

三峡水库香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的时空分布^{*}

张敏^{1,2} 徐耀阳^{1,2} 邵美玲¹ 蔡庆华^{1**}

(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, 武汉 430072; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 2004年10月—2006年7月,对三峡水库香溪河库湾底泥中总氮(TN)、总磷(TP)含量的时空分布特征及其影响因素进行了分析。结果表明:香溪河库湾底泥中TN、TP含量均表现为“中间高,两头低”的空间分布规律,其中,TN含量最高值为 $1.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,出现在库湾中部区域,最低值为 $0.89\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,出现在河口附近区域,TP含量最高值为 $1.07\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最低值为 $0.80\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,分别出现在库湾中部和库尾。TN含量按秋季、冬季、春季的顺序依次降低,从春季到夏季则大幅上升,夏季达最高值;TP含量的季节波动较小,以春季最高。研究区底泥中TN、TP含量的年际差异均达显著水平。香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的空间分布主要受水体中悬浮物质沉积率的影响,沉积率较高区域的TN、TP含量较高,TN含量的季节波动主要受上游来水量季节变化的影响,而TP含量的季节变化主要源于点源污染。

关键词 底泥 营养物质 时空分布 香溪河库湾 三峡水库

文章编号 1001-9332(2009)11-2799-07 中图分类号 Q178.5 文献标识码 A

Spatiotemporal distribution of total nitrogen and total phosphorus in sediments of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. ZHANG Min^{1,2}, XU Yao-yang^{1,2}, SHAO Mei-ling¹, CAI Qing-hua¹(¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(11): 2799–2805.

Abstract: The spatiotemporal distribution of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in sediments of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir was investigated from October 2004 to July 2006, with related affecting factors analyzed. The TN and TP concentrations in the sediments were higher in the middle stretch but lower in the two edges of the Bay. The maximum value of TN concentration ($1.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) appeared in the middle part of the Bay, and the minimum ($0.89\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) occurred at the adjacent areas to the river mouth; while the maximum value of TP concentration ($1.07\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) appeared in the middle, and the minimum ($0.80\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) was in the edges of the Bay. The TN concentration decreased in the sequence of autumn – winter – spring, but increased from spring to summer dramatically; while the seasonal variation of TP concentration was not very significant, with the maximum occurred in spring. Significant inter-annual variations were observed in the TN and TP concentrations. The spatial distributions of TN and TP concentrations were mainly affected by the sedimentation of suspended matter. In the regions where sedimentation rate was high, the TN and TP concentrations were also very high. The seasonal fluctuation of TN concentration was mainly affected by river discharge, while that of TP concentration was mainly affected by point source pollution.

Key words: sediment; nutrient; spatiotemporal distribution; Xiangxi Bay; Three Gorges Reservoir.

^{*} 国家自然科学基金项目(40671197)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-427)和国家重点实验室专项经费项目(2008FBZ02)资助。

^{**} 通讯作者。E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

2009-04-22 收稿, 2009-09-09 接受。

底泥是淡水生态系统的重要组分,在水生态系统中充当着“源”与“汇”的角色,它不断地接纳水体中沉积下来的颗粒物质,又不断地向水体中释放营养^[1],在水生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用。底泥中各种营养物质的不断积累,会引起底栖生境的改变,对生存在其中的底栖生物产生重要影响^[2]。此外,在某些水动力条件下,沉积的营养物质又会随着表层与底层水的混合而进入上层水体,从而为浮游植物的生存提供必要的营养^[3],因而可能引起或加重水体的富营养化程度。以往对湖泊及海洋中底泥的研究已十分广泛^[3-5],尤其是一些浅水湖泊更易受风力等外界因素的干扰而导致底泥营养物质向上层水体释放,因而更受关注^[6-7]。目前对水库特别是底泥的研究相对较少^[8-9]尤其是因截流江河所建成的水库,其建成会引发一系列生态环境的改变,如主河道水文条件的改变等,使水库在纵向上产生不同的沉积结构^[8],导致底泥中各种物质也在纵向上产生相应的分区,进而影响整个生态系统的变化。

香溪河发源于神农架林区,全长 94 km,流域面积 3099 km²,拥有九冲河、古夫河、高岚河三大支流^[10],是三峡水库湖北库区较靠近坝首的最大支流。自 2003 年三峡水库蓄水后,香溪河下游受长江回水的顶托而形成库湾,长约 20 km。香溪河库湾形成后,水流变缓、水深加大、水体滞留时间延长,使水体中营养物质更易向底部沉积^[9],从而在纵向上产生不同的沉积特征,导致底泥中营养物质空间分布的差异。目前,有关香溪河库湾底泥的相关研究非常少,仅付长营等^[11]对库湾沉积物对磷的吸附释放特征进行过研究,而对于其中营养物质空间分布的研究尚属空白。本文分析了 2004 年 10 月—2006 年 7 月香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量及其时空分布特征,并初步讨论了造成这种分布的原因,以期为库湾水生态系统的管理与保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

自香溪河河口逆河而上设置 7 个采样点(图 1),分别记为 XX01~XX07。其中,XX01 样点位于香溪河汇入长江的河口处,受长江回水的影响;XX07 样点处于库湾回水区末端,受上游河流来水的影响;位于库湾中部区域的样点受外来因素的影响相对较小,水动力条件相对稳定。

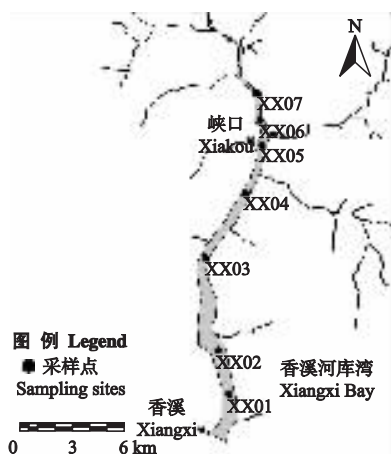


图 1 研究区采样点分布

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the study area.

1.2 样品采集与处理

于 2004 年 10 月和 2005 年 1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)以及 2006 年 7 月,每月每样点采样 1 次。用 1/16 m² 改良彼得生采泥器采集底泥样品,采集后装入保鲜袋带回实验室,自然风干后研磨、过 100 目筛,装入保鲜袋备用。底泥样品测定依据文献^[12],TN 采用重铬酸钾-硫酸法消化,用奈氏试剂比色法测定;TP 采用高氯酸-硫酸法消化,用钼锑抗比色法测定。

水化学样品与底泥同步采集,现场加浓硫酸调整使水样 pH < 2,低温保存。后于实验室内由连续流动分析仪(Skalar San++, 荷兰)分析水体 TN、TP 含量。

香溪河流量数据源于湖北省兴山县的香溪河水文站。

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析各分区氮、磷含量的差异性;用配对 *t* 检验方法对不同年份各相应季节氮、磷含量以及总氮、总磷年均含量进行比较。

分析前,若数据分布不具正态性,则将数据进行对数转换,使其服从正态分布。总氮、总磷含量的季节变化采用相同季节氮、磷含量的均值,年变化采用各年氮、磷含量的均值进行比较。

2 结果与分析

2.1 香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的空间分布

2.1.1 空间分布 由图 2 可以看出,研究区总氮、总磷含量在库湾中的分布均呈现“中间高、两头低”的

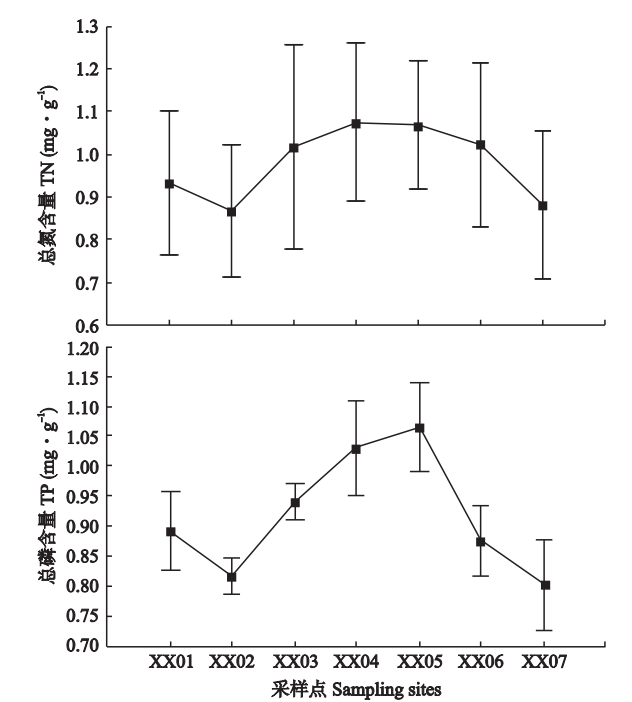


图2 研究区各样点的总氮、总磷含量
Fig.2 TN and TP contents in each sampling site of the study area (mean ± SD).

趋势. TN 含量最高值(1.08 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)出现在 XX04 样点 ,最低值(0.89 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)出现在 XX02 样点 ;TP 含量最高值(1.07 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)出现在 XX05 样点 ,而最低值(0.80 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)出现在 XX07 样点.

2.1.2 香溪河库湾的纵向生态分区 纵向上存在分区是水库的重要空间特性之一^[15] ,香溪河库湾在某种程度上相当于一个小型水库 ,因此 ,其在纵向上也存在相应的生态分区. 邵美玲^[16]曾利用底栖动物的空间分布对香溪河库湾进行分区 ,其中 ,XX01 ~ XX02 为 I 区 ,XX03 ~ XX06 为 II 区 ,XX07 为 III 区. 分别对 3 个分区底泥中 TN、TP 含量进行单因素方差分析 ,结果表明 ,TN 含量在 I 区与 II 区间差异显著($P < 0.05$) ,在 II 区与 III 区、I 区与 III 区间的差异不显著($P > 0.05$) 对于 TP 含量而言 ,II 区与 I、III 区间的差异均达显著水平($P < 0.05$) ,I 区与 III 区间无显著差异($P > 0.05$). 无论是 TN 含量还是 TP 含量 ,I 区与 III 区之间的差异均不显著 ,主要原因在于这 2 个区都位于河流与库湾的过渡交错区 ,氮、磷沉积受到的影响因素极为相似. TN 含量在 II 区与 III 区间的差异不显著 ,主要是由于陆源输入是氮的主要来源之一^[14] ,II 区与 III 区均系人口较为集中的城镇分布区 ,因此 ,相似的氮源输入造成 2 个区的 TN 含量差异不显著.

通过各分区 TN、TP 含量的单因素方差分析可

知 ,依据 TP 含量进行分区 ,整个库湾可分为 3 个区 ;而依据 TN 含量则仅能划分为 2 个区. 以 TP 含量为标准的分区结果与邵美玲^[16]利用底栖动物对香溪河库湾进行分区的结果吻合 ,而 TN 含量由于受陆源输入影响较大 ,不适合单独作为库湾分区的依据. 显然 ,选取底栖动物这一相对稳定的因子作为生态分区的依据更能真实反映库湾长期的空间分异.

2.2 香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的时间变化

2.2.1 季节变化 2004 年 10 月—2006 年 7 月 ,研究区底泥 TN 含量依次为 :秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季 ,而 TP 含量的季节波动较平缓 ,并以春季最高(图 3) ,与李凤彬等^[17]研究结果一致. 该季节变化与李凤清等^[18]对 2000—2005 年香溪河营养盐入库通量的季节动态研究结果极为相似 ,唯一不同的是本研究中 TN 含量的最高值出现在秋季 ,而李凤清等^[18]研究中上游 TN 入库通量最高值出现在夏季 ,其原因可能是上游营养盐的输入对底泥中营养盐有影响 ,但具有一定的时滞性.

从图 4 可以看出 ,研究期间 ,大部分季节香溪河库湾底泥 TN、TP 含量均为“ 中间高、两头低 ” ,但 2004 年 10 月 XX06、XX07 样点底泥中 TN、TP 含量以及 2005 年 10 月 XX06 样点底泥中 TN 含量均相对较高(2005 年 10 月与 2006 年 4 月 XX07 样点底泥样品丢失). 其原因可能是受水位波动的影响 ,外源输入成为这 2 个样点 TN 的主要来源^[13-14] ,加之研究区在 2004 年 10 月和 2005 年 10 月进行了汛后蓄水 ,这 2 个样点位于回水区末端 ,水位上升使消落区内的植物残体进入库湾并沉积 ,导致其 TN 含量增加. 处于河口位置的 XX01、XX02 样点中 ,XX01 的氮、磷含量一般高于 XX02 ,可能与各样点不同的沉积率有关.

2.2.2 年际变化 对香溪河库湾 TN、TP 含量相同季节以及年均值间进行配对 t 检验 ,结果表明 ,除春季

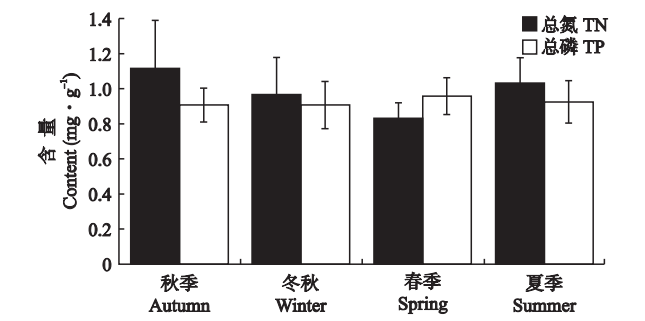


图3 研究区总氮、总磷含量的季节动态
Fig.3 Seasonal dynamics of TN and TP contents in the study area (mean ± SD).

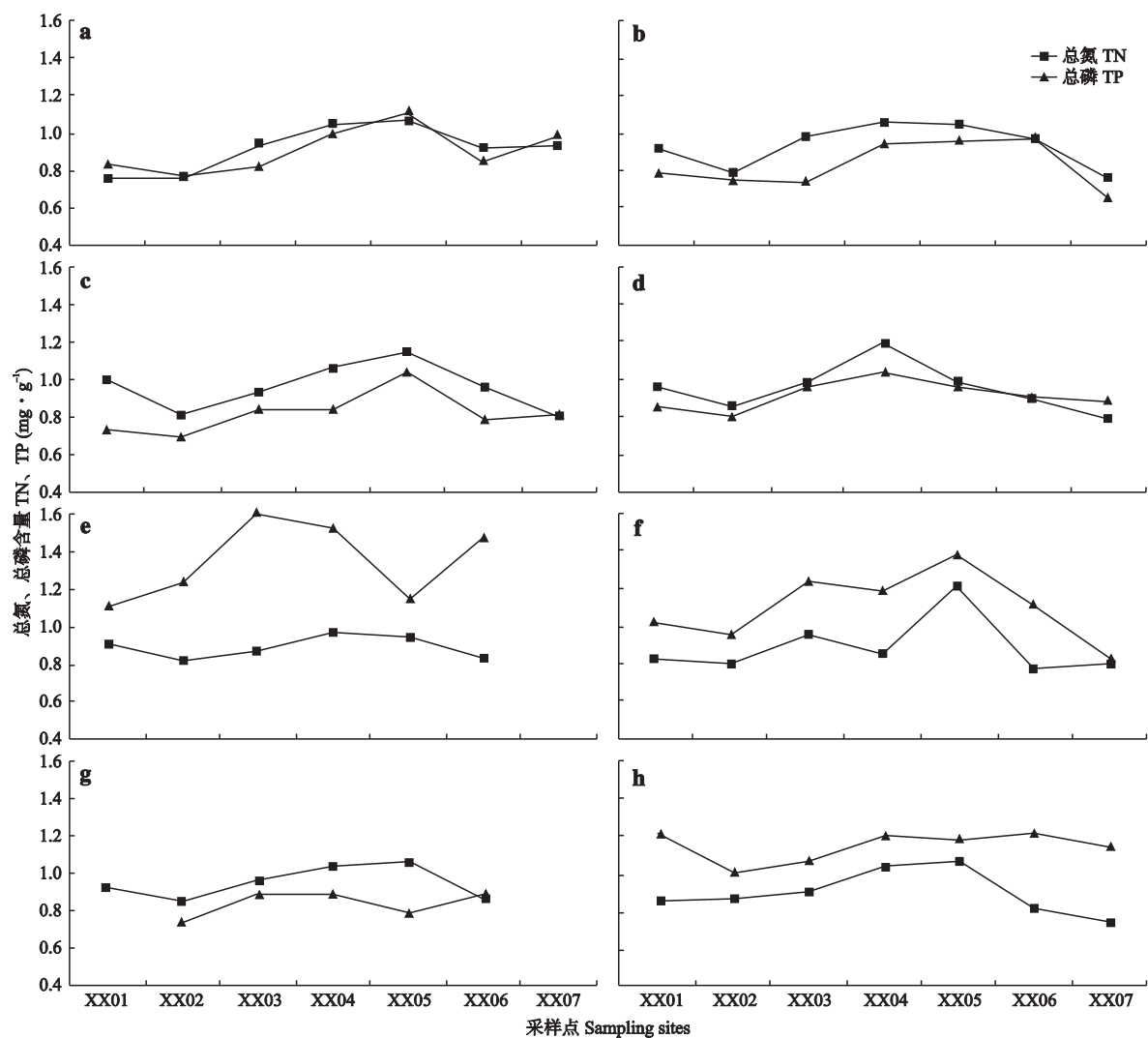


图 4 研究区不同季节总氮、总磷含量的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of TN and TP contents in different seasons in the study area.
a) 2004-10 ; b) 2005-01 c) 2005-04 d) 2005-07 e) 2005-10 f) 2006-01 g) 2006-4 h) 2006-7.

外,其他相同季节间 TN 含量的差异均达极显著水平($P < 0.01$),其年变化也呈极显著差异($P < 0.01$);各相同季节间 TP 含量无显著差异,但年变化差异显著($P < 0.05$). 2005—2006 年的 TN 含量 [$(1.12 \pm 0.22) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$] 比 2004—2005 年 [$(0.87 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$] 显著增加,而 2005—2006 年的 TP 含量 [$(0.90 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$] 显著低于 2004—2005 年 [$(0.94 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$].

2.3 香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的影响因素
2.3.1 表层水体总氮、总磷含量 研究区表层水体中 TN 含量呈现出自河口向库尾逐渐降低的趋势,而 TP 含量则正好相反(图 5),这与叶麟等^[19]对香溪河库湾磷酸盐、硝酸盐分布的研究结果一致.研究区表层水体中的氮、磷含量分布与底泥中截然不同,

主要原因是香溪河库湾不同于湖泊,其具有一定的流动性,底泥中物质主要源于表层水体悬浮颗粒物质的沉积^[1],因此,表层水体中营养物质含量不会在短期内影响到底层.

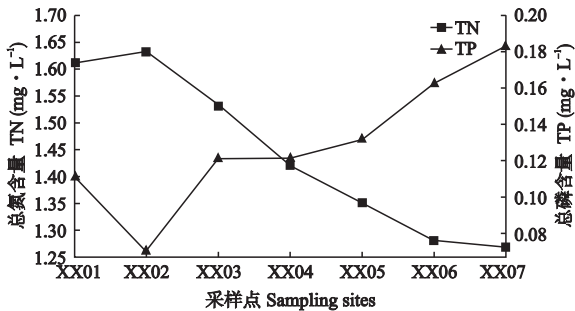


图 5 研究区表层水体总氮、总磷含量的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of TN and TP contents in surface water of the study area.

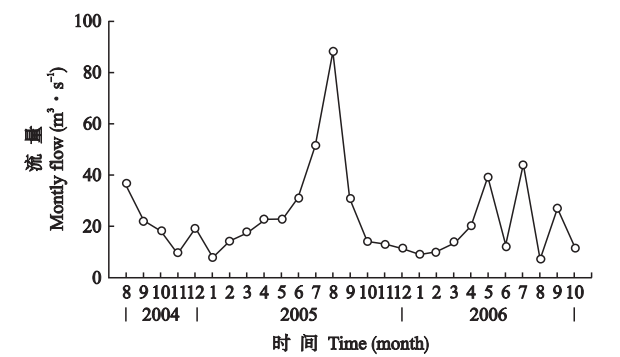


图 6 2004 年 8 月—2006 年 10 月香溪河上游的月均流量
Fig. 6 Monthly flow of Xiangxi River upstream from August 2004 to October 2006.

2.3.2 香溪河库湾的流量 考虑到流量对底泥的影响可能并非瞬时影响,因此,图 6 为 2004 年 8 月—2006 年 10 月间香溪河上游的月均流量数据。

比较流量与底泥中氮、磷含量的季节变化可知:磷元素受流量季节性变化的影响并不显著,原因是磷主要源于点源污染;总氮含量变化则与流量存在明显关系,夏秋季节(6—9 月)较高的流量可能是造成期间总氮含量较高的主要原因。2005 年 7、8 月,香溪河库湾流量非常大(图 6),若依据“总氮含量主要受上游来水量的影响,并且这种影响具有一定时滞性”的推测,则 2005 年 10 月样品中的总氮含量会增加,这一推测与图 3 结果一致,说明研究区总氮含量的季节变化受到流量季节性变化的显著影响,且该影响具一定时滞性。据此推测,2005 年后流量的相对增加也可能是总氮年际变化较显著的主要原因。

2.3.3 其他因素 底泥物质主要源于上层水体悬浮颗粒物质的沉积,因此,沉积率的高低在某种程度上决定了底泥中营养物质的水平。邵美玲^[16]于 2005 年 11 月以及 2006 年 1、4 和 7 月对香溪河库湾沉积率进行测定的结果表明,总颗粒物的沉积率呈“中间高,两头低”的分布,且以 XX02 和 XX07 样点的沉积率最低,与本研究底泥中总氮、总磷含量的

空间分布几乎完全一致,说明底泥中总氮、总磷含量受水体中悬浮颗粒物含量以及沉积过程的影响较大。此外,底泥氮、磷含量的空间分布特征与库湾水华暴发时叶绿素 a 浓度的分布也具有较强的相关性。韩新芹等^[20]研究表明,香溪河库湾春季水华暴发时,库湾中部区域叶绿素 a 含量较高,而河口以及库尾位置的叶绿素 a 浓度偏低。由此推测,水华的暴发对于底泥 TN、TP 含量具有一定的贡献。然而,水华暴发对底泥氮、磷含量的影响过程却十分复杂,一方面,水华过后,藻类残体的大量沉积成为底泥中氮、磷的一个重要来源^[21],使底泥中氮、磷含量增加;另一方面,藻类沉积又为底栖动物提供了丰富的饵料^[22],使底栖动物的代谢活动加强,从而加强了对含氮、磷有机质的分解^[23],导致氮、磷更易向水体中释放。因此,水华暴发对水生态系统中氮、磷的生物地化循环过程具有重要影响。

影响底泥中氮、磷含量的因素还有很多,如水体流速、底泥 pH、氧化还原电位以及底栖动物排泄等^[24-26],这些因素的时空变化都可能是氮、磷含量分布的影响因子。

2.4 不同湖泊水库底泥中氮、磷含量的对比
对渤海湾沉积物分布的研究表明,湾尾位置的氮、磷含量较高^[27];对 Baltic Sea 东芬兰库湾的研究也表明,离河口越远,沉积率越高,底泥中氮、磷含量也越高^[28]。香溪河库湾在地形特征上与以上研究不同,它是一个两端开口的库湾,相当于有 2 个河口:上游的香溪河溪流与库湾的交错区,下游香溪河库湾与长江的交错区。从河口数量考虑,本研究区底泥中氮、磷含量的分布与其他研究结果一致,即远离河口区域的氮、磷含量较高,主要原因可能是受水动力条件的干扰所致^[13]。

表 1 中对比了国内外一些营养程度与香溪河库湾较为类似的湖泊水库。从中可见,香溪河库湾底泥中氮污染并不十分严重,而磷污染则处于所比较湖泊的中上水平,说明香溪河库湾周边含磷废水的排

表 1 香溪河库湾与其他水体底泥中总氮、总磷含量的比较
Tab. 1 Comparison of TN and TP contents among Xiangxi Bay and some other water bodies

地点 Site	总氮含量 TN content (mg · g ⁻¹)	总磷含量 TP content (mg · g ⁻¹)	平均水深 Average water depth (m)	营养水平 Eutrophic level	文献 Reference
巢湖 Lake Chao	0.78	0.55	3.06	富营养 Eutrophic	[7]
芬兰湾 The Eastern Gulf of Finland	8.00	2.90	30.0	富营养 Eutrophic	[28]
洋水库 Yanghe Reservoir	2.13	0.74	5.70	富营养 Eutrophic	[17]
辽宁大伙房水库 Dahuofang Reservoir in Liaoning	3.44	0.80	12.0	中-富营养 Meso-eutrophic	[17]
香溪河库湾 Xiangxi Bay	0.99	0.92	31.0	富营养 Eutrophic	本研究 This study

放十分严重. 通过对比还可看出, 底泥中氮、磷含量水平并不能决定水体富营养水平, 因为各湖泊水库中影响底泥氮、磷吸附释放的因子不同, 因此底泥中氮、磷含量对上层水体的影响也不尽相同^[5].

3 结 论

香溪河库湾底泥中 TN 含量存在明显的空间和季节分布规律, 而 TP 含量的空间规律明显, 但季节变化不显著. TN、TP 含量的年际变化均达显著水平.

库湾底泥中 TN、TP 含量的空间分布总体上呈“中间高, 两头低”的分布规律, 主要是受到库湾内各区沉积率不同的影响. 中部区域水体相对稳定、沉积率较高, 因此造成底泥中氮、磷含量较高, 而位于库尾的样点(XX07), 其底泥中 TN 含量由于受水位波动的影响表现为时高时低.

由于 TN 主要源于面源污染, 而 TP 主要源于点源污染, 因此, TN 含量的季节变化受上游来水量季节变化的影响较显著, 表现出与流量变化相同的季节变化趋势, 而 TP 含量的季节波动则较平缓. 2005 年汛期香溪河上游来水量的增加可能是造成总氮含量年际变化较显著的主要原因之一.

利用底泥中 TN、TP 含量对香溪河库湾进行大致分区与利用底栖动物群落结构进行分区的结果对比表明, TN 含量由于易受外源输入的干扰, 不宜单独作为分区的标准, 而利用 TP 含量进行分区则相对较好. 但比较而言, 利用底栖动物这一相对稳定的生物因子作为分区标准能更真实地反映库湾长期的空间分区状态.

通过比较香溪河库湾与其他一些湖泊水库底泥中氮、磷含量水平可知, 香溪河库湾中氮污染并不十分严重, 而磷污染已达到所比较湖库的中上水平, 说明香溪河库湾受周边磷元素排放的影响较严重.

参考文献

- [1] Liu J-K (刘建康). Ecological Study on Lake Donghu. Beijing : Science Press , 1990 (in Chinese)
- [2] Kaller MD , Hartman KJ. Evidence of a threshold level of fine sediment accumulation for altering benthic macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia* , 2004 , **518** : 95–104
- [3] Li XG , Song JM , Yuan HM , *et al.* Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay sediments. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* , 2007 , **25** : 157–165
- [4] Xie L-Q (谢丽强) , Xie P (谢 平) , Tang H-J (唐汇娟). The concentration and dynamics of sediment phosphorus in various regions of Lake Donghu. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报) , 2001 , **25** (4) : 305–310 (in Chinese)
- [5] Teodoru CR , Friedl G , Friedrich J , *et al.* Spatial distribution and recent changes in carbon , nitrogen and phosphorus accumulation in sediments of the Black Sea. *Marine Chemistry* , 2007 , **105** : 52–69
- [6] Ali A , Reddy KR , DeBusk WF. Seasonal changes in sediment and water chemistry of a subtropical shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia* , 1988 , **159** : 159–167
- [7] Xu FL , Tao S , Dawson RW , *et al.* The distributions and effects of nutrients in the sediment of a shallow eutrophic Chinese lake. *Hydrobiologia* , 2003 , **492** : 85–93
- [8] Jorcin A , Nagueira MG. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment-water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Paranapanema River , South-east Brazil). *Lakes and Reservoirs : Research and Management* , 2005 , **10** : 1–12
- [9] Gashkina NA. Phosphorus distribution in bottom deposits of the Mozhaik Reservoir. *Water Resources* , 2002 , **29** : 319–326
- [10] Tang T (唐 涛) , Li D-F (黎道丰) , Pan W-B (潘文斌) , *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 2004 , **15** (1) : 141–144 (in Chinese)
- [11] Fu C-Y (付长营) , Tao M (陶 敏) , Fang T (方涛) , *et al.* Characters of phosphorus sorption in sediment of Xiangxi Bay , Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报) , 2006 , **30** (1) : 31–36 (in Chinese)
- [12] Cai Q-H (蔡庆华). Protocols for Standard Observation and Measurement on Aquatic Ecosystems. Beijing : China Environmental Science Press , 2007 (in Chinese)
- [13] Piña-Ochoa E , Alvares-Cobelas M , Rodrigo MA , *et al.* Nitrogen sedimentation in a lake affected by massive nitrogen inputs : Autochthonous versus allochthonous effects. *Freshwater Biology* , 2006 , **51** : 2228–2239
- [14] Vaalgamaa S , Conley DJ. Detecting environmental change in estuaries : Nutrient and heavy metal distributions in sediment cores in estuaries from the Gulf of Finland , Baltic Sea. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , 2008 , **76** : 45–56
- [15] Wetzel RG. Limnology : Lake and River Ecosystems. 3rd Ed. San Diego : Academic Press , 2001
- [16] Shao M-L (邵美玲). Ecological Study on Benthic Macroinvertebrates of the Reservoir Aggregate : Hubei Portion of Three Gorges Reservoir and Xiangxi River Basin as Examples. PhD Thesis. Beijing : Graduate University of the Chinese Academy of Sciences , 2008 (in Chinese)
- [17] Li F-B (李凤彬) , Dai L (代 礼) , Xiao Y (肖 勇) , *et al.* Study on the impact of the sediment to trophic state in Yanghe Reservoir. *Water Resources Protection* (水资源保护) , 2003 (3) : 31–34 (in Chinese)
- [18] Li F-Q (李凤清) , Ye L (叶 麟) , Liu R-Q (刘瑞秋) , *et al.* Dynamics of the main nutrients input to

- Xiangxi Bay of the Three-Gorge Reservoir. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 1-7 (in Chinese)
- [19] Ye L (叶 麟), Xu Y-Y (徐耀阳), Cai Q-H (蔡庆华). The spatial and temporal distribution of nitrate and phosphate in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir Region during the spring bloom period. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2006, **30**(1): 75-79 (in Chinese)
- [20] Han X-Q (韩新芹), Ye L (叶 麟), Xu Y-Y (徐耀阳), *et al.* Analysis of the spatial and temporal changes of chlorophyll a concentration in Xiangxi Bay in spring and its impact factors. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2006, **30**(1): 89-94 (in Chinese)
- [21] Goedkoop W, Petersson K. Seasonal changes in sediment phosphorus forms in relation to sedimentation and benthic bacterial biomass in Lake Erken. *Hydrobiologia*, 2000, **431**: 41-50
- [22] Goedkoop W, Johnson RK. Pelagic-benthic coupling profundal benthic community response to spring diatom deposition in mesotrophic Lake Erken. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**: 636-647
- [23] Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems. *BioScience*, 1999, **49**: 119-127
- [24] Heidenreich M, Kleeberg A. Phosphorus-binding in iron-rich sediments of a shallow Reservoir: Spatial characterization based on sonar data. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 147-153
- [25] Devine JA, Vanni MJ. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2002, **47**: 1107-1121
- [26] Han S-S (韩沙沙), Wen M-Y (温茂琰). Phosphorus release and affecting factors in the sediments of eutrophic water. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(2): 98-101 (in Chinese)
- [27] Zhao Z-M (赵志梅), Zhang L (张 雷), Zheng B-H (郑丙辉), *et al.* Spatial distribution of nitrogen and phosphorus in core sediments of Bohai Bay. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2005, **33**(4): 107-111 (in Chinese)
- [28] Lehtoranta J, Pitkanen H, Sandman O. Sediment accumulation of nutrients (N, P) in the Eastern Gulf of Finland (Baltic Sea). *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, **99**: 477-486

作者简介 张 敏,女,1986年生,硕士研究生.主要从事淡水生态学研究,发表论文2篇. E-mail: zhangmin01@ihb.ac.cn

责任编辑 杨 弘
