J. Lake Sci.(湖泊科学),2023,**35**(2):411-422
DOI 10.18307/2023.0204
© 2023 by *Journal of Lake Sciences*

三峡水库蓄水后库区水沙变化及其生态环境响应特征*

林　莉[1,2],董　磊[1,2],潘　雄[1,2],杨文俊[3**]
(1:长江科学院流域水环境研究所,武汉 430010)
(2:长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,武汉 430010)
(3:长江科学院院长办公室,武汉 430010)

摘　要: 三峡水库举世瞩目,是长江保护与治理的关键性枢纽工程,水库自2003年蓄水运行后库区水沙条件均发生了显著改变,对库区水生态环境产生了深远影响。本文系统综述了三峡水库蓄水运行后库区的水流动力特性和泥沙淤积特性,总结了蓄水后水库的新水沙运动情况;从水库蓄水运行后水质参数特征,营养物质、重金属和典型有毒有机污染物的赋存特征等方面,分析了三峡水库库区新水沙变化条件下的水环境响应特征;基于水库蓄水前后浮游植物、底栖动物等重点生物群落的现存量和群落特征变化规律,探索了三峡水库新水沙变化条件下库区的水生态响应特征;最后对未来三峡水库运行下的水生态环境效应研究提出展望,本文可为三峡水库水生态环境保护科学研究和管理提供新的认识和决策参考。
关键词: 三峡水库;水沙变化;生态环境;营养物质;污染物质;生物群落

Water and sediment changes and the eco-environment response characteristics in Three Gorges Reservoir after the impoundment*

Lin Li[1,2], Dong Lei[1,2], Pan Xiong[1,2] & Yang Wenjun[3**]
(1: *Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan* 430010, *P.R. China*)
(2: *Hubei Provincial Key Lab of Basin Water Resource and Eco-Environmental Science, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan* 430010, *P.R.China*)
(3: *Administration Office, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan* 430010, *P.R.China*)

Abstract: The water-sediment conditions in the reservoir area had changed significantly after the operation of the Three Gorges Reservoir, which has had a profound impact on the water ecology of the reservoir area. In this paper, the dynamic characteristics of the water flow and sedimentation in the reservoir area before and after the operation of the Three Gorges Reservoir were summarized, and the changes in the water-sedimentation conditions after water storage were analyzed. The water environmental response characteristics under this newly formed water-sediment conditions were evaluated in terms of changes in water quality parameters, nutrients, heavy metals, and toxic organic pollutants after the reservoir storage. The ecological response characteristics of aquatic biotas were also explored based on the community changes of phytoplankton, benthic fauna and other key biological communities before and after the reservoir storage. Finally, the outlook for future research on the water ecological environmental effects of the Three Gorges Reservoir was proposed. This paper can provide support for the water ecological environment protection of the Three Gorges Reservoir.
Keywords: Three George Reservoir; water and sediment change; ecological environment effects; nutrients; pollutants; biotic community

---

* 2021-12-24 收稿;2022-06-07 收修改稿。
国家自然科学基金项目(52179057,52130903)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021480/SH)和武汉市应用基础前沿专项(2020020601012285)联合资助。
** 通信作者;E-mail:yangwj@mail.crsri.cn。

河流两岸自古以来即为人类繁衍生息之所,但极端水沙过程也给人类带来水害。通过修建水利工程在某种程度上改变河流自然状态和过程,确保防洪和供水安全,可以变水害为水利。三峡水库举世瞩目,是长江保护与治理的关键性枢纽工程,水库的建设运行必将改变天然河道水沙条件与河床形态的相对平衡状态,水流运动特性发生显著改变,泥沙淤积为其必然。泥沙与水流是河流生源物质和污染物质的主要载体,来自陆面的生源物质和污染物质容易附着于泥沙颗粒进入水体,水沙行为的改变将显著影响这些物质在水库中的赋存状态和环境行为。蓄水后水沙运动规律的变化也会对水库中的生物群落产生影响,造成生物群落的现存量和组成特征发生改变。

三峡水库蓄水后入库泥沙大幅减小、库区出现极细泥沙淤积等状况,这些都是论证阶段未曾考虑到的新认知;同时周边经济社会发展对库区水生态环境安全产生了显著影响。三峡水库作为我国重要的战略淡水资源库和生态环境敏感区,只有正确认识蓄水后库区水沙变化条件下的生态环境动态响应特征,才能妥善处理"盆"与"水"的关系,切实将三峡水库建设成长江大保护的重要生态工程。

本文简要综述了三峡水库蓄水运行前后库区的水流动力特性和泥沙淤积特性,总结了蓄水后库区水沙的变化情况;从水库蓄水前后库区水质参数差异,营养物质、重金属和有毒有机污染物的赋存特征等方面,分析了水库库区水沙变化条件下的水环境响应特征;基于水库蓄水后浮游植物、底栖动物等重点生物群落的现存量和群落特征变化规律,探索了库区水沙变化条件下的水生态响应特征;最后,对未来三峡水库运行下的水生态环境效应研究提出展望,为三峡水库水生态环境保护提供参考。

1 三峡水库蓄水后库区水沙变化情况

1.1 三峡水库蓄水后库区水流动力特性

三峡工程经历了 135 m 蓄水(2003 年)、156 m 蓄水(2006 年)和 175 m 试验性蓄水(2008－2013 年)3 个阶段,且 2010－2021 年已连续 12 年实现 175 m 的设计目标最高水位。水库运行后,采用了枯期蓄水至 175 m、汛期泄洪至 145 m 的模式进行周期性蓄水。三峡水库 175 m 试验性蓄水后,回水末端上延至江津附近(距大坝约 660 km),变动回水区为江津至涪陵段,长约 173.4 km,占库区总长度的 26.3%;常年回水区为涪陵至大坝段,长约 486.5 km,占库区总长度的 73.7%。常年回水区受蓄水影响最大,水流趋缓,水库水体可在坝前滞留 77 d,干流水体断面平均流速由原来的 2 m/s 下降到 0.17 m/s,支流库湾水体流速也由蓄水前的 1~3 m/s 下降到 0.05 m/s,处于准静止状态[1-2]。库区江段水位较蓄水前明显抬高,其中近坝水域水位抬高约 90 m,万州、涪陵江段则分别抬高约 40 和 10 m。蓄水后,水库汛期水位变化幅度也显著降低,年内最大变幅不超过 30 m,而蓄水前的水位日内涨幅可达 17 m,年内水位变幅最大则可到 50 m 左右[3]。

水深的沿程增大改变了库区内的水温分布,水深较深的水域内部的垂直循环受阻,出现温跃层[4-5]。水流结构包括流速分布、紊动分布等均将重新调整。作为典型的河道型水库,三峡水库库区水流具有明显的壅水型非均匀流特征,各断面流速分布规律基本一致,纵向流速较大,且基本有沿程减小的趋势,横向流速与垂向流速较小且大致相当[6]。库区纵向流速沿垂线分布大致沿水深呈对数分布;横向流速受地形影响明显,除顺直且流速较小河段以外多数河段存在横向环流;垂向流速分布最为均匀,方向向下,有一定促进泥沙沉降的作用[7]。三峡水库库区垂向紊动强度相对均匀,弯道段横向紊动极为明显,在垂向流速及垂向紊动强度上与一般天然河道存在较大差别,对泥沙运动,尤其是悬移质含沙量沿垂线分布带来明显影响[6]。

1.2 三峡水库蓄水后库区泥沙淤积特性

根据长江水利委员会水文局监测成果,三峡工程蓄水运用以来,受上游来沙减少、水库调度、河道采砂等影响,水库泥沙淤积大为减轻。2003 年 6 月－2018 年 12 月,三峡水库淤积泥沙 17.733 亿 t,年均淤积泥沙仅为论证阶段的 34%,水库排沙比为 24.1%。2003 年 3 月－2018 年 10 月库区干流(大坝—江津)累计淤积泥沙 15.559 亿 m^3,其中变动回水区累计冲刷泥沙 0.783 亿 m^3,常年回水区淤积量为 16.342 亿 m^3。库区绝大部分泥沙淤积在 145 m 以下库容内,淤积在 145~175 m 之间的泥沙为 1.303 亿 m^3,占总淤积量的 7.5%,占水库防洪库容的 0.56%,水库有效库容损失较小。变动回水区同时具有水库和天然河道的双重特性,受上游来水来沙条件与水库运行的影响,常表现为蓄水期淤积、消落期冲刷,局部江段出现累积性泥沙淤积现象,淤积部位发生在弯道凹岸、回流区以及宽浅河段,边滩淤多,主槽淤少[8]。

三峡水库蓄水运行以来,入库沙量大幅减小的同时,入库粗颗粒泥沙含量也有所降低,库区沿程泥沙粒径明显偏细,且存在细颗粒泥沙絮凝现象。由于絮凝作用,细颗粒泥沙形成絮团,粒径变粗,沉速加快,粒径越小,絮凝强度越大;水流流速越小,絮凝作用也越强,泥沙絮凝作用是引起细颗粒泥沙在库区淤积的主要原因[9-10],粒径小于0.016 mm的细颗粒泥沙淤积量占库区总淤积量的60.7%[11]。对于整体泥沙淤积较少的变动回水区,其中江津至重庆江段大量细沙淤积不显著,重庆至长寿江段则出现卵石缓慢累积性淤积,长寿至涪陵江段有明显的细沙累积性淤积[12-13]。

2 三峡水库蓄水后库区水沙变化下的水环境响应特征

三峡水库蓄水后演变成河道型水库,其水位大幅抬升,库容大幅增加,流速急剧降低,水体流态及悬浮物沉降条件的改变导致污染物的时空分布特征发生显著变化,进而对水质产生影响[14]。

2.1 三峡水库蓄水后库区干支流总体水质特征

2.1.1 干流水质变化分析　三峡库区蓄水后,干流水质总体变好,库区干流断面月度达标率均值由蓄水前(1998－2002年)的62.3%变为蓄水后(2004－2009年)的78.3%,库区干流超标因子主要为高锰酸盐指数、总磷、铅等[15]。2000－2015年,水库蓄水后从上游到下游干流水质评价结果优于Ⅲ类水的比例总体呈上升趋势[16]。基于1998－2017年三峡工程生态与环境监测系统水文水质同步监测重点站的长序列实测结果,成库后水体悬浮物及总磷、高锰酸盐指数、铅的浓度总体上从库尾至库首呈现下降趋势,与文献报道结果基本一致[15-18]。成库后试验性蓄水期的2013－2017年,悬浮物、总磷、高锰酸盐指数和铅的浓度从寸滩断面至太平溪断面(库尾至库首方向)总体呈沿程下降趋势,下降幅度均值分别为86.2%、50.5%、40.1%和75.4%,这是由于库区泥沙沉降作用所致;在成库前,污染物浓度没有表现出如此明显的沿程浓度下降特征(附图Ⅰ)。库区干流重点断面月达标率均值由蓄水前(1998－2002年)的62.3%上升为蓄水后(2003－2017年)的93.7%(附图Ⅱ)。总体上,三峡水库蓄水后库区干流水质整体保持稳定,且呈现向好趋势[15-19]。

2.1.2 支流水质变化分析　三峡水库2003年蓄水后,库区干流平均流速从天然河道的3~5 m/s降至0.07~2.43 m/s[20],蓄水引起水力条件改变,使支流回水区水力停留时间较天然状态加长,如支流香溪河、大宁河、小江等回水距离较长的河段,水力停留时间增大,营养盐更容易累积[16]。《长江三峡工程生态与环境监测公报》显示,与蓄水前相比,支流口流速减缓,水质由1999年的Ⅱ类降为2005年的Ⅳ类。基于蓄水前后(2003－2015年)水质情况分析,各支流(库湾)水质类别总体呈变差趋势,满足(或优于)Ⅲ类水占比由66.7%降至30.2%[21](附图Ⅱ),主要超标因子总磷浓度在蓄水后高水位运行期较运行初期有所上升。三峡库区支流水质主要污染指标是总氮和总磷,中位数分别为1.619~2.739和0.088~0.277 mg/L,由于不同的水动力和污染负荷条件,总氮和总磷表现出时间和空间上的异质性,部分支流呈现富营养化特征,水华发生频率集中在春季,从上游向下游呈递增趋势[22]。总体而言,受三峡库区蓄水引起水力条件的变化等,三峡水库支流整体上由蓄水前的贫—中营养状态向中—富营养状态转变[23-24],目前处于中—富营养水平,且富营养化程度有加重趋势[25]。

2.2 三峡水库蓄水后库区氮磷营养盐特征

三峡水库蓄水后流速大幅减缓,对库区水体中氮、磷营养盐的循环过程有显著影响[26]。2004年蓄水后库区水体总磷和总氮浓度均值分别达到0.083和1.56 mg/L,营养盐浓度总体偏高[27]。也有研究表明,丰水期(低水位运行阶段)会给三峡库区带来较多的磷营养盐[28]。三峡水库水体中总氮和总磷的主要组成分别为硝酸盐氮和颗粒态磷[29]。

2008－2013年三峡水库调查结果表明,空间尺度上总磷浓度从上游到下游逐渐降低,乌江监测站武隆的总磷浓度极高(0.40 mg/L),主要是由于乌江上游贵州省丰富的磷矿资源开采不当所致[26]。三峡库区水体总氮浓度呈现波动变化,无明显规律[26];三峡库区总磷浓度从库尾到库首(朱沱到太平溪断面)沿程有明显下降趋势,但支流乌江的总磷浓度超标严重[26,30]。泥沙淤积是长江干流水体中磷浓度发生变化的主要原因之一,总磷从库尾到库首沿程明显降低,而泥沙淤积从库尾到库首沿程明显升高,越接近大坝泥沙淤积量越大[30]。结合2015－2017年三峡库区干支流水质现场实测数据,水体总氮和总磷浓度分别为1.48~2.33和0.09~0.16 mg/L,在垂直方向上,表层水的营养盐浓度高于底层水;在空间尺度上,由于河岸带和支流输

入氮的积累,总氮浓度从库尾到坝前逐渐增加,而总磷浓度由于泥沙淤积而从库尾到坝前逐渐降低[31]。长序列研究表明,三峡库区水质总体较好,但全面蓄水期(2010 年)前水质较差;空间上库区中游水质最差,时空差异性较大[32]。三峡水库蓄水后多项水质指标有所改善,但氮污染较严重,且有加重的趋势,氮增长可能是由于外部输入造成的,包括上游来源、非点源和点源污染输入,水位和距坝距离是影响氮形态分布的重要因素[33]。总之,三峡水库运行对库区营养物质的赋存产生了显著影响,加之周边人类活动,库区水体营养盐浓度变化呈现出较大的不确定性,应引起足够重视。

2.3 三峡水库蓄水后库区重金属赋存现状

2.3.1 水体重金属 三峡水库在蓄水达到 135 m(2003－2004 年)前后库区水体表、中、底层重金属浓度总体无明显差异,水体重金属浓度整体表现为蓄水前大于蓄水后[34]。基于 2008－2013 年三峡水库调查结果,2008 年库区水体 Cu、Cd 和 Pb 的平均值分别为 10.4、1.5 和 15.0 mg/L,而 2013 年分别为 3.0、0.77 和 7.89 mg/L,均有所降低[26]。

库区干流整体上重金属浓度从重庆江段至坝前略呈下降趋势,库区水质总体安全,但某些重金属(如 Pd、As 等)因存在潜在致癌性,也应引起关注[26]。重金属的污染情况具有明显的区域性,主要集中在上游城市江段,可能与沿岸集中的工农业生产有关,主要是受外源输入以及泥沙吸附等的影响[35]。当蓄水至 156 m(2007 年)时,与蓄水前和 135 m 蓄水期(2003－2004 年)的历史数据相比较,干流和香溪河库湾溶解性 Cu、Pb 和 Cr 的浓度都呈升高趋势,也高于长江干流其它水域[36]。结合 2015－2016 年三峡库区蓄水期和泄水期水体 6 种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn)的时空分布特征及健康风险研究,除 Zn 外,地表水中重金属平均浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838－2002)规定的 I 类水质标准限值,水体重金属浓度较高区域主要分布在三峡库区的上游城区段[37]。2017 年三峡水库蓄水期,库区支流香溪河水体重金属(As、Hg、Cu、Pb、Ca、Zn、Mn 和 Ni)上游污染比下游污染严重,但除 Mn 外,其余重金属对人体健康的危害程度较低,其污染源主要来自于农业种植、交通运输和采矿[38]。基于 2018 年三峡水库蓄水期库区支流汝溪河水体重金属(Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Ni 和 Pb)调查研究,除 Ni 外,水体重金属的浓度均低于 I 类水质标准限值[39]。综上,三峡水库蓄水后已经影响到区域痕量重金属的生物地球化学循环,但流域内水质重金属风险等级较低,水质总体良好。

2.3.2 沉积物重金属 沉积物作为水环境中重金属污染物的载体和“蓄积库”,其污染特征及分布规律是查明水体重金属污染状况的重要手段,也是反演该区域重金属污染历史的主要依据[40]。三峡库区 2003 年蓄水前,沉积物普遍受到重金属 Hg 污染,其含量均值为 0.312 mg/kg,与 2003 年蓄水前相比,2008－2017 年蓄水后沉积物中 Hg 含量明显降低[41-42],这可能与三峡库区周边汞矿开采减少等有关[43],具体原因有待深入研究。三峡水库运行初期(2008－2013 年),库区沉积物存在一定的重金属富集现象,并呈现沿程升高趋势[44]。三峡水库高水位稳定运行后(2015－2017 年),沉积物重金属浓度趋于稳定。与三峡水库首次实行 175 m 试验性蓄水时(2008 年)相比,2017 年三峡库区沉积物 Cr、Zn、Cd、Pb 和 Hg 含量有所增长,Cu 和 As 含量有所降低,Ni 含量基本保持不变[42](表 1)。三峡库区沉积物金属元素的平均含量略高于长江沉积物金属背景值及四川省土壤金属背景值。利用地积累指数分析表明,沉积物中 Cr 呈无污染状态,Cu、Zn 和 Pb 呈无污染至中度污染状态,Cd 呈中度污染状态[35]。三峡库区沉积物中的 Cd 污染需引起关注[45-46]。

香溪河作为三峡库区坝首的第一条支流,沉积物中 Zn、Mn、Ba、Cr、Cu 和 Ni 等重金属处于无污染至轻度污染状态,处于低生态危害等级,且不同重金属之间存在相同来源[47]。支流汝溪河 8 种重金属(Cr、Ni、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb 和 Hg)含量均超过长江水系沉积物背景值,生物毒害风险为低级至中低级[48]。基于三峡库区 6 个典型支流和河口的表层沉积物样品分析,表明支流表层沉积物重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cr 有富集现象[49]。从潜在生态风险指数来看,云阳、小江、新津的等级为中等风险,其中 Cd 的贡献率最高,支流重金属污染主要来自于农业化肥和工业污水(Cu、Zn、Cr 等)和船舶燃油排放(Pb 等)[49]。综上,三峡库区干支流沉积物中重金属含量不同程度地受到人为因素影响,Cd 污染是重要的环境问题之一,而其他金属的生态风险很低,流域内的径流调节、局部地貌特征以及人类活动(工农业生产、航运业、采矿业等)影响了沉积物中重金属的赋存特征[47-49]。

表 1 三峡库区沉积物金属含量均值及背景值[42](mg/kg)

Tab.1 Contents of heavy metals in the sediment of Three Gorges Reservoir and their background values

时间	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Ni
2008-10	86.3	76.0	138	18.1	0.75	59.4	0.11	46.8
2009-03	79.7	46.7	104	12.3	0.71	38.1	0.13	41.7
2010-03	84.9	56.4	130	14.1	0.90	44.0	0.17	45.7
2015-06	102±26.1	60.7±15.0	154±20.1	13.0±2.8	0.94±0.27	55.2±12.3	0.13±0.03	44.8±7.5
2015-12	94.8±11.4	59.4±13.5	167±26.9	16.4±2.4	1.19±0.36	55.6±11.9	0.12±0.03	48.8±6.1
2016-06	98.7±13.5	62.8±18.9	169±31.4	15.9±3.4	1.13±0.31	60.1±15.2	0.13±0.05	48.6±8.9
2016-12	100±7.2	60.1±17.4	164±28.9	13.1±2.1	0.94±0.19	64.9±12.9	0.12±0.03	46.5±5.9
2017-06	101±7.8	60.9±15.8	164±23.0	13.2±2.1	1.03±0.23	62.5±16.5	0.13±0.03	46.6±6.6
长江沉积物背景值	82	35	78	9.6	0.25	27.0	0.08	33
四川省土壤背景值	79	31	86.5	10.4	0.10	30.9	0.06	32

2.4 三峡库区水体典型有毒有机污染物赋存现状

多环芳烃(PAHs)和邻苯二甲酸酯类(PAEs)是环境中广泛存在的有毒有机污染物[50]。PAHs 具有毒性和致癌作用,主要来源于含碳物质的不完全燃烧[51],被认为是三峡库区首要的有毒有机污染物[52]。PAEs 作为增塑剂被广泛使用,属于内分泌干扰物[53],是三峡工程蓄水前水体主要污染物之一[54],而关于三峡水库蓄水前后水体及沉积物中 PAHs 和 PAEs 赋存状况的研究资料较少。

2.4.1 PAHs　2005 年三峡库区重庆江段水体检出 9 种 PAHs,而 2010 年增加到 15 种,说明 5 年间研究区 PAHs 污染有所加重,推断 PAHs 主要来源于石化产品的燃烧和泄漏、木材和煤的燃烧[55]。2016 年三峡库区调查结果表明,水体 PAHs 浓度为 3.9~107.6 ng/L,与 2010 年(6.44~109.39 ng/L)接近,表明三峡水库 2010 年全面蓄水后,PAHs 浓度总体保持稳定;三峡库区干流沉积物 PAHs 含量为 185.5~2055.6 ng/g(均值 726.1 ng/g),相比国内外河流处于中等水平[56],但部分沉积物中 PAH 单体(如芴、菲和蒽等)的浓度水平对人类健康构成潜在威胁[57]。相关性和主成因分析表明,三峡库区水体和沉积物 PAHs 主要来自于焦化或煤焦油挥发、石油源及燃料的中低温燃烧。建议后续加强对库区 PAHs 的监测和管控。

2.4.2 PAEs　2005 年三峡库区水体中 PAEs 主要为邻苯二甲酸二正丁酯(DBP)和邻苯二甲酸(2-乙基已基)酯(DEHP),浓度分别为 830~2201 和 660~3600 ng/L[54]。2010 年库区重庆段水体中 ΣPAEs 浓度为 53.2~343.0 ng/L,DBP 和 DEHP 是水体中的主要污染物[58]。2016 年库区水体 ΣPAEs 浓度为 122.4~2884.7 ng/L(均值 848.1 ng/L),其中 DBP 和 DEHP 浓度分别为 75.6~722.5 和 41.0~2425.6 ng/L[59]。2005－2016 年,三峡水库水体中 DBP 和 DEHP 浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838－2002)限值(3000 和 8000 ng/L)。与试验性蓄水时初期(2005 年)相比,2016 年三峡库区水体 PAEs 浓度有降低趋势[54-58]。2010 年三峡库区重庆段沉积物 PAEs 含量为 1787.0~5045.9 ng/g[58]。2016 年库区沉积物 ΣPAEs 含量为 192.9~3473.4 ng/g(均值 1253.35 ng/g),沉积物中主要污染物也以 DEHP 和 DBP 为主,含量分别为 35.6~1796.3、201.8~3278.46 ng/g[56]。可见,三峡水库不同时间段水体和沉积物中 PAEs 均以 DEHP 和 DBP 为主。与国内外其他地区相比,库区水体和沉积物中 PAEs 含量处于中等偏下水平[59]。研究表明人为活动以及三峡库区蓄水影响邻苯二甲酸酯 PAEs 的分布特征[60]。由于水体及沉积物中 DEHP 和 DBP 的浓度相对较高,可能存在一定的生态风险,建议后续也相应加强对库区 PAEs 的监测和管控。

3 三峡水库蓄水后库区水沙变化下的水生态响应特征

三峡水库蓄水运行后库区泥沙及水文情势发生显著改变,库区干支流藻类、底栖动物、微生物和鱼类等水生生物群落结构与分布均发生了演替,其中以藻类的变化最为显著[24]。

3.1 三峡库区水沙变化下的藻类时空特征

3.1.1 典型支流藻类响应特征　三峡水库成库前支流未观测到水华现象,而自 2003 年水库实施蓄水后,香溪河、大宁河等库区主要支流多次暴发水华。长期的水质监测显示这些支流水体氮磷营养盐浓度蓄水前后变

化不大,且均高于水华发生的对应临界浓度,说明在成库前支流就已具备充足的水华发生营养基础[61]。成库后蓄水位抬高,支流出现回水区,水力停留时间加长,如香溪河、大宁河、小江等回水距离较长河段水力停留时间都在10天以上,为藻类的迅速生长提供了适宜的条件[2]。

三峡水库蓄水运行后,库区典型支流由原先的河流型生态系统逐渐转变为特殊的"河库型"生态系统[62]。蓄水前香溪河共观察到底栖藻类204种(含变种),分属硅藻、绿藻、蓝藻和黄藻4门[63];蓄水后则观察到附石藻类218种(变种),流域藻类密度大幅提升,相较蓄水前香溪河底栖藻类种类数、多样性指数虽均有所增加,但整体波动不大,绝对优势种相对丰度在不同时间段变化较大[64]。其他支流如梅溪河、草堂河和大溪河蓄水后硅藻门优势逐渐明显[65];大宁河中硅藻门占绝对优势,绿藻门和甲藻门次之,藻类种群丰富度以蓄水期最高,而藻类多样性指数在蓄水期最小[66]。

蔡庆华和孙志禹[23]基于叶绿素*a*、透明度和相对水柱稳定性将香溪河从入河口到库湾末端,在纵向上划为干流区、湖泊区、过渡区和河流区。由于水位、水动力条件差异,香溪河水生生物群落分布存在区域差异,指标沿着河道纵轴的空间梯度变化,形成新的浮游植物纵向分布格局。整体上,香溪河库湾由于水温分层引发的异重流现象明显,增大了支流表层水体水平流速,在纵向上以过渡区的叶绿素*a*浓度最高。洪尚波等[67]对大宁河的藻类调查发现除易暴发水华的库湾开阔地带外,狭窄的峡谷地带也会暴发严重水华,并且持续时间更长;河口区域的浮游藻类群落稳定性和生物均匀性较其他地区更好。大宁河水体水生态特征存在空间异质性,如长江干流至大宁河回水末端水体TSI_{TN}、TSI_{TP}和TSI_{SD}等营养状态指数均呈现沿程降低的趋势[66]。

3.1.2 干流藻类响应特征 蓄水前,三峡水库干流是水流湍急的峡谷型天然河道,适应流水生活的硅藻是绝对优势藻种,占藻类种群总数的60%左右,并且自上而下随着水体流速的降低以及水体类型的变化,硅藻比例下降,蓝藻比例上升[68]。蓄水前三峡干流浮游藻类共7门,除优势种硅藻门外,还包括绿藻门、蓝藻门、裸藻门、隐藻门、甲藻门以及黄藻门[69]。蓄水前由于库区水体泥沙悬浮量大,光合作用条件不佳,不利于藻类生长[70]。干流各断面藻细胞密度较低,年均值在5×10^4 cells/L左右,上下游各江段藻密度变幅不大[71]。

蓄水后库区干流藻类生长分布则发生了显著变化。虽然干流浮游植物种类蓄水后仍以硅藻门和绿藻门为主,但藻类多样性整体增多,绿藻门的优势度则随水体类型的改变(由河流型向类湖泊型水体过渡)而逐渐增加[61,72-73]。从生物量的角度来看,蓄水后库区干流藻密度总体有所增加,沿水流方向呈逐步上升的趋势。蓄水对藻类的季节变化特征也产生了影响,藻细胞密度峰值出现季节由蓄水前的冬季转变为蓄水后的春季。2019年,刘黎等研究指出蓄水改变了库区水体的水温、浊度、高锰酸盐指数和溶解氧,并导致库区上游藻类以变异直链藻(*Melosira varians*)为主,库区中下游以近缘桥弯藻(*Cymbella affinis*)为优势种,下游则以披针形舟形藻(*Navicula*)为优势种,共能解释硅藻群落总变异的18%[61]。

3.2 三峡水库蓄水前后库区底栖动物响应特征

比较三峡水库1984年勘察设计阶段库区河段底栖动物的调查结果(未发表)与王宝强等[74]和张敏等[75]的调查结果,发现蓄水后三峡库区底栖动物种类数在不同的江段变化有所不同,其中靠近大坝的秭归至巫山段,底栖动物种类呈减少的趋势,而重庆境内的云阳至木洞段底栖动物种类变化趋势不明显。Li等[76]于2003－2013年调查发现三峡大坝上游和香溪河入河口上游底栖动物有49个种(属),主要包括摇蚊科,颤蚓科和仙女虫科。第一蓄水阶段三峡水库的先锋物种是梯形多足摇蚊(*Polypedilum scalaenum*);第二蓄水阶段肥满仙女虫(*Nais inflata* Liang)为优势种,相对丰度高达97%;第三蓄水阶段水位波动范围的增加并没有显著改变底栖动物群落稳定的季节性格局[75]。总之,三峡水库底栖动物群落结构在蓄水初期发生了微弱的方向性变化,从第三蓄水阶段开始群落结构变得相对稳定。当然受水位波动和季节性洪水的影响,库区底栖动物群落在年与年之间也会发生较大的随机变化,但从长期来看群落结构将保持这种稳定性。

从密度变化看,底栖动物密度在靠近大坝的秭归至巫山的干流江段从1980s至今一直维持在300 ind./m^2左右,而重庆境内的云阳至木洞江段却呈现明显的递减趋势,且减少程度较大;从生物量变化看,库区蓄水十年后靠近大坝的秭归至巫山段底栖动物生物量增加1倍多,重庆云阳至木洞段生物量也有增加趋势。在三峡水库第二个蓄水阶段,库区底栖动物群落的季节变化比年份变化更大,底栖动物群落形成了季节模式;而第三蓄水阶段,库区底栖动物密度和丰富度在春季达到高峰,秋季最低[76](附图Ⅲ),密度和丰度在季节

上的顺序均为:春季>冬季>夏季>秋季[76]。这种稳定的季节模式与前两个蓄水期相似,春季和冬季的群落特征与夏季和秋季明显不同。底栖动物群落在夏季和秋季主要受到入库流量的调节,在冬季和春季则与水力停留时间密切相关,在蓄水后期,入库流量和输沙量也是影响库区底栖动物群落总密度和丰富度的重要因素。

3.3 三峡水库蓄水前后库区微生物响应特征

三峡水库蓄水前有关微生物群落结构方面的研究资料较少。水库蓄水后,季节性的水位波动提高了三峡库区微生物的丰度和多样性,研究表明水库变动回水区微生物丰度与多样性最高,其次是非回水区和常年回水区[77]。本研究团队于2015－2017年调查发现库区支流汇入断面淤积物中微生物以变形菌为主,坝前和城市河段以酸杆菌和放线菌为主;变动回水区微生物丰富度指数最高,其次为主要城市江段,坝前区微生物丰富度最低;常年回水区、变动回水区、主要城市江段和支流汇入口微生物活性受环境变量的影响表现出较大的差异。

赵媛莉等[78]对三峡水库一级支流香溪河水域调查共检出细菌类群15门、87属,回水区(河口、中游)和河流区(上游)的优势菌虽均属变形菌门,但可能因受长江回水和香溪河支流高岚河影响,各区域优势菌在属水平上差异显著($P<0.05$)。芽孢杆菌属常见于底泥深处,香溪河底栖微生物中芽孢杆菌的比例从回水区的河口处至中游处逐渐减少至河流区消失,很可能是受大坝修建、拦截所导致;且越靠近大坝处,底泥中芽孢杆菌属细菌丰度越高;在香溪河干流底泥细菌群落多样性分析中发现,Simpson、Shannon和Margalef多样性指数在空间分布上沿程整体呈“中间高、两头低”的特征。

3.4 三峡水库蓄水前后库区鱼类响应特征

随着三峡蓄水后水位与自然生境(如水温、流态、流速等)的改变,鱼类组成也随之发生转变。2005－2006年库区共监测到鱼类108种,分属9目20科71属,鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)、鲤(*Cyprinus carpio*)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、铜鱼(*Coreius heterodon*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、长鳍吻鮈(*Rhinogobio ventralis*)、圆筒吻鮈(*Rhinogobio cylindricus* Gunther)、长吻鮠(*Leiocassis longirostris*)、草鱼(*Ctenopharyngodon della*)是库区主要经济鱼类[79]。与建坝前调查相比,库区渔获物鱼类种类下降了19种。三峡水库成库后,库尾至库首流速不断减缓,改变了鱼类生境,影响了鱼类的栖息越冬,使得喜急流的鱼类相对减少,而喜静水的鱼类数量增多,底栖鱼类所受影响则不大[9]。研究同时指出,三峡蓄水后部分洄游鱼类产卵场及理想栖息地减少,库区干流鱼类资源种类数量衰退,其中主要经济鱼类如“四大家鱼”、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)、白甲(*Onychostoma sima*)等大幅减少,长江鲟(*Acipenser dabryanus* Dumeril)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、岩鲤(*Procypris rabaudi*)、鲈鲤(*Percocypris pingi pingi*)也较成库前稀少[80]。

长江水温结构和过程也随三峡及上游梯级水坝的建设运行发生改变,成库后春季水温降低,秋季水温升高,影响了中华鲟的产卵繁殖[4-5,81-82]。湖泊是长江鱼类索饵、育肥的重要场所,江湖阻隔导致长江泛滥平原的湖泊中鱼类总种数减少38.1%[82]。三峡水库的运行打破了长江流域原有的江湖连通格局,间接影响了一些通江湖泊中江湖洄游性鱼类的组成特征[83]。2007年4－5月研究发现,三峡水库库首到库尾鱼类密度总体上呈现不断上升的趋势,支流小江和长滩河密度相对较高,香溪河次之,抱龙河和大溪河密度最低,整个库区探测到的鱼类个体大小呈现偏态分布,小型鱼体占绝大多数,中大型鱼体很少,特大型鱼体极少[84]。总体而言,175 m试验性蓄水对库中和库尾江段的鱼类群落结构的影响较大,但对库首及库尾以上流水江段的影响较小[85]。不过,随着鱼类自身对蓄水后水文条件的适应,近几年三峡库区鱼类产卵量和孵化量已有所恢复[86-87],三峡水库蓄水后的库区鱼类响应特征还有待后续长期的观察研究。

4 结论与展望

4.1 结论

1)三峡水库蓄水运行后库区水沙条件均发生了显著改变,对库区水生态环境产生了深远影响。水库经历了3个阶段的蓄水后,库区干支流水流速度大幅降低,入库泥沙显著减少,粗颗粒泥沙含量也有所降低,库区沿程泥沙粒径明显偏细,且存在细颗粒泥沙絮凝现象,对泥沙沉降产生显著影响。

2)三峡水库蓄水后库区干流水质整体稳定向好;支流水质由蓄水前的贫—中营养状态向中—富营养状态转变,富营养化程度有所增加。水库水体总磷浓度无显著变化,但总氮浓度变化呈现出较大不确定性。水体重金属浓度相比蓄水前有所降低,但部分重金属 Pd、As 等因本身致癌性,对人体健康构成威胁,沉积物中 Cd 存在一定的污染风险,应引起关注。水库蓄水后库区 PAHs 含量总体保持稳定,相比国内外河流处于中等水平,但部分 PAH 单体浓度对人类健康构成潜在威胁,需加强监控;水体和沉积物中 PAEs 含量处于中等偏下水平。

3)水库蓄水后库区支流藻类水华发生频繁,干流藻类虽仍以硅藻门和绿藻门为主,但绿藻门的优势度由河流型水体向类湖泊型水体过渡时逐渐增加。干流藻类优势种变化不大,仍以硅藻和绿藻为主。库区底栖动物群落结构在蓄水初期经历了微弱的变化,后续第三蓄水阶段开始后变得相对稳定。水库蓄水后,季节性的水位波动提高了三峡库区变动回水区微生物的丰度和多样性。建坝后库区鱼类种类有所下降,蓄水对库中和库尾江段的鱼类群落结构的影响较大,激流性鱼类种类数量大幅减少,静水性鱼类种类数量增加,对库首及库尾以上流水江段的影响较小。

4.2 展望

三峡水库蓄水已有十余年,虽然围绕三峡水库库区泥沙淤积特性及其生态环境响应已开展了相关研究,但由于水库仍处于蓄水初期,水库生态系统并未达到稳定状态,且水利工程对水生态和水环境的影响是一个长期的过程,仍需从水沙变化、水环境、水生态等方面进行持续的观测和科学研究,以期揭示三峡库区水沙变化条件下的生态环境效应内在驱动机制,为探索三峡水库水沙生态调控技术提供理论指导。同时随着近几年上游水土保持工程效益的发挥以及向家坝、溪洛渡等大型梯级电站的相继投入使用,研究发现三峡水库部分河道冲刷加强,入库泥沙锐减,而库区细颗粒泥沙淤积率并未降低,大部分仍淤积在库区常年回水区[88,89],这势必改变三峡库区和下游河道生境演变趋势,影响水库水沙过程和生态系统的演化规律。因此,对三峡库区生态环境的研究还仅处于初级阶段,三峡水库库区水沙条件的变化及其与生态系统演化的响应关系还需要进行深入探索与实践。

5 附录

附图Ⅰ~Ⅲ见电子版(DOI:10.18307/2023.0204)。

6 参考文献

[1] Zheng BH, Zhang Y, Fu G *et al*. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 1022-1030. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2006.06.025. [郑丙辉, 张远, 富国等. 三峡水库营养状态评价标准研究. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1022-1030.]

[2] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al*. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]

[3] 戴卓. 三峡成库后洛碛河段鱼类越冬特性研究[学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[4] Guo WX, Wang HX, Xia ZQ *et al*. Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, **28**(6): 182-187. [郭文献, 王鸿翔, 夏自强等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究. 水力发电学报, 2009, **28**(6): 182-187.]

[5] Deng Y, Xiao Y, Tuo YC *et al*. Influence of Three Gorges Reservoir on water temperature between Yichang and Jianli. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 551-560. [邓云, 肖尧, 脱友才等. 三峡工程对宜昌——监利河段水温情势的影响分析. 水科学进展, 2016, **27**(4): 551-560.]

[6] Shu QY. Velocity distribution and wake-law in gradually decelerating flows. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, **47**(2): 177-184. DOI: 10.3826/jhr.2009.3254.

[7] Chen J, Chen ZY, Xu KQ *et al*. Characteristics of ADP velocity profile in the Three Gorges and its hydrogeomorphic environment significance. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(5): 464-468. [陈静, 陈中原, 徐開钦等. 长江三峡 ADP 流速剖面特征及其水文地貌环境意义分析. 科学通报, 2005, **50**(5): 464-468.]

[8] Liu HX, Lu YJ, Zuo LQ. Fluvial morphology study on key channels of the Three Gorges fluctuating back water area. *Hydro-Science and Engineering*, 2011, (4): 32-38. [刘怀湘, 陆永军, 左利钦. 三峡变动回水区重点河段演变分析. 水利水运工程学报, 2011, (4):

32-38.]
[9] 方春明, 董耀华. 三峡工程水库泥沙淤积及其影响与对策研究. 武汉: 长江出版社, 2011.
[10] Li YZ, Jiang YJ. An empirical analysis of sediment flocculation settlement in front of the Three Gorges Reservoir. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, **40**(2): 62-65, 72. [李云中, 江玉姣. 三峡水库坝前泥沙絮凝沉降实证分析. 水利水电快报, 2019, **40**(2): 62-65, 72.]
[11] Li WJ, Ma HP, Yang SF *et al*. Sedimentation and one dimensional simulation of fine sediment in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, **29**(2): 251-260. [李文杰, 马浩平, 杨胜发等. 三峡库区细颗粒泥沙淤积及一维数值模拟研究. 应用基础与工程科学学报, 2021, **29**(2): 251-260.]
[12] 谢龙. 三峡变动回水区末端段复合水动力条件分析及对泥沙输移的影响[学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
[13] Hu XY. Study of river channel evolution from Yichang to Hukou at downstream of Three Gorges Project. *Yangtze River*, 2012, **43**(24): 1-4, 24. [胡向阳. 三峡工程下游宜昌至湖口河段河道演变研究. 人民长江, 2012, **43**(24): 1-4, 24.]
[14] Ding XW, Zhu Q, Zhai AF *et al*. Water quality safety prediction model for drinking water source areas in Three Gorges Reservoir and its application. *Ecological Indicators*, 2019, **101**: 734-741. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.068.
[15] Yin SY, Lou BF, Liu H *et al*. Analysis of water quality of the Yangtze River within the Three Gorges Reservoir area during construction period. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(3): 305-310. [印士勇, 娄保锋, 刘辉等. 三峡工程蓄水运用期库区干流水质分析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(3): 305-310.]
[16] Ji DB, Wells SA, Yang ZJ *et al*. Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2017, **98**: 70-81. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.019.
[17] Zhuo HH, Wu YL, Liu MX *et al*. Trend study of water quality in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(6): 925-936. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201706015. [卓海华, 吴云丽, 刘旻璇等. 三峡水库水质变化趋势研究. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(6): 925-936.]
[18] Li Z, Ma JR, Guo JS *et al*. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992−2016). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, **19**(3): 317-327. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2018.08.005.
[19] Wang ST, Lei JS, Jia HY *et al*. Water quality characteristics and causes analysis of Three Gorges Reservoir from 2003 to 2017. *Yangtze River*, 2020, **51**(10): 47-53, 127. [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. 人民长江, 2020, **51**(10): 47-53, 127.]
[20] Tang XQ, Wu M, Li R. Distribution, sedimentation, and bioavailability of particulate phosphorus in the mainstream of the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2018, **140**: 44-55. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.024.
[21] Jiao JL, Ma W, Pei QN *et al*. Study on the characteristics of eutrophication evolution of tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, **6**(6): 544-548. [焦军丽, 马巍, 裴倩楠等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, **6**(6): 544-548.]
[22] Xiang R, Wang LJ, Li H *et al*. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015. *Water Research*, 2021, **195**: 116993. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116993.
[23] Cai QH, Sun ZY. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: Progress and prospects. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 169-177. DOI: 10.18307/2012.0201. [蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 169-177.]
[24] Han CN, Qin YW, Ma YQ *et al*. Cause of variation in water quality distribution and its ecological effects in the Daning Bay of the Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 893-900. [韩超南, 秦延文, 马迎群等. 三峡支流大宁河库湾水质分布变化原因及其生态效应. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 893-900.]
[25] Li L, Yu H, Liu H *et al*. Current situation of water bloom in tributaries of Three Gorges Reservoir area and its prevention and control measures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(3): 64-66, 69. [李礼, 喻航, 刘浩等. 三峡库区支流"水华"现状及防控对策. 安徽农业科学, 2019, **47**(3): 64-66, 69.]
[26] Gao Q, Li Y, Cheng QY *et al*. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013. *Water Research*, 2016, **92**: 262-274. DOI: 10.1016/j.watres.2015.12.055.
[27] Zhang Y, Zheng BH, Liu HL *et al*. Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding. *Water Resources Protection*, 2005, **21**(6): 23-26. [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. 水资源保护, 2005, **21**(6): 23-26.]
[28] Huang L, Fang HW, Reible D. Mathematical model for interactions and transport of phosphorus and sediment in the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2015, **85**: 393-403. DOI: 10.1016/j.watres.2015.08.049.
[29] Huang YL, Zhang P, Liu DF *et al*. Nutrient spatial pattern of the upstream, mainstream and tributaries of the Three Gorges Reservoir in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6833-6847. DOI: 10.1007/s10661-014-3892-5.
[30] Zhou Q, Xin XK, Yin W *et al*. The characteristics and changing trend of total phosphorus pollution in the Three Gorges Reservoir. *Ecology*

and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2019, **4**(1): 16-21. [周琴, 辛小康, 尹炜等. 三峡水库磷污染特性及变化趋势研究. 三峡生态环境监测, 2019, **4**(1): 16-21.]

[31] Wang DY, Tang XQ, Li R *et al*. Spatial distribution patterns of nitrogen and phosphorus in water and bed sediment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **322**: 129026. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129026.

[32] Xiang R, Wang LJ, Li H *et al*. Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**: 144866. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144866.

[33] Nie B, Zeng YH, Niu LH *et al*. Long-term impacts of reservoir operation on the spatiotemporal variation in nitrogen forms in the post-Three Gorges Dam period (2004-2016). *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(46): 65633-65643. DOI: 10.1007/s11356-021-15557-z.

[34] Zhang S, Li LL, Zhang Y *et al*. Changes of heavy metals distribution in water body of the Three Gorges Reservoir at 135 m water level. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(11): 3342-3343, 3376. [张晟, 黎莉莉, 张勇等. 三峡水库135m水位蓄水前后水体中重金属分布变化. 安徽农业科学, 2007, **35**(11): 3342-3343, 3376.]

[35] Lin L, Li C, Yang WJ *et al*. Spatial variations and periodic changes in heavy metals in surface water and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. *Chemosphere*, 2020, **240**: 124837. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124837.

[36] Zhao J, Yu ZG, Chen HT *et al*. Distributions of dissolved heavy metals in the typical backwater regions of the Three Gorges reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2009, **2**(2): 9-14. [赵军, 于志刚, 陈洪涛等. 三峡水库156m蓄水后典型库湾溶解态重金属分布特征研究. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 9-14.]

[37] Zhao LY, Gong DD, Zhao WH *et al*. Spatial-temporal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**: 134883. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134883.

[38] Xiong B, Li RP, Johnson D *et al*. Spatial distribution, risk assessment, and source identification of heavy metals in water from the Xiangxi River, Three Gorges Reservoir Region, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(2): 915-930. DOI: 10.1007/s10653-020-00614-2.

[39] Fang ZQ, Wang YM, Xie DT *et al*. Potential ecological risk of heavy metals in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **106**(1): 18-23. DOI: 10.1007/s00128-020-03014-5.

[40] Wang JK, Zhou HD, Lu J *et al*. Reviews of heavy metals pollution in water environment of Three Gorges Reservoir. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, **12**(1): 49-53. [王健康, 周怀东, 陆瑾等. 三峡库区水环境中重金属污染研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, **12**(1): 49-53.]

[41] Xu XQ, Deng GQ, Hui JY *et al*. Heavy metal pollution in sediments from the Three Gorge Reservoir area. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(1):1-10. [徐小清, 邓冠强, 惠嘉玉等. 长江三峡库区江段沉积物的重金属污染特征. 水生生物学报, 1999, **23**(1): 1-10.]

[42] Gao L, Gao B, Xu DY *et al*. Multiple assessments of trace metals in sediments and their response to the water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 197-205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.112.

[43] Yang ZN. Mercury pollution in the area of the Three Gorges Reservoir in Chongqing territory. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2008, **25**(3): 13-16, 35. [杨振宁. 三峡库区重庆段汞污染现状分析. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2008, **25**(3): 13-16, 35.]

[44] Wei X, Han LF, Gao B *et al*. Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir: The impact of water impoundment. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 667-675. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.10.018.

[45] Bing HJ, Zhou J, Wu YH *et al*. Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 485-496. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.062.

[46] Bing HJ, Wu YH, Zhou J *et al*. Spatial variation of heavy metal contamination in the riparian sediments after two-year flow regulation in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1004-1016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.401.

[47] Zheng R, Chen S, Wang B *et al*. Distribution and risk assessment of heavy metal content in the sediments of Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(1): 192-198. [郑睿, 谌书, 王彬等. 三峡库区香溪河沉积物重金属含量分布及风险评价. 生态环境学报, 2020, **29**(1): 192-198.]

[48] Fang ZQ, Wang YM, Wang X *et al*. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of the ruxi tributary of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1338-1345. DOI: 10.13227/j.hjkx.201909208. [方志青, 王永敏, 王训等. 三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险. 环境科学, 2020, **41**(3): 1338-1345.]

[49] Shui LJ, Pan XJ, Chen XJ *et al*. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Three Gorges Reservoir. *Water*, 2020, **12**(6): 1798. DOI: 10.3390/w12061798.

[50] Deyerling D, Wang JX, Hu W *et al*. PAH distribution and mass fluxes in the Three Gorges Reservoir after impoundment of the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment*, 2014, **491/492**: 123-130. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.076.

[51] Wang Y, Shen CC, Shen ZY *et al*. Spatial variation and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from the

Yangtze Estuary, China. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2015, **17**(7): 1340-1347. DOI: 10.1039/c5em00077g.

[52] Zhu YD, Yang YY, Liu MX *et al*. Concentration, distribution, source, and risk assessment of PAHs and heavy metals in surface water from the Three Gorges Reservoir, China. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2015, **21**(6): 1593-1607. DOI: 10.1080/10807039.2014.962315.

[53] Zhang LL, Liu JL, Liu HY *et al*. The occurrence and ecological risk assessment of phthalate esters (PAEs) in urban aquatic environments of China. *Ecotoxicology*, 2015, **24**(5): 967-984. DOI: 10.1007/s10646-015-1446-4.

[54] Xu C, Shu WQ, Luo CH *et al*. Water environmental health risk assessment of PAHs and PAEs in the Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(5): 57-60. DOI: 10.13198/j.res.2007.05.59.xuch.009. [许川, 舒为群, 罗财红等. 三峡库区水环境多环芳烃和邻苯二甲酸酯类有机污染物健康风险评价. 环境科学研究, 2007, **20**(5): 57-60.]

[55] Wang C, Tan L, Lv YB *et al*. Distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water from Chongqing section of the Yangtze River. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 18-22. [王超, 谭丽, 吕怡兵等. 长江重庆段表层水体中多环芳烃的分布及来源分析. 环境化学, 2015, **34**(1): 18-22.]

[56] Lin L, Dong L, Li QY *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 660-667. DOI:10.18307/2018.0308. [林莉, 董磊, 李青云等. 三峡库区水体和底泥中多环芳烃和邻苯二甲酸酯类分布和来源. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 660-667.]

[57] Dong L, Lin L, Yang WJ *et al*. Distribution, composition, levels, source, and risk assessment of PAHs in surface water and sediment from the mainstream Three Gorges Reservoir. *Desalination and Water Treatment*, 2019, **168**: 175-183. DOI: 10.5004/dwt.2019.24414.

[58] Du X, Luo GY, Xu XY. Distribution and partition of phthalate esters in water phase, pore water and sediments from Chongqing section of the Yangtze River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 557-562. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.02.023. [杜娴, 罗固源, 许晓毅. 长江重庆段两江水相、间隙水和沉积物中邻苯二甲酸酯的分布与分配. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 557-562.]

[59] Lin L, Dong L,Meng XY *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the Three Gorges Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **69**: 271-280. DOI: 10.1016/j.jes.2017.11.004.

[60] He MJ, Yang T, Yang ZH *et al*. Current state, distribution, and sources of phthalate esters and organophosphate esters in soils of the Three Gorges Reservoir region, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **74**(3): 502-513. DOI: 10.1007/s00244-017-0469-7.

[61] Liu L, He XY, Fu JK *et al*. Benthic diatom communities in the main stream of Three Gorges Reservoir area and its relationship with environmental factors. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3577-3587. DOI: 10.13227/j.hjkx.201901017. [刘黎, 贺新宇, 付君珂等. 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系. 环境科学, 2019, **40**(8): 3577-3587.]

[62] Huang Y, Huang ZL, Xiao WF *et al*. Water quality evaluation and prediction of the reservoir inflow and outflow after the Three Gorges Project operation. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(2): 211-215, 239. [黄玥, 黄志霖, 肖文发等. 三峡水库蓄水运行后入出库断面水质评价与预测. 环境污染与防治, 2019, **41**(2): 211-215, 239.]

[63] Tang T, Li DF, Pan WB *et al*. River continuum characteristics of Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 141-144. [唐涛, 黎道丰, 潘文斌等. 香溪河河流连续统特征研究. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 141-144.]

[64] Jia XH, Wu NC, Tang T *et al*. Spatiotemporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(4): 881-886. [贾兴焕, 吴乃成, 唐涛等. 香溪河水系附石藻类的时空动态. 应用生态学报, 2008, **19**(4): 881-886.]

[65] Fu JK, Liu L, He XY *et al*. Dynamics of epilithic algae communities and their relationship with environmental factors during storage and non-storage periods in the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3099-3107. DOI: 10.13227/j.hjkx.201812086. [付君珂, 刘黎, 贺新宇等. 三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析. 环境科学, 2019, **40**(7): 3099-3107.]

[66] Zhang JL, Zheng BH, Liu DF *et al*. Succession pattern of phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and its driving factors. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 535-546. DOI: 10.13227/j.hjkx.201606137. [张佳磊, 郑丙辉, 刘德富等. 三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素. 环境科学, 2017, **38**(2): 535-546.]

[67] Hong SB, Wu GY, Wan D *et al*. Distribution of algae and its influencing factors in Daning River in Three Gorges Reservoir during period of spring algal bloom. *Water Resources Protection*, 2012, **28**(1): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn. 1004-6933.2012.01.019. [洪尚波, 吴光应, 万丹等. 三峡水库大宁河春季水华藻类分布及影响因子. 水资源保护, 2012, **28**(1): 80-84.]

[68] 杨浩. 三峡水库蓄水对长江干流浮游植物群落物种组成的影响研究. 重庆: 西南大学, 2012.

[69] Zhu AM, Hu JX, Li SX *et al*. Phytoplankton diversity and water quality in the main stream and tributaries of Three Gorges Reservoir region of Yangtze River during dry season. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 378-385. DOI: 10.18307/2013.0311. [朱爱民, 胡菊香, 李嗣新等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 378-385.]

[70] Wang L,Cai QH, Xu YY *et al*. Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(2): 197-212. DOI: 10.1007/s10452-010-9346-4.

[71] Qiu GS, Ye D, Chen J *et al*. Analysis on floating algae variation in main stem of TGP reservoir area before and after impoundment. *Yangtze*

River, 2011, **42**(2): 83-86. [邱光胜, 叶丹, 陈洁等. 三峡水库蓄水前后库区干流浮游藻类变化分析. 人民长江, 2011, **42**(2): 83-86.]

[72] 夏志强. 三峡库区水华敏感期水质和浮游植物时空分布研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014.

[73] Zhu AM, Cheng YC, Zhou LF *et al*. Impact of the operation of Three Gorges Reservoir during wet season on phytoplankton in main stem of Yangtze River and its tributaries. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(5): 22-30. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.05.004. [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. 水生态学杂志, 2018, **39**(5): 22-30.]

[74] Wang BQ, Liu XQ, Peng ZH *et al*. The community structure of zoobenthos in the Three Gorges Reservior: A comparison before and after the impoundment. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 965-972. DOI: 10.7541/2015.126. [王宝强, 刘学勤, 彭增辉等. 三峡水库底栖动物群落结构特征及其与蓄水前资料的比较. 水生生物学报, 2015, **39**(5): 965-972.]

[75] Zhang M, Cai QH, Qu XD *et al*. Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(13): 4483-4494. [张敏, 蔡庆华, 渠晓东等. 三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态. 生态学报, 2017, **37**(13): 4483-4494.]

[76] Li B, Cai QH, Zhang M *et al*. Macroinvertebrate community succession in the Three Gorges Reservoir ten years after impoundment. *Quaternary International*, 2015, **380/381**: 247-255. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.06.017.

[77] Xiang YP, Wang YM, Zhang C *et al*. Water level fluctuations influence microbial communities and mercury methylation in soils in the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **68**: 206-217. DOI: 10.1016/j.jes.2018.03.009.

[78] Zhao YL, Zhang QQ, Liu XH *et al*. Impacts of three georges dam on structure and diversity of the benthic microorganism community in Xiangxi River. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(3): 45-50. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2017.03.007. [赵媛莉, 张倩倩, 刘新华等. 三峡大坝对香溪河底栖微生物群落结构和多样性的影响. 水生态学杂志, 2017, **38**(3): 45-50.]

[79] Wu Q,Duan XB, Xu SY *et al*. Studies on fishery resources in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2007, **37**(2): 70-75. [吴强, 段辛斌, 徐树英等. 长江三峡库区蓄水后鱼类资源现状. 淡水渔业, 2007, **37**(2): 70-75.]

[80] 王建柱. 三峡大坝的修建对库区动物的影响[学位论文]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006.

[81] Yu WG, Xia ZQ, Yu GR *et al*. Water temperature variation in Three Gorges Reservoir and its influences on procreation of Chinese sturgeons. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, **35**(1): 92-95. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-1980.2007.01.022. [余文公, 夏自强, 于国荣等. 三峡水库水温变化及其对中华鲟繁殖的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, **35**(1): 92-95.]

[82] Liu XQ, Wang HZ. Estimation of minimum area requirement of river-connected lakes for fish diversity conservation in the Yangtze River floodplain. *Diversity and Distributions*, 2010, **16**(6): 932-940. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00706.x.

[83] Zhang H, Mo KL, Li T *et al*. The potential influence of the Poyang Lake Hydraulic Project construction on river-lake migration of grass carp. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 600-610. [张辉, 莫康乐, 李婷等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对草鱼江湖洄游潜在的影响. 生态学报, 2022, **42**(2): 600-610.]

[84] Tao JP, Chen YB,Qiao Y *et al*. Hydroacoustic surveys on spatial distribution of fishes in the Three Gorges Reservoir during the first impoundment. *Journal of Hydroecology*, 2008, **29**(5):25-33. [陶江平, 陈永柏, 乔晔等. 三峡水库成库期间鱼类空间分布的水声学研究. 水生态学杂志, 2008, **29**(5):25-33.]

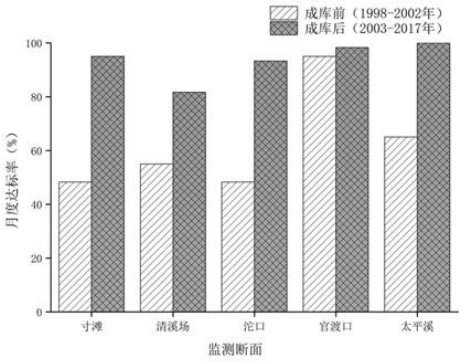
[85] Yang Z, Tang HY, Zhu D *et al*. Spatiotemporal patterns of fish community structures in the Three Gorges Reservoir and its upstream during the 175-m-deep impoundment. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(15): 5064-5075. [杨志, 唐会元, 朱迪等. 三峡水库 175m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局. 生态学报, 2015, **35**(15): 5064-5075.]

[86] Li MZ, Ma Q, Chen L *et al*. Natural reproduction and hydrologic requirements of pelagophil fish in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 84-96. [黎明政, 马琴, 陈林等. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 84-96.]

[87] Wang HZ, Liu XQ, Wang HJ. The Yangtze River-floodplain ecosystem: Multiple threats and holistic conservation. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 157-182. [王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 157-182.]

[88] Liu J, Yang SF, Shen Y. Impact of runoff and sediment from the Upper Yangtze River on deposition in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 33-39. [刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响. 泥沙研究, 2019, **44**(6): 33-39.]

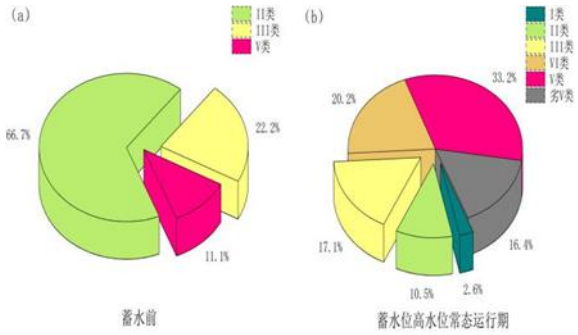
[89] Liu J, Shen Y, Yang SQ. Influence of non-balanced water and sediment transport in the Upper Yangtze River on sediment siltation in the Three Gorges Reservoir area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(6): 1333-1342. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202006008. [刘洁, 沈颖, 杨树青. 长江上游不平衡水沙输运对三峡库区泥沙淤积影响. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(6): 1333-1342.]



附图 I　成库前后主要干流断面月度达标率（符合或优于 III 类水质比例）

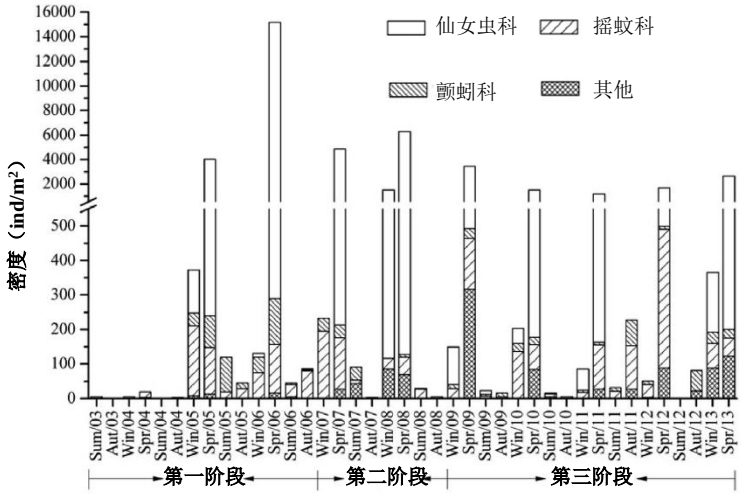
（数据来源：1998-2017 年三峡工程生态与环境监测系统水文水质同步监测重点站水质数据）

Attached Fig. I Monthly compliance rate of main stem sections before and after storage (Proportion of water quality meeting or better than Class III)



附图 II 三峡水库蓄水前后支流整体水质类别

Attached Fig.II Overall water quality categories of tributaries before and after storage in the Three Gorges Reservoir



附图 III　底栖动物不同季节种类密度

Attached Fig. III The species density of benthic fauna in different seasons