

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.04.14

# 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子

叶许春<sup>1</sup>,孟元可<sup>1</sup>,张永生<sup>2</sup>,蒋名亮<sup>3,4</sup>,徐力刚<sup>3,4</sup>

(1.西南大学地理科学学院,重庆 400715; 2.中国水利水电科学研究院,北京 100038;  
3.中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008; 4.中国科学院流域地理学重点实验室,江苏 南京 210008)

**摘要:**基于2015—2016年香溪河回水区域主要水质参数和营养状态的周年监测数据,分析并探讨三峡库区香溪河库湾回水区营养状态的季节性变化特征及潜在污染来源。结果表明:①香溪河回水区TN、TP污染十分严重,在调查时段内,各月份香溪河库湾水体的TN、TP质量浓度均远高于限制值,易发生水体富营养化;②香溪河回水区水体营养程度较高,所有月份均达到中营养以上水平,并在2015年8月达到富营养状态。水体营养状态从低到高季节顺序为秋季、冬季、春季、夏季。TN质量浓度是影响香溪河回水区水体富营养化程度最重要的指标;③香溪河回水区TN主要来自农业面源污染和城镇生活污水排入,流域上游的磷矿资源开采产生的工业废水以及库湾沿岸的点源污染是水体中COD<sub>Mn</sub>与TP污染负荷的主要来源。水体中Chl-a质量浓度受TN、TP等营养盐的限制较弱,SD受浮游藻类和悬浮物的共同影响。

**关键词:**水体富营养化;水质参数;变化特征;污染来源;香溪河回水区

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2018)04-0080-06

## Variation characteristics of trophic states of Xiangxi River backwater area in Three Gorges Reservoir and its driving factors

YE Xuchun<sup>1</sup>, MENG Yuanke<sup>1</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>2</sup>, JIANG Minliang<sup>3,4</sup>, XU Ligang<sup>3,4</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008, China;

4. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The seasonal variation characteristics of trophic states and potential pollution sources of Xiangxi River backwater area in the Three Gorges Reservoir were analyzed based on the annual monitoring data of major water quality parameters and trophic states in Xiangxi River backwater area during 2015-2016. The results show that: (1) TN and TP pollution in Xiangxi River backwater area are very serious. During the study period, the concentrations of TN and TP in each month were higher than the limiting value, making the water of Xiangxi River backwater area easy to eutrophication. (2) Trophic States of the Xiangxi River backwater area is quite high, reaching the level of middle eutrophication in all the months, and even being eutrophication in August, 2015. Seasonally, the order of water trophic states from low to high is autumn, winter, spring and summer. The concentration of TN is the most important indicator that affects the trophic states of Xiangxi River backwater area.

基金项目:国家水体污染防治与治理科技重大专项(2014ZX07104-006-05)

作者简介:叶许春(1982—),男,副教授,主要从事水文水资源及水环境变化研究。E-mail:yxch2000@swu.edu.cn

通信作者:徐力刚,研究员,博士。E-mail:lgxu@niglas.ac.cn

(3) The TN in Xiangxi River backwater area mainly comes from agricultural non-point source pollution and urban sewage discharged, while the industrial wastewater from the phosphate resources exploitation in the upstream basin and some point source pollution are the main sources of COD<sub>Mn</sub> and TP pollution in the water. The concentration of Chl-a is limited less by the nutrient salts such as TN and TP, and SD is affected by both planktonic algae and suspended solids in the water.

**Key words:** water eutrophication; water quality parameters; variation characteristics; pollution sources; Xiangxi River backwater area

近几十年来,受到社会经济快速发展和人类活动干扰加剧的影响,众多地表水体面临着水环境恶化、富营养化加剧和服务功能减弱等重大生态环境问题<sup>[1-5]</sup>。自2003年6月三峡工程成功蓄水运行以来,库区水环境条件发生了巨大变化。伴随着库区水位提高、水流减缓,水体扩散能力减弱、污染物滞留时间延长,导致部分支流回水区域污染加重,水体富营养化频繁发生<sup>[2,6]</sup>。有关三峡工程运行后库区及其支流回水区营养盐的来源及时空分布特征一直是学者们研究的重点<sup>[6-10]</sup>。除此之外,不少研究开始关注库区水文水动力条件以及水温、光照等外在诱发因素对水体环境恶化以及藻类水华产生的影响<sup>[11-14]</sup>。这些研究对认识三峡库区水环境演变机制以及确定富营养化水域治理措施起到关键作用。

香溪河是三峡库区重要支流,其干流长度94 km,流域面积3 099 km<sup>2</sup>。三峡水库蓄水后,香溪河形成回水库湾。当水库蓄水至135 m时,香溪河库湾回水淹没范围长达26 km,当蓄水至175 m时回水范围可达40 km。由于水动力学条件的改变以及沿岸地区工农业及生活污水的大量排入,香溪河库湾水体营养程度增加,并多次发生藻类水华,对库区饮水安全造成严重威胁,引起了广泛关注<sup>[8,12,14]</sup>。然而,以往研究大多针对特定时段,缺少在完整水文年内较大尺度上的连续性研究报道。本研究自2015年7月以来对香溪河库湾水域进行了为期1年的连续监测,重点探讨香溪河库湾回水区营养状态的季节性变化特征以及污染来源,以期为三峡库区富营养化的研究和防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

在香溪河回水区峡口大桥水域至香溪河河口,沿河道中泓线布设4个监测采样点,见图1。其中,X01位于峡口镇附近,代表香溪河回水区上游监测采样点;X02位于贾家店附近,代表中游监测采样点;X03位于楚家湾附近,代表下游监测采样点;X04位于香溪河与长江交汇处,代表河口监测采样点。监测工作集中在2015年7月24日至2016年6月30日期间完成,于每月下旬在所有监测采样点进

行现场监测和水样采集(表层0.5 m以上),水样带回中科院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行各种水化学测定。

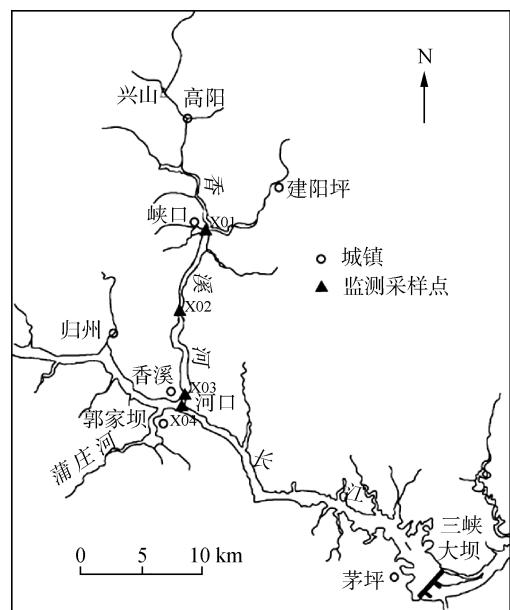


图1 香溪河位置及监测采样点布置

主要监测指标包括水温(T)、溶解氧(DO)、pH值、浊度(Turb)、电导率(Cond)、透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl-a)以及高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)等10项。其中水体SD采用Secchi盘测定,DO、T、pH、Cond等采用便携式YSI ProPlus多参数水质测定仪(产自USA)现场测得。其他指标如浊度(Turb)采用浊度计测定;Chl-a采用丙酮萃取分光光度法测定;COD<sub>Mn</sub>采用高锰酸钾酸性法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定,具体方法可参考文献[15]。

依据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》采用加权综合营养指数法<sup>[16]</sup>对香溪河回水区水体的营养现状进行评价。综合营养状态指数 $I_{TLI}$ 的计算公式为

$$I_{TLI} = \sum_{j=1}^m W_j I_{TLI,j} \quad (1)$$

式中: $W_j$ 为第j种参数的营养状态指数的相关权重;

$I_{TLI,j}$  代表第  $j$  种因子的营养状态指数;  $m$  为评价因子个数, 本研究综合考虑 Chl-a、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 和 SD5 种影响因子。采用 0 ~ 100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级:  $I_{TLI} < 30$  为贫营养;  $30 \leq I_{TLI} \leq 50$  为中营养;  $50 < I_{TLI} \leq 60$  为轻度富营养;  $60 < I_{TLI} \leq 70$  为中度富营养;  $I_{TLI} > 70$  为重度富营养。

## 2 结果及讨论

### 2.1 回水区水体基本理化性状分析

三峡水库蓄水之后, 香溪河库湾水体基本处于准静止状态, 除河口处受到长江影响存在一定的差异外, 总体上空间差异不大。表 1 为监测期间香溪河回水区的主要物理化学参数。由表 1 可知, 整个库湾水体 pH 范围在 8.22 ~ 8.33, 为弱碱性水体。DO 质量浓度范围在 7.31 ~ 9.48 mg/L, 河口处 DO 质量浓度相对较低。水体透明度就全年来看空间差异不大, 在 1.42 ~ 1.44 m 之间, 但存在较大的季节性差异。冬季水库处于枯水期, 水体透明度为全年最高。夏季水体透明度全年最低, 不仅与浮游植物

生长有关, 还易受降雨携带的泥沙及悬浮颗粒物等因素的影响。浊度的空间差异最显著, 从库湾上游到河口处呈不断增大的趋势, 特别是河口处水体浊度平均达到 20.31 NTU, 远远大于上游的 5.50 NTU, 这主要是由于受长江来水中携带的大量悬浮物的影响。电导率在 528.13 ~ 564.89  $\mu\text{S}/\text{cm}$  之间, 7—10 月的电导率明显高于其他月份, 空间上差异并不十分明显。

### 2.2 营养参数的周年变化

COD<sub>Mn</sub> 作为有机污染物指标, 当其质量浓度超过 4 mg/L 时, 表示水体受到有机污染<sup>[17]</sup>。调查表明, 香溪河回水区除 2016 年 1 月的下游、2016 年 3 月的上游和下游受到有机污染外(图 2(a)), 其他季节 COD<sub>Mn</sub> 质量浓度均低于 4 mg/L, 优于地表水 II 类标准。总体来看, 7—10 月香溪河 COD<sub>Mn</sub> 质量浓度较稳定(9 月上游水域可能受局部污染)。11 月 COD<sub>Mn</sub> 质量浓度降到全年最低。冬季 COD<sub>Mn</sub> 质量浓度明显上升, 并且 12 月和 1 月呈现较大的空间差异。在之后的 3 月, 香溪河库湾水体 COD<sub>Mn</sub> 质量浓

表 1 香溪河基本理化指标数据

监测点	水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH 值	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	透明度/m	浊度/NTU	电导率/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
X01(上游)	$19.97 \pm 5.18$	$8.25 \pm 0.45$	$9.48 \pm 4.01$	$1.41 \pm 0.67$	$5.50 \pm 5.96$	$545.05 \pm 420.77$
X02(中游)	$19.87 \pm 4.69$	$8.25 \pm 0.34$	$7.99 \pm 1.28$	$1.44 \pm 0.74$	$7.07 \pm 7.64$	$564.89 \pm 441.65$
X03(下游)	$20.14 \pm 5.41$	$8.33 \pm 0.49$	$8.68 \pm 2.49$	$1.43 \pm 0.80$	$7.75 \pm 7.81$	$561.98 \pm 441.53$
X04(河口)	$19.76 \pm 5.04$	$8.00 \pm 0.36$	$7.31 \pm 0.96$	$1.42 \pm 0.86$	$20.31 \pm 20.48$	$528.13 \pm 395.52$

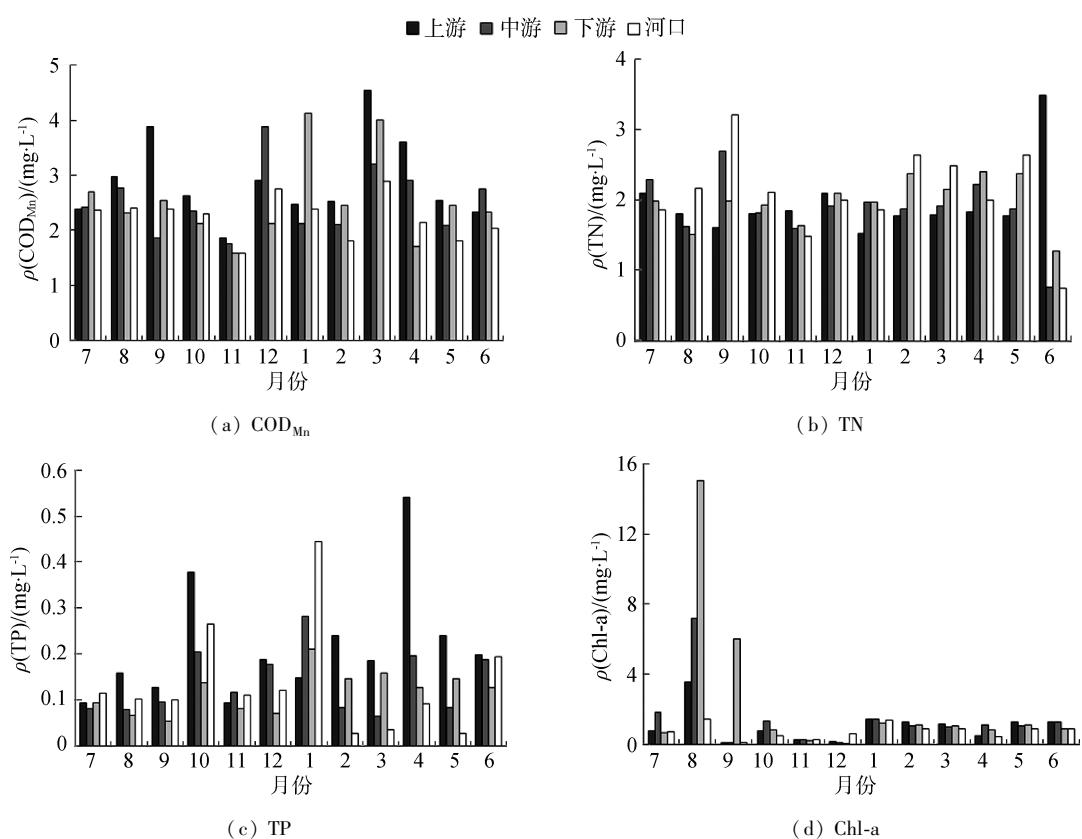


图 2 香溪河库湾水体 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 以及 Chl-a 质量浓度动态变化

度达到全年最高,之后一直呈逐月降低趋势。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 质量浓度的这种特征除了与香溪河回水区局部的有机污染有关外,还与三峡水库的运行方式密切相关。冬季三峡水库蓄水维持较高水位,香溪河库湾水流平静水体扩散能力弱,导致  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度存在较大的空间差异。在随后的春季泄水过程中,随着库区水位的降低,库湾水动力条件加强, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度呈现明显的下降趋势。香溪河回水区从上游到河口 TN 质量浓度在  $0.75 \sim 3.50 \text{ mg/L}$  之间(图 2(b))。除了 2016 年 6 月中、下游及河口处 TN 质量浓度偏低外,其他时间均大于  $1.5 \text{ mg/L}$ ,为地表水Ⅳ、V 类水质标准,表明香溪河库湾全年 TN 污染十分严重。空间上,香溪河回水区上下游 TN 质量浓度差异较小,仅上游河段在 2016 年 6 月异常偏大。另外,部分月份里河口区 TN 质量浓度反而高于其他河段。季节上看,TN 质量浓度变化趋势不明显,但是 2015 年秋季 TN 质量浓度呈现降低的趋势,随后的冬春季节略有增加并维持在较高水平。秋季是三峡水库的蓄水季节,随着水库水位的逐渐升高,干流水体大量进入库湾,且以倒灌异重流的形式对库湾营养盐进行了稀释和再分配<sup>[18]</sup>,同时水库的高水位运行状态使颗粒态的营养盐得以沉降,营养盐浓度逐渐降低。冬季是浮游植物生物量较小的季节,对营养盐的消耗量较小,库湾中的营养盐浓度逐渐上升,营养盐开始累积。春季 TN 质量浓度略有增加,则可能更多地受区内农业耕作活动的影响。

香溪河 TP 质量浓度在  $0.03 \sim 0.54 \text{ mg/L}$  之间(图 2(c)),其中大多数时间里小于  $0.20 \text{ mg/L}$ ,达到Ⅲ类水质标准。但是在 10 月、1 月以及次年 4 月,香溪河 TP 质量浓度异常偏高,局部河段 TP 质量浓度超过  $0.4 \text{ mg/L}$ ,达到劣 V 类水质标准。时间上 TP 质量浓度表现出与 TN 不同的变化趋势。7—9 月 TP 质量浓度偏低,主要是受浮游植物生长吸收的影响。其他时间里,TP 质量浓度变化复杂,还可能受到库区水动力条件改变的影响,也与城镇生活污水排入和农村化肥过度施用有关。空间上,除了 2—5 月河口区 TP 质量浓度整体较低外,在大多数月份里 TP 质量浓度上游最高,下游最低,然后到河口区 TP 质量浓度又有所增高。这一特征在很大程度上受流域自然环境特征的影响。香溪河流域内磷矿资源丰富,上游磷矿资源的开采、库湾沿岸的非点源污染是水体中磷污染负荷的主要来源<sup>[19]</sup>,因此库湾上游磷营养盐质量浓度明显大于下游。河口区水体受长江干流影响,已有研究也表明,三峡库区大多数支流回水区的 TN、TP 质量浓度

低于干流<sup>[20]</sup>。

Chl-a 质量浓度可以在一定程度上表征水体浮游植物的现存量<sup>[21]</sup>。香溪河回水区 Chl-a 质量浓度年变化范围在  $0.07 \sim 15.07 \text{ mg/L}$  之间,并且呈现出巨大的季节行波动特征。如图 2(d)所示,香溪河回水区 Chl-a 质量浓度在 2015 年 8 月呈现出爆发式增加特点,在之后的 9 月份急剧减小,仅在下游水域仍保持在较高水平。香溪河回水区 Chl-a 质量浓度在 11—12 月达到最低值,在随后的 1—6 月质量浓度稳定且维持在较低水平。根据 OECD 富营养化单因子 Chl-a 评价标准( $\rho(\text{Chl-a}) < 3 \text{ mg/L}$  为贫营养; $3 \leq \rho(\text{Chl-a}) < 11 \text{ mg/L}$  为中营养; $11 \leq \rho(\text{Chl-a}) < 78 \text{ mg/L}$  为富营养; $\rho(\text{Chl-a}) \geq 78 \text{ mg/L}$  为严重富营养)<sup>[14]</sup>,2015 年 8 月整个库湾回水区均处于中营养状态,下游水域更是达到富营养状态。

## 2.3 营养状态的周年变化

调查时段内不同月份香溪河库湾水域营养状态评价结果见图 3。整个回水区综合营养状态指数  $I_{\text{TLI}}$  范围为  $30.30 \sim 52.31$ ,水体营养程度较高,无贫营养状态。就各月份来看,除了在 2015 年 8 月香溪河回水区达到富营养状态外,其他月份均达到中营养状态。这一特点也与 Chl-a 质量浓度在 8 月呈现爆发式增加相对应。水体营养状态指数最低的是 2015 年 11 月,其次是 12 月,其他月份库湾水体的营养状态均维持在较高水平,差异并不突出。受三峡库区长江主流水体的影响,2—5 月河口的营养状态总体要低于库湾,并且从上游到下游营养状态呈一定的梯度减小。这一特征与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度变化特征相似,而与 TN 质量浓度变化情况不同。从季节变化来看,统计表明香溪河库湾水域营养状态从低到高顺序为秋季、冬季、春季、夏季。

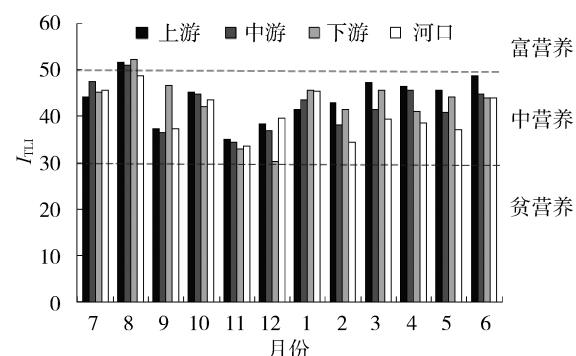


图 3 香溪河库湾水体综合营养状态指数变化

## 2.4 水体富营养化主要驱动因子分析

水体富营养化的发生所必需的条件主要有 3 个<sup>[22]</sup>:TN、TP 等营养盐相对比较充足;缓慢的水流流态(流速、水深等)以及适宜的环境条件(水温、光照等)。根据单因子营养状态指数分析,香溪河回

水区中 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP、Chl-a 与 SD 的平均营养状态指数分别为 25.17、65.61、60.67、21.78 和 47.56，表明 TN 质量浓度是影响水体富营养化程度最重要的指标，其次是 TP、SD、COD<sub>Mn</sub> 和 Chl-a。

一般认为，当水体中 TN、TP 质量浓度分别达到 0.20、0.02 mg/L 以上时，水体存在发生富营养化的风险<sup>[7]</sup>。蓝藻水华的暴发是水体富营养化后的一种表现，其对破坏水体原有的生态系统平衡起着重要作用<sup>[23]</sup>。本研究中，调查时段内各月份香溪河库湾水体的 TN、TP 质量浓度均远高于限制值，表明水体为浮游藻类的生长提供了充足的营养盐，在一定的环境条件驱动下（合适的温度和光照）藻类水华风险较大。另外，研究表明 N/P 值对藻类的暴发性生长具有重要作用，当水体中 N/P 值小于 7 时，N 将限制藻类的生长；N/P 值在 8~30 之间为适应藻类生长范围；N/P 值大于 30 时，P 将成为藻类生长的限制因子<sup>[24-26]</sup>。本研究中香溪河库湾水域中 N/P 值在 3.41~37.23 之间，绝大多数时间里其比值在 8~30 之间，因此香溪河库湾水体 N、P 条件较适合藻类的生长，容易发生水体富营养化。

根据相关性分析（表 2）可知，香溪河 TN 质量浓度与 COD<sub>Mn</sub> 以及 TP 质量浓度呈负相关，表明其主要来源不同。香溪河流域是典型的农业耕作区，沿岸有较多的村镇分布，因而农村化肥过度施用和城镇生活污水排入应该是 TN 污染的主要来源。此外，COD<sub>Mn</sub> 与 TP 呈较强的正相关，特别是 COD<sub>Mn</sub> 与 TP 质量浓度都具有从库湾上游向下游减小的趋势，流域上游磷矿资源开采的工业废水以及库湾沿岸的点源污染是水体中 COD<sub>Mn</sub> 与 TP 污染负荷的主要来源。Chl-a 质量浓度与主要营养盐之间均呈弱负相关关系，表明水体中 Chl-a 质量浓度受 N、P 等营养盐的限制较弱，可能更多地受到水温和光照等条件的影响。Chl-a 与 SD 呈较强的负相关，表明回水区透明度除受浮游藻类影响外，还受水体中悬浮物的影响，这与该区域较强的人类活动有关。

表 2 香溪河库湾水体各营养因子间相关系数

营养因子	COD <sub>Mn</sub>	TN	TP	Chl-a	SD
COD <sub>Mn</sub>	1				
TN	-0.112	1			
TP	0.335	-0.023	1		
Chl-a	-0.043	-0.188	-0.231	1	
SD	-0.014	0.022	0.144	-0.404	1

### 3 结 论

a. 香溪河回水区 TN 污染十分严重，为地表水

IV、V 类水质标准，无明显季节变化趋势。TP 污染在大多数时间里达到Ⅲ类水质标准，某些月份里局部水域可达到劣 V 类水质标准。在调查时段内，各月份香溪河库湾水体的 TN、TP 质量浓度均远高于限制值，为浮游藻类生长提供了良好条件，易发生水体富营养化。

b. 香溪河回水区水体营养程度较高，所有月份均达到中营养状态，其中 2015 年 8 月更是达到富营养状态。就季节来看，水体营养状态从低到高顺序为秋季、冬季、春季、夏季。TN 质量浓度是影响香溪河库湾水体富营养化程度最重要的指标，其次是 TP、SD、COD<sub>Mn</sub> 和 Chl-a。

c. 香溪河水体中的 TN 主要来自农业面源污染和城镇生活污水的排入，而流域上游的磷矿资源开采产生的工业废水以及库湾沿岸的点源污染是水体中 COD<sub>Mn</sub> 与 TP 污染负荷的主要来源。水体中 Chl-a 质量浓度受 N、P 等营养盐的限制较弱，可能更多地受到水温和光照等条件的影响。水体透明度除受浮游藻类影响外，还受水体中悬浮物的影响，这与该区域较强的人类活动有关。

### 参 考 文 献：

- [1] 陈星, 许钦, 何新玥, 等. 城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32(2):77-81. ( CHEN Xing, XU Qin, HE Xinyue, et al. Research on health evaluation and protection of urban shallow lake ecosystem [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):77-81. (in Chinese) )
- [2] 郭平, 龚宇, 李永建, 等. 三峡水库 135 m 水位蓄水典型次级河流回水段富营养化监测评价 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(2):88-90. ( GUO Ping, GONG Yu, LI Yongjian, et al. Eutrophic investigation and assessment on backwater reaches of several typical branches of Three Gorges Reservoir at 135 m water level [J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(2):88-89. (in Chinese) )
- [3] 毛建忠, 孙燕利, 贺克雕, 等. 牛栏江—滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果研究 [J]. 水资源保护, 2017, 33(2):47-51. ( MAO Jianzhong, SUN Yanli, HE Kediao, et al. Study of water environment improvement effect by Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project in Waihai area of Dianchi Lake [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):47-51. (in Chinese) )
- [4] 李勇, 袁佳慧, 张维维, 等. 太湖地区农田土壤大孔隙及胶体释放对有效磷下渗的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1):7-13. ( LI Yong, YUAN Jiahui, ZHANG Weiwei, et al. Effects of macropore and colloid release on vertical migration of available phosphorus in farmland soil of Taihu Lake region [J]. Journal of Hohai University, 2017, 45(1):7-13. (in Chinese) )

- University ( Natural Sciences ), 2017, 45 ( 1 ) : 7-13. ( in Chinese )
- [ 5 ] 谢艾玲,徐枫,向龙,等.环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析 [ J ]. 河海大学学报 ( 自然科学版 ), 2017, 45 ( 5 ) : 391-397. ( XIE Ailing, XU Feng, XIANG Long, et al. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2017, 45 ( 5 ) : 391-397. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] 易仲强,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响 [ J ]. 水生态学杂志, 2009, 2 ( 5 ) : 6-11. ( YI Zhongqiang, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Water temperature structure and impact of which on the bloom in spring in Xiangxi Bay at Three Gorges Reservoir [ J ]. Journal of Hydroecology, 2009, 2 ( 5 ) : 6-11. ( in Chinese ) )
- [ 7 ] 张晟 李崇明,郑坚,等.三峡水库支流回水区营养状态季节变化 [ J ]. 环境科学, 2009, 30 ( 1 ) : 64-69. ( ZHANG Sheng, LI Chongming, ZHENG Jian, et al. Seasonal variation of trophic states in backwater areas of tributaries in Three Gorges Reservoir [ J ]. Environmental Science, 2009, 30 ( 1 ) : 64-69. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 孔松,刘德富,纪道斌,等.香溪河库湾春季藻华生长的影响因子分析 [ J ]. 三峡大学学报 ( 自然科学版 ), 2012, 34 ( 1 ) : 23-28. ( KONG Song, LIU Defu, JI Daobing, et al. Analysis of factors impacted on algal growth during period of spring algal bloom in Xiangxi River Bay [ J ]. Journal of China Three Gorges University, 2012, 34 ( 1 ) : 23-28. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等.三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析 [ J ]. 水资源保护, 2005, 21 ( 6 ) : 23-26. ( ZHANG Yuan, ZHENG Binghui, LIU Hongliang, et al. Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding [ J ]. Water Resources Protection, 2005, 21 ( 6 ) : 23-26. ( in Chinese ) )
- [ 10 ] 郭胜,李崇明,郭劲松,等.三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征 [ J ]. 环境科学, 2011, 32 ( 5 ) : 1266-1272. ( GUO Sheng, LI Chongming, GUO Jinsong, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [ J ]. Environmental Science, 2011, 32 ( 5 ) : 1266-1272. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] 杨艳青,刘凌,陈沐松,等.摇蚊幼虫生物扰动对富营养化湖泊内源磷释放的影响 [ J ]. 河海大学学报 ( 自然科学版 ), 2016, 44 ( 6 ) : 485-490. ( YANG Yanqing, LIU Ling, CHEN Musong, et al. Effect of chironomid larvae bioturbation on release of internal phosphorus in eutrophic lake [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2016, 44 ( 6 ) : 485-490. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] 李媛,刘德富,孔松,等.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, 2012, 32 ( 8 ) : 1882-1893. ( LI Yuan, LIU Defu, KONG Song, et al. Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32 ( 8 ) : 1882-1893. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 刘流,刘德富,肖尚斌,等.水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 [ J ]. 环境科学, 2012, 33 ( 9 ) : 3046-3050. ( LIU Liu, LIU Defu, XIAO Shangbing, et al. Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [ J ]. Environmental Science, 2012, 33 ( 9 ) : 3046-3050. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 徐耀阳,叶麟,韩新芹,等.香溪河库湾春季水华期间水体光学特征及相关分析 [ J ]. 水生生物学报, 2006, 30 ( 1 ) : 84-88. ( XU Yaoyang, YE Lin, HAN Xinjin, et al. Characteristic and regression analysis of the par attenuation coefficient in Xiangxi bay during spring bloom [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30 ( 1 ) : 84-88. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 黄祥飞,陈伟民,蔡启铭.湖泊生态调查观测与分析 [ M ]. 北京:中国标准化出版社, 2000.
- [ 16 ] 中国环境监测总站.湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定 [ M ]. 北京:国家环境保护总局, 2001.
- [ 17 ] 刘建康.东湖生态学研究(二) [ M ]. 北京:科学出版社, 1995:63-226.
- [ 18 ] 陈媛媛,刘德富,杨正健,等.分层异重流对香溪河库湾主要营养盐补给作用分析 [ J ]. 环境科学学报, 2013, 33 ( 3 ) : 762-770. ( CHEN Yuanyuan, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. The impacts of the stratified density currents on supply pattern of main nutrients in Xiangxi River [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 ( 3 ) : 762-770. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 叶绿.三峡库区香溪河水华现象发生规律与对策研究 [ D ]. 南京:河海大学, 2006.
- [ 20 ] 张晟,刘景红,张全宁,等.三峡水库成库初期 N、P 分布特征 [ J ]. 水土保持学报, 2005, 19 ( 4 ) : 123-126. ( ZHANG Sheng, LIU Jinghong, ZHANG Quanning, et al. Distribution features of nitrogen and phosphorus in incipient Three Gorges Reservoir [ J ]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19 ( 4 ) : 123-126. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] 赵挺,高方述.洪泽湖西部湖滨水质污染特征分析 [ J ]. 环保科技, 2013, 19 ( 4 ) : 16-20. ( ZHAO Ting, GAO Fangshu. Pollution characteristics of water in west Hongze Lake [ J ]. Environmental Protection & Technology, 2013, 19 ( 4 ) : 16-20. ( in Chinese ) )

(下转第 92 页)

- [17] 徐彩平,刘霞,陈宇炜.浮游植物叶绿素a浓度测定方法的比较研究[J].生态与农村环境学报,2013,29(4):438-442. (XU Caiping, LIU Xia, CHEN Yuwei. Comparison of methods for determination of phytoplankton chlorophyll-a [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(4): 438-442. (in Chinese))
- [18] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [19] WU Y C, KE X B, HERNANDEZ M, et al. Autotrophic growth of bacterial and archaeal ammonia oxidizers in freshwater sediment microcosms incubated at different temperatures [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(9):3076-3084.
- [20] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002,18(5):47-49. (WANG Mingcui, LIU Xueqin, ZHANG Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5): 47-49. (in Chinese))
- [21] 张丽梅,贺纪正.一个新的古菌类群:奇古菌门(*Thaumarchaeota*)[J].微生物学报,2012,54(2):411-421. (ZHANG Limei, HE Jizheng. A novel archaeal phylum:*thaumarchaeota* [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2012, 54(2):411-421. (in Chinese))
- [22] KONNEKE M, BERNHARD A E, DE LA TORRE J R, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon[J]. Nature, 2005, 437(7058):543-546.
- [23] ISOBE K, KOBA K, SUWA Y, et al. High abundance of ammonia-oxidizing archaea in acidified subtropical forest soils in southern China after long-term N deposition[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, 80(1):193-203.
- [24] ERGUDER T H, BOON N, WITTEBOLLE L, et al. Environmental factors shaping the ecological niches of ammonia-oxidizing archaea [J]. FEMS Microbiology Review, 2009, 33(5):855-869.
- [25] 吴俊锋,谢飞,陈丽娜,等.太湖重污染湖区底泥沉积物特性[J].水资源保护,2011,27(4):74-78. (WU Junfeng, XIE Fei, CHEN Lina, et al. Characteristics of bottom sediment in heavily polluted area of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (4): 74-78. (in Chinese))
- [26] ALVES R J, WANEK W, ZAPPE A, et al. Nitrification rates in arctic soils are associated with functionally distinct populations of ammonia-oxidizing archaea [J]. International Society for Microbial Ecology, 2013, 7(8): 1620-1631.
- [27] FRENCH E, KOZLOWSKI J A, MUKHERJEE M, et al. Ecophysiological characterization of ammonia-oxidizing archaea and bacteria from freshwater [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(16):5773-5780.
- [28] HUANG L Q, DONG H L, WANG S, et al. Diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in diverse Chinese paddy soils[J]. Geomicrobiology Journal, 2014, 31(1):12-22.
- [29] JIN T, ZHANG T, YE L, et al. Diversity and quantity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in sediment of the Pearl River Estuary, China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(3):1137-1145.
- [30] 乌云.乌梁素海上覆水体与表层沉积物污染特征及其污染物迁移转换规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

(收稿日期:2017-08-18 编辑:彭桃英)

## (上接第 85 页)

- [22] 匡武名,张萌,张金美,等.鄱阳湖外围湖泊水体营养波动周年特征的比较湖沼学研究[J].湖泊科学,2016,28(6):1293-1305. (KUANG Wuming, ZHANG Meng, ZHANG Jinmei, et al. Comparative limnological study on annual dynamic pattern of nutrients in water column of three suburb lakes adjacent to Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6):1293-1305. (in Chinese))
- [23] 王寿兵,屈云芳,徐紫然.基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J].水资源保护,2016,32(5):1-4. (WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):1-4. (in Chinese))
- [24] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境科学出版社,1988:15-47.

- [25] 许士国,汪天祥.水库内源污染蓄积过程及影响研究综述[J].水利水电科技进展,2015,35(5):162-167. (XU Shiguo, WANG Tianxiang. Review of research on accumulation process and effect of internal pollution of reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):162-167. (in Chinese))
- [26] 张佳磊,郑丙辉,刘录三,等.三峡库区大宁河库湾水体混合过程中的营养盐行为[J].水利水电科技进展,2013,33(6):66-70. (ZHANG Jialei, ZHENG Binghui, LIU Lusan, et al. Behaviors of nutritive salt during water body mixing process in Daning Bay of Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(6):66-70. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-17 编辑:彭桃英)