

天荒坪抽水蓄能电站水位变化对水体营养状态的影响

俞 焰¹, 杨正健^{2,3}, 张佳磊^{2,3}, 刘德富^{1,2,3}, 贡丹丹¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430068;
3. 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要:为了探究抽水蓄能电站水位波动、营养物质时空分布以及浮游植物分布特性,分析水体营养状态及其成因,为后期控制水体富营养化提供指导。2014–2015年在浙江天荒坪抽水蓄能电站的上水库(S1)和下水库(S3–S4)设置4个采样点,获取相关的监测点数据,分析了水库水位、水体稳定性、营养盐以及叶绿素a的分布规律,讨论了水库水位剧烈波动对水体稳定、营养盐以及叶绿素a浓度的影响。结果表明:(1)天荒坪抽水蓄能电站水库水体稳定性较小,各监测点浮点频率均在 $0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 以下。总氮、溶解性硅酸盐浓度较高,总氮范围在1.8~2.8 mg/L,已达到V类水标准;硅酸盐浓度为3.30~8.00 mg/L;叶绿素a浓度较低,为1.60~6.24 $\mu\text{g/L}$;(2)抽水蓄能电站水库水位频繁波动致使水体垂向掺混加强,混合层增大,水体在上、下库内滞留时间减短,致使游植物生长受到抑制,水体中叶绿素a浓度降低。大幅度水体交换、冲洗造成营养物质在一定程度上被稀释;(3)天荒坪抽水蓄能电站水库处于中营养状态,各监测点富营养化指数在30~40。总氮对水体富营养化贡献最大,基准指标叶绿素a贡献反而较小。抽水蓄能电站频繁水位波动稀释了水体中的营养物质,并限制了浮游植物的生长,减轻了水库的富营养化程度。

关键词: 抽水蓄能电站; 营养状态; 水位变化; 天荒坪

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2016)06-0068-08

由于水库的“顶托”作用,致使原河道水流速度变缓、营养物质集聚,呈现湖泊状态;同时,缓慢的流速有利于泥沙等物质沉降(李崇明等,2007;郑丙辉等,2008);水体透明度增加,在适宜的光照、温度等因子的影响下就有可能出现严重的水体富营养化问题(Wang et al, 2009)。水体富营养化成为当今世界面临的重大环境问题,其具有发展快、规模大、危害重、难处理等特点,水体富营养化已经受到各国的高度重视,并成为全球性的研究课题(Ryther & Dunstan, 1997; Carpenter et al, 1998; Hudnell et al, 2010)。

目前,国内外对浅水湖泊以及三峡水库水体富营养化等问题的研究较多(金岗等,1992;Lau & Lane, 2002;秦伯强等,2006);对抽水蓄能水库水环

境问题关注极少,主要集中在20世纪90年代,而且只是部分抽水蓄能电站项目建站时对环境影响的论证(张静波和胡文修,1992;胡小冬,1995;马耶和刘东,1996)。郑磊等(1996)在广州抽水蓄能电站建站初期对水库进行了浮游植物调查,相关的富营养化综合性研究目前处于空白阶段。抽水蓄能电站作为一种特殊的发电方式在世界范围内已经得到了广泛应用(崔继纯等,2007)。由于抽水蓄能电站的自身特点,其环境问题更加引起各方关注。因此,如何保证抽水蓄能电站水库生态健康、实现生态系统服务价值及可持续发展,是关系到国计民生的大事。

本文分析了抽水蓄能电站水位波动、营养物质时空分布以及浮游植物分布特性,尝试分析抽水蓄能电站水体的营养状态及其成因,为后期控制水体富营养化提供指导。

1 材料与方法

1.1 区域概况

天荒坪抽水蓄能电站位于浙江省湖州市安吉县天荒坪镇(董红,1994)。电站上水库位于大溪左岸支沟龙潭坎的沟源洼地($30^{\circ}27'51.4'' \sim 30^{\circ}28'21.0''\text{N}$, $119^{\circ}35'52.4'' \sim 119^{\circ}35'57.9''\text{E}$);其东西两侧分别为搁天岭(高程973.48 m)和天荒坪(高

收稿日期:2015-12-23

基金项目:三峡水库浮游植物生境演变机制及水华预测预报计划研究项目(2014CB460601);科技部2014年国际科技合作与交流专项-河道型水库水华机理及防控技术合作研究(2014DFE70070);三峡大学学校资助项目-抽水蓄能电站水库水质富营养化现状及形成机制研究(2015CX012)。

作者简介:俞焰,1990年生,男,硕士研究生,研究方向为生态水力学。E-mail:719162536@qq.com

通信作者:刘德富,教授。E-mail:dfliu@189.cn

程 930.19 m)(李金荣,2001);下库坝址以上流域面积 24.2 km²,水库平均降水量 18 496 mm,多年平均径流量 2 450 万 m³,保证率 99% 枯水年的年均径流量约为 1 000 万 m³,流入下库的水量足以补偿蒸发和渗漏的水量损失源,多年平均气温 13.8℃。

天荒坪抽水蓄能电站在正常运行条件下,水库水位变化分 3 种模式。第 1 种模式:上水库夜间蓄水,水位上升;白天泄水发电,水位下降。下库与上库刚好进行相反过程,昼升夜降;第 2 种模式为夜间不蓄水,仅白天泄水;第 3 种调度模式时,上、下库的水位无变化。

1.2 样点布设

根据天荒坪水库时空及地貌特征,在上库进出水口处设置 1 个采样点,记为 S1,在下库的库首进出水口位置设 1 个采样点,记为 S2;并在下库的库中、库尾分别设置采样点,记为 S3 及 S4(图 1)。

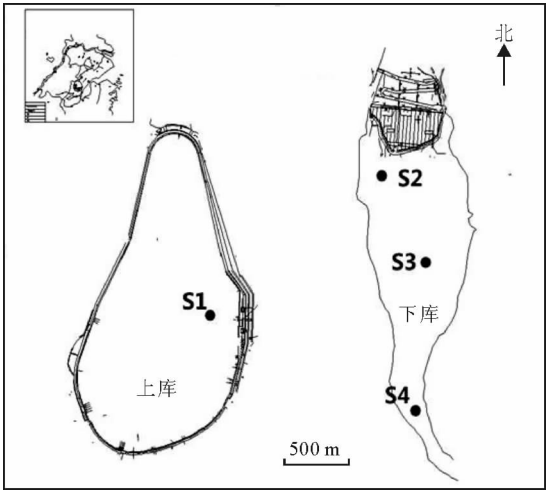


图 1 天荒坪水库采样点分布

Fig.1 Location of the sampling points in the upper and lower Tianhuangping Reservoirs

1.3 监测指标

监测指标包括水位(WL)、水温(WT)、pH 值(pH)、浊度(Trub)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)、水深(Depth)、透明度(SD)、叶绿素 a 浓度(Chl-a)、水下光合有效辐射(PAR)、水下消光系数(Ksd)、总氮(TN)、氨氮(NH₄-N)、硝氮(NO₃-N)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO₄-P)、可溶性硅酸盐(D-Si)、碱度、总硬度(Mg²⁺、Ca²⁺)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

1.4 实验分析

在各采样点用 5 L 采水器取 300 mL 表层(0.5 m)水 2 瓶,储存于洁净的聚乙烯瓶中;其中 1 瓶加酸至 pH < 2,于室内实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)与高锰酸盐浓度;另一瓶经电动抽滤机用

醋酸纤维滤膜(孔径 0.45 μm)抽滤,滤膜低温干燥,于室内采用分光光度法测定 Chl-a 浓度,抽滤的水样用于测定 D-Si 浓度。

高锰酸盐指数、叶绿素 a、总氮、总磷、可溶性磷、溶解性总氮、硝酸盐氮、氨氮(复盛,2002)根据《水和废水监测分析方法(第 4 版)》测定水;用硅钼黄分光光度法测定溶解性硅酸盐浓度;水温、pH、浊度、溶解氧、电导率、水深等参数由 YSI-EXO 便携式/在线多参数水质监测仪(美国)现场测定,水下光强用 International Light 4100 光照计(美国)测定;透明度用赛氏盘现场直接测定。

1.5 数据分析

本文营养状态评价采用郑丙辉等(2006)提出的三峡水库水体富营养化综合指数(I_E)评价法,选取叶绿素 a(Chl-a)(基准指标)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})共计 5 项指标作为营养状态评价的统一指标。

TLI(Σ) = ∑_{j=1}^m W_j × TLI(j) (1)

式中:TLI(Σ)表示综合营养状态指数;TLI(j)代表第 j 种参数的营养状态指数;W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

采用数值 0 ~ 100 对营养状态进行分级:TLI(Σ) < 30 为贫营养;30 ≤ TLI(Σ) ≤ 50 为中营养;TLI(Σ) > 50 为富营养。

水体稳定系数是评价水体垂向混合程度及水体分层状态的参数,水体稳定系数越大,水体垂向越稳定,越易形成分层水体;水体稳定系数越小,越易形成混合水体(李媛等,2012)。水体浮力频率平方值(N²,单位:s⁻²)作为水体稳定性评价指标(Lueck & Mudge, 1997;Boehrer & Schultze, 2008)。计算公式如下:

N² = (g/ρ) (dρ/dz) (2)

式中:g 为重力加速度,取 8.8092597 m/s²;ρ 为水体综合密度;z 指水深,以水体表面作为起始面,沿水深向下作为正方向。

水体密度由水温(T)对应的水体密度加上水体中的含沙量而得。由于天荒坪下水库上游有用于泥沙沉降的专用坝,本文忽略水体中泥沙对水体体积的影响。水温对应的水体密度根据 Lawson 等(2007)的公式计算:

ρ_T = 1000 [1 - (T + 288.9414) / 508929.2 (T + 68.12963) (T - 3.9863)²] (3)

混合层深度(m)取与表层水温温差 ΔT = 0.5℃

时所对应的水深;采用1%表面光强所对应的深度(m)作为真光层深度(Reinart et al, 2001;张运林等,2006)。

2 结果与分析

2.1 水动力特性

2.1.1 水位变化 从图2可知,上水库在2014年9月28日和2015年1月27日属第1种调度模式下,上库第1阶段于00:00开始,至07:00结束,由下库抽蓄水至上库,历时7 h;水位夜间由(884.69 ± 1.00) m 上升至(902.6 ± 1.00) m,变幅为17.94 m。第2阶段为上库泄水发电至下库,从07:00至23:00时,历时16 h。白天水位由(902.6 ± 1.00) m 下降至(882.54 ± 1.00) m,变幅为20.09 m,全天累

计水位变幅38.03 m,平均1.63 m/h。下库水位变化主要受上库的影响,水位变化规律与上水库相反。2015年4月23日也属于第1种调度模式,但上库泄水至14:00结束,水位变化仅为13.0 m。第1种调度模式下,上、下库日水位及流量变化较大,水体交换频繁,上、下库内水体滞留时间短;2014年11月9日属第2种调度模式,即夜间上、下水库水位无明显变化,上库水位由09:00开始下降至18:00,水位由895 m下降至883 m,变幅12 m。第2种调度模式下,日水位变化较小,水体在上库停留较长时间再泄水至下库。2014年10月9日上、下水库当日无变化;第3种调度模式下,上库水位无明显变化,下库有微弱变化,主要原因是上库无自然入流,下库水位受上游自然入库以及下游出库微弱影响。

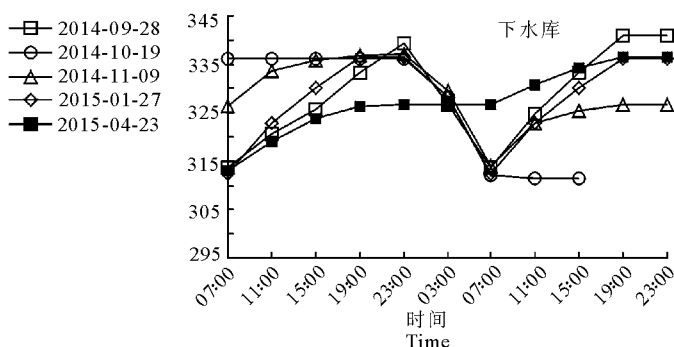
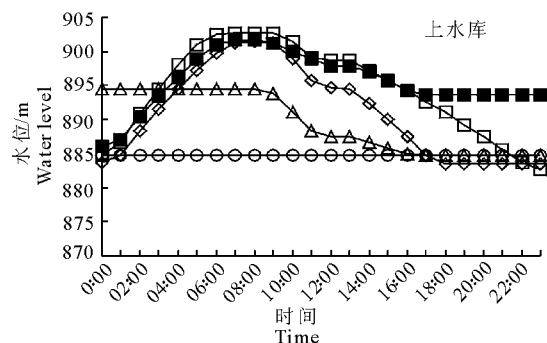


图2 抽水蓄能电站上、下水库水位变化

Fig.2 Diel variation of water level in the upper and lower Tianhuangping Reservoirs

2.1.2 水体稳定系数 一般水库出现弱水温分层时,其对应的水体稳定系数作为稳定水体与过渡水体的判定阈值。 $N^2 < 0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 时,为混合水体; $N^2 > 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 时,为分层水体; $0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2} < N^2 < 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 时,为弱分层水体(杨正健等,2012)。

抽水蓄能电站水体稳定系数分布特性如图3。可见上、下库水体稳定系数均在 $0.15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 以下,水体处于完全混合状态,垂向交换较强,未出现分层现象。上库较下库的水体稳定系数大,在下库中,S2位置水体稳定性最小,主要原因是抽、蓄水口在监测断面位置,水体扰动最剧烈。从时间上看,水库中水体稳定系数主要受上库蓄水与泄水的影响;抽水或泄水量越大,水体稳定系数越小,如2015年1月27日,水库水位变幅为20.09 m,变幅最大,其水体稳定系数最小;而2014年10月19日水库水位变化最小,其水体稳定系数最大。

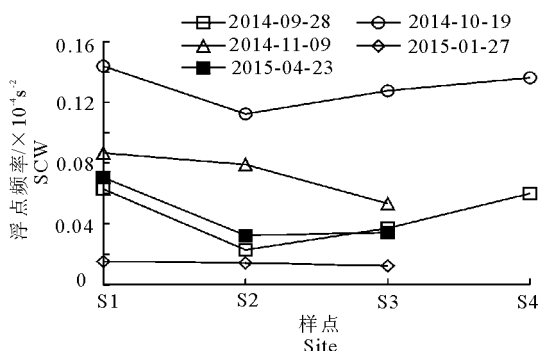


图3 抽水蓄能电站各采样点水体稳定系数变化

Fig.3 Variation of water stability coefficient in upper and lower Tianhuangping Reservoirs

2.2 营养盐分布特性

天荒坪抽水蓄能电站水库中TN含量较高,为1.80~2.80 mg/L(图4)。在空间分布上,上库总氮平均含量小于下库,下库分布规律整体为越远离进出水口总氮平均含量越低。在时间分布上,上库从2014年9月至2015年4月TN呈现不断递增的趋

势,上库无天然入流,水体营养物质易在无水质交换时沉降积累;下库 TN 含量在不同时间变化较大,2014 年 10 月略大于其他各月;S3 断面在 2014 年 10 月总氮含量出现最大值,为 2.80 mg/L。

上、下库 2014 年 10 月至 2015 年 4 月 TP 含量差异较小,为 0.01 ~ 0.03 mg/L;2014 年 9 月水库内 TP 波动较大,在 S4 断面出现最大值,为 0.08 mg/L,主要原因可能是上游自然来流对水库影响较大。溶解性硅酸盐(D-Si)各监测点含量基本保持一致,仅

在 2015 年 4 月出现差异,呈现上库大于下库,S2 断面出现最小值 3.36 mg/L。2014 年 10 月水库内 COD 明显大于其他监测时间,各断面 COD 在 2.57 ~ 3.03 mg/L;其他各月差异较小,含量在 0.72 ~ 2.12 mg/L。

2014 年 10 月,在第 3 种调度模式下,水库总氮、COD 含量稍高于其他 2 种调度模式,不同调度模式对总磷以及溶解性硅含量影响较小;较高水位变化对营养物质有一定的稀释作用。

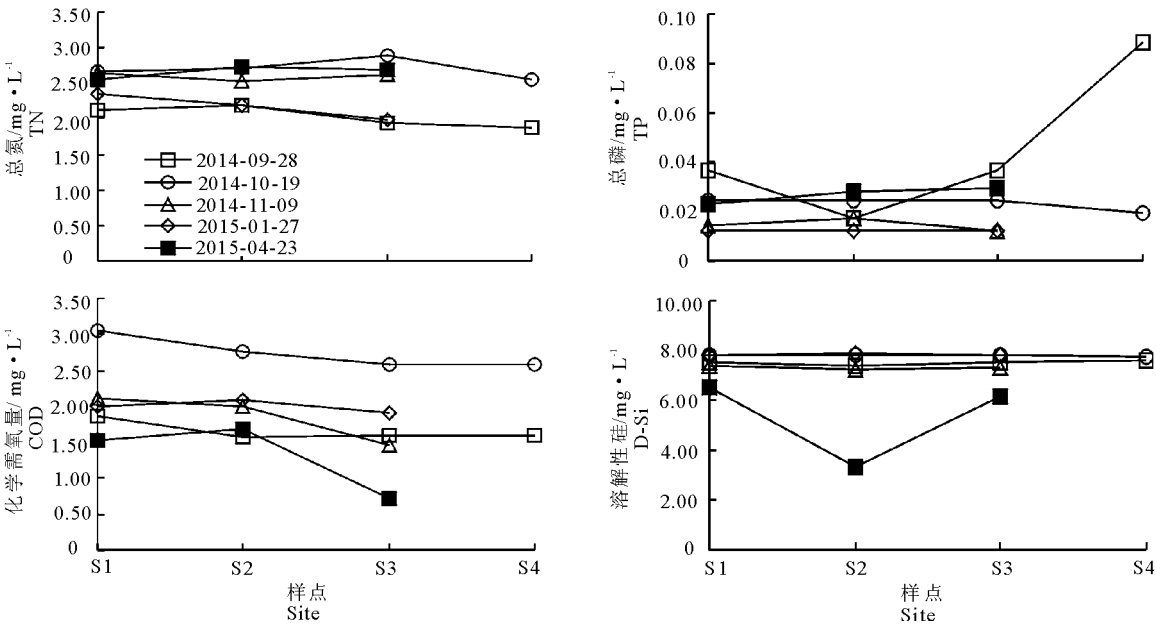


图 4 各采样点水体营养盐变化

Fig. 4 Nutrient concentrations for each date and sampling site

2.3 叶绿素 a 浓度变化与真光层和混合层的关系

水库中各点 Chl-a 变化如图 5 所示。水库中 Chl-a 浓度较低,在 1.6 ~ 6.24 μg/L;上库各时间点 Chl-a 浓度有明显差异,2015 年 4 月最大,2014 年 10 月次之;下库 S2 断面在 2015 年 4 月 Chl-a 浓度含量最高,达到 6.24 μg/L,其他各月则为各断面中最小,其不同测点时间差异较小。下库中 S3 和 S4 断面呈现越远离出水口、叶绿素 a 含量越大的趋势。整体上看,除 2015 年 4 月水库各断面 Chl-a 含量较高外(4 月水温升高,适宜藻类生长),其他时间内 Chl-a 受调度模式下的影响,水位变幅越大,其对应的 Chl-a 浓度则越小。

叶绿素 a 浓度与混合层、真光层深度关系如图 6。可见混合层(Z_{mix})深度减小,真光层(Z_{eu})深度增加,叶绿素 a 浓度随之增大。S1 在 2015 年 1 月水体混合层为最大的 24 m,相对叶绿素 a 浓度最低,为 1.63 μg/L,真光层深度则为 12 m。2015 年 4 月,S1 混合深度减小至 16 m,叶绿素 a 浓度急剧上

升,达到最大值,为 6.09 μg/L。在 2014 年 3 次监测结果中,同样可以发现 S1 中叶绿素 a 浓度与混合层有很好的对应关系。

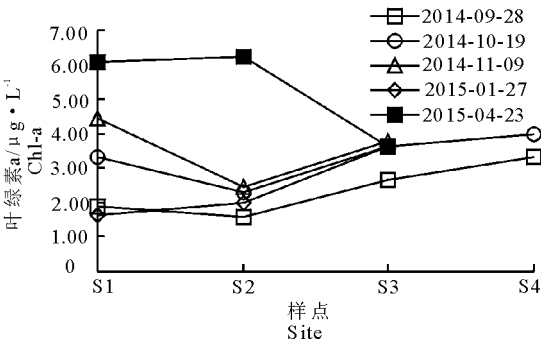


图 5 各采样点叶绿素 a 浓度变化

Fig. 5 Chlorophyll-a concentrations for each date and sampling site

S2 断面的混合层与真光层较大,且叶绿素 a 与真光层、混合层分布的规律与 S1 类似,即混合层越大,水体中叶绿素 a 浓度较小,真光层也较小。2014

年9月在样点S2测定得出叶绿素a浓度为1.60 $\mu\text{g/L}$,该月混合层深度达到32 m,而真光层仅

为17 m;2015年4月样点S2叶绿素上升至6.24 $\mu\text{g/L}$,混合层深度降至25 m。

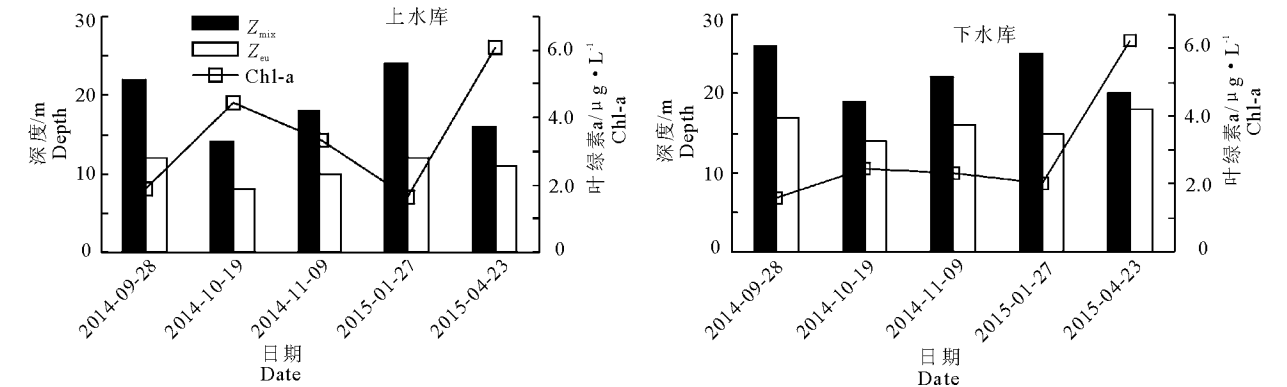


图6 上、下水库混合层、真光层与 Chl-a 变化特征

Fig.6 Variation of Chl-a concentration with depth of the mixed and euphotic layers in the upper and lower reservoirs

2.4 叶绿素 a 与各影响因子的关系

由表1可知,水库叶绿素a与水位波动幅度(ΔWL)呈现显著负相关。水位波动越大,水库中叶绿素a含量则越小;叶绿素a与TP、TN等营养物质相关性不明显,抽水蓄能电站水库中,上、下库TN和TP浓度均超过国际公认的富营养化阈值(Thomann & Mueller, 1987) ($\text{TP} = 0.02 \text{ mg/L}$, $\text{TN} = 0.2 \text{ mg/L}$);因此营养盐已不是浮游植物生长限制因子。真光层深度与叶绿素a呈现正相关,水体混和层深度与叶绿素a呈现负相关,混合层越大,叶绿素a含量则越小。混合层与水位变化相关性显著,水体垂向混合主要依靠抽蓄水时的水位变化。

2.5 水体营养特性

各断面营养状态指数分布如图7。水库整体处于中营养状态,富营养化指数在30~40,上、下库的差异小。上库2014年10~11月 I_E 指数大于其他各月,下库S2断面2014年4月 I_E 最大,S3与S4各月的 I_E 差异很小。从富营养化主要贡献量上看,总氮的贡献最大,是决定富营养程度的主要指标;叶绿素a贡献量次之(从叶绿素a角度看,3~10 $\mu\text{g/L}$

为中营养(郑丙辉等,2006);而TP、SD、COD等对富营养化贡献较小。在水位变化较大的2014年9月与2015年1月,各断面水体富营养化指数(I_E)小于水位无变化的2014年10月。

3 讨论

3.1 水位波动对水动力及营养盐的影响

水位变化是影响水库水情状况的重要因子(王旭等,2010)。天荒坪抽水蓄能电站上、下水库水位变化较大(最大水位变幅16 m),频繁的大幅水位波动对原位水体造成强大的扰动作用,水体稳定系数减小,垂向交换程度强,水体处于完全混合,无分层现象;同时,天荒坪抽水蓄能电站上、下水库最大海拔落差将近600 m,上水库泄水至下水库时,水位落差大、流速快。高流速水体对下水库具有强烈冲刷作用,致使下层水体在掺混过程中输移至上层,原集中于表层水体的各营养物质不断向下层输移,随着水体垂向掺混被均匀分布在水体中。研究发现天荒坪抽水蓄能电站水库表层水体总氮、COD受水位变化影响较大,呈现水位变化越大其浓度相对较小的

表1 上、下水库叶绿素a与各影响因子相关性

Tab.1 Correlation of Chl-a with each environmental parameter in the upper and lower reservoirs

因子	Chl-a	ΔWL	TN	TP	Z_{eu}	Z_{mix}	$Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$
Chl-a	1						
ΔWL	-0.894 *	1					
TN	-0.149	-0.073	1				
TP	-0.634	0.612	-0.089	1			
Z_{eu}	0.844 *	-0.094	-0.121	-0.565	1		
Z_{mix}	-0.105 *	0.906 **	-0.231	-0.318	0.201	1	
$Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$	0.142	0.046	-0.133	0.390	-0.240	-0.868 *	1

注: *表示在0.05水平(双侧)显著相关; **表示在0.01水平(双侧)显著相关。
Note: * indicate a significant correlation at 0.05 level (bilateral); ** indicate a highly significant correlation at 0.01 level (bilateral).

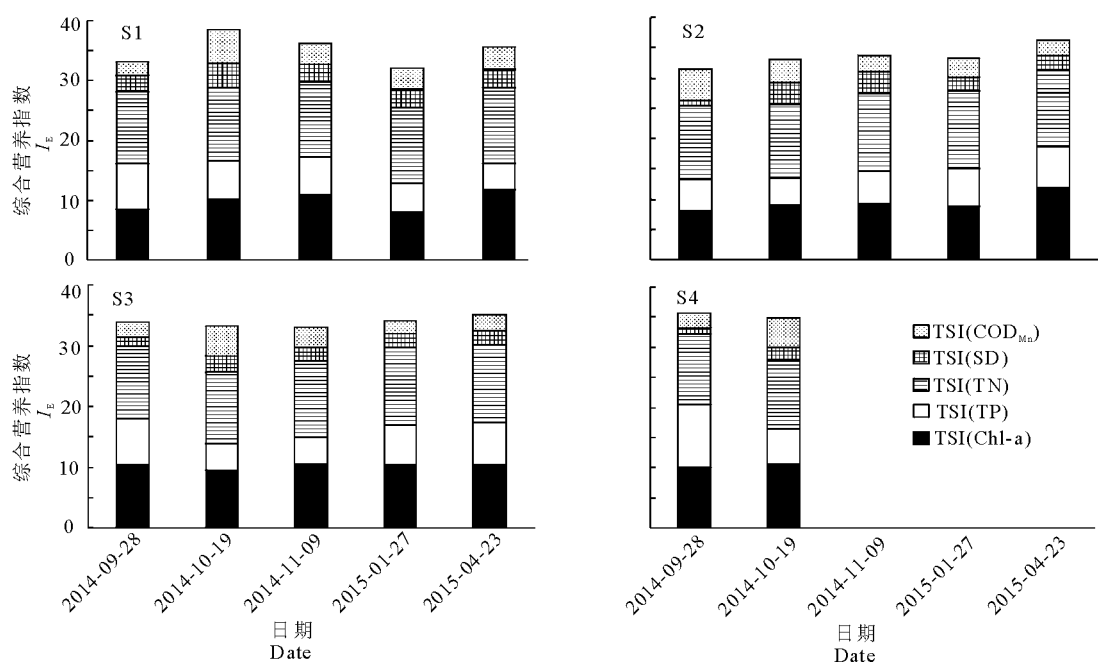


图 7 各采样点营养状态综合指数

Fig. 7 Eutrophication index at each sampling site

规律。刘洪波等(2013)研究发现,水体频繁交换致使营养物质富集程度较差;Lung(1988)认为大流量的水体频繁交换使得水体营养盐交换作用加强,对原水体中营养物质产生一定的稀释作用。

3.2 水位波动对浮游植物的影响

姜作发等(2001)认为水位变化对浮游植物初级生产力有重要影响;水位变化引起的水体垂向掺混,影响浮游藻类的组成,并抑制藻类的聚集(Estrada et al,1987);王云中等(2011)研究发现藻类聚集状态被破坏时,会明显减缓其生长。高水位的波动破坏了水体分层,水库中的物理因子发生变化,环境因子垂向分布差异减小;同时,浮游植物也因水体掺混而不断垂向迁移,致使其无法稳定停留在固定水层接受光照,吸收营养盐,其光合作用效率大大降低,叶绿素 a 浓度也因此减小。邹锐等(2012)在垂向水动力对蓝藻控制效应的研究中也证实,水体扰动越强,对叶绿素 a 的影响也越大。抽水蓄能电站高频率、高变幅的水位波动,对浮游植物生长有明显抑制作用,造成水库中叶绿素 a 浓度较低。

3.3 水位波动对富营养状态影响

营养状态综合指数(I_e)评价法以叶绿素 a 为基准指标,选取总氮、总磷、透明度、COD 为评价指标。水库水位变化对各评价指标有重要影响,以此间接影响水库营养状态。以 2014 年 9 月与 2015 年 1 月为例,水库中营养盐浓度小于其他各月,主要原因是抽蓄水时水位落差大、交换流量大;上、下库大幅度

频繁的水流运动,缩短水体停留时间,使水体内营养盐得到稀释和降解(施文超,2013),致使水库有较好的自净作用。浮游植物生长需要适宜的光照、水温、流速以及充足的营养物质等条件(孔繁翔和高光,2005)。水库频繁水位波动造成水体中营养物质被稀释;同时水体强烈扰动,浮游植物无法在稳定的水域中接受光照,光合作用减弱;抽水蓄能电站水位落差大,泄水时水的流速极大,浮游植物无法在高流速环境中生长。因此水位剧烈波动抑制了浮游植物生长,使得水体中基准指标叶绿素 a 浓度较小。综合分析水位频繁变化减弱了水体中营养物质的积累,通过限制浮游植物生长,降低了水体中叶绿素 a 浓度,最终减轻了水库水体的富营养化程度。

4 结论

- (1)天荒坪抽水蓄能电站水库总氮含量较高(1.8~2.8 mg/L),已达到 V 类水标准(GB-2012)。水库抽蓄时水位频繁波动,水体稳定性减弱,大幅度水体交换造成营养物质在一定程度上被稀释。
- (2)天荒坪抽水蓄能电站水库处于中营养状态,总氮对水体富营养化贡献最大,基准指标叶绿素 a 贡献反而较小。频繁的水位波动造成水库中水体垂向掺混加强,混合层增大,水体在上、下库内滞留时间短,致使水库有较好的自净作用。水位频繁变化限制了浮游植物生长,降低了叶绿素 a 浓度,在一定程度上减轻了水库的富营养化程度。

参考文献

- 崔继连, 刘殿海, 梁维列, 等, 2007. 抽水蓄能电站经济环保效益分析[J]. 中国电力, 40(1): 5-10.
- 董红, 1994. 天荒坪抽水蓄能电站工程概述[J]. 水力发电, (4): 9-10.
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]: 北京: 中国环境科学出版社.
- 胡小冬, 1995. 广州抽水蓄能电站水库生态调查与水质初析[J]. 人民珠江, (4): 39-42.
- 姜作发, 夏重志, 2001. 哈蟆通水库水位变化对浮游植物初级生产力及能量转化效率的影响[J]. 中国水产科学, 8(4): 23-26.
- 金岗, 王振堂, 1992. 环境生态学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 孔繁翔, 高光, 2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 25(3): 589-595.
- 李崇明, 黄真理, 张晟, 等, 2007. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境, 16(1): 1-6.
- 李金荣, 2001. 天荒坪抽水蓄能电站上水库设计[J]. 水力发电, (6): 22-24.
- 李媛, 刘德富, 孔松, 等, 2012. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析[J]. 环境科学学报, 32(8): 1882-1893.
- 刘洪波, 朱梦羚, 王精志, 等, 2013. 水库水动力对水体富营养化影响[J]. 水资源与水工程学报, 24(2): 19-21.
- 马耶, 刘东, 1996. 波兰最大的赞诺威克抽水蓄能电站[J]. 水利水电快报, 17(20): 12-15.
- 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等, 2006. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 51(16): 1857-1866.
- 施文超, 2013. 湖泊富营养化治理[A]. 第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集[C].
- 王旭, 肖伟华, 朱维耀, 等, 2012. 洞庭湖水位变化对水质影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 10(5): 59-62.
- 王云中, 杨成建, 陈兴都, 等, 2011. 不同水动力条件对景观水体富营养化模拟过程中藻类演替的影响[J]. 环境监测管理与技术, (2): 23-27.
- 杨正健, 刘德富, 马骏, 等, 2012. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J]. 武汉大学学报: 工学版, 45(1): 1-9.
- 张静波, 胡文修, 1992. 抽水蓄能电站的特殊环境影响[J]. 东北水利水电, (9): 29-31.
- 张运林, 秦伯强, 胡维平, 等, 2006. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 36(3): 287-296.
- 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等, 2008. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 29(1): 1-6.
- 郑丙辉, 张远, 富国, 等, 2006. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 26(6): 1022-1030.
- 郑磊, 杞桑, 1996. 广州抽水蓄能电站蓄水库蓄水初期浮游生物调查[J]. 生态科学, 15(1): 15-21.
- 中华人民共和国水利部, 2002. 地表水环境质量标准[S].
- 邹锐, 周璟, 孙永健, 等, 2012. 垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究[J]. 环境科学, 33(5): 1540-1549.
- Boehrer B, Schultze M, 2008. Stratification of lakes[J]. Reviews of Geophysics, 46(2): 1-28.
- Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al, 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 8(3): 559-568.
- Estrada M, Alcaraz M, Marrase C, 1987. Effects of turbulence on the composition of phytoplankton assemblages in marine microcosms[J]. Mar Ecol Prog Ser, 38: 267-281.
- Hudnell H K, 2010. The state of US freshwater harmful algal blooms assessments, policy and legislation[J]. Toxicon, 55(5): 1024-1034.
- Lau S, Lane S, 2002. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study[J]. Science of the Total Environment, 288(3): 167-181.
- Lawson R, Anderson M A, 2007. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake[J]. Water Research, 41(19): 4457-4467.
- Lueck R G, Mudge T D, 1997. Topographically induced mixing around a shallow seamount[J]. Science, 276: 1831-1833.
- Lung W S, Paerl H W, 1988. Modeling blue-green algal blooms in the lower Neuse River[J]. Water Research, 22(7): 895-905.
- Reinart A, Arst H, Erm A, et al, 2001. Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake Ülemiste[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 6(1): 75-84.
- Ryther J H, Dunstan W M, 1971. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment[J]. Science, 171: 1008-1013.
- Thomann R V, Mueller J A, 1987. Principles of surface water quality modeling and control[M]: Harper & Row, Publishers.
- Wang Y, Shen Z, Niu J, et al, 2009. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions[J]. Journal of Hazardous Materials, 162(1): 92-98.

Effect of Water Level Fluctuation on Eutrophication in
Tianhuangping Pumped Storage Reservoir

YU Yan¹, YANG Zheng-jian^{2,3}, ZHANG Jia-lei^{2,3}, LIU De-fu^{1,2,3}, GONG Dan-dan¹

- (1. Water Resources and Environment College of Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;
2. Resource and Environmental Engineering of Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P. R. China;
3. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of Rivers and Lakes
and Algae Use, Wuhan 430068, P. R. China)

Abstract: Pumped storage technology has been well developed in China since the sixties, but the water environment of pumped storage reservoirs has drawn little attention. Here, we present a case study on the relationship of water level fluctuation to spatial and temporal distribution of nutrients and phytoplankton in the Tianhuangping pumped storage reservoir. The goals were to assess the trophic state and causative factors in the pumped storage reservoirs and provide theoretical guidance for water quality management. Tianhuangping pumped storage station is located in Anji County, Huzhou City, Zhejiang Province. Under normal operation, there are three patterns of water regulation at Tianhuangping: (1) water storage in the upper reservoir at night with rising water levels and power generation during the day with falling water levels; (2) no water storage at night and power generation during the day; (3) no water level fluctuation between the upper and lower reservoirs. Water monitoring was carried out at four sampling sites in the Tianhuangping reservoirs (S1 in the upper reservoir and S2 – S4 in the lower reservoir) on four dates; September 28 (pattern 1 water regulation), October 9 (pattern 3) and November 9 (pattern 2) of 2014, January 27 (Pattern 1) and April 23 (Pattern 1) of 2015. Parameters measured included diel water level fluctuation in the upper and lower reservoirs, water stability, COD_{Mn}, Secchi depth, nutrients (TN, TP), and chlorophyll-a (Chl-a). The influence of reservoir water level fluctuation on water stability, nutrients and Chl-a was analyzed. Results show the following: (1) Water stability in the Tianhuangping reservoirs is low, with the floating point frequency at all sampling stations $<0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$. The concentrations of TN and D-Si were high; TN concentrations ranged from 1.8 to 2.8 mg/L, meeting only the Class V water standard, and D-Si concentrations ranged from 3.30 to 8.00 mg/L. Chl-a concentration was low, ranging from 1.6 to 6.24 $\mu\text{g/L}$. (2) Frequent fluctuation of the water level strengthens vertical mixing, increases the mixed water layer depth and shortens water residence time. Intensive water exchange and flushing dilute nutrient concentrations, limiting the growth of phytoplankton and reducing Chl-a. (3) The water in Tianhuangping reservoirs is mesotrophic, with the eutrophication index ranging from 30 to 40 at all sampling stations. TN has the greatest influence on eutrophication with a smaller contribution from Chl-a. Frequent fluctuation of the reservoir water level flushes the nutrients, inhibits phytoplankton growth, and reduces the degree of eutrophication in the reservoirs.

Key words: pumped storage station; eutrophication; water level change; Tianhuangping