J. Lake Sci.(湖泊科学), 2007, **19**(1):70 - 76
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
© 2007 by *Journal of Lake Sciences*

三峡水库成库后水体中 COD_{Mn}、BOD_5 空间变化*

张 晟[1],李崇明[1],吕平毓[2],高吉喜[3],高群杰[1],宋 丹[1]
(1:重庆市环境科学研究院,重庆 400020)
(2:长江上游水环境监测中心,重庆 400020)
(3:中国环境科学研究院,北京 100012)

摘 要:根据2004年2、5、8月,三峡水库成库后6个水平断面、4个垂直断面采样分析,对水体水质参数、DO以及 COD_{Mn} 和 BOD_5 的水平分布和垂直分布进行了研究. 研究结果表明,成库后 BOD_5 达到国家地表水Ⅰ类标准,COD_{Mn} 不同季节变化较大,水质范围在Ⅱ-Ⅳ类标准. BOD_5、COD_{Mn} 变化范围分别在0.1-1.3 mg/L,1.8-6.3 mg/L,受三峡水库成库的影响,水平分布上,DO、COD_{Mn}、BOD_5 在成库区域低于上游区;COD_{Mn} 含量丰水期>平水期>枯水期;BOD_5 浓度降低主要与污染物停留时间变长有关,COD_{Mn} 主要是与泥沙沉积有关. 垂直分布上,污染物3个层次变化不显著,未出现分层现象. 枯水期、平水期、丰水期颗粒态含量占总 COD_{Mn} 范围分别为5.5%-27.3%,9.1%-28.8%,48.6%-78.3%. 三峡水库对 COD_{Mn}、BOD_5 有净化作用,枯水期成库区域通量 COD_{Mn}、BOD_5 比上游区降低44%、76%,平水期降低13.5%,32%,丰水期降低31.8%、19.1%. 各采样站点有机物通量和流量有显著的相关性. 大宁河库湾受浮游藻类生长的影响,DO饱和率高于干流库区.
关键词:三峡水库;COD_{Mn};BOD_5;空间变化

Spatial variation of BOD_5 and COD_{Mn} in the Three Gorges Reservoir

ZHANG Sheng[1], LI Chongming[1], LV Pingyu[2], Gao Jixi[3], GAO Qunjie[1] & SONG Dan[1]
(1: *Chongqing Academy of Environmental Science*, *Chongqing* 400020, *P. R China*)
(2: *Water Environment Monitoring Center for Upper Yangtze River*, *Chongqing* 400716, *P. R China*)
(3: *Chinese Research Academy of Environment Science*, *Beijing* 100012, *P. R China*)

Abstract: Through sampling and analysis of 6 horizontal stations and 4 vertical stations in the Three Gorges area, the spatial variation of water quality parameter, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD_5) and permenganate index of oxygen demand (COD_{Mn}) were revealed in Feb., May and Aug., 2004. Concentration of BOD_5 were retained low level which preceded surface water standard Ⅰ and COD_{Mn} changed from Ⅱ-Ⅳ in diverse season. The variation of BOD_5 and COD_{Mn} ranged from 0.1-1.3 mg/L and 1.8-6.3 mg/L respectively. Horizontal concentration of DO, BOD_5 and COD_{Mn} in reservoir area were lower than upstream area. In flood season, concentration of COD_{Mn} were higher than normal and dry season. In reservoir area, the lower concentration of BOD_5 were due to long retension time and COD due to particulate deposition. The vertical variation of BOD_5 and COD_{Mn} were not notable and organic pollutant were not layered. Particle COD_{Mn} rate in total COD_{Mn} in dry, normal and flood season ranged from 5.5%-27.3%, 9.1%-28.8% and 48.6%-78.3% respectively. Water quality was improved when passing through reservoir. Flux of COD_{Mn} and BOD_5 decreased 44% and 76% in dry season, 13.5% and 32% in normal season, 31.8% and 19.1% in flood season respectively. There was significant correlation between organic pollutant load and water discharge. Because of algae growth, the saturated rate of DO in Daning river bay is higher than in the main stream of reservoir.
Keywords: Three Gorges Reservoir; COD_{Mn}; BOD_5; spatial variation

---

* 重庆市自然科学基金资助项目(2004BB7075,2005BB7239)和中-意合作项目(三峡库区生态环境调查及评价)联合资助. 2006-03-03收稿;2006-06-16收修改稿. 张晟,男,1971年生,博士,副研究员;E-mail:shengzsts@126.com.

长江三峡大型水利枢纽工程的兴建,使长江三峡库区段由天然河流变为河道型水库. 水库蓄水后,库区水质如何变化一直成为国内外广泛关注的问题. 在三峡工程项目环境影响评价论证阶段,国内外专家已对三峡工程可能带来的环境问题进行了详细的调查研究与预测[1,2],取得了丰富的研究成果,但预测结果与成库后实际状况的符合程度如何,并未得到验证. 三峡水库蓄水后,对部分受成库影响的次级河流和干流库首,从富营养化角度如 N、P 等营养盐因子分布研究较多[3-7],而对 DO 和有机污染物分布变化变化报道较少[8,9]. 三峡库区沿岸大部分城镇生活污水未经处理直排入水库[10],并且三峡库区水土流失严重[11],农田不合理施肥等原因造成了严重的面源污染,其中 COD_{Mn} 和 BODs(以下简称 COD 和 BOD)是主要排放的污染物[12]. 由于天然河流和水库的水体流态有显著不同,必然影响污染物在水体中的迁移和分布变化,本文在三峡水库成库后,对 DO 及有机污染物(COD、BOD)进行了不同水期分布的研究,以探求三峡水库蓄水后,水体 DO 和有机污染物在水库上游区、水库区和次级河流库湾的空间变化规律,为三峡水库水污染防治提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

在三峡水库设置 6 个水平断面朱沱(1#)、寸滩(2#)、长寿(3#)、涪陵(4#)、万州(5#)、奉节(6#)和 4 个垂直断面(朱沱、寸滩、涪陵、万州). 139 m 蓄水,朱沱、寸滩、长寿和涪陵为水库上游区,万州和奉节为已成库区. 采样点位设置见图 1. 每个水平断面均设置 3 个测点(左、中、右),在水面下 0.5 m 处采集样品;垂直断面分别设置左、中、右 3 条垂线,每一垂线按其水深又设置 3 个测点(水面下 0.5 m 处、0.6 倍水深、0.8 倍水深),每个垂直断面共 9 个测点采集样品,在垂直断面同时进行水文指标测量. 样品采集时间分别为:枯水期(2 月)、平水期(5 月)和丰水期(8 月),每一水期各采集样品 2 次.

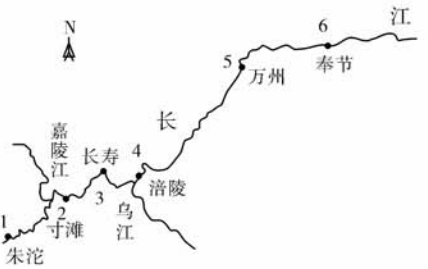

图 1 样品采集点位

Fig. 1 Investigation stations in the Three Gorges Area

1.2 样品分析方法

BOD 采用不经稀释的 5 日生化直接培养法,COD 采用酸性高锰酸钾法测定[13],其中可溶态 COD 为水样过 0.45 μm 滤膜后分析. 所有样品在 4 h 内进行.

1.3 数据处理

数据处理及分析计算在 Excel 上进行,其中颗粒态 COD = COD - 可溶态 COD. 文中除注明颗粒态和溶解态的 COD 外,均为水体中总 COD.

2 结果与讨论

2.1 干流水文水质参数变化

水文、水质参数不同季节变化见图 2. 水体表层水温,枯水期范围在 9.4 - 11.6℃,平水期范围在 21.0 - 23.0℃,丰水期范围在 24.2 - 26.2℃. 各采样站点之间在相同水期变幅较小. pH 在 7.8 - 8.2 之间,全年在各采样点位变化较小,为中偏碱性水体. 三峡大坝坝前为维持在同一水位,随着上游来水量调节出库流量,水体流速枯水期在成库区的万州比上游区的涪陵降低约 80%,平水期降低 61%,丰水期降低 51%,表明三峡水库成库后,水体流速显著变缓. 其中成库区万州点位枯、平、丰水期的流速分别为 0.15 m/s、0.52 m/s 和 0.89 m/s,枯水期流速显著小于平水期和丰水期. 受水温的影响,各测点枯水期 DO 含量高于平水期和丰水期,平水期和丰水期 DO 差异较小. 水库上游区 DO 含量饱和率均大于 90%. 成库区 DO 含量饱和率均小于 90%,其中平水期饱和率最低约为 80%. 影响水体中 DO 含量的主要因素有四个,曝气作用、光合作用、呼吸作用和有机物的氧化降解作用. 其中曝气作用和光合作用是增加氧的作用,后两者为减少溶解氧的作用,这四种作用构成了水体中氧的平衡. 成库后,三峡水库水体透明度增加,有利于水生生物特别是藻类的生长,光合作用增强,有利于溶解氧增加. 但同时水体流速减缓,曝气作用减弱,溶解氧降低,由于水中溶解氧来源主要靠曝气作用. 因此,成库区域 DO 含量虽然依然较高,但比上游区有较明显的降低. 与 2003 年 9

月成库初期比较,由于水库系统处于调整时期,成库初期 DO 含量变化在上游和水库区并无明显差别[14]. 成库后水体流速的减缓,导致水体复氧能力降低,水库区平均溶解氧浓度呈下降趋势,与成库前的预测结论较一致[15]. 同时间接也证明了在本研究调查期间水库系统可能趋近相对稳定时期.

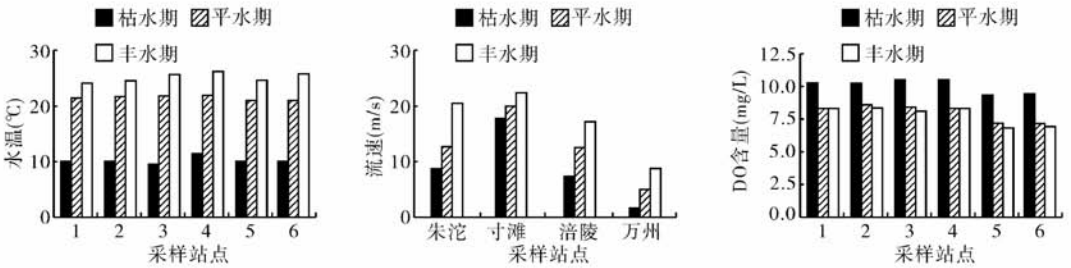

图 2 水文、水质参数变化

Fig. 2 Changes of hydrology and water quality parameters

2.2 干流 BOD、COD 变化

2.2.1 BOD、COD 水平分布　在各采样站点,COD 含量均为丰水期 > 平水期 > 枯水期,枯水期、平水期、丰水期 COD 含量范围分别在 1.8 – 2.7 mg/L,2.0 – 3.2 mg/L,2.6 – 6.3 mg/L. 按地表水环境质量标准(GB3838 – 2002),在枯水期和平水期各采样点均能达到Ⅱ类标准,丰水期的上游区只能达到Ⅲ、Ⅳ类标准. COD 的水平分布为成库区(5#、6#)小于上游区(1#、2#、3#、4#). 丰水期和平水期 BOD 在同一采样点位浓度变化差异不大,枯水期浓度最低. 枯水期、平水期、丰水期 BOD 含量范围分别在 0.1 – 1.1 mg/L,0.8 – 1.3 mg/L,0.8 – 1.2 mg/L,均优于国家Ⅰ类水质标准. 与 COD 的水平分布近似,成库区小于上游区. COD、BOD 的水平分布特征表明,成库区有机物含量的降低可能与受蓄水的影响有关.

BOD、COD 均为具有自净降解能力的有机耗氧类污染物质,COD 和 BOD 动态降解变化满足一级反应动力学规律[7]:

$$P_{(t)} = P_{(0)}e^{-kt},$$

上式变形得:

$$P_{(t)}/P_{(0)} = e^{-kt}, 1 - P_{(t)}/P_{(0)} = 1 - e^{-kt},$$

式中,$1 - P_{(t)}/P_{(0)}$ 为污染物降低率;$P_{(t)}$ 为 t 时的污染物浓度(mg/L);$P_{(0)}$ 为起始时污染物浓度(mg/L);k 为降解速率;t 为滞留时间. 从上试分析,COD、BOD 浓度降低率受两方面影响. 一方面成库后,由于水体平均流速比建库前小,单位时间内污染物质自净降解速率随着水流紊动强度的减弱而减弱,污染物降低率减小;另一方面污染物质在库区滞留时间延长,污染物降低率变大. 污染物降低率的大小决定于正负两方面影响优势程度. 在成库区流速和污染物降解速率丰水期 > 平水期 > 枯水期,而水体滞留时间枯水期 > 平水期 > 丰水期. 不同水期污染物在上游区和成库区浓度变化比较表明,139 m 成库时 BOD 浓度变化可能受水体滞留时间增加的影响远大于降解速率降低影响,表现为枯水期成库区与上游区均值比较下降幅度最大约为 80%,平水期和丰水期全程略有降低;但成库区与上游区比较 COD 在丰水期降低最大约为 45%,枯水期和平水期略有降低,COD 浓度变化可能受降解速率的影响大于水体滞留时间影响或与其它因素有关. 与三峡水库成库前 1998、1999 年丰水期的研究结果比较,BOD 值变化不大,COD 值偏高. BOD、COD 的水平分布也有明显差异,在成库前水平分布无明显规律变化[16].

2.2.2 不同物理形态 COD 含量变化　不同物理形态 COD 含量变化见表 1. 颗粒态 COD 含量丰水期 > 平水期 > 枯水期,颗粒态 COD 在不同水期含量变化与 COD 一致. 丰水期由于受暴雨的影响,水土流失较严重导致颗粒态 COD 增高明显,部分采样站点(1#)颗粒态 COD 比枯水期增高 19 倍以上. 枯水期、平水期、丰水期颗粒态含量占 COD 范围分别为 5.5% – 27.3%,9.1% – 28.8%,48.6% – 78.3%. 成库区由于流速减缓,部分颗粒态 COD 在采样点前已经沉积,在不同水期颗粒态 COD 含量占 COD 的比例均显著小于上游区. 可溶态 COD 含量平水期 > 丰水期 > 枯水期,从相同水期的可溶态 COD 含量分析,与 COD 含量变化不同,成库区溶解性 COD 与上游区比较变化不大. 表明 COD 含量在成库区的减少,主要的是与三峡水库成库后水体流速减缓,水体中颗粒态 COD 的沉积有关. 将 6 个断面 COD 与 SS 作相关性分析,COD 与 SS 呈极显著正相关

关系($R^2=0.7146$,$P<0.01$),也表明三峡库区水体中 COD 含量受 SS 的影响.

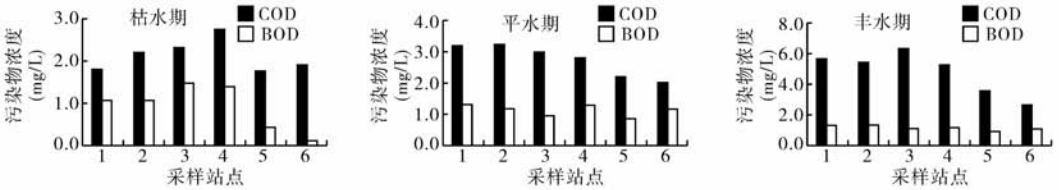

图 3 不同水期 COD、BOD 沿程分布

Fig. 3 Distribution of COD and BOD in diverse seasons along the river

表 1 不同形态 COD 含量变化(单位:mg/L)

Tab. 1 Concentration change of diverse forms COD (mg/L)

	朱沱			寸滩			涪陵			万州		
	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期
COD	1.8	3.2	7.8	2.2	3.2	5.4	2.7	2.8	5.2	1.8	2.2	3.5
可溶 COD	1.5	2.5	2.0	1.6	2.3	1.9	2.1	2.2	1.8	1.7	2.0	1.8
颗粒 COD	0.3	0.7	5.8	0.6	0.9	3.5	0.6	0.6	3.4	0.1	0.2	1.7

2.2.3 BOD、COD 垂直分布　BOD、COD 垂直分布变化见表 2、3. 将不同季节同一采样断面的上层、中层和下层分别作 t 检验(成对双样本分析),COD 和 BOD 含量在同一采样断面的垂直方向上分布无显著差别. 将上游区(均值)和成库区(均值)3 个层次 COD 和 BOD 作 t 检验,成库区 COD 含量在 3 个层次均远低于上游区,数据有显著差异;枯水期在水库区 BOD 显著小于上游区,平水期和丰水期无显著差异. COD、BOD 的垂直分布特征表明,在三峡水库 139 m 蓄水期间,上游区由于未受成库的影响水体有较大流速,污染物混合较均匀. 而成库区可能是因为采样点设置距离库尾较远,较大的颗粒态污染物在此前已经沉积,其它悬移物质在库区水体流态条件下分布较均匀,能够保证各层次污染物的均匀混合有关. COD 和 BOD 的垂直分布特征与营养盐垂直分布近似[11],目前在水库区还未出现分层现象.

表 2 BOD 垂直分布(单位:mg/L)

Tab. 2 Vertical distribution of BOD (mg/L)

	朱沱			寸滩			涪陵			万州		
	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期
上层	1.1	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.4	1.3	1.0	0.2	0.8	0.8
中层	1.2	1.1	1.1	1.3	0.9	1.0	1.7	1.1	1.1	0.1	1.0	1.1
下层	0.9	0.9	1.2	0.9	1.2	1.2	1.5	1.0	1.2	0.3	1.0	0.9

表 3 COD 垂直分布(单位:mg/L)

Tab. 3 Vertical distribution of COD (mg/L)

	朱沱			寸滩			涪陵			万州		
	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期
上层	1.8	3.2	7.8	2.2	3.2	5.4	2.6	2.8	5.2	1.8	2.2	3.5
中层	1.9	3.2	7.8	2.2	3.2	5.2	2.7	2.9	5.1	1.7	2.1	3.4
下层	2.0	3.2	7.6	2.1	3.2	5.7	2.6	3.0	4.9	2.0	2.0	3.4

表4 不同水期 BOD、COD 通量(单位:kg/s)

Tab.4 Fluxes of COD and BOD in diverse seasons

	枯水期		平水期		丰水期	
	COD	BOD	COD	BOD	COD	BOD
朱沱	5.13	3.14	12.6	5.14	89.6	19.2
寸滩	7.41	3.71	18.4	6.34	100.4	22.3
涪陵	12.7	6.59	22.9	10.6	111.8	21.5
万州	7.06	1.57	19.8	7.18	76.3	17.4

2.3 干流 BOD、COD 通量变化

根据2004年不同水期各采样站点径流量和有机物浓度,计算各站点有机物通量. 4个站点有机物通量见表4. 从不同水期通量比较,丰水期各采样站点通量远大于平水期和枯水期. 由于嘉陵江、乌江以及其它次级河流不断汇入,上游区有机污染物通量沿水流方向各站点逐渐增加. 在成库区又有明显降低,枯水期成库区 COD、BOD 通量分别比上游区降低44%、76%,平水期降低13.5%,32%,丰水期降低31.8%、19.1%. 对葛洲坝的研究表明,当 COD、BOD 等污染物流经水库,通过沉淀、净化和被生物利用等作用污染负荷明显减少[16]. 但结合 BOD 和不同形态 COD 浓度分布分析,三峡水库 BOD 污染负荷明显减少主要靠自然降解净化达到,COD 负荷的降低主要与颗粒态 COD 沉积有关. 因此对水库的泥沙沉积、底质环境的变化应该予以重视.

根据水文条件的不同,分别对成库区、上游区2组径流量和有机物通量作相关分析. 与长江三峡库区段水体中部分重金属和营养盐一样[17,18],COD、BOD 通量与长江干流径流量在99%置性度水平上呈显著相关关系,COD、BOD 通量与长江干流径流量相关关系见图4.

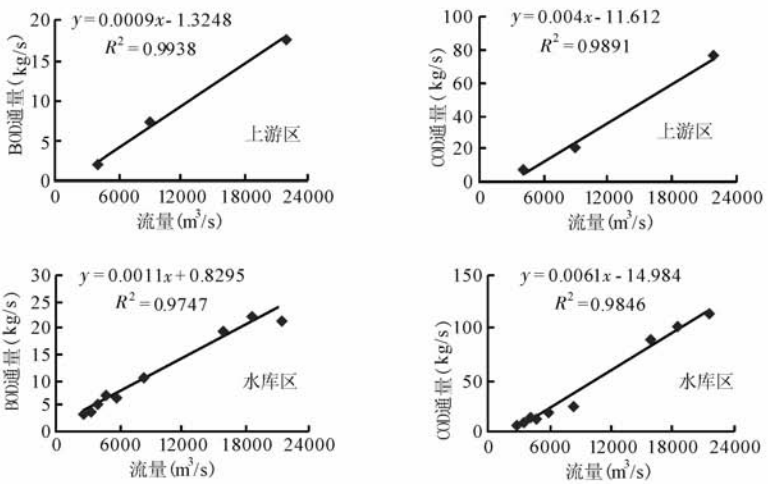

图4 流量与有机污染物通量关系

Fig.4 Correlation of discharge and organic pollutant flux

2.4 支流 DO、BOD、COD 变化

受三峡水库成库影响的大宁河库湾在不同季节 DO、COD、BOD 变化见表5. 枯水期、平水期、丰水期颗粒 COD 占 COD 比例分别为9.5%、25%和30%,由于大宁河流域植被覆盖率较高,水土流失状况相对较轻,水体中颗粒 COD 占 COD 的比例在容易发生水土流失状况的丰水期远小于干流库区. BOD 含量季节变化和干流水库区一致,在枯水期远低于平水期和丰水期. 三峡水库成库后对部分支流的回水区 DO 及 N、P 等的分布产生了影响[3-6]. 由于受干流回水顶托的影响,支流回水区水体流速缓慢,形成了有利于藻类生长的水文条件,由于藻类大量繁殖,浮游植物在光合作用中释放氧,增加了水体中 DO 浓度[19]. 对三峡成库成库后香溪河研究表明[9],叶绿素 a 浓度与 DO 含量之间存在显著正相关关系. 大宁河 DO 含量饱和率在枯水期、平水期、丰水期分别为85%、87%和104%,高于干流库区,也可能与大宁河库湾藻类生长有关,其水体中叶绿素 a 含量高于干流库区. 由于在样品采集时,不是大宁河发生严重富营养化时期,在本研究中未发现 DO 饱和率过高的现象. 其它研究显示[20],大宁河水体成库后发生富营养化期间,DO 饱和率曾达到170%左右.

表 5 不同季节大宁河 DO,COD、BOD 变化(单位:mg/L)

Tab. 5 The change of DO,COD and BOD of Daning river in diverse seasons

	COD	可溶 COD	颗粒 COD	BOD	DO	水温(℃)
枯水期	2.1	1.9	0.2	0.2	9.6	10.0
平水期	2.4	1.8	0.6	1.1	7.4	24.0
丰水期	2.0	1.4	0.6	1.1	7.9	30.0

三峡水库 139 m 蓄水后,对 DO 和有机污染物的分布有影响,成库区含量均低于上游区. 随着 2006 年 156 m,2009 年 175 m 蓄水,水体流速进一步减缓,更有利于 BOD 的降解,但颗粒态 COD 的沉积将更加严重,在干流成库区 DO 及有机污染物的浓度可能将进一步降低, DO 含量的降低对浮游动植物和鱼类生长的影响程度如何,应该引起注意. 同时部分受成库影响的次级河流库湾,由于水体富营养化,DO 含量可能远超过正常值,对次级河流富营养化问题应加强研究.

3 结语

三峡水库 139 m 成库后,水体中 BOD 含量较低,达到国家地表水Ⅰ类标准,COD 在不同水期变化较大,达到Ⅱ-Ⅳ类水质标准. 成库后 DO、COD 和 BOD 水平分布有明显特征,成库区含量低于上游区. 其中 DO 含量的降低与成库后水体流速变缓,水体复氧能力减弱有关. 同一采样站点 COD 和 BOD 的垂直分布无明显差异,有机污染物未出现分层现象. 丰水期各采样站点污染物通量远大于平水期和枯水期,上游区和成库区的流量与 BOD、COD 通量有显著相关性. 三峡工程对库区水体 COD、BOD 有有利影响,水库对水体中 COD 和 BOD 有净化作用,但净化机制不同,BOD 主要靠自然降解净化,而 COD 主要靠泥沙沉积净化. 受成库影响的次级河流主要受水体富营养化影响,DO 含量有上升趋势.

4 参考文献

[1] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究. 武汉:湖北科学技术出版社,1997:32-33.

[2] 李文通,覃瑞坤,曹淑君等. 三峡工程对三峡库区水体有机物污染影响的评价及其对策. 见:中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京:科学出版社,1987:779-788.

[3] 曹　明,蔡庆华,刘瑞秋等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究. 水生生物学报,2006,**30**(1):12-19.

[4] 方　涛,付长营,敖鸿毅等. 三峡蓄水前后香溪河氮磷污染状况研究. 水生生物学报, 2006,**30**(1):26-30.

[5] 况琪军,胡征宇,周广杰等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005,**29**(4):353-358.

[6] 幸　梅,鲍　雷. 三峡蓄水前后长江部分江段水质变化. 环境与健康杂志. 2004,**21**(5):308-310.

[7] 胡征宇,蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生生态系统动态的初步研究. 水生生物学报,2006,**30**(1):1-6.

[8] 付长营,陶　敏,方　涛等. 三峡水库香溪河沉积物对磷的吸附特征研究. 水生生物学报,2006,**30**(1):31-36.

[9] 韩新芹,叶　麟,徐耀阳等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006,**30**(1):89-94.

[10] 方子云. 长江流域水环境的主要问题、原因及对策. 长江流域资源与环境,1997,**6**(4):346-349.

[11] 张　晟,刘景红,张全宁,等. 三峡水库成库初期氮、磷分布特征. 水土保持学报,2005,**19**(4):123-126.

[12] 林芳荣,李学灵,吴亚蒂. 面源污染管理与控制手册. 广州:科学普及出版社广州分社,1987:1-8.

[13] 魏复盛主编. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京:中国环境科学出版社,2002:123-165.
[14] 张 晟,刘景红,黎莉莉等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征. 环境科学,2006,**27**(6):19-24.
[15] 黄时达,顾润南,孙洁华等. 三峡水库水质管理目标与水污染防治对策. 见:中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京:科学出版社,1987:841-856.
[16] 徐开钦,林诚二,牧秀明等. 长江干流主要营养盐含量的变化特征. 地理学报,2004,**59**(1):118-124.
[17] 黄时达,徐小清,鲁生业等. 三峡工程与环境污染及人群健康. 北京:科学出版社,1994:65-75.
[18] 沈志良. 长江干流营养盐通量的初步研究. 海洋与湖沼,1997,**28**(5):522-528.
[19] 刘镇盛,王春生,倪建宇等. 抚仙湖叶绿素a的生态分布特征. 生态学报,2003,**23**(9):1773-1780.
[20] 钟成华,幸治国,赵文谦等. 三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价. 灌溉排水学报,2004,**23**(3):20-23.