

三峡水库近坝段水面漂浮物对水质的影响*

张馨月¹, 高千红¹, 闫金波¹, 纪道斌², 罗玉红^{2**}

(1: 长江水利委员会长江三峡水文水资源勘测局, 宜昌 443000)

(2: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 每年汛期与蓄水期三峡水库近坝段水域会有大量漂浮物聚集, 为探索三峡水库近坝段水域(坝前及以上约 12.7 km 长的河段)水面漂浮物对水质的影响, 2018 年开展了漂浮物覆盖水体水质跟踪监测和漂浮物浸泡试验, 并以 2014—2018 年的漂浮物产量和近坝段水域水质监测数据为基础进行了相关分析与回归分析。结果表明: 漂浮物会提高坝前覆盖水体的氮类营养盐水平和有机污染物浓度, 引起河湾漂浮物覆盖水域氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度升高, 致使氮类营养盐组成的变化和由于高锰酸盐指数/总有机碳比值($\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$)的差异变化对水体产生有机污染。除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 外, 坝前水域受漂浮物影响程度大于河湾区域, 漂浮物对河湾水质的影响在蓄水期更为明显, 漂浮物覆盖水体垂直方向上 2 m 内水质因子无明显分层现象; 相比综合类漂浮物, 植物类漂浮物对水质的影响更迅速和明显; 漂浮物仅在其覆盖的水体小范围内对氮类营养盐指标造成影响, 漂浮物产量的增加会增大近坝段水域水体悬浮物、有机污染物和还原性无机物质(COD_{Mn})浓度, 形成一定的影响规律。因此, 合理布置清漂作业点, 高效及时地开展漂浮物清理工作, 短期内优先打捞植物类漂浮物, 合理实施水库调度以减少漂浮物聚集量与缩短滞留时长, 加强漂浮物影响水体的水质监测对近坝区河段水环境保护意义重大。

关键词: 水质; 水面漂浮物; 浸泡试验; 三峡水库; 近坝段

Water quality affected by floating debris near the dam section of Three Gorges Reservoir*

ZHANG Xinyue¹, GAO Qianhong¹, YAN Jinbo¹, JI Daobin² & LUO Yuhong^{2**}

(1: Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, P.R.China)

(2: School of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

Abstract: During the flood season and impoundment period, there will be a large amount of floating debris gathering in the water area near the dam of the Three Gorges Reservoir. In order to explore the influence of water surface floating debris on the water quality near the dam section of the Three Gorges Reservoir (about 12.7 km long before and after the dam), floating immersion test and water quality monitoring of floating body covered water were carried out in 2018. Correlation analysis and regression analysis were used to analyze both the drift production of 2014–2018 and the water quality monitoring data of the near dam section. The results showed that the floating debris increased the concentration of nitrogen nutrient salts and organic pollutants in front of the dam, and led to the increase of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in the bay area resulting in the change of nitrogen nutrients composition and organic pollutants pollution due to the difference of $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ ratio. In addition to $\text{NH}_3\text{-N}$, the influence of floating debris on the water quality in front of the dam was greater than that in the bay area. For the bay area, this influence became more obvious during the impoundment period. There was no obvious stratification of water quality factors within 2 m in the vertical direction of the water body covered by floating debris. Comparing to the comprehensive floating debris, the effect of plant floating debris on water quality was more rapid and obvious. The floating debris only affected the nitrogen nutrient index within a small range of water covered by it. The increase of floating debris production led to the concentration increase of suspended matter, organic pollutants and reducing inorganic substances (COD_{Mn}) in the water near the dam, forming a certain influence law. Therefore, it is of great significance for

* 2019-08-07 收稿; 2019-12-25 收修改稿。

三峡集团有限公司三峡库区水面漂浮物监测项目资助。

** 通信作者; E-mail: luoyuhong@ctgu.edu.cn.

water environment protection to arrange the floating debris cleaning operation points reasonably, to carry out floating debris cleaning efficiently and timely, to give priority to the salvage of plant floating debris in a short period time, to implement reservoir scheduling reasonably in order to slow down the accumulation and retention time of floating debris, to enhance the monitoring about the impact of floating debris on water quality near the dam.

Keywords: Water quality; floating debris; floating immersion test; Three Gorges Reservoir; near the dam section

三峡工程自 2003 年蓄水运行后,受库区雨洪影响,每年汛期(5—8 月)都会出现大量的水面漂浮物聚集;蓄水期(9—10 月)随着库区水位的抬升也会产生大量水面漂浮物。水面漂浮物的大量聚集,对城市景观、船舶航行安全、河道防洪、水环境等均有不同程度的影响^[1],三峡工程漂浮物问题也引起了社会各界的关注^[2-4]。

三峡水库的漂浮物主要分为 3 类:一是农作物秸秆、地表植被、水生生物;二是工业及生活垃圾;三是意外事故类漂浮物^[2]。漂浮物一般集中在汛期和蓄水期,一般情况下入库流量为 25000~40000 m³/s 时,漂浮物开始逐步增多,当流量大于 40000 m³/s 时,漂浮物骤增^[2]。坝前漂浮物的分布及其运移规律与坝区河势、水流流态、库水位、流量及三峡电站的调度方式等因素有关,坝区漂浮物滞留量呈“右多左少”的分布态势^[5]。漂浮物运移规律及治理研究已取得了一定的成果^[5-6],漂浮物对水质影响的研究却很少。郑雯等在天津市海河漂浮物现状调查中指出:如不将生活垃圾及时打捞将会加重海河水体的有机污染^[7],在三峡库区尚未见漂浮物对水质影响的相关报道。

本研究以三峡库区近坝段(坝前及以上约 12.7 km 长的河段)水域水体为研究对象,分析了汛期与蓄水期漂浮物对水质的影响规律,并对 2014—2018 年漂浮物打捞量与近坝段水域水质参数进行相关性分析和回归分析,结合漂浮物浸泡试验,初步探讨了水面漂浮物对水质的影响机制。

1 主要研究方法

1.1 研究河段概况

研究河段上起庙河水文断面(湖北省秭归县兰陵村),下至三峡大坝,河段全长约 12.7 km;河道左右两岸为山体,河势稳定。三峡水库蓄水后,该河段处于三峡水库常年回水区,每年汛期和蓄水期有大量漂浮物滞留于坝前、机组和河湾处,对该河段的水环境产生了一定的影响。

1.2 样点设置

本研究分别在漂浮物常聚地坝前和河湾漂浮物覆盖水体设置了 3 个采样点,分别为 S1(坝前 1 号机组)、S2(坝前地下电站)和 S3(银杏沱河湾),在采样点上游 100 m 无漂浮物水体处分别设置坝前对照断面和河湾对照断面(图 1)。

1.3 样品采集

样品采集按汛期和蓄水期分别进行,2018 年汛期 7 月 12 日、17 日、22 日以及 8 月 11 日(此间长江上游 1 号、2 号洪水通过三峡水库,入库流量达 60000 m³/s 以上,坝前水位在 145~160 m 左右)在漂浮物覆盖采样点 S1、S3 采样 4 次。蓄水期 10 月 19 日、25 日、31 日分别在漂浮物覆盖采样点 S1、S2、S3 采样 3 次。采样点垂直线上设置 3 个水样测点(水面下 0.5、1.0、2.0 m);对照断面分别在左岸、中泓、右岸取水水面下 0.5 m 采集水样;庙河断面作为常规监测断面,每月上旬采样 1 次,全年采样 12 次。采样方法按照《环境监测规范》(SL219—2013)。每次采样对现场漂浮物组成进行调查记录。

1.4 漂浮物浸泡试验设计

天然状态下,漂浮物的组成极其复杂,调查发现,汛期与蓄水期均以植物类漂浮物为主,蓄水期尤为显著。为便于研究,将近坝段漂浮物大体分为树兜、秸秆等植物类天然漂浮物和白色泡沫、塑料等人为垃圾两大类,为探究天然漂浮物组成情况下和漂浮物主要成分植物类漂浮物对水体水质的影响,试验选用 2 个 400 L 的塑料桶作为反应器,一个桶用于随机打捞银杏沱河湾处漂浮物,主要为树枝草渣、秸秆及生活垃圾、塑料、白色泡沫等天然情况下聚集的综合类漂浮物;另一个桶放入树枝杂草、秸秆、树杆、树兜、竹子、浮萍等植物类漂浮物。漂浮物浸泡试验在银杏沱河湾 S3 采样点附近水文趸船进行,浸泡物湿重均为 25 kg,取 250 L 未受漂浮物影响的长江水样浸泡 15 天(反应池漂浮物密度为 0.1 t/m³),浸泡试验于 2018 年 10 月 19

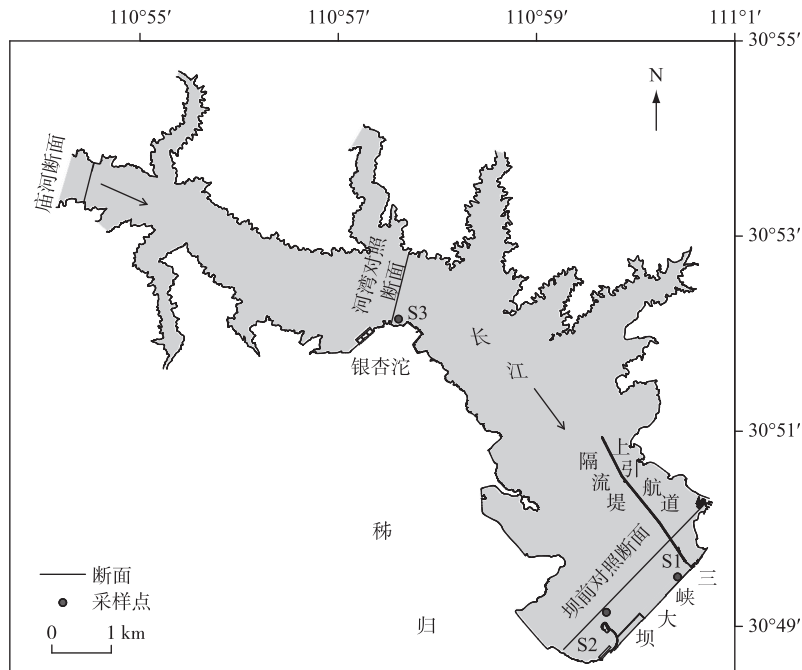


图1 三峡水库近坝段采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites near the dam section of Three Gorges Reservoir

日开始,与蓄水期漂浮物水质监测同步进行,并于第0、2、4、6、8、12、15天采集反应器中水样。

1.5 监测指标及方法

漂浮物覆盖下样点监测指标包括溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总有机碳(TOC);庙河断面监测指标包括水温(WT)、pH、电导率(EC)、DO、TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、悬浮物(SS)、五日生化需氧量(BOD_5)、氯化物(Cl^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、氟化物(F^-)、总硬度(T-Hard)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、石油类有机污染物(POP)、粪大肠菌群(fecal coliforms, FC)、流量(Q)、断面平均流速(V)共计19项。其中现场测定参数(水温、pH值、电导率、DO)采用便携式水质分析仪HQ40d(美国)测定(图2),总有机碳浓度采用总碳总氮分析仪mutil N/C 3100(德国)测定(HJ 501—2009),悬浮物浓度采用重量法测定(GB/T 11901—1989),其余指标测定参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。流量、断面平均流速数据摘自庙河水文站整编数据。总漂浮物产量及其分布数据基于三峡水库清漂监理部《三峡水库水面漂浮物监测及清漂监理工作总结》(2014—2018年)^[8]及《2018年三峡水库水面漂浮物监测情况》1—12月月报并结合现场调查统计得到。

1.6 数据统计分析

以垂线水深为因子,水质因子为因变量,采用单因素方差分析识别不同水深水质状况的空间差异;采用Pearson相关分析,初步分析漂浮物产量与水环境因子之间变化的相关程度;在Pearson相关分析的基础上挑选出相关性显著的水质指标与漂浮物产量、水文因子进行逐步多元回归分析。为消除自变量量纲不一样的影响,在回归分析前对自变量按式(1)进行标准化处理:

$$\text{标准化数据} = (\text{原数据} - \text{均值}) / \text{标准差} \quad (1)$$

为确保样本得到的回归方程能更真实地反映总体间的统计关系,对回归方程进行残差分析,采用正态曲线直方图和标准化残差的正态概率图(P-P图)进行残差的正态性检验;采用DW(Durbin-Watson)检验样本序列是否存在自相关,排除伪回归可能;采用方差膨胀因子(VIF)进行自变量间的多重共线性判断^[9]。一般认为,DW越接近2越好,Durbin-Watson总结了DW统计量的下临界值dL和上临界值dU,如果 $dU \leq d \leq$



图2 现场采样与监测

Fig.2 In-site sampling and monitoring

4-dU,说明原序列不存在自相关^[9],通过样本容量 N 和自变量个数 k 以及显著性水平(文中显著水平设为 $\alpha=0.05$),可在 DW 统计量临界值表中查得临界值以确定各回归模型的无自相关范围; VIF 越大,多重共线性越强,当 $VIF \geq 10$ 时,说明存在严重的多重共线性,一般认为 $VIF < 5$ 则自变量间不存在多重共线性. 以上所有检验均在 SPSS 上完成计算. 当 DW 检验不通过时,本文选用差分法对所有因变量和自变量进行一阶差分(式(2)和(3))作为新变量再进行回归分析,重新计算 DW 值,然后进行检验.

$$\Delta x_{ij} = x_{ij} - x_{i(j-1)} \quad (2)$$

$$\Delta y_j = y_j - y_{j-1} \quad (3)$$

式中, Δx_{ij} 为第 i 个自变量在点 j 的一阶差分值, Δy_j 为因变量在点 j 的一阶差分值, $i = 1, 2, \dots, k; j = 2, 3, \dots, n$.

随着清漂工作的日趋完善,漂浮物打捞量可以很直观的反映进入水体的绝大部分漂浮物,本文把漂浮物打捞量近似于漂浮物产量,选取 2014—2018 年每年 6—11 月(2016 年为 5—11 月数据)近坝段水面漂浮物(秭归和坝前区域的总和,湿重以 t 计)打捞量数据进行统计分析. 漂浮物时期划分按 6—9 月为汛期,10—11 月为蓄水期,12—次年 5 月为消落期. 上述所有分析均在 IBM SPSS Statistics 19.0 和 Origin 8.0 软件中进行.

2 结果与分析

2.1 近坝段水面漂浮物总量及其分布特征

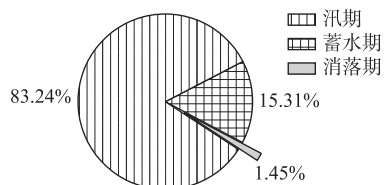


图3 2018年不同时期近坝段水面漂浮物总量分布

Fig.3 Distribution of total floating debris near the dam section in different periods of 2018

2018 年近坝段水面漂浮物总量为 49303 t,其中坝前 42251 t,秭归 7052 t. 汛期漂浮物产量 41041 t,占总量的 83.24%,蓄水期为 7547 t,占总量的 15.31%,消落期为 715 t,占总量的 1.45% (图 3).

汛期漂浮物以农作物茎秆、树木根茎、杂草为主,白色泡沫、塑料等生活垃圾次之;蓄水期漂浮物中树枝渣草、农作物等自然垃圾占绝对优势,有少量水生植物,白色泡沫、塑料等生活垃圾占比远小于汛期. 汛期与蓄水期均以植物类等自然漂浮物为主,据三峡水库清漂监理部人员多年调查估算汛期植物类漂浮物占比约为 65%,蓄水期占比约为 85%. 汛期漂浮物主要集中在坝前,河湾处较少,而蓄水期漂浮物主要集中在坝前右岸电站和河湾及港区船舶内档.

2.2 水面漂浮物影响下近坝段水质特征

2.2.1 不同时期漂浮物影响下水质特征 2018 年汛期与蓄水期,近坝段漂浮物影响下样点水质特征如表 1 所示. 可以看出汛期水体的营养盐指标中坝前 S1 样点 TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较对照断面都出现了增长,TN 浓度较对照断面增长率为 3.5%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度增长率为 9.5%. S3 样点河湾处 TN 浓度变化不大,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较对照断面出现升高,其增长率高达 20.3%. 样点 S1 的 TP 浓度略高于对照断面,S3 样点处未表现明显变化差异. 漂浮物覆盖下水体坝前氮类营养盐浓度高于河湾;坝前 S1 样点 TOC、 COD_{Mn} 浓度比对照断面高,TOC 浓度增长率为 9.5%, COD_{Mn} 增长率为 6.8%,S1 样点漂浮物覆盖水体的 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ 比值小于对照断面. S3 样点河湾处 TOC 浓度较对照断面升高,增长率不如 S1 样点明显,仅为 1.2%,而 COD_{Mn} 浓度却出现下降, $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ 比值小于对照断面.

蓄水期 TN 浓度在 S1、S2 样点均高于对照断面,较对照断面增长率均为 5.62%,而 S3 样点 TN 浓度却比对照断面有所下降,下降率为 7.2%. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度坝前点与对照断面差别不大,但在 S3 样点河湾处 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度相比对照断面明显升高,增长率为 25.0%. TP 浓度总体变化不大,S2 样点略高于对照,S3 样点与对照无明显差异;坝前 TOC 浓度较对照断面增大,S1 样点增长率为 13.3%,S2 样点增长率为 6.2%. 相比对照断面,S3 样点处 TOC 浓度却出现下降,下降率为 7.2%. 坝前和河湾样点 COD_{Mn} 均略有所升高,但不明显,坝前样点 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ 比值小于对照断面,而河湾 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ 比值大于对照断面.

综合来看,除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度外,坝前(S1、S2 样点)漂浮物覆盖水体各项指标较对照断面变化率要高于河湾漂浮物覆盖水体(S3 样点),而河湾处水质指标的变化以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的升高最为明显,TN 浓度在河湾处却出现较明显的下降,且相比对照断面,河湾处蓄水期漂浮物覆盖水体水质指标较汛期变化率大. 坝前与河湾处均未监测到明显的 TP 浓度变化.

表 1 不同时期近坝段样点水质因子特征(均值±标准差)
Tab.1 Characteristics of water quality factors of sampling sites near the dam section
in different periods (mean ± standard deviation)

时期	样点	水质因子/(mg/L)				
		TP	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD_{Mn}	TOC
汛期	S1	0.16±0.00	2.35±0.03	0.231±0.09	3.60±0.90	3.88±0.47
	坝前对照	0.15±0.01	2.27±0.10	0.215±0.09	3.37±1.10	3.54±0.56
	S3	0.15±0.01	2.29±0.05	0.154±0.00	3.66±0.50	3.98±0.21
	河湾对照	0.15±0.01	2.30±0.09	0.128±0.01	3.85±0.70	3.94±0.07
蓄水期	S1	0.09±0.01	1.88±0.16	0.080±0.02	1.93±0.06	2.92±1.38
	S2	0.09±0.01	1.88±0.16	0.083±0.02	1.99±0.05	2.73±0.07
	坝前对照	0.08±0.00	1.78±0.16	0.084±0.01	1.92±0.05	2.57±0.16
	S3	0.09±0.01	1.62±0.09	0.095±0.02	1.92±0.03	2.74±0.10
	河湾对照	0.09±0.01	1.75±0.02	0.076±0.01	1.89±0.01	2.96±0.11

2.2.2 漂浮物覆盖下水体水质因子垂向特征 分别对汛期与蓄水期坝前和银杏沱河湾处 0.5、1.0、2.0 m 垂直方向上各采样点水质因子进行单因素方差检验,结果显示坝前和银杏沱河湾处 0.5、1.0、2.0 m 垂直方向上各水质因子均不存在统计学意义的差异($P>0.05$),说明漂浮物覆盖水体垂直方向上 2 m 内水质因子并未出现明显分层的现象,垂向扩散均匀.

2.3 漂浮物浸泡试验主要水质指标变化特征

2.3.1 漂浮物浸泡过程中水体 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化 漂浮物浸泡过程中水体 TP 浓度均呈现上升的变化趋势,其中植物类反应器中水体前 2 天迅速上升,随后缓慢上升,在试验结束时,TP 浓度约为初始值的 37 倍,综合类反应器中水体 TP 浓度增长较植物类缓慢,试验结束时约为初始值的 12 倍(图 4).

综合类和植物类反应器中水体的 TN 浓度变化趋势类似,短时间内下降后再波动抬升,第 8 天达到较高值后下降,至试验结束时有所回升. 两个反应器水体 TN 浓度差别不大,植物类反应器水体略高于综合类反

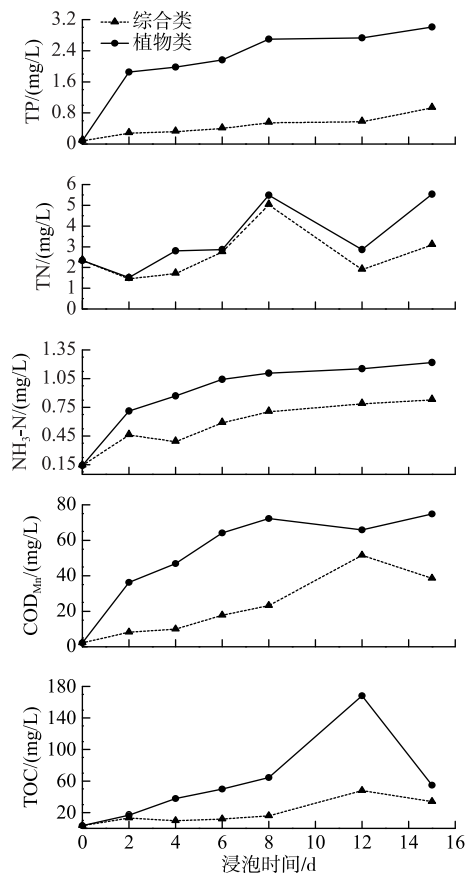


图4 漂浮物浸泡过程中水体TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}和TOC浓度的动态变化

Fig.4 Dynamics of TP, TN, NH₃-N, COD_{Mn} and TOC concentrations in water during the immersion period of floating debris

应器水体,但在实验结束时,两者差别增大.

水体NH₃-N浓度均呈现缓慢上升的趋势,植物类反应器水体中NH₃-N浓度高于综合类反应器水体. 试验结束时,植物类反应器水体NH₃-N浓度约为初始值的8倍,综合类反应器水体NH₃-N浓度约为初始值的6倍.

植物类反应器水体的COD_{Mn}高于综合类反应器水体(图4),且植物类前期增长率远高于综合类反应器水体,试验结束时达到最高,综合类反应器水体COD_{Mn}在第12天达到最高值后开始下降.

植物类和综合类反应器水体的TOC浓度变化趋势接近,均在第12天达到最大值,植物类反应器水体中TOC浓度在中后期远高于综合类反应器水体,随后陡降.

2.4 漂浮物产量与水环境因子的关系

2.4.1 漂浮物产量与水环境因子的相关性分析 近坝段水面漂浮物打捞量与庙河断面常规监测的19项水环境因子的Pearson相关系数矩阵如表2所示,其中漂浮物产量与流量、流速、悬浮物、COD_{Mn}均呈极显著正相关,与石油类呈显著正相关,与pH、总硬度均呈负相关. 漂浮物产量与氮、磷等营养盐浓度并未表现出直接的相关性.

2.4.2 漂浮物产量与水质因子的多元回归分析 为进一步揭示在水文因子(流量、流速等)的影响下,漂浮物产量对水质因子的影响是否显著,在相关性分析的基础上,挑选出与漂浮物产量呈极显著相关($P<0.01$)的水质因子,与漂浮物产量、水文因子建立多元回归方程,其中水质因子作为因变量,漂浮物产量、水文因子(流量和流速)作为自变量.

漂浮物产量、流量、流速与水质因子的逐步多元回归分析结果如表3所示,通过自变量标准化的回归系数可以看出,相比水文因素(流量和流速),漂浮物产量与COD_{Mn}呈极显著正相关性. 悬浮物(SS)受流量和漂浮物产量影响显著,且流量对悬浮物的影响略大于漂浮物对其的影响.

表2 漂浮物产量与水环境因子的Pearson相关系数矩阵($n=31$)¹⁾

Tab.2 Pearson correlation coefficients matrix between floating debris yield and water environmental factors

	漂浮物产量	流量	流速	pH	悬浮物	总硬度	石油类	COD _{Mn}
漂浮物产量	1							
流量	0.688 **	1						
流速	0.680 **	0.914 **	1					
pH	-0.397 *	-0.375 *	-0.428 *	1				
悬浮物	0.707 **	0.712 **	0.687 **	-0.281	1			
总硬度	-0.309 *	-0.110	0.012	-0.098	-0.300	1		
石油类	0.396 *	0.211	0.239	-0.424 *	0.141	-0.266	1	
COD _{Mn}	0.689 **	0.639 **	0.627 **	-0.382 *	0.903 **	-0.253	0.081	1

1) 仅列举与漂浮物产量显著相关的因子; ** 表示极显著相关($P<0.01$, 双尾检验) * 表示显著相关($P<0.05$, 双尾检验);数值加粗表示相关系数绝对值 ≥ 0.600 的因子.

表 3 逐步多元回归分析结果¹⁾
Tab.3 Stepwise multiple regression analysis

因变量	模型摘要		Durbin-Watson		逐步回归筛选 的自变量	自变量标准化 回归系数
	相关系数 <i>R</i>	调整 <i>R</i> ²	<i>DW</i> 值	无相关范围		
SS	0.772	0.596	2.058	1.570~2.430	流量	0.429 *
					漂浮物产量	0.412 *
COD _{Mn}	0.746	0.540	2.467	1.489~2.511	漂浮物产量	0.746 **

1) COD_{Mn} 分析结果为对因变量 COD_{Mn} 和自变量漂浮物产量、流量和流速分别进行一阶差分后再回归的结果; ** 表示极显著相关($P<0.01$, 双尾检验), * 表示显著相关($P<0.05$, 双尾检验).

3 讨论

3.1 汛期及蓄水期漂浮物对水质的影响

2018 年 7 月上旬,长江流域上游持续强降水,“长江 1 号洪峰”、“长江 2 号洪峰”接踵而至,大量的漂浮物随洪水而来,导致 2018 年汛期近坝段水面漂浮物骤增,且长时间滞留. 监测结果表明,漂浮物对坝前覆盖水体的影响主要表现为氮类营养盐和有机污染物浓度的升高,漂浮物对河湾处水体的影响主要表现在 NH₃-N 浓度升高而 TN 浓度变化不大或下降的氮类营养盐组成的变化,以及有机污染指标 COD_{Mn}/TOC 比值差异. 漂浮物对近坝段水质的时空影响主要表现为坝前大于河湾,坝前水域汛期与蓄水期均受到不同程度的影响,河湾蓄水期受漂浮物的影响要大于汛期. 漂浮物覆盖水体水质的时空变化规律与漂浮物的产量时空分布有着相同的趋势,坝前为漂浮物主要聚集的地方,虽然汛期漂浮物产量要大于蓄水期,但是 2018 年由于连续洪水致使漂浮物骤增,部分来不及清理的漂浮物最长滞留时间高达 80 多天,加大了对蓄水期坝前水域水质的影响,因此汛期和蓄水期坝前受漂浮物的影响均较明显,而在蓄水期河湾处漂浮物要多过汛期,对河湾处水质的影响也增大.

监测数据显示,在漂浮物大量聚集的坝前 TN 浓度两个时期均出现了增长,汛期 NH₃-N 浓度也出现了增长,而在聚集量相对小于坝前的河湾营养盐水平提高主要表现为 NH₃-N 浓度的增长,在蓄水期 TN 浓度却出现下降. 三峡水库水体 TN 以无机氮为主^[11],而长江水体无机氮化合物常以硝态氮为主^[12],在河湾处 NH₃-N 浓度大幅增长的情况下,汛期 TN 浓度变化不大,蓄水期 TN 浓度却出现下降,推测是由于漂浮物覆盖水体从而硝态氮浓度存在下降现象所致. 硝态氮在水体可以通过自养和细菌转化为有机物,反硝化作用使得硝态氮浓度降低^[13],由于河湾处水流速度较坝前缓慢,推测在漂浮物覆盖的影响下水体出现了反硝化现象,有研究表明溶解氧浓度会影响水体氨氮与硝态氮之间的转化^[14],实际监测数据也显示河湾处溶解氧浓度较坝前低,加之蓄水期高水位的河湾水体可能处于相对强的还原环境,进一步促使了河湾水体反硝化现象的发生,以致河湾处 NH₃-N 浓度的增长较坝前更明显,且蓄水期河湾 TN 浓度明显降低. 同时水生植物的分解过程中,硝态氮通过微生物异化作用均可转化为 NH₃-N^[15],漂浮物中植物类的分解以及微生物的异化作用使得水体出现 TN 浓度变化不大或下降,但 NH₃-N 浓度却明显上升的现象. 另外浸泡试验结果表明,漂浮物在水体的浸泡过程,其滞留时长也会导致水体 TN 浓度的波动. 有学者认为在氮素的各种形态中,还原态氨氮的相对增加直接反映了水体营养水平的提高^[16],NH₃-N 浓度的升高表明水体近期受到污染^[17],说明在漂浮物聚集时期,其覆盖区域水体受到了营养盐类的污染.

TOC 浓度常用于评价水体中有机污染物程度,COD_{Mn}反映了有机污染物和还原性无机物质污染程度^[18]. 此次监测数据显示,坝前样点 TOC 与 COD_{Mn}漂浮物水下样点浓度高于对照断面,表明漂浮物对水体造成了一定有机污染和还原性无机物质污染. 河湾处 COD_{Mn}/TOC 比值在汛期低于对照断面,蓄水期大于对照断面,表明汛期漂浮物释放了更多难于被高锰酸盐氧化的有机污染物,而在蓄水期漂浮物覆盖水体有机物更易被氧化剂氧化且含有较多的无机还原性物质,这也进一步验证了蓄水期的河湾还原环境增强,水体反硝化作用增强致使 TN 浓度下降的推论.

3.2 漂浮物对水质的影响机制分析

通过分析植物类和综合类两种水面漂浮物浸泡过程对水质的影响发现,在 15 天的监测期内,综合类与

植物类反应器中水体水质指标有着较一致的变化趋势,随着浸泡时间的增加,水体无机和有机污染都会加重,有机污染物在达到一定值后会下降,其中纯植物类漂浮物对水质的危害更迅速和明显。数据显示, TN 浓度在两个反应器中均表现为短期先下降再上升,在第 12 天 TOC 浓度达到了最大值,而 TN 浓度却又降到一个较低值。推测在浸泡之初,植物类漂浮物对水体 TN 的吸收作用,以及生活垃圾等其他漂浮物的物理吸附作用大于植物腐烂分解作用,导致了 TN 浓度的第一次下降,随着腐烂分解作用的加快, TN 又逐步释放出来,在第 12 天,反应器中溶解氧都处于一个极低值,水体在缺氧的状态下出现了反硝化作用, TN 浓度再次下降,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为有机物分解从有机氮转换成无机氮的第一产物而积累^[19],以致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度持续上升。大多学者认为,水生植物腐烂分解包括可溶性有机物的浸出、微生物对有机物的降解、难溶性物质的缓慢分解 3 个过程^[20-21], TOC 浓度在第 12 天后急剧下降,但水中 COD_{Mn} 浓度仍维持在较高的水平,其原因可能是反应池中植物的腐烂分解已进入第 2 过程,有机物被微生物降解为无机物的过程,厌氧微生物对有机物的降解作用^[22-23],使得 TOC 下降,而水体仍含有较多的无机还原性污染物质。有研究表明植物残体腐烂分解会影响营养物质的循环、积累以及重新释放过程^[24],天然情况下,水体漂浮物浸泡过程对水体的影响极其复杂,由于天然河流是流动的,水体不断循环自净,而试验水体环境是静止的,污染浓度会明显扩大,但以现场实际漂浮物组成情况为原型的综合类漂浮物试验结果仍可作为水体漂浮物对水质影响因素的定性参考,对植物类漂浮物(漂浮物的主要组成部分)对水质的影响规律也有了初步的探索。研究表明,水生植物生长过程中对水体氮、磷以及有机物有较强的富集和去除作用^[25-26],而植物残体腐烂分解亦会形成二次污染^[27],在短期内植物类漂浮物比白色泡沫、塑料等生活垃圾对水质影响更大,因此建议在短期内优先打捞植物类漂浮物,以减少植物类漂浮物浸泡时长,避免植物残体腐烂造成的二次污染。

通过分析漂浮物产量与近坝段水环境因子的相互关系发现,近坝段水域漂浮物产量与 DO、电导率(EC)等理化指标以及氮、磷等营养盐指标并未表现出直接的相关性,而在漂浮物覆盖水体的跟踪监测数据显示水体受到营养盐类的污染,且漂浮物浸泡试验也验证了这一结果,说明漂浮物仅在其覆盖的小范围水体对氮类等营养盐指标造成影响,然而对于整个近坝段区域来说,水质状况可能受到很多因素的影响,漂浮物产量与营养盐之间的关系并不明确,这也需要在下一步研究中优化监测样点和监测频次。但对近坝段区域近 5 年数据的回归分析显示水面漂浮物聚集增加会加大水体 SS、 COD_{Mn} 浓度,与近坝段水体已经形成了一定的规律性影响。

4 结论与展望

1) 2018 年近坝段水面漂浮物总量为 49303 t,其中坝前 42251 t,秭归 7052 t。汛期漂浮物产量为 41041 t,占总量的 83.24%,蓄水期为 7547 t,占总量的 15.31%。汛期与蓄水期均以植物类等自然漂浮物为主,蓄水期自然垃圾占绝对优势,白色泡沫、塑料等生活垃圾占比少于汛期。

2) 漂浮物对坝前覆盖水域的影响主要表现为氮类营养盐和有机污染物浓度的提高,对河湾覆盖水域的影响表现为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高、氮类营养盐组成的变化和有机物污染指标 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TOC}$ 比值的差异。且除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 外,坝前水域受漂浮物影响程度要大于河湾区域,漂浮物对河湾水质的影响在蓄水期更为明显;漂浮物覆盖水体垂直方向上 2 m 内水质因子无明显分层的现象。

3) 漂浮物浸泡试验发现,在 15 天的监测期内,纯植物类漂浮物对水质的影响更迅速和明显,综合类和植物类漂浮物随着浸泡时间的增加,水体营养盐和有机污染均会加重,且影响氮类营养盐的积累与释放过程,有机污染物在达到一定值后会下降。

4) 相关性分析与回归分析表明,漂浮物仅在其覆盖的水体小范围内对氮类营养盐指标造成影响,对于整个近坝段区域漂浮物产量与营养盐之间的关系尚不明确,但漂浮物产量的增加会增大水体悬浮物以及有机污染物和还原性无机物质污染(COD_{Mn}) 浓度,形成了一定规律性影响。

因此,我们建议在漂浮物形成聚集过程中,及时开展漂浮物打捞工作,合理布置清漂作业点,减小漂浮物聚集量与滞留时长,避免植物残体腐烂造成的二次污染,加强漂浮物影响水体水质跟踪监测。此外,由于流量、流速等水文因子对漂浮物产量及运移、水质因子有着重要的影响,如何结合水库调度减轻或缓解漂浮物骤增与长时间聚集造成的水质影响,如何进一步有针对地进行水质监测,量化漂浮物对水质的影响对近

坝段水质保护意义重大,值得进一步思考与研究.

致谢:对三峡水库清漂监理部工作人员在现场采样以及资料收集过程中给予的帮助表示感谢!

5 参考文献

- [1] Cai Y, Tang XF, Jiang WX. Summary of treatment measures for floating debris in river course. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, **30**(8): 84-89. [蔡莹,唐祥甫,蒋文秀.河道漂浮物对工程影响及研究现状.长江科学院院报,2013, **30**(8): 84-89.]
- [2] Feng ZP. Preliminary study on the floating debris in the Three Gorges Reservoir. *Water Power*, 2003, **12**: 27-28. [冯正鹏.三峡水库漂浮物问题研究初探.水力发电,2003, **12**: 27-28.]
- [3] Sun EY, Yang WJ. Study on the problem of floating pollution and its treatment in the Three Gorges Project. *Water Power*, 2000, **4**: 12-15. [孙尔雨,杨文俊.三峡工程漂污问题及其治理研究.水力发电,2000, **4**: 12-15.]
- [4] Chen HL. Investigation and control measures of floating debris in the Three Gorges Project. *Yangtze River*, 2007, **38**(5): 7-8. [陈鸿丽.三峡工程漂浮物调查及治理措施.人民长江,2007, **38**(5): 7-8.]
- [5] Li XH, Yang W, Wen FQ. Tentative study on drifting property of drifters and its solving measures in dam area of Three Gorges Project. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2000, **17**(1): 5-8. [李学海,杨伟,文发清.三峡工程坝区漂污运移规律及治理措施初步研究.长江科学院院报,2000, **17**(1): 5-8.]
- [6] Cai Y, Li ZH, Li L *et al.* Exploration on comprehensive management of floating matters in river-type reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, **27**(12): 31-35. [蔡莹,李章浩,李利等.河道型水库漂浮物综合治理措施探究.长江科学院院报,2010, **27**(12): 31-35.]
- [7] Zheng W, Han ZM, Zhao ZS. A study on the current situation of floating debris in Haihe River of Tianjin and the Counter-measures. *Environmental Sanitation Engineering*, 2001, **9**(2): 123-126. [郑雯,韩志梅,赵藏闪.天津市海河漂浮物现状调查与治理对策研究.环境卫生工程,2001, **9**(2): 123-126.]
- [8] Floating cleaning of Three Gorges Reservoir supervision department ed. Summary of the monitoring and cleaning of floating debris in Three Gorges Reservoir. Yichang: Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, 2014-2018. [三峡水库清漂监理部.三峡水库水面漂浮物监测及清漂监理工作总结.宜昌:长江三峡水文水资源勘测局,2014-2018.]
- [9] Li YG, Du HW, Huang YS *et al.* eds. SPSS 19.0 introduction and improvement of statistical analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 183-185. [李玉光,杜宏巍,黄永生等.SPSS 19.0 统计分析入门与提高.北京:清华大学出版社,2014: 183-185.]
- [10] Tao J, Zhang XQ, Tao JQ *et al.* The checking and removing of autocorrelation in climatic time series. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **19**(1): 47-52. [陶杰,张雪芹,陶建强等.气候变化趋势分析中自相关的检验与去除.应用气象学报,2008, **19**(1): 47-52.]
- [11] Zhang S, Liu JH, Zhang QN *et al.* Distribution feature of nitrogen and phosphorus in incipient Three Gorges Reservoir. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(4): 123-126. [张晟,刘景红,张全宁等.三峡水库成库初期氮、磷分布特征.水土保持,2005, **19**(4): 123-126.]
- [12] Liu RQ. Preliminary report on physico-chemical properties of main channel and tributaries in upper and middle reaches of the Chang Jiang river, before and after damming of the Three Gorges Project. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(5): 446-450. [刘瑞秋.三峡大坝截流前后长江中上游江段水化学特性的初步调查.水生生物学报,2000, **24**(5): 446-450.]
- [13] Seitzinger SP. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4): 702-724.
- [14] Li WH, Chen YX, Sun JP. Influence of different dissolved oxygen (DO) amounts on released pollutants from sediment to overlying water. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(2): 170-173. [李文红,陈英旭,孙建平.不同溶解氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究.农业环境科学学报,2003, **22**(2): 170-173.]
- [15] Zeng HA, Wu JL. Characteristics and mechanisms of water environmental changes in the lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(6): 834-841. [曾海鳌,吴敬禄.长江中下游不同营养水平湖泊水体环境变化特征及机制.水科学进展,2007, **18**(6): 834-841.]

- [16] Quriós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes. *Limnetia*, 2003, **22** (1/2): 37-50.
- [17] Zhai M, Yue XT, Song AQ. A research on hygienic status of rural drinking water. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2006, **23**(1): 64-65. [翟敏, 岳喜同, 宋爱芹. 济宁市农村生活饮用水卫生状况调查. 环境与职业医学, 2006, **23**(1): 64-65.]
- [18] Editorial board of “monitoring and analysis methods of water and wastewater”, Ministry of Environmental Protection of the People’s Republic of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] Zhang XP. Chemical characteristics of inorganic nitrogen in Maluan Bay, Xiamen. *Jouranal of Ocenography in Taiwan Strait*, 2001, **20**(3): 319-322. [张晓萍. 厦门马銮湾水域无机氮的化学特征. 台湾海峡, 2001, **20**(3): 319-322.]
- [20] Best EPH, Dassen JHA, Boon JJ *et al.* Studies on decomposition of *Ceratophyllum demersum* litter under laboratory and field conditions: Losses of dry mass and nutrients, qualitative changes in organic compounds and consequences for ambient water and sediments. *Hydrobiologia*, 1990, **194**: 91-114.
- [21] Gu JJ, Jin ZH, Liu ZY. Experimental studies on decomposition process of submerged macrophytes from Wuliangshuai lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(4): 181-184. [顾久君, 金朝晖, 刘振英. 乌梁素海沉水植物腐烂分解试验研究. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(4): 181-184.]
- [22] Liu, QY, Xie J, Zhou YH *et al.* Study of microbial degradation of toxic organic compounds in fermentation treatment of municipal sludge. *China Environmental Science*, 1995, **15**(3): 215-218. [刘庆余, 谢君, 周颖辉等. 城市污泥发酵处理中微生物对有机物的降解. 中国环境科学, 1995, **15**(3): 215-218.]
- [23] Wen L. The properties and complexation with metals of dissolved organic matter from macrophyte decomposition in lake Baiyangdian [Dissertation]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. [闻丽. 白洋淀植物腐解 DOM 特性及其与重金属相互作用的研究[学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2014.]
- [24] Cheesman A, Turner B, Inglett P *et al.* Phosphorus tansformations during decomposition of wetland macrophytes. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(24): 9265-9271.
- [25] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia*, 1990, **200**(1): 367-377.
- [26] Li HX. Study on phytoremediation and reclamation of heavy metal and organic contamination in dredged sewage river sediment [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2005. [李红霞. 河道底泥中重金属和有机物的植物去除及资源化[学位论文]. 天津: 天津大学, 2005.]
- [27] Yang QX. Ecological functions of aquatic vegetation in east Taihu Lake and its reasonable regulation. *J Lake Sci*, 1998, **10** (1): 67-72. DOI: 10.18307/1998.0111. [杨清心. 东太湖水生植被的生态功能及调节机制. 湖泊科学, 1998, **10** (1): 67-72.]