

三峡水库汛期运行对长江干支流浮游植物的影响

朱爱民,程郁春,周连凤,李嗣新

(水利部中国科学院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室,湖北 武汉 430079)

摘要:为了探究三峡水库 175 m 蓄水后工程运行对库区浮游植物影响,于汛期对长江干流及其 25 条支流浮游植物进行了调查,长江干流上游至下游共设朱沱、丰收坝、寸滩等 13 个采样点,綦江、嘉陵江、五布河等 25 条长江支流共设 94 个采样点。结果表明:(1)干流 145 m 淹没河段,硅藻种类比例明显降低,蓝藻、绿藻、甲藻、隐藻种类比例明显升高,但主要种类组成仍为硅藻-绿藻-蓝藻型;现存量升高不明显,硅藻比例明显降低、蓝藻比例明显升高;出现蓝藻优势种类且占比最高,硅藻优势种类占比下降,但仍为最高优势度种类,且最高其优势度基本不变;浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀性指数(J)下降不明显;(2)145 m 未淹没支流,175 m 淹没河段重新恢复为自然河流状态,其浮游植物群落也恢复到自然河流状态;(3)145 m 淹没支流河口,浮游植物种类组成特点明显改变;现存量明显升高,其组成发生较大变化;硅藻优势种类占比、最高优势度明显下降,绿藻、蓝藻、隐藻、甲藻等优势种类相应升高; H' 和 J 明显降低;(4)从上游至下游,干流和 25 条支流河口硅藻种类比例由最高到最低变化,蓝藻、绿藻种类比例由较低到最高变化。

关键词:三峡水库;汛期运行;长江干流;支流;浮游植物

中图分类号:Q178.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2018)05-0022-09

三峡水库为多功能年调节水库,每年 10 月下旬蓄水至 175 m 设计正常蓄水位,干流回水末端到达重庆,长江沿岸支流河口以上形成数千米到数十千米的回水区(黄真理等,2006)。汛期主要功能是防洪,按照调度运行方案,在汛期到来之前(5 月末至 6 月初),水库加大出库流量,使水位降至防洪限制水位 145 m,并在整个汛期(6 月中旬至 9 月末)基本维持此水位运行,以满足防洪需要。汛期运行水位为一年中最低,回水区末端消落至涪陵,涪陵以上干流及其支流河口由 175 m 淹没状态回复到天然河流状态,涪陵以下干流及其支流河口仍为淹没状态(张丹,2011)。

三峡水库蓄水运行改变了原来河流的水文情势,对水库长江干流及支流水生态系统产生显著影响(蔡庆华等,2006),水生生物群落也随之发生了很大变化(胡征宇等,2006);汛期多条支流发生了蓝藻水华(田泽斌等,2012;朱孔贤等,2012;许涛等,2014;杨敏等,2014)。有关三峡水库浮游植物的研究较多,但集中在蓄水水位未达到 175 m,鲜见汛期

运行对长江干支流浮游植物影响的报道。2010 年 10 月三峡水库首次蓄水至 175 m 水位运行,此后仅见汛期运行对单个支流浮游植物影响的研究(彭成荣等,2014)。为此,项目组在汛期运行的 6 月(水位 145.06~149.80 m)对三峡水库长江干流及其 25 条支流浮游植物进行调查,探讨了汛期运行对干、支流浮游植物的影响,旨在为三峡工程对水生态影响及水库水生态系统演变积累资料。

1 材料与方法

1.1 调查范围与样点设置

长江干流为 175 m 淹没河段,结合已有的监测断面,自上游至下游依次设朱沱、丰收坝、寸滩、扇沱、清溪场、白公祠、桐园、苦草沱、白帝城、培石、黄蜡石、屈原祠、银杏沱共 13 个采样点(图 1),其中朱沱-扇沱位于 145 m 未淹没河段,其他 9 个采样点位于 145 m 淹没河段,根据河宽,每个采样点设 1~3 个垂线(左、中、右)。

25 条支流为 175 m 淹没支流,自上游至下游依次为綦江、嘉陵江、五布河、御临河、龙溪河、梨香溪、渠溪河、龙河、黄金河、汝溪河、澎溪河、汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、草堂河、大溪河、大宁河、官渡河、抱龙河、神龙溪、吒溪河、童庄河、香溪河、九畹溪(图 1),其中綦江-龙溪河共计 5 条支流为 145 m 未淹没支流,其他 20 条为 145 m 淹没支流。根据河流

收稿日期:2016-11-15

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07528-003)。

作者简介:朱爱民,1963 年生,男,研究员,主要从事水库水生态和渔业生态研究。E-mail: zham@mail.ihe.ac.cn

长度,145 m 未淹没支流 175 m 以上和以下主河道各设 2~3 个采样点(上、中、下),分别共设 12 个和 10 个采样点;145 m 淹没支流 175 m 以上主河道各

设 2~3 个采样点(上、中、下),共计 52 个采样点;145 m 淹没河段下游(河口)各设 1 个采样点,共 20 个采样点;合计 94 个采样点。

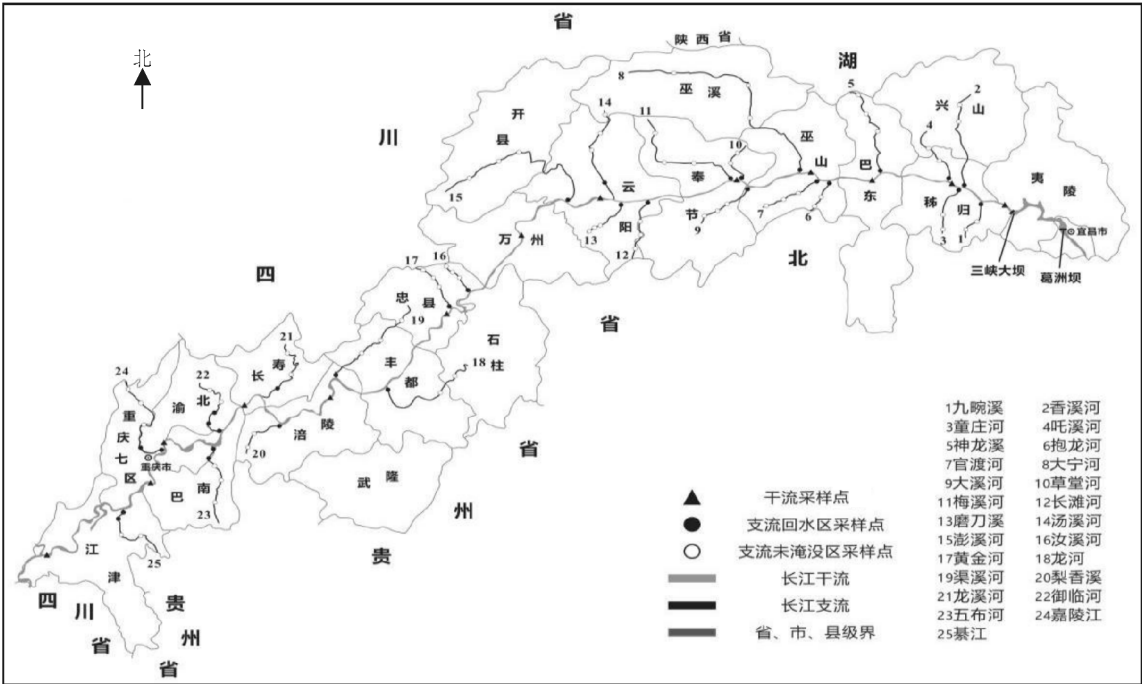


图 1 三峡水库长江干流及支流各采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in main stem of Yangtze River and its tributaries in the Three Gorges Reservoir

1.2 采样方法与种类鉴定

在 145 m 淹没水域,浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网在水面下画“∞”捞取,定量样品用 2.5 L 采水器分别在表层、1 m、3 m 和 5 m 等量取水,然后取 1 L 混合水样。在 145 m 未淹没水域,定性样品通常用 25 号浮游生物网在水中将网口对水流方向捞取,用 2.5 L 采水器取 1 L 定量样品;在水体较大、较深、流速较缓的地方,采用 145 m 淹没水域采集方法。样品现场加鲁哥氏液固定、室内处理,定性样品于光学显微镜下 10×40 倍观察,鉴定其种类(胡鸿钧等,2006),定量样品在室内沉淀 24 h,浓缩至 30 mL,取 0.1 mL 于 0.1 mL 计数框内进行视野法计数并鉴定种类(章宗涉等,1991;胡鸿钧等,2006)。现场测透明度和水温。

1.3 数据分析

浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀性指数(J)(沈韞芬等,1990)和种类优势度(Y)(王俊莉等,2014)计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S (n_i/N) \times \log_2(n_i/N)$$
$$J = H' / \log_2 S$$
$$Y = n_i/N \times f_i \times 100\%$$

式中: S 为种类数; N 为同一样品中个体总数; n_i 为第 i 种个体数; f_i 为出现频率。以 $Y>20\%$ 的种为各采样点优势种。

相似度指数(P): $P=c/(a+b-c)$

式中: a 、 b 为 2 个不同采样点种类数, c 为 2 个不同采样点的共有种类数。

使用 SPSS(Version 22.0.0)进行统计,用 ONE WAY ANOVA 进行方差分析,LSD 分析法检验数据的差异性。

2 结果

2.1 种类组成

2.1.1 干支流不同淹没影响河段比较 长江干流 145 m 未淹没河段有 4 门 69 种(变种),淹没河段有 6 门 152 种(变种)。145 m 未淹没支流,175 m 以上河段有 7 门 166 种(变种)、175 m 以下河段有 7 门 143 种(变种)。145 m 淹没支流,175 m 以上河段有 7 门 238 种(变种),145 m 淹没河段有 6 门 136 种(变种)。各河段主要种类是硅藻、绿藻、蓝藻(图 2),占 87.04%~99.37%,其它种类较少。

长江干流 145 m 淹没河段相较于未淹没河段硅藻比例显著降低($P<0.01$),蓝藻($P<0.01$)、绿

藻($P<0.05$)、甲藻($P<0.05$)、隐藻($P<0.05$)比例显著升高,但主要种类组成特点不变,仍为硅藻-绿藻-蓝藻型。145 m 未淹没支流,175 m 以上与以下河段种类组成比例无显著差异($P>0.05$)。145 m 淹没支流,145 m 淹没河段硅藻比例显著低于($P<0.01$),蓝藻、绿藻、甲藻、隐藻比例显著高于175 m 以上河段($P<0.01$)和干流145 m 淹没河段(绿藻、隐藻 $P<0.01$,蓝藻、甲藻 $P<0.05$),主要种类组成变为绿藻-硅藻-蓝藻型。表明干、支流145 m 淹没河段与其未淹没河段之间、支流与干流145 m 淹没河段之间,种类组成存在明显差异,且其差异一致,但支流145 m 淹没河段与175 m 以上河段之间的差异比干流145 m 淹没河段与未淹没河段之间的差异更大。

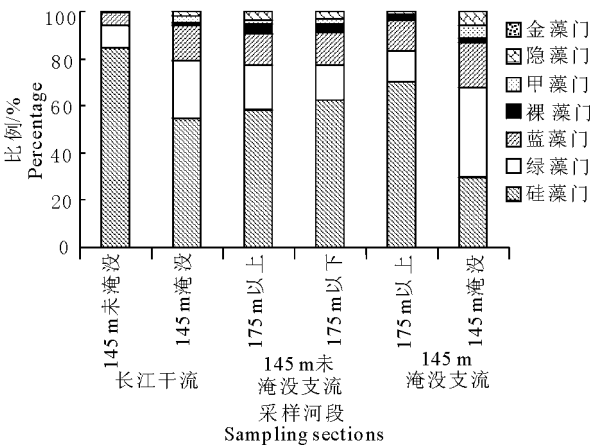


图2 不同河段浮游植物种类组成

Fig.2 Phytoplankton species composition in different sections of rivers

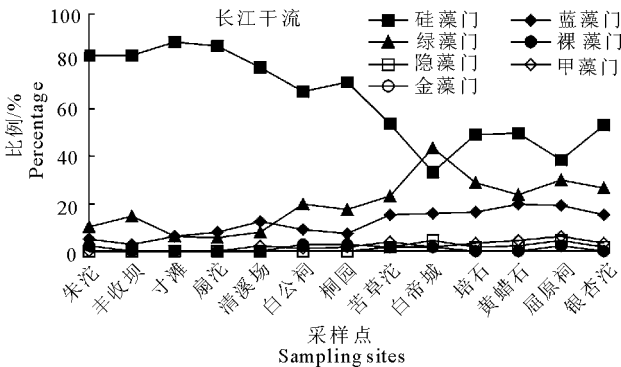


图3 长江干流和25条支流河口浮游植物种类组成空间变化

Fig.3 Horizontal distribution of phytoplankton species in the main stem of Yangtze River and estuaries of 25 tributaries

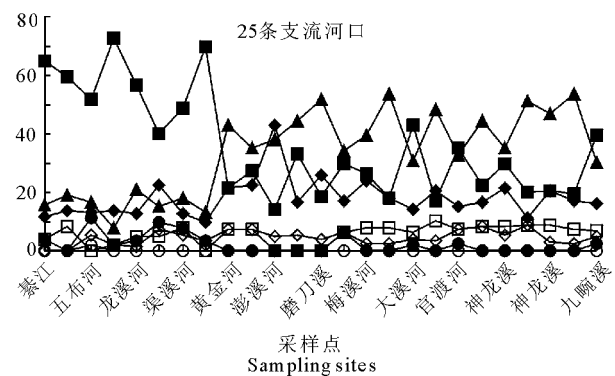
145 m未淹没支流:175 m 以下与以上河段之间组成无显著差异($P>0.05$)。145 m 淹没支流:与175 m 以上河段相比,145 m 淹没河段硅藻比例显著下降($P<0.01$),绿藻、隐藻、甲藻和蓝藻比例显著升

2.1.2 空间变化 自上游至下游,干流和支流河口硅藻、蓝藻、绿藻比例变化较大,且相同藻类变化趋势相同(图3),受淹没影响,其变化可分为三段:上游145 m 未淹没段(朱沱-扇沱和綦江-龙溪河),硅藻比例最高,蓝藻、绿藻比例较低,呈波动变化并维持相对稳定水平;接着为145 m 淹没过渡(缓冲)段或初始淹没段(清溪场-桐园和梨香溪-龙河),硅藻比例呈波动下降,蓝藻、绿藻比例呈波动升高,但硅藻比例仍高于蓝藻、绿藻比例;最后进入下游145 m 稳定(中下)淹没段(苦草沱-银杏沱和黄金河-九畹溪),硅藻比例波动下降至最低,蓝藻、绿藻比例波动上升到最高,并维持相对稳定水平。其中,干流硅藻比例仍最高,绿藻比例次之,蓝藻比例第三(白帝城断面除外),但支流河口绿藻比例升至最高,硅藻比例降为其次,蓝藻比例第三。

2.2 现存量及组成

2.2.1 干支流不同淹没影响河段比较 浮游植物密度平均值及变幅见表1。干流145 m 淹没河段高于145 m 未淹没河段,145 m 未淹没支流175 m 以下河段低于175 m 以上河段,但均无显著差异($P>0.05$)。145 m 淹没支流:145 m 淹没河段显著高于其175 m 以上河段和干流145 m 淹没河段($P<0.01$)。

浮游植物密度组成见图4。长江干流:与145 m 未淹没河段相比,145 m 淹没河段硅藻比例显著降低($P<0.01$)、蓝藻比例显著升高($P<0.01$),绿藻、裸藻、甲藻和隐藻比例升高均不显著($P>0.05$)。



高($P<0.01$ 、 $P<0.05$),裸藻比例升高不显著($P>0.05$)。支流145 m 淹没河段硅藻比例显著低于、隐藻比例显著高于干流145 m 淹没河段($P<0.01$),二者之间绿藻、蓝藻、裸藻和甲藻比例

各有高低, 无显著差异 ($P>0.05$)。表明干、支流 145 m 淹没河段与其未淹没河段相比, 密度组成变化一致, 但支流 145 m 淹没河段与未淹没河段的差异更明显, 且与干流 145 m 淹没河段也有明显差异, 支流 145 m 淹没河段与 175 m 以上河段之间密度组成的差异比干流 145 m 淹没河段与未淹没河段之间的差异更大。

表 1 浮游植物密度变幅及平均值

Tab.1 Mean and range of phytoplankton density			
水域	河段	密度变幅/ $\times 10^4$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$	密度均值/ $\times 10^4$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$
长江干流	145 m 未淹没	2.87~5.22	3.94
	145 m 淹没	2.05~57.37	11.93
145 m 未淹没支流	175 m 以上	3.13~759.07	80.89
	175 m 以下	4.04~119.30	18.94
145 m 淹没支流	175 m 以上	0.34~58.28	10.63
	145 m 淹没	3.44~31665.85	1974.54

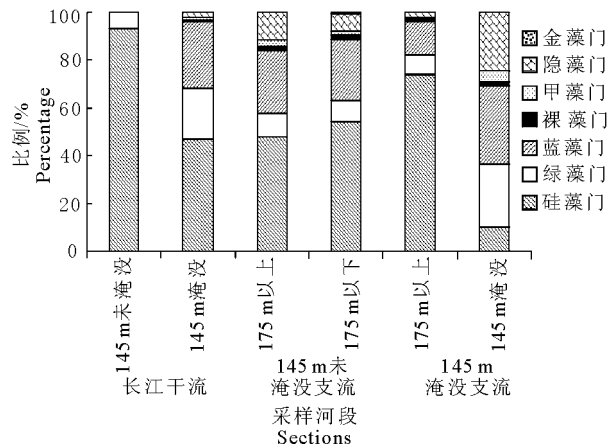


图 4 浮游植物密度组成

Fig.4 Phytoplankton density composition

2.2.2 空间变化 密度空间变化见图 5 和图 6。在上游 145 m 未淹没段(朱沱-扇沱和綦江-龙溪河), 密度维持较低水平, 进入 145 m 淹没过渡段和中下淹没段后(清溪场-银杏沱和梨香溪-九畹溪), 干流和支流河口出现数个高峰, 支流河口出现高峰无明显空间变化规律, 可能与不同支流营养状况、河口水文情势等有关, 干流出现高峰可能受干支流水文情势相互作用和支流河口高峰共同影响, 其高峰断面除苦草沱位于彭溪河河口上游约 700 m 外, 其余位于支流河口以下, 干流断面与支流河口之间种类相似度为 0.18~0.54, 最高峰断面白帝城位于草堂河河口下游 500 m, 种类相似度为 0.54, 66.67% 的优势种类与草堂河河口相同。

长江干流和各支流的浮游植物门类组成空间变化见图 7 和图 8。干流空间变化主要受淹没影响, 大致分 3 段(图 7), 上游 145 m 未淹没段(朱沱-扇

沱), 硅藻比例最高, 只有少部分绿藻; 接着为 145 m 淹没过渡段(清溪场-桐园), 硅藻比例呈波动下降, 蓝藻、绿藻比例呈波动升高, 但硅藻比例仍大幅高于蓝藻、绿藻比例; 下游 145 m 中下淹没段(苦草沱-银杏沱), 硅藻比例降至最低, 蓝藻、绿藻比例升到最高, 硅藻比例总体上略高于蓝藻和绿藻比例。同时, 该河段开始出现甲藻、隐藻和裸藻, 但维持较低水平。上述变化与种类组成(图 3)空间变化类似。

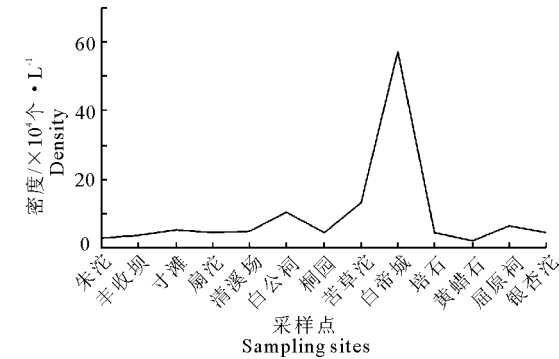


图 5 长江干流浮游植物密度空间变化
Fig.5 Horizontal distribution of phytoplankton density in main stem of Yangze River

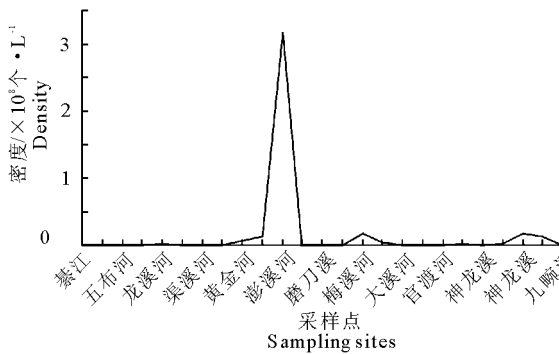


图 6 25 条支流河口浮游植物密度空间变化
Fig.6 Horizontal distribution of phytoplankton density in the estuaries of 25 tributaries

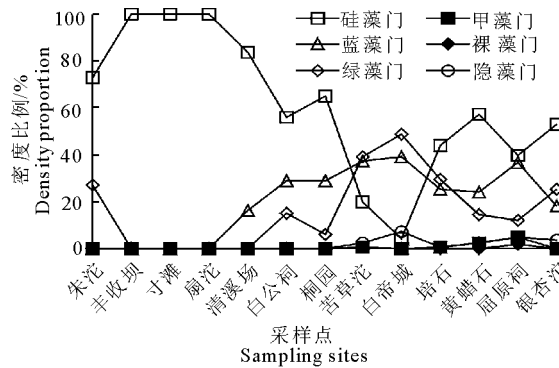


图 7 长江干流浮游植物密度组成空间变化
Fig.7 Horizontal distribution of phytoplankton density composition in the main stem of Yangze River

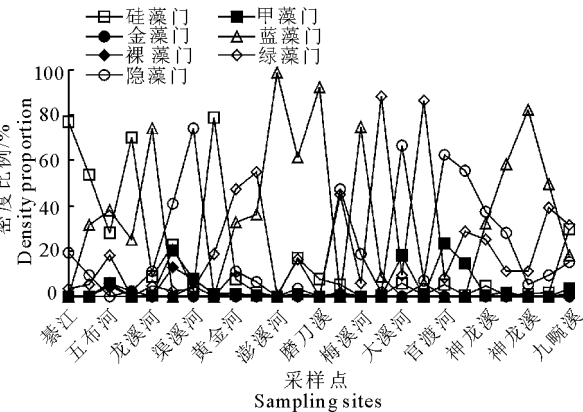


图8 25条支流河口浮游植物密度组成空间变化

Fig.8 Horizontal distribution of phytoplankton density composition in the estuaries of 25 tributaries

支流河口空间变化较干流复杂(图8),除受淹没影响外,也受不同支流营养状况及水文情势影响。总体上,硅藻比例在上游145 m未淹没段及淹没过渡段(綦江-龙河)呈波动变化并维持较高水平,下游145 m中下淹没段(黄金河-九响溪)在较低水平波动。绿藻比例呈2次上升-下降变化,蓝藻、隐藻和甲藻比例呈现2~3个高峰区,裸藻主要在未淹没段及淹没过渡段(五布河-龙河)出现,金藻只在未淹没段的1条支流出现。

2.3 优势种类

2.3.1 干支流不同淹没影响河段比较 不同河段浮游植物优势种类比较见表2。长江干流:与145 m未淹没河段相比,145 m淹没河段增加了蓝藻优势

表2 不同河段浮游植物优势种类

Tab.2 Dominant species of phytoplankton in different sections of rivers				
干支流	河段	采样点/个	种类数	优势种类及最高优势度/%
长江干流	145 m 未淹没	4	2 门 3 种	硅藻:小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.) 38.46、变异直链藻(<i>Melosira varians</i>) 35.00; 绿藻:二角盘星藻大孔变种(<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>clathratum</i>) 27.27
	145 m 淹没	9	3 门 6 种	硅藻:小环藻(<i>C.</i> sp.) 33.33、变异直链藻(<i>M. varians</i>) 38.93; 绿藻:空球藻(<i>Eudorina</i> sp.) 23.97; 蓝藻:中华小尖头藻(<i>Raphidiopsis sinensia</i>) 36.92、类颤藻鱼腥藻(<i>Anabaena osicellar-iordes</i>) 30.91、水华束丝藻(<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>) 29.96
145 m 未淹没支流	175 m 以上	12	4 门 10 种	硅藻:变异直链藻(<i>M. varians</i>) 33.33、绒毛平板藻(<i>Tabellaria flocculosa</i>) 26.67、尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>) 25.00、颗粒直链藻极狭变种(<i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i>) 20.83; 绿藻:二角盘星藻大孔变种(<i>P. duplex</i> var. <i>clathratum</i>) 25.40; 蓝藻:卷曲鱼腥藻(<i>A. circinalis</i>) 69.03、小席藻(<i>Phormidium tenus</i>) 46.89、泥污颤藻(<i>Oscillatoria limosa</i>) 38.46、微小平裂藻(<i>Merismopedia tenuissima</i>) 25.81; 隐藻:尖尾蓝隐藻(<i>Chroomonas acuta</i>) 46.01
	175 m 以下	10	3 门 8 种	硅藻:变异直链藻(<i>M. varians</i>) 54.39、小环藻(<i>C.</i> sp.) 20.00; 绿藻:双对栅藻(<i>Scenedesmus bijuga</i>) 25.40; 蓝藻:小席藻(<i>P. tenus</i>) 42.62、中华小尖头藻(<i>R. sinensia</i>) 32.43、为首螺旋藻(<i>Spirulina princeps</i>) 31.58、水华束丝藻(<i>A. flos-aquae</i>) 25.00、小颤藻(<i>O. tenuis</i>) 22.47
145 m 淹没支流	175 m 以上	52	4 门 22 种	硅藻:克洛脆杆藻(<i>Fragilaria crotonensis</i>) 44.87、美丽双壁藻(<i>Diploneis puella</i>) 44.29、微细异极藻近椭圆变种(<i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>subelliptica</i>) 32.43、变异直链藻(<i>M. varians</i>) 32.00、近缘桥弯藻(<i>Cymbella affinis</i>) 30.77、小环藻(<i>C.</i> sp.) 24.36、卵圆双壁藻(<i>D. ovalis</i>) 23.08、双头辐节藻(<i>Stauroneis anceps</i>) 23.08、短小舟形藻(<i>Navicula exigua</i>) 21.43、微细异极藻(<i>G. parvulum</i>) 20.27、尖针杆藻(<i>S. acus</i>) 20.22; 绿藻:空球藻(<i>E. sp.</i>) 49.23、双对栅藻(<i>S. bijuga</i>) 26.67、小空星藻(<i>Coelastrum microporum</i>) 21.92; 蓝藻:水华束丝藻(<i>A. flos-aquae</i>) 59.52、两栖颤藻(<i>O. tenuis</i>) 20.41-52.63、微小平裂藻(<i>M. tenuissima</i>) 44.07、点状平裂藻(<i>M. punctata</i>) 39.60、皮状席藻(<i>P. corium</i>) 35.71、泥污颤藻(<i>O. limosa</i>) 24.39、小席藻(<i>P. tenus</i>) 20.13; 裸藻:梭形裸藻(<i>Euglena acus</i>) 28.57
	145 m 淹没	20	5 门 13 种	硅藻:颗粒直链藻极狭变种(<i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i>) 22.09; 绿藻:球四鞭藻(<i>Carteria globulosa</i>) 78.45、空球藻(<i>E. sp.</i>) 49.27、韦氏藻(<i>Westella botryoides</i>) 23.64、小空星藻(<i>C. microporum</i>) 20.29; 蓝藻:水华微囊藻(<i>Microcystis flos-aquae</i>) 95.11、不定微囊藻(<i>M. incerta</i>) 79.65、水生集胞藻(<i>Synechocystis aquetilis</i>) 56.60、小席藻(<i>P. tenus</i>) 55.74、卷曲鱼腥藻(<i>A. circinalis</i>) 21.28; 隐藻:尖尾蓝隐藻(<i>C. acuta</i>) 39.07、嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>) 37.17; 甲藻:拟多甲藻(<i>Peridiniopsis</i> sp.) 20.94

种类,占比由 0 升至 50%,硅藻、绿藻优势种类占比大幅下降,但硅藻优势种类不变,优势度基本不变,且仍为最高优势度种类,绿藻优势种类优势度变化不大。145 m 未淹没支流:与 175 m 以上河段相比,175 m 以下河段主要是蓝藻优势种类占比增加、最高优势度下降,硅藻优势种类占比下降、最高优势度升高。145 m 淹没支流:与 175 m 以上河段相比,145 m 淹没河段硅藻优势种类占比(50.00%→7.69%)和最高优势度(44.87%→22.09%)大幅下降,绿藻(13.64%→30.77%)、蓝藻(31.82%→38.46%)、隐藻(0%→15.38%)、甲藻(0%→7.69%)优势种类占比不同程度升高,且蓝藻(59.52%→95.11%)、绿藻(49.23%→78.45%)最高优势度大幅升高,其中蓝藻中的水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)在澎溪河和梅溪河、不定微囊藻(*M. incerta*)在童庄河密度超过 10×10^6 个/L,已形成水华。

从表 2 可以看出,支流 145 m 淹没河段优势种的门类多于干流 145 m 淹没河段,硅藻最高优势度低于、绿藻、蓝藻最高优势度大幅高于干流 145 m 淹没河段。空球藻(*Eudorina* sp.)最高优势度大幅高于干流 145 m 淹没河段。因此,干流 145 m 淹没

河段利于蓝藻成为优势种类,支流 145 m 淹没河段利于蓝藻、绿藻、隐藻和甲藻成为优势种类,均不利于硅藻成为优势种类。支流 145 m 淹没河段优势种类的变化比干流 145 m 淹没河段的变化更大。

2.3.2 空间变化 长江干流(图 9)硅藻优势种类出现在上游 145 m 未淹没河段及 145 m 淹没过渡段(朱沱-桐园),下游 145 m 中下淹没段(苦草沱-银杏沱)出现率降低,蓝藻优势种类开始在该河段出现,绿藻优势种类在 145 m 未淹没和淹没河段均出现,但出现率较低。支流河口(图 9),硅藻优势种类出现在龙河及其以上 3 条 145 m 未淹没和淹没支流,隐藻、绿藻和甲藻优势种类均出现在 145 m 淹没支流,分别有 8 条、6 条和 1 条,蓝藻优势种类出现在 145 m 未淹没和淹没支流,且出现的支流最多,有 12 条。

2.4 多样性指数及水质

浮游植物多样性指数(H')和均匀性指数(J)见表 3。干流 145 m 淹没河段低于 145 m 未淹没河段,145 m 未淹没支流 175 m 以下河段高于 175 m 以上河段,但均无显著差异($P>0.05$),145 m 淹没支流 145 m 淹没河段极显著低于 175 m 以上河段($P<0.01$)。

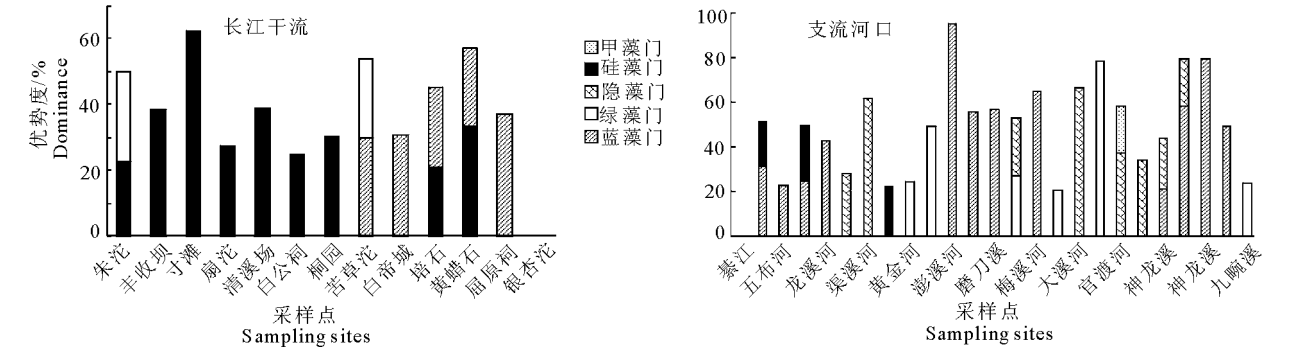


图 9 长江干流和 25 条支流河口各门优势种类优势度空间变化

Fig.9 Horizontal distribution of dominant phyla proportion of phytoplankton density in main stem of Yangze River and the estuaries of 25 tributaries

表 3 浮游植物多样性指数(H')和均匀性指数(J)

Tab.3 Diversity index (H') and evenness index (J) of phytoplankton

水域	河段	H' 变幅	H' 均值	J 变幅	J 均值
长江	145 m 未淹没	2.74~3.03	2.88	0.76~0.95	0.86
干流	145 m 淹没	2.19~3.04	2.73	0.59~0.82	0.74
145 m	175 m 以上	1.97~3.99	3.25	0.42~0.91	0.76
未淹没支流	175 m 以下	2.61~4.25	3.53	0.60~0.96	0.80
145 m	175 m 以上	1.65~4.64	3.59	0.60~0.98	0.86
淹没支流	145 m 淹没	0.40~3.70	2.49	0.10~0.86	0.62

按照 H' 和 J 的水质评价标准(沈韞芬等, 1990), J 评价的水质要好于 H' (表 4)。 H' 评价的

水质,干流 145 m 淹没河段与 145 m 未淹没河段相比,中污染样点比例略有增加;145 m 淹没支流:145 m淹没河段与 175 m 以上河段相比,中污染样点比例大幅增加,并出现重污染样点。145 m未淹没支流:175 m 以下河段水质好于 175 m 以上河段。

3 讨论

3.1 汛期运行对长江干流浮游植物的影响

本次调查表明,与 145 m 未淹没河段(自然河流)不同,145 m 淹没河段(河流型水库)主要是水流

表 4 不同河段各类水质样点比例

Tab.4 Proportion of water quality sites in different sections of rivers

水域	河段	多样性指数	样点比例/%		
			重污染	中污染	轻污染或无污染
长江干流	145 m	H'		75.00	25.00
	未淹没	J			100
	145 m	H'		88.89	11.11
	淹没	J			100
145 m 未淹没支流	175 m	H'		33.33	66.67
	以上	J		8.33	91.67
	175 m	H'		10.00	90.00
	以下	J			100
145 m 淹没支流	175 m	H'		15.38	84.62
	以上	J			100
	145 m	H'	5.00	70.00	25.00
	淹没	J	5.00	20.00	75.00

速度减缓、泥沙含量降低等水文情势变化导致透明度(39 cm)、水温(23.1℃)升高等水生态环境改变。

流速减缓等水文情势变化通过藻类自身浮力和个体生存方式的适应性直接影响浮游植物生存类型(朱爱民等,2013);Harris(1980)认为,水滞留时间对种类组成的影响取决于藻类的自身浮力,比重较大的如硅藻沉降快,需要高的流速支持其悬浮于水中,静水状态则适合大型的和有鞭毛的藻类;Sommer(1981)从个体生存方式提出藻类 r-k 生存对策,认为当水的扰动大于浮游植物繁殖时间,环境更适合于内禀增长率高的藻类,它们是先驱者,能在扰动间隙迅速建立种群,这些藻类个体通常很小,通过高繁殖率来抵御高死亡率;而低扰动,由于环境稳定,则更适合于那些个体大、竞争力强的后来者种群达到高峰。水温升高更适宜喜高温的藻类如蓝藻生长,并成为优势种类。透明度升高有利于促进藻类的光合作用,提高现存量。因此,145 m 淹没河段硅藻种类减少,蓝藻、绿藻、隐藻、甲藻等个体大、有鞭毛、喜高温的种类增加,但汛期来水全年最大,水库出库流量与天然流量相同,水交换量全年最大,145 m 淹没河段流速仍较快,透明度(29 cm)和水温(2.2℃)升高不多,145 m 淹没河段浮游植物受影响不大,虽然硅藻种类比例明显降低,蓝藻、绿藻、甲藻、隐藻比例明显升高,但主要种类组成特点不变,仍为硅藻-绿藻-蓝藻型。浮游植物现存量升高不明显,其组成变化与种类组成变化相同但程度小;虽然增加了蓝藻优势种类且占比最大,但硅藻优势种类不变、最高优势度基本不变,且仍为最高优势度种类;多样性指数 H' 和均匀性指数 J 下降不明显,显

示水质污染略有加重。汛期干流水文情势最接近天然河流,其淹没河段浮游植物受影响在周年中可能最轻。

3.2 汛期运行对支流浮游植物的影响

5 条 175 m 淹没支流成为 145 m 未淹没支流,其 175 m 淹没河段重新回到自然河流情势,浮游植物群落也恢复到自然河流状态。

20 条 145 m 淹没支流,145 m 淹没河段受到干流水体顶托,流速、水体交换量受到较大限制,成为湖泊型水体(张远等,2006),其水温(24.8℃)比 175 m 以上自然河段升高了 2.2℃,透明度(72.7 cm)较高,比干流 145 m 淹没河段分别高 33.7 cm、1.7℃。由于前述藻类自身浮力和藻类个体生存方式的适应性(Harris,1980;Sommer,1981)以及水温升高更适宜喜高温藻类如蓝藻的生长,较高透明度有利于促进藻类的光合作用、提高现存量。因此,145 m 淹没河段浮游植物受影响与干流相同但程度更大,即主要种类组成发生变化,为绿藻-硅藻-蓝藻型;现存量明显升高,其组成变化基本与种类组成变化相同;硅藻优势种类占比、最高优势度大幅下降,绿藻、蓝藻、隐藻、甲藻优势种类占比相应升高,蓝藻、绿藻最高优势度大幅升高,部分蓝藻在 3 条支流形成水华; H' 和 J 明显降低,显示水质污染明显加重。由于出现有害蓝藻水华,汛期淹没河段浮游植物受影响在周年中可能最大。

3.3 汛期运行对浮游植物空间变化影响

干流主要受淹没影响,较少受支流影响。25 条支流河口除受淹没影响外,还受不同支流营养状况以及干流水文情势相互作用影响,支流河口空间变化较干流复杂。

种类组成中,硅藻、蓝藻和绿藻呈明显空间变化。干流和支流河口相同藻类的变化趋势相同并与淹没变化同步,即从 145 m 未淹没段-145 m 淹没过渡段-145 m 中下淹没段,硅藻种类比例呈最高-波动下降-最低变化,蓝藻、绿藻种类比例呈较低-波动升高-最高变化。

干流和支流河口浮游植物密度无明显空间变化,其组成呈一定空间变化。干流密度组成空间变化与种类组成空间变化类似并与淹没变化同步。支流河口空间变化较干流复杂,大致趋势是上游 145 m 未淹没段及淹没过渡段支流河口硅藻比例较高、绿藻比例较低,下游 145 m 中下淹没段支流河口硅藻比例降低、绿藻比例升高,其他藻类比例无明显变化规律。

优势种类上,干流硅藻优势种类出现在 145 m 未淹没段和 145 m 淹没过渡段,145 m 中下淹没段出现率降低。蓝藻优势种类只出现在 145 m 中下淹没段,绿藻优势种类出现在 145 m 未淹没和淹没河段,但出现率较低。支流河口硅藻优势种类出现在 145 m 淹没过渡段及以上支流,隐藻、绿藻和甲藻优势种类只出现在 145 m 淹没支流,蓝藻优势种类出现在 145 m 未淹没与淹没支流。

志谢:水工程生态研究所邹怡、郑志伟、汪红军、池仕运、万力、冯坤等同事参加野外采样工作,在此表示感谢!

参考文献

- 蔡庆华,胡征宇,2006. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报,30(1):7-11.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类:系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 胡征宇,蔡庆华,2006. 三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究[J]. 水生生物学报,30(1):1-6.
- 黄真理,李玉樑,陈永灿,等,2006. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M].北京:中国水利水电出版社:6-18.
- 彭成荣,陈磊,毕永红,等,2014. 三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响[J]. 中国环境科学 34(7):1863-1871.
- 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等,1990. 微型生物监测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社:136.
- 田泽斌,刘德富,杨正健,等,2012. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 32(11):2083-2089.
- 王俊莉,刘冬燕,古滨河,等,2014. 基于浮游植物群落的安徽太平湖水环境生态评价[J]. 湖泊科学, 26(6):939-947.
- 许涛,王雨春,刘德富,等,2014. 三峡水库香溪河库湾夏季水华调查[J]. 生态学杂志,33(3):646-652.
- 杨敏,张晟,胡征宇,2014. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析[J]. 湖泊科学,26(3):371-378.
- 张丹,2011. 三峡回水变动区船舶航行路径优化及三维环境仿真研究[D]. 武汉:武汉理工大学.
- 张远,郑丙辉,刘鸿亮,2006. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 15(2):254-258.
- 章宗涉,黄祥飞,1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社:333-344.
- 朱爱民,胡菊香,李嗣新,等,2013. 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[J]. 湖泊科学,25(3):378-385.
- 朱孔贤,毕永红,胡建林,等,2012. 三峡水库神农溪 2008 年夏季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华暴发特性[J]. 湖泊科学,24(2):220-226.
- Harris G P, 1980. Temporal and spatial scales in phytoplankton ecology: Mechanisms, methods, and management[J]. Can J Fish Aqua Sci, 37: 877-900.
- Sommer U, 1981. The role of r-and K-selection in the succession of phytoplankton in Lake Constance[J]. Acta Ecologia, 2: 327-342.

(责任编辑 万月华)

Impact of the Operation of Three Gorges Reservoir During Wet Season on
Phytoplankton in Main Stem of Yangtze River and Its Tributaries

ZHU Ai-min, CHENG Yu-chun, ZHOU Lian-feng, LI Si-xin

(Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem
of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources
and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: In order to study the influence of 175 m impoundment project operation on phytoplankton, the phytoplankton was investigated during wet season in main stem of Yangtze River and its 25 tributaries in the Three Gorges Reservoir. In this research, thirteen sampling sites was set in the main stem of Yangtze river and ninety-four in the tributaries. Both qualitative and quantitative samples of phytoplankton were collected and the work of species identification was done with microscope, and Shannon-Wiener diversity indices, Pielou evenness indices and the species dominance were calculated. Results show that: (1) Compared to the unsubmerged reaches when the water level was 145 m, in backwater area (145m) of Yangtze River, bacillariophyta species proportion obviously decreased, and cyanophyta, chlorophyta, pyrrophyta and cryptophyta species proportion obviously increased, but species composition dominated by bacillariophyta, chlorophyta and cyanophyta was not changed. And standingcrop increased not obviously. However, bacillariophyta species proportion obviously decreased and cyanophyta species proportion obviously increased. In dominant species, the proportion of cyanophyta was the highest, bacillariophyta proportion declined, and the dominance of bacillariophyta remained the same as the inflooded reaches. The H' (Shannon-Wiener diversity index) and J of (Pielou evenness index) of phytoplankton declined not obviously. (2) The flooded reaches when the water level of the Three George Reservoir was 175 m and unsubmerged (145 m) tributaries were restored to natural river state again, and correspondingly phytoplankton community were restored to natural river state. (3) Phytoplankton species composition changed obviously in the estuary of flooded (145 m) tributaries. Compared to the unsubmerged reaches when the water level was 175 m, the standingcrop increased obviously and composition was changed greatly. In dominant species, bacillariophyta proportion and the highest dominance declined obviously, chlorophyta, cyanophyta, pyrrophyta and cryptophyta proportions increased correspondingly. The H' and J of phytoplankton declined obviously. (4) From upstream to downstream, in main stem of Yangtze River and estuary of 25 tributaries, bacillariophyta species proportion were changing from the highest to lowest, and cyanophyta and chlorophyta species proportion were changing from the lower to the highest.

Key words: Three Gorges Reservoir; operation in wet season; main stem of Yangtze River; tributary; phytoplankton