



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202304116

中图分类号 X824

文献标识码 A

卓海华, 兰秀薇, 娄保锋, 等. 乌江汇入对三峡水库局部水体中磷质量浓度的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3497-3504. [ZHUO Haihua, LAN Xiuwei, LOU Baofeng, et al. The impact of inflow of Wujiang River on phosphorus concentrations of local reach of the mainstream of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3497-3504.]

乌江汇入对三峡水库局部水体中磷质量浓度的影响

卓海华¹, 兰秀薇², 娄保锋¹, 杨霞³, 吴云丽¹, 徐杰¹, 兰静^{1,✉}

1. 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010; 2. 长江水利委员会, 武汉, 430010; 3. 中国长江三峡集团公司, 宜昌 443000

摘要 乌江水体中总磷与三峡水库相关水域存在差异。通过对相关水体中磷质量浓度变化特征的分析, 结果表明: 2008 年前乌江 TP 显著低于三峡水库相关水域, 其汇入对后者主要表现为“稀释”作用, 可使清溪场断面 TP 年均值最大降低约 0.02 mg·L⁻¹; 2009 年后乌江 TP 急剧升高, 其汇入后清溪场断面 2009—2013 年 TP 年均值最大升高约 0.057 mg·L⁻¹; 2014 年后乌江汇入基本不会使清溪场断面 TP 年均值明显改变; 1998—2006 年乌江 TDP 与三峡水库相关水域相近, 乌江汇入对清溪场断面 TDP 年均值基本无影响; 之后乌江 TDP 快速上升, 2007—2013 年乌江汇入最大可使清溪场断面 TDP 年均值升高约 0.061 mg·L⁻¹; 2014 年后乌江 TDP 大幅回落, 其对水库影响降低, 最大可使清溪场断面 TDP 年均值升高约 0.008 mg·L⁻¹; 乌江汇入对三峡水库局部水体磷质量浓度的影响在不同时段其程度、趋势均不一致; 乌江干流水电建设导致的水文条件变化和乌江上游区域磷矿开发过程中含磷废水排放使得乌江水体中磷质量浓度发生改变, 进而间接、持续对三峡水库局部水体中磷质量浓度产生影响。该研究结果可为三峡水库的水生态环境监管提供参考。

关键词 乌江; 总磷; 溶解态总磷; 输入; 三峡水库; 影响

三峡水库是国家重要的战略淡水资源库, 也是重要的生态环境敏感区^[1]。随着三峡工程建设的深入推进, 长江三峡相关河段由天然河道演变成河道型水库, 其水文情势随之发生重大改变, 这也使得库区水环境质量各要素出现不同程度变化。为此, 针对三峡水库在水文泥沙特征、水环境变化、营养盐分布、污染物输移转化、水生生物种群及密度等方面已有大量研究^[2-18]。磷是水生物生长的必要元素和水体富营养化的控制性元素, 其作为三峡水库水环境质量主要控制性指标也被重点关注^[19-31]。现有研究较好地阐释了三峡成库前后水库水环境状况及演化趋势, 但却鲜有河流汇入对三峡水库水环境质量影响方面的研究。

三峡水库范围主要有嘉陵江、乌江、小江、大宁河、香溪河等几十条河流汇入, 其中以嘉陵江和乌江年径流量较大, 其余相对较小^[32]。乌江武隆断面多年平均径流量约为清溪场断面的 13%^[33]。乌江常出现总磷严重超标现象^[34-35]。不同于其他入库河流, 乌江径流量较大且水体中总磷频繁、严重出现超标, 其对三峡水库相关水域水质的影响不能忽略。有学者对乌江入库磷通量进行了估算^[36-40], 也有学者研究了局部时段乌江汇入对长江干流磷质量浓度的影响^[17, 41-42], 但缺少定量分析, 这对于进一步描述乌江汇入对三峡库区的影响程度及特征仍存在不足。不同于通量核算, 磷的质量浓度是开展水质评价和水环境质量考核的基础^[43]。因此, 从质量浓度角度系统分析乌江磷输入对三峡水库局部水体水质的影响有一定意义。

三峡水库在蓄水后的调度运行会对库区干、支流水文情势产生明显影响, 进而影响以水、沙为输运载体的磷循环过程。鉴于乌江流量较大、乌江与所汇入水体中磷质量浓度长期存在明显差异以及总磷是三峡水库

收稿日期: 2023-04-25; 录用日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金资助项目 (U2240213); 三峡水库水质分析合同项目 (0711596)。

第一作者: 卓海华 (1978—), 男, 硕士, 正高级工程师, zhuohaihua@cjjg.mee.gov.cn; ✉通信作者: 兰静 (1982—), 女, 硕士, 副高级工程师, 22630948@qq.com

水环境质量主要控制因子,本研究利用长江流域水环境监测中心 1998—2019 年系列的监测成果,系统分析乌江汇入对三峡水库局部水域的影响程度及变化趋势,同时进行主要原因剖析,以期能为三峡水库水生态环境监管提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究范围

选取寸滩断面作为对照断面,清溪场断面作为控制断面,武隆断面作为乌江磷输入参照断面开展研究。在监测过程中,监测断面位置始终保持一致。寸滩断面位于重庆市主城区靠下游位置,清溪场断面位于长江干流乌江汇入口下游约 12 km,武隆断面位于重庆市武隆取区。3 个断面间河道无大的河流汇入。水质采样按照《水环境监测规范》(SL 219) 要求,根据河道特征在每个断面设置 2~3 条垂线、每条垂线设置 2~3 个采样点,利用车载深水采样器分层采集水样。监测频次为每月 1 次。断面位置示意图见图 1。总磷(total phosphorus, TP, 测定原样)和溶解态总磷(total dissolved phosphate, TDP, 原样经 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后测定)采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893-1989) 测定。悬浮物采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB/T 11901-1989) 测定。颗粒态总磷(total phosphorus of particles, TPP) 为 TP 与 TDP 差值。



图 1 监测断面位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring section locations

1.2 数据处理

统计分析时,各断面数据取各测点均值。数据经过检查、剔除异常值等处理后,采用 Microsoft Office Excel 2019 进行整理和分析。水质因子间相关性采用 SPSS 19 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 总体变化

选取三峡水库寸滩、清溪场和乌江武隆 3 个断面 1998—2019 年总磷 (TP)、溶解态磷 (TDP) 按月监测成果进行统计分析 (图 2)。三峡库区寸滩、清溪场断面和乌江武隆断面 TP 年均值 1998—2002 年呈明显下降趋势,其中寸滩和清溪场 TP 年均值从约 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,乌江武隆断面 TP 年均值则从 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。自 2002 年开始,寸滩和清溪场断面 TP 年均值逐步升高,至 2004 年分别升高至 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 2004—2012 年,寸滩断面 TP 年均值为 $0.20\sim 0.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,清溪场断面 TP 年均值为 $0.23\sim 0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 自 2012 年后,这 2 个断面 TP 年均值均呈下降趋势。乌江武隆断面 TP 年均值在 2002—2008 年间呈波动上升趋势,但 2009—2010 年突然出现较大增幅,TP 年均值从 2008 年的 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 2010 年的 $0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 这一质量浓度值在 2010—2012 年间为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近小幅波动下降,2012—2019 年总体呈持续下降态势,且 2012—2014 年间降幅显著。

TP 变化可明显分成不同特征的 3 个阶段。
1) 1998—2008 年,乌江武隆断面 TP 年均值显著低于三峡库区寸滩和清溪场断面,仅为后者的 1/2 左右,且本阶段寸滩和清溪场断面 TP 年均值存在交叉;
2) 2009—2013 年,乌江武隆断面 TP 年均值大幅升高,与三峡库区寸滩、清溪场断面 TP 年均值发生逆转,最高达到后者的近 2 倍;这一阶段清溪场断面 TP 年均值均高于寸滩断面,且大部分年份差异较为明显;
3) 2014—2019 年,武隆、寸

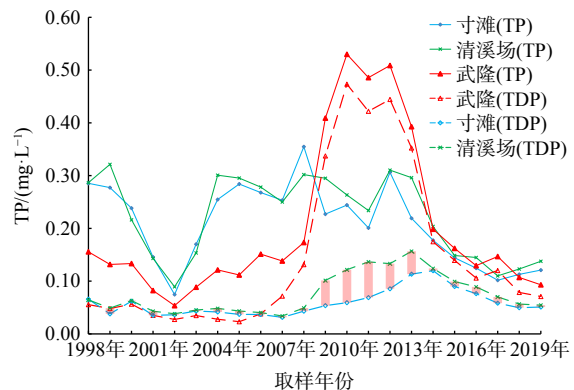


图 2 水体磷质量浓度变化趋势

Fig. 2 Trend of the change of phosphorus concentrations in water

滩、清溪场断面 TP 年均值趋近，且均呈波动下降趋势；本阶段清溪场断面 TP 年均值仍高于寸滩断面，但两种差异总体上较上一阶段收窄；武隆断面 TP 年均值与寸滩、清溪场断面相差不大且均存在交叉。

TDP 与 TP 年均值变化趋势存在一定程度的不一致。在 2006 年前，乌江武隆断面 TDP 年均值与寸滩、清溪场断面 TDP 年均值相近。2007 年后武隆断面 TDP 年均值快速上升，从不到 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 迅速上升至 2010 年的 $0.473 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；2010—2012 年间其质量浓度在存在小幅波动，而在 2013—2014 年出现大幅降低，至 2014 年已降至 $0.175 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；2014 年后武隆断面 TDP 年均值波动下降但降幅趋缓。自 2007 年开始，乌江武隆断面 TDP 年均值始终高于寸滩和清溪场断面，尤其是 2009—2013 年间。1998—2006 年间，寸滩断面与清溪场断面 TDP 年均值在 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近小幅波动，两者无明显差异 ($p>0.05$)；在 2007 年后，寸滩断面 TDP 年均值稳步升高，从略高于 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，同期清溪场断面 TDP 年均值也呈升高趋势，但增幅显著高于寸滩断面，从 $0.034 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 2013 年最高点 $0.157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，较寸滩断面 TDP 年均值平均高约 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (最大升高近 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，直至 2014 年回落至略高于寸滩的 $0.124 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2014—2019 年，寸滩和清溪场断面 TDP 年均值均缓慢回落至略高于 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，且自 2008 年后清溪场断面 TDP 年均值均高于寸滩断面。由上可知，若不考虑水体自净、沿程小支流以及点面源污染物汇入等因素，乌江汇入对三峡水库局部水体中磷质量浓度已产生影响。

2.2 时间特征

为进一步探讨乌江汇入对三峡水库局部水体磷质量浓度产生的年际/年内影响程度，结合前文分析，分阶段统计各断面 TP 和 TDP 特征值和相关性、武隆与清溪场断面水体磷质量浓度差值 (λ) 及理想状况下 (仅考虑断面流量) 乌江汇入导致清溪场断面水体磷质量浓度变化值 (δ)，具体见图 3 和图 4。

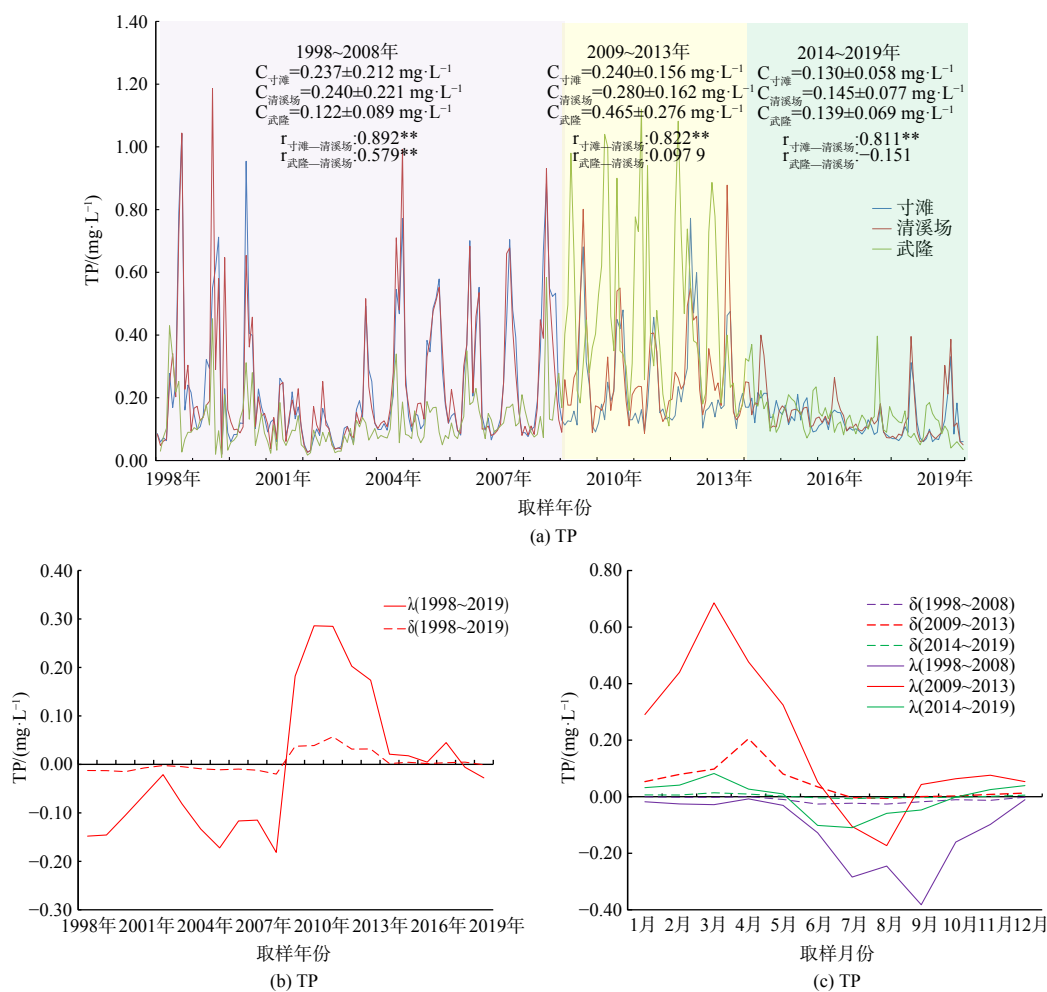


图 3 水体 TP 变化分析

Fig. 3 Analysis of TP concentration change in water

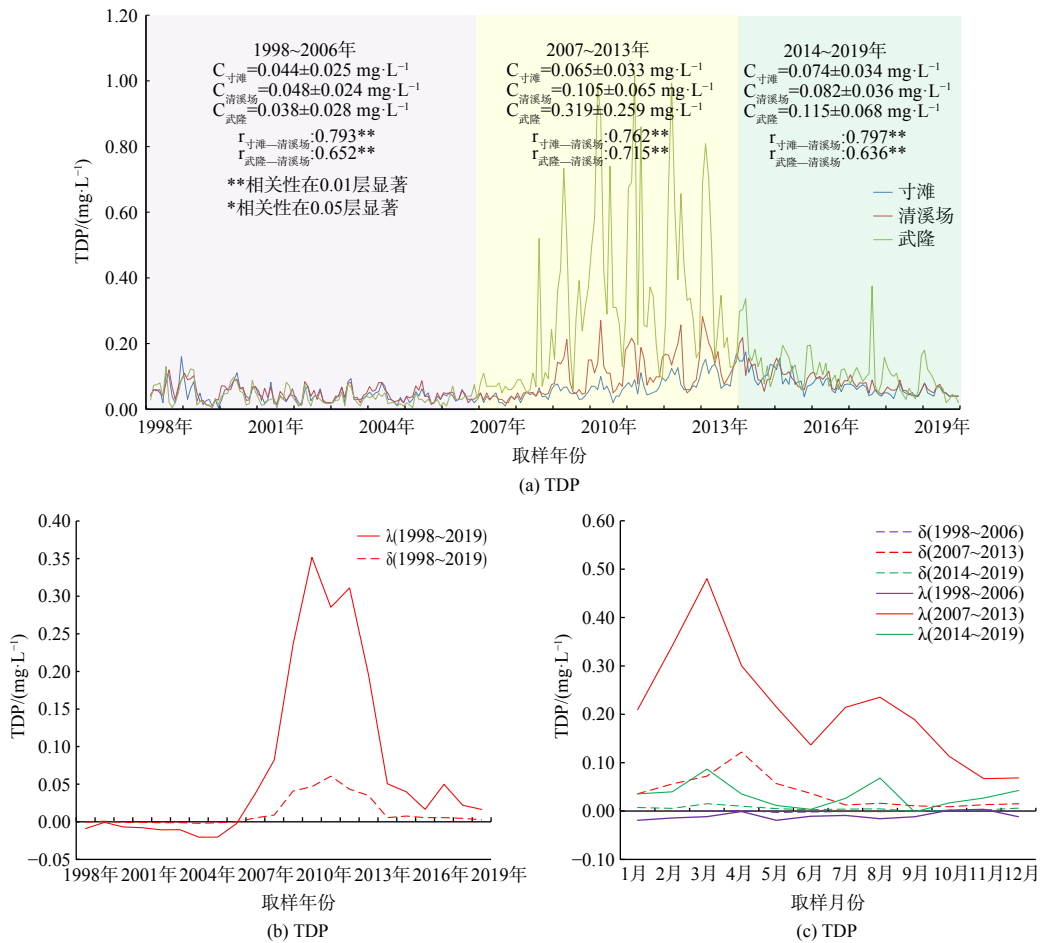


图 4 水体 TDP 变化分析

Fig. 4 Analysis of TDP concentration change in water

由图 3 (a) 和图 3 (b) 可见, 各时段寸滩和清溪场断面间 TP 相关性较好, 而武隆与清溪场断面间这种相关性较低或无显著相关性。1998—2014 年间, 寸滩和清溪场断面 TP 随水期变化特征较为明显, 即丰水期^[7] (6—9 月) TP 较枯水期 (1—3 月, 12 月) 和平水期 (4—5 月、10—11 月) 高。乌江相对较复杂, 1998—2008 年间 TP 峰值主要出现在丰水期; 2009—2013 年 TP 通常在 3—5 月和 6—9 月均会出现质量浓度峰值, 且前者往往更高, 这将对清溪场断面 TP 变化产生影响。武隆断面 TP 均值在 1998—2008 年显著低于寸滩和清溪场断面, 若仅考虑水量因素, 乌江汇入对水库局部水体 TP 将以“稀释”为主, 可使清溪场断面 TP 年均值最大降低约 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 2009—2013 年乌江 TP 显著高于库内相关断面, 乌江汇入在这期间可使清溪场断面 TP 年均值最大升高约 $0.057 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2014—2019 年, 武隆、寸滩和清溪场等 3 个断面 TP 相差变小且水期特征均显著降低, 这期间乌江汇入可使清溪场断面 TP 年均值最大变化不超过 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可基本认为乌江汇入长江干流无显著影响。

另外, 两者年内变化趋势的不一致也导致不同阶段乌江汇入对三峡水库局部水体总磷质量浓度的影响也不完全相同, 具体见图 3 (c)。在 1998—2008 年, 武隆断面 TP 月均值总体上显著低于库内清溪场断面, 乌江汇入对水库局部水体总磷主要表现为“稀释”作用, 这种作用在 8 月份达到最大值, 可使清溪场断面 TP 月均值下降约 $0.026 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 2009—2013 年, 因武隆断面 TP 月均值在 7—8 月低于清溪场断面, 其余月份则高于清溪场断面, 尤其是 3—4 月; 在这一阶段, 7—8 月其对水库中 TP 仍表现为“稀释”作用, 但这种作用影响相对较小; 而在其他月份, 乌江汇入会使库内相关水域 TP 月均值上升, 最大可使清溪场断面 TP 月均值升高约 $0.205 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (4 月)。2014—2019 年与前一阶段相似, 但武隆断面与清溪场断面 TP 月均值最大差值为 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 考虑到乌江平均汇入流量仅略高于清溪场断面 1/10, 乌江汇入对清溪场断面 TP 月均值影

响总体较小，变化将不超过 $0.014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

溶解态磷 (TDP) 是水体磷循环的重要组成部分，溶解态无机磷是水生生物直接可利用的磷源^[44]。因此，厘清乌江 TDP 对三峡水库的影响有着重要的意义。由图 4 (a) 和 (b) 可见，1998—2006 年乌江 TDP 均值略低与清溪场断面，清溪场断面 TDP 均值较上游寸滩断面略高，但总体上无显著差异 ($p>0.05$)，这一阶段可认为乌江汇入对三峡水库水体中 TDP 未产生显著影响；2007—2013 年，乌江 TDP 均值显著高于清溪场断面，清溪场断面 TDP 均值显著高于寸滩，若仅考虑水量因素，这一阶段乌江汇入可使清溪场断面 TDP 年均值最大升高约 $0.061 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；2014—2019 年，乌江 TDP 均值明显高于清溪场断面，乌江汇入对长江干流 TDP 影响减小，最大可使清溪场断面质量浓度均值升高约 $0.008 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

各阶段 TDP 月度均值变化见图 4 (c)。在 1998—2006 年，因武隆断面 TDP 月度均值总体上略低于三峡水库库内的清溪场断面，虽然乌江汇入对库内局部水体仍表现为“稀释”作用，但这种影响几乎可以忽略。2007—2013 年武隆断面 TDP 月度均值显著高于清溪场断面，乌江汇入会使清溪场断面水体 TDP 月度值升高，尤其是 3—4 月份，最大可升高约 $0.122 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (4 月)。2014—2019 年，除个别月份外武隆断面 TDP 月度值高于清溪场断面，两者最大差值明显小于 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，影响程度降低，乌江汇入可使清溪场断面 TDP 月度值最大升高约 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (3 月)。

2.3 影响因素

以 SS、TDP、TPP 为对象进行分析，具体见图 5 和图 6。乌江干流水体磷质量浓度存在年际变化，也存在一定的季节变化。这种变化对三峡水库局部水体中不同赋存形式的磷质量浓度也产生了一定影响，前文已经有一定的分析，在此进一步进行解析。

图 5 表明，在 2006 年前，乌江武隆断面水体中 TPP 大部分年份处于相对较高水平，但波动较大；2007—2012 年较 2006 年前总体有一定幅度的下降，且质量浓度变化较小；2014 年后水体 TPP 进一步下降，只有约 2007—2013 年间的一半。TDP 均值在 2006 年前处于相对较低水平且变幅较小；2007 年后快速上升，至 2010 年年均值达到峰值 (接近 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，并在几年中保持在较高水平；2014 年后持续下降，直至 2019 年降至略高于 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体中的磷容易被泥沙颗粒吸附，水体悬浮物含量对水体磷形态分布有一定影响，且颗粒粒径越小对水体中磷具有更高的缓冲能力^[45]。乌江武隆断面水体泥沙粒径中位值在 0.009 mm 附近^[33]，小的粒径更利于对磷的吸附^[45]。在 2006 年前，当水体悬浮物处于较高水平时，水体中颗粒磷质量浓度可以保持在较高水平；2007—2013 年间，虽然水体中悬浮物大幅降低，但因水体中溶解磷质量浓度大幅上升，水体中 TPP 仍可处于较高水平；在 2014 年之后，

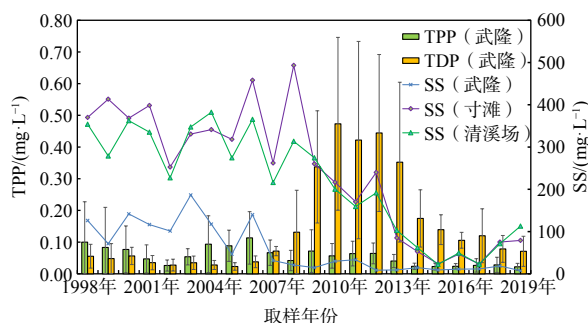


图 5 目标水体中 SS、TPP、TDP 年际变化趋势图

Fig. 5 The interannual variations of SS and phosphorus concentrations in the target water body

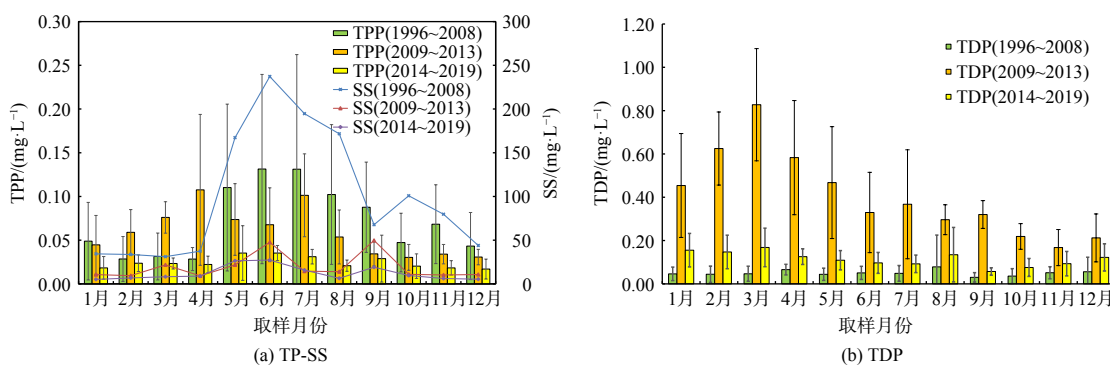


图 6 武隆断面水体中 SS、TPP、TDP 年内变化趋势图

Fig. 6 Interannual variations of SS and TPP in water at Cuntan and Qingxiang sections

水体中 TDP 和悬浮物质量浓度均大幅降低,这一阶段水体 TPP 大幅降低。乌江干流水体中 SS 的改变,也会影响到三峡水库局部水域,使相关水体中 SS 浓度以及其泥沙粒径产生变化,这将影响水体中磷的吸附/解吸过程和能力进而对水体中不同形态的磷含量产生影响。这是一个非常复杂的过程,本文将不做深入讨论。

图 6 表明,在 2008 年前乌江水体中 TPP 具有较明显的水期特征,丰水期高于枯水期和平水期,这与三峡水库库内的寸滩、清溪场断面水期变化特征^[17]基本一致;而在 2008 年后,乌江武隆断面水体中 TPP 的这种水期变化特征变得不明显。对于 TDP 而言,2009—2013 年间,水体 TDP 显著高于 2008 年之前,且在 3 月份达到极大值;2014 年后水体 TDP 虽较前一时期有大幅下降,但仍显著高于 2008 年前。乌江水体中 SS、TPP、TDP 的这种变化,进一步说明乌江汇入会对三峡水库局部水体磷质量浓度在不同时段产生不同程度影响。

乌江水体中磷质量浓度的变化,表面上是因为水体中 SS 含量以及溶解态和颗粒态在水体中的量发生重大改变。而乌江水体中磷质量浓度的这种变化,结合相关研究成果进行分析,又可归结为 2 个主要方面原因,一是乌江上游磷矿开发带来的污染,二是乌江梯级水电开发产生的影响。乌江中上游地区磷矿资源丰富,分布集中度高。自上世纪 50 年代开始,伴随着开阳磷矿、瓮福磷矿等众多磷矿的相继开发,大部分渣场防渗措施不完善,同时贵州又是我国喀斯特最发育的地区之一^[46],含磷废水渗漏^[47]导致乌江流域相关水体磷质量浓度升高,进而对三峡水库局部水体中磷质量浓度产生影响。在 2006 年前,渗漏对三峡水库局部水体的影响尚不显著,但在 2007—2013 年间则变得非常显著,即使在 2014 年后,其影响也仍存在。随着乌江干流梯级水电站 2006 年后全面建成投产^[48],使得乌江干流水文情势出现巨大变化,一方面是系列水库蓄水使得河道水流速度变缓,水体中 TPP 随泥沙/悬浮物沉降进入沉积物,使得水体中 TP 下降;另一方面随着各电站下闸蓄水而形成系列亚深水湖库,因底层水季节性缺氧导致底部沉积物中磷的强烈释放^[49],使得水中 TDP 升高。这几方面原因叠加,导致 2007 年后武隆断面水体中磷质量浓度年内变化与三峡水库水体中磷质量浓度变化存在的水期变化特征不一致,即 2—3 月份对清溪场断面磷质量浓度的影响更明显。

需要说明的是,在进行上述分析时未考虑寸滩至清溪场断面间存在的点、面源影响及水体自净、沉降、吸附等物理化学变化甚至三峡 175 m 高程蓄水后带来“蓄清”作用^[50]等系列影响。这些因素对于水体中磷质量浓度的变化,一方面是增加,另一方面是降低,可部分互相抵消。若将这些因素综合考虑,可能会使研究结果出现一定的偏差,但不会导致总体趋势的显著变化。

3 结论

1) 1998—2008 年,乌江武隆断面 TP 年均值显著低于三峡水库相关水域,这对于水库局部水体主要表现为“稀释”作用,这理论上可使库内清溪场断面 TP 年均值最大降低约 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;2009—2013 年间乌江武隆断面 TP 年均值急剧升高,显著高于三峡水库相关水域,可使清溪场断面 TP 年均值最大升高约 $0.057 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;2014 年后乌江武隆断面 TP 回落至与库内相关断面相近水平,这基本不会对三峡水库水体 TP 产生明显影响。

2) 1998—2006 年,乌江武隆断面 TDP 年均值与三峡水库相关水域相近,乌江汇入基本对水库 TDP 无显著影响。2007 年后乌江武隆断面 TDP 年均值快速上升至显著高于三峡水库相关水体。2014 年后迅速回落但仍明显高于三峡水库相关水域。2007—2013 年乌江汇入将使清溪场断面 TDP 年均最大升高约 $0.061 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2014 年后这种影响大幅降低,但仍可使清溪场断面 TDP 均值最大升高约 $0.008 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3) 乌江水体磷质量浓度年内变化趋势与三峡水库相关水域不完全同步,不同月份乌江汇入对水库影响程度不一致。在理想状态下,1998—2008 年乌江汇入对水库局部水体 TP 主要表现为“稀释”作用,最大可使清溪场断面 TP 月均值降低约 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (8 月份);2009—2013 年部分月份对水库局部水体 TP 表现为轻微的稀释,部分月份则会使得清溪场断面 TP 显著升高,最大可使其月均浓度升高约 $0.205 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (4 月);2014 年后乌江汇入对清溪场断面各月 TP 影响较小。2006 年前乌江汇入对三峡水库清溪场断面 TDP 月均值改变可基本忽略,2007 年后将使清溪场断面 TDP 月均浓度升高,尤其是 2007—2013 年间,最大将使后者升高约 $0.122 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (4 月)。

4) 乌江干流系列水电开发使得乌江水文条件发生巨变,导致水体中 SS、TPP、TP、TDP 在不同时期呈现不同变化;乌江上游磷矿开发过程中含磷废水的排放也导致乌江水体 TP 和 TDP 发生改变。这两种变化是乌江水体中磷发生变化的主要原因,从而间接、持续对三峡水库局部水体中磷的质量浓度产生影响。

参考文献

- [1] 梁福庆. 三峡水库环境保护研究[J]. 中国三峡, 2009(3): 64-71.
- [2] 王玉璇, 金中武, 陈鹏, 等. 三峡水库汛期水沙异步特性及沙峰输移时间研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(9): 24-29.
- [3] 高军, 刘俊辉, 姜保锋. 三峡工程蓄水对长江宜昌站泥沙的影响[J]. 人民长江, 2013, 44(S2): 23-24.
- [4] 张珍. 三峡工程对长江水位和水沙通量影响的定量估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [5] 时瑶, 赵艳民, 秦延文, 等. 三峡水库不同调度期水体氮形态时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 9-16.
- [6] 纪道斌, 方娇, 龙良红, 等. 三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3543-3551.
- [7] 陈莎, 谢青, 付梅, 等. 三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2303-2312.
- [8] 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 等. 三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 295-305.
- [9] XIANG R, WANG L J, LI H, et al. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015[J]. Water Research, 2021, 195.
- [10] 王顺天, 雷俊山, 贾海燕, 等. 三峡水库 2003~2017 年水质变化特征及成因分析[J]. 人民长江, 2020, 51(10): 47-53.
- [11] 曹伟, 秦延文, 马迎群, 等. 三峡库区重庆市内重点工业园区氮、磷排放特征[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(6): 617-626.
- [12] 朱爱民, 程郁春, 周连凤, 等. 三峡水库汛期运行对长江干支流浮游植物的影响[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(5): 22-30.
- [13] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 633-645.
- [14] 黄玥, 黄志霖, 肖文发, 等. 基于 Mann-Kendall 法的三峡库区长江干流入库断面水质变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 950-961.
- [15] 潘晓洁, 刘诚, 万成炎, 等. 三峡水库典型支流河口浮游植物群落与水环境相关性分析[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(6): 7-13.
- [16] 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 等. 三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4946-4955.
- [17] 卓海华, 吴云丽, 刘旻璐, 等. 三峡水库水质变化趋势研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 925-936.
- [18] 王小焕, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入库水质评价及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 554-565.
- [19] 尹炜, 王超, 张洪. 长江流域总磷问题思考[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 44-52.
- [20] ZENG X, HUANG L, HE G J, et al. Phosphorus transport in the Three Gorges Reservoir over the past two decades[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609.
- [21] 黄伟, 张研, 罗晓佼, 等. 三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1356-1364.
- [22] SHI W J, DU M, YE C, et al. Divergent effects of hydrological alteration and nutrient addition on greenhouse gas emissions in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Water Research, 2021, 201.
- [23] 何立平, 兰波, 林俊杰, 等. 三峡库区消落带紫色潮土磷形态转化过程[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 1952-1960.
- [24] 王殿常, 吴兴华. 三峡水库磷输移规律研究[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 885-895.
- [25] 卓海华, 姜保锋, 吴云丽, 等. 新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5371-5380.
- [26] 杨凡, 王丽娟, 纪道斌, 等. 三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 688-698.
- [27] 翟婉盈, 湛若云, 卓海华, 等. 三峡水库蓄水不同阶段总磷的变化特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5069-5078.
- [28] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1839-1846.
- [29] 李翻译, 陈铭, 王雨春, 等. 近 10 年来三峡消落带土壤氮、磷时空分布特征研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2448-2457.
- [30] 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 等. 三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2096-2106.
- [31] 吕平毓, 张研, 熊中福, 等. 三峡库区成库前后干流万州段水体总磷特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(7): 162-167.
- [32] 中国河湖大典编纂委员会. 中国河湖大典[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [33] 水利部长江水利委员会编. 长江泥沙公报[R]. 武汉: 长江出版社, 1998-2019.
- [34] 长江流域水资源保护局. 长江三峡工程生态与环境监测系统水文水质同步监测重点站年报[R]. 武汉: 长江水利委员会, 1998-2019.
- [35] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 1998-2017.
- [36] 李思璇, 宋瑞, 许全喜, 等. 长江上游总磷通量时空变化特征研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(5): 179-185.
- [37] 周涛, 程天雨, 虞宁晓, 等. 乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 707-713.
- [38] 尹真真, 赵丽, 彭昱, 等. 三峡库区重庆段总磷污染源解析及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(1): 51-57.
- [39] 叶婷婷, 丁坚平, 褚学伟. 乌江 34 号泉磷污染预测[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 115-120.
- [40] 嵇晓燕, 彭丹. “十三五”时期长江流域总磷浓度变化特征[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 1-9.
- [41] 熊强, 孟梅, 陈召沪, 等. 长江和乌江重庆段溶解性磷和总磷的分布特征及来源解析[J]. 环境工程, 2019, 37: 358-362.
- [42] 卓海华, 兰静, 吴云丽, 等. 乌江磷污染对三峡水库水质影响研究[J]. 人民长江, 2014, 45(4): 66-68.
- [43] 中华人民共和国水利部. 地表水资源质量评价技术规程: SL 395-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [44] 王红军. 太湖溶解态磷的分布特征及其形态研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [45] 韩超南, 孙宁宇, 戴岩, 等. 地表水中悬浮物含量和粒径对磷测定的影响[J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 161-167.
- [46] 刘振中, 俞序君, 俞锦标. 乌江流域喀斯特地貌的初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1963(15): 12-22.
- [47] 高德伟, 李光界. 乌江流域污染根源在涉磷产业无序发展[J]. 环境经济, 2019(1): 60-65.
- [48] 靳会蛟, 韩艳利. 流域水电梯级开发环境影响后评价研究与应用——以贵州乌江干流水电梯级开发为例[J]. 四川环境, 2021, 40(6): 114-124.
- [49] 胡鑫平, 李庞义, 王敬富, 等. 乌江渡沉积物磷的污染特征及其对河流筑坝的响应[J/OL]. 地球与环境: 1-8.
- [50] 刘辉, 卓海华, 陈水松. 三峡水库试验性蓄水期间水环境质量监测分析[J]. 人民长江, 2012, 43(1): 55-58.

(责任编辑: 靳炜)

The impact of inflow of Wujiang River on phosphorus concentrations of local reach of the mainstream of Three Gorges Reservoir

ZHUO Haihua¹, LAN Xiuwei², LOU Baofeng¹, YANG Xia³, WU Yunli¹, XU Jie¹, LAN Jing^{1,*}

1. Changjiang Basin Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang River Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. China Three Gorges Corporation, Yichang 443000, China

Abstract The total phosphorus concentration (TP) in the Wujiang River was different from that in the mainstream of the Three Gorges Reservoir (TGR) on the Yangtze River. The analysis on the characteristics of phosphorus concentration changes in related water areas indicates that: In 1998 – 2008, the average concentration of TP in the Wujiang River was significantly lower than that in the reach of TGR mainstream near the Wujiang mouth (here namely QXC reach), and the inflow of the Wujiang River had a dilution function on TP in QXC reach, which reduced the average TP at Qingxichang section (QXC) (~10 km downstream from the mouth) by $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. However, in 2009 – 2013, extremely high TP in Wujiang River resulted in significant rise of TP at QXC with 0.057 mg/L as the highest among the annual average increments. In 2014 – 2019, the difference between two rivers near the mouth was not significant, and the impact of Wujiang on TP in QXC reach was negligible. In 1998 – 2006, The average concentration of TDP (the dissolved part of TP) in the Wujiang River was close to that in QXC reach, and the inflow of Wujiang had little impact on TDP in QXC reach. Subsequently, TDP in Wujiang River rose sharply, and the inflow resulted in marked increase of TDP at QXC section with $0.061 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as the highest. After 2013, the TDP in the Wujiang River dramatically declined, and its impact on TDP in QXC reach weakened, and the increments of the annual average TDP at QXC section resulting from Wujiang inflow were $\leq 0.008 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The degree and trend of the influence of Wujiang River inflow on the phosphorus concentration in the local water body of the Three Gorges Reservoir are inconsistent in different periods. Construction of a series of hydropower stations and the discharge of P-containing wastewater during the development of phosphate mines in Wujiang River results in fluctuation of P concentrations in Wujiang River, and furthermore influences on P concentrations in QXC reach.

Keywords Wujiang River; total phosphorus; total dissolved phosphate; input; Three Gorges Reservoir; influence