 为了统一评价结果, 避免富营养化水平被错误估计, 多使用综合营养状态指数, 因此引入了权重的概

念^[19,37],而 Calson^[7]认为,利用透明度的优点在于它简单、易得而且与叶绿素得到的 TSI 值相近。而磷指数在全年都较稳定,但其精确程度取决于磷是否是藻类生长的主要限制因素。因此他建议在进行营养分级时优先考虑具有生物学参数的 TSI_{chl} 指数^[7,38]。其中蔡庆华在将 TSI 引入并应用于中国湖泊时,利用 Saaty 层次分析法计算得出了各指数的权重,明确了 TSI_{chl} 指数的重要性^[20,22]。因此,基于 TSI_{chl} 水库干流处于贫营养,而香溪河库湾春夏季节处于中-富营养水平,秋冬季节处于贫-中营养水平。可能是由于库区本身具有较高的氮、磷本底^[39],所以蓄水 10 年来,水体营养状态没有出现显著的上升或下降趋势。

基于营养状态指数数值的二维坐标体系结果,三峡水库长江干流水体氮磷营养盐超过藻类正常生长的需求,呈现富余状态,不会成为藻类生长的限制因素,藻类生长基本受非藻类浊度引起的光衰减限制,偶尔出现浮游动物摄食压力成为限制藻类生物量的情况。与水库干流不同,虽然超过半数以上的时间香溪河支流库湾藻类主要受到非藻类浊度限制,但仍在春夏季节的部分时间里受到氮磷营养不足和浮游动物摄食压力的限制,这与轮虫密度在 3~9 月具有较高值有关^[40]。本文关于三峡水库长江干流与香溪河支流库湾的水体营养状态评价及其限制因素结论与徐耀阳^[36]的研究一致。

三峡水库长江干流和香溪河支流库湾,水体滞留时间与基于氮磷的营养状态指数的相关性较弱,但对基于透明度的营养状态指数具有显著影响。入库流量对基于氮和透明度的营养状态具有显著影响。王丽婧等^[41]研究表明,在入库污染负荷总量组成中,面源贡献占绝对优势。加之三峡库区水土流失面积较大,占库区国土面积的 50%强^[42]。因此,做好三峡库区的面源污染防治与水土保持保育有助于防治水体富营养化的进一步加剧。在三峡水库长江干流,入库流量和滞留时间对非藻类浊度的限制程度具有显著的影响,使其随水文条件的季节规律而变化。入库流量越大,水体滞留时间越短,水位越低,非藻类浊度的限制程度越大,发生水华的风险就越低^[29,43]。在香溪河库湾,磷限制藻类生长程度受入库流量影响而具有相同的季节变化规律。水体滞留时间对氮磷营养限制藻类生长程度均具有显著的影响,滞留时间愈长,营养盐限制藻类生长的程度越小。因此,增加出库流量,以缩减支流库湾库容,使水体滞留时间缩短,可以降低氮磷营养盐引起的富营养化风险^[36,44]。Xu 等^[29]根据多年数据所做的回归经验模型预测认为,三峡水库干流营养状态可能在大部分时间里仍受到水体扰动下的非藻类浊度的限制,富营养化加剧的风险较小。而香溪河库湾在进入正常水位运行后,汛期主要是过渡型水体,而非汛期主要以湖泊型水体为主,库湾随滞留时间的延长水体更加趋于稳定,非藻类浊度的限制进一步被削弱,富营养化风险和藻类水华暴发的机率可能会增加^[29,45]。

4 结论

(1) 研究期间,基于 TSI_{chl} 三峡水库干流处于贫营养,而香溪河支流库湾春夏季节处于中-富营养水平,秋冬季节处于贫-中营养水平。蓄水 10 年来,水体营养状态没有出现显著的上升或下降趋势。三峡水库长江干流水体氮磷营养盐超过藻类正常生长的需求,藻类生长主要受非藻类浊度引起的光衰减限制。超过半数以上的时间香溪河支流库湾藻类主要受到非藻类浊度限制,但在春夏季节的部分时间里受到氮磷营养和浮游动物摄食压力的限制。

(2) 在三峡水库长江干流水动力特征对非藻类浊度的限制程度具有明显的控制作用,对营养盐利用几乎没有调控作用。与水库干流不同,香溪河支流库湾水动力条件在一定程度上影响了藻类对营养盐的利用,但对非藻类浊度限制程度的影响很弱。表明水动力条件在香溪河支流库湾能影响藻类对营养盐的利用,可通过调节水动力条件来控制香溪河支流库湾藻类对营养的利用。

参考文献:

[1] RODHE W. Crystallization of eutrophication concepts in northern Europe[M]. In Eutrophication: causes, consequences, correctives. National Academy Sciences Public 1700. 1969, pp:50- 64.

[2] MOSS B, MADGWICK J, PHILLIPS G, et al. A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes[M]. Norwich: Broads Authority and Environment Agency, 1996.

-
- [3]许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5):1239-1247.
- [4]朱荣, 王欢, 余得昭, 等. 2013年洱海水华期间微囊藻毒素和浮游植物动态变化[J]. 湖泊科学, 2015, 27(3):378-384.
- [5]杨水化, 彭正洪, 焦洪赞, 等. 城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析——以武汉市后官湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4):941-951.
- [6]李华, 沈洪艳, 李双江, 等. 富营养化对白洋淀底栖-浮游耦合食物网结构和功能的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(6):2017~2030.
- [7]CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2):361-369.
- [8]DODDS W K. Eutrophication and trophic state in rivers and streams[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51:671-680.
- [9]朱天顺, 刘梅, 申恒伦, 等. 南水北调东线湖群水体营养状态评价及其限制因子研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12):2992-3002.
- [10]KRATINA P, GREIG H S, THOMPSON P L, et al. Warming modifies trophic cascades and eutrophication in experimental freshwater communities[J]. *Ecology*, 2012, 93(6):1421-1430.
- [11]谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 等. 太湖 2007-2016 十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2):305-318.
- [12]陈能汪. 全球变化下九龙江河流-河口系统营养盐循环过程、通量与效应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1):23-31.
- [13]胡文, 李春华, 叶春, 等. 生态模型在水体富营养化研究领域的应用进展[J]. 环境科学研究, 2020, 33(2):349-362.
- [14]朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6):1510-1524.
- [15]蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1):7-11.
- [16]秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10):855-864.
- [17]CARLSON R E. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs[M]. In: Proceedings of a National Conference on Enhancing the States' Lake Management Programs. Chicago:Monitoring and Lake Impact Assessment. 1991, pp:59-71.
- [18]HAVENS K E. Using trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data[M]. *Korean Journal of Limnology*, 2000, 33:187-196.

-
- [19] 邹伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 综合营养状态指数 (TLI) 在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 36-47.
- [20] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 89-94.
- [21] 许秋瑾, 郑丙辉, 朱延忠, 等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 453-457.
- [22] 蔡庆华, 刘建康, KING LORENZ. 评价湖泊富营养化的一个综合模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13: 1674-1678.
- [23] MATTHEWS R, HILLES M and PELLETIER G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation[J]. Hydrobiologia, 2002, 468(1-3): 107-121.
- [24] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 基于着生硅藻指数的梧桐河水生态健康评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 83-90.
- [25] KRATZER C R and BREZONIK P L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1981, 17: 713-715.
- [26] CARLSON R E and HAVENS K E. Simple graphical methods for the interpretation of relationships between trophic state variables[J]. Lake and Reservoir Management, 2005, 21(1): 107-118.
- [27] 蔡庆华. 武汉东湖富营养化的综合评价[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(4): 335-339.
- [28] WEYSI K, NOURMORADI H, SAMARGHANDI M R, et al. Investigation on the Trophic Status of Ekbatan Reservoir: A Drinking Water Supply Reservoir in Iran[J]. Journal of Research in Health Sciences, 2013, 14: 64-68.
- [29] XU Y Y, CAI Q H, HAN X Q, et al. Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 169: 237-248.
- [30] 叶麟, 谭路, 蔡庆华. 三峡水库水生态系统健康评价[J]. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 49-55.
- [31] WAGNER I and ZALEWSKI M. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir—consequences for restoration[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 79-90.
- [32] AN K G, PARK S S. Influence of seasonal monsoon on the trophic state deviation in an Asian reservoir[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 145(1-4): 267-287.
- [33] JI R B, DAVIS C S, CHEN C S, et al. Modeling the influence of low-salinity water inflow on winter-spring phytoplankton dynamics in the Nova Scotian Shelf-Gulf of Maine region[J]. Journal of Plankton Research, 2008, 30(12): 1399-1416.
- [34] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 2007.
- [35] GEORGE G, HURLEY M and HEWITT D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger

lakes in the English Lake District[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52:1647-1666.

[36]徐耀阳. 基于生态同步性概念的大型水库富营养化与春季藻类水华研究——以三峡水库为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

[37]全栋, 史小红, 赵胜男, 等. 2006-2017年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5):1259-1267.

[38]OSGOOD R A. Using differences among carlson's trophic state index values in regional water quality assessment[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1982, 18(1):67-74.

[39]曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(1):12-19.

[40]孔令惠. 三峡水库香溪河库湾浮游轮虫群落动态及其与水环境关系[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

[41]王丽婧, 郑丙辉, 李子成. 三峡库区及上游流域面源污染特征与防治策略[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8):783-788.

[42]贺秀斌. 三峡库区水土流失与面源污染控制试验示范[C]//中国水土保持学会科技协作工作委员会 2011年年会论文集. 四川, 2011:23-26.

[43]TAN L, CAI Q H, ZHANG H Y, et al. Trophic status of tributary bay aggregate and their relationships with basin characteristics in a large, subtropical dendritic reservoir, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, 23(3):650-659.

[44]焦军丽, 马巍, 裴倩楠, 等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 6(6):544-548.

[45]曾辉. 长江和三峡库区浮游植物季节变动及其与营养盐和水文条件关系研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.