

赣江中下游浮游植物群落结构及其水质生物学评价

杨威¹, 刘琪², 张婷婷², 孙雨琛², 何平², 纪磊², 张萌³, 邓道贵²

(1. 淮北师范大学信息学院, 安徽 淮北 235000;

2. 淮北师范大学生命科学院, 安徽 淮北 235000;

3. 江西省环境保护科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要:为了探究赣江中下游浮游植物群落结构的季节变化,为渔业资源可持续利用、水质监测及生物多样性保护提供参考,2016年10月(秋季)、2017年1月(冬季)、4月(春季)和7月(夏季),对赣江中下游浮游植物群落结构进行季度调查。结果表明,赣江中下游共记录浮游植物5门、55属、95种。其中,绿藻门44种,占总浮游植物种类的46.0%;硅藻门29种,占30.5%;蓝藻门15种,占16.0%。浮游植物密度为 $82.3 \times 10^4 \sim 906.0 \times 10^4$ 个/L,平均值为 315.0×10^4 个/L。生物量为0.43~1.26 mg/L,平均值为0.69 mg/L。赣江支流浮游植物的平均密度和生物量(546.0×10^4 个/L, 1.07 mg/L)均高于干流(212.0×10^4 个/L, 0.52 mg/L)。干流主要优势种为小席藻(*Phormidium tenue*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*);支流主要优势种为小席藻、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)和水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)。浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Margalef 丰富度指数(D)的年均值分别为1.87和0.94,干流的 H' 值高于支流,而干流的 D 值低于支流。研究显示,赣江中下游水域均受到不同程度的污染,干流的污染程度比支流更为严重。

关键词:赣江;浮游植物;群落结构;生物学评价

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)02-0068-09

赣江是长江流域的主要支流,也是江西省第一大河,发源于闽赣交界的武夷山区,自南向北流经赣州、万安、吉安等20多个县市,至南昌市分四支注入鄱阳湖,干流长766 km。赣州市以上为上游,长255 km,赣州市至新干县城为中游,长303 km,新干县城至吴城县城为下游,长208 km。赣江流域属亚热带湿润季风气候,年降水量1400~1800 mm(王毛兰等,2007a)。近年来,赣江流域受到不同程度的污染,2006年1月,赣江干流总氮和总磷浓度分别为1.64 mg/L和0.02 mg/L(王毛兰等,2007b)。2009-2010年,赣江下游水质处于中度-重度污染状态(杨威等,2011)。随着污染的不断加重,2011年7月赣江中下游总氮和总磷浓度分别为5.77 mg/L和0.05 mg/L,水质处于中-富营养状

况(计勇等,2012)。2013年枯水期,赣江干流硝态氮和总磷浓度分别为1.85 mg/L和0.04 mg/L(王鹏等,2015)。

浮游植物是水体生态系统的初级生产者,在物质循环和能量转化过程中起着十分重要的作用。浮游植物的群落结构和现存量主要与水温、营养盐、浮游动物和鱼类牧食密切相关(Sommer et al,1986, Deng et al,2007,胡翠林等,2014)。目前,国内对赣江流域浮游植物群落结构的调查已有一些报道(胡美琴等,1988;陈彦良等,2009;刘足根等,2012;计勇等,2012)。赣江浮游植物的密度呈逐年上升趋势,其群落结构差异较大。由于这些调查研究的时间不足,不能很好地反映赣江流域浮游植物群落结构的季节变化特征。因此,本文通过对赣江中下游水域浮游植物4个季度的调查研究,揭示其群落结构的季节变化,以期为赣江中下游水域的渔业资源可持续利用、水质监测及生物多样性保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样时间和样点设置

2016年10月(秋季)、2017年1月(冬季)、4月(春季)和7月(夏季)分4次对赣江中下游水域浮游

收稿日期:2018-04-08

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A842);安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2019169);安徽高校科研平台创新团队项目(KJ2015TD001);国家水专项子课题-丰水型流域水生态功能区管理示范研究(2012ZX07501-001-06)。

作者简介:杨威,1985年生,男,硕士,讲师,主要从事浮游生物生态学研究。E-mail:yangwei851025@163.com

通信作者:邓道贵,博士,教授。E-mail:dengdg@263.net

植物进行调查,共设置 13 个采样点(图 1)。其中,干流 9 个采样点(1.吉安市,2.吉水县文峰镇,3.吉水县小江村,4.峡江巴邱镇,5.新干县,6.樟树市张家村,7.南昌市扬子洲,8.新建县樵舍,9.永修吴城);禾水上游 1 个采样点(10.永新县);袁河支流 3 个采样点(11.宜春市,12.新余市江口水库,13.樟树市临江镇)。

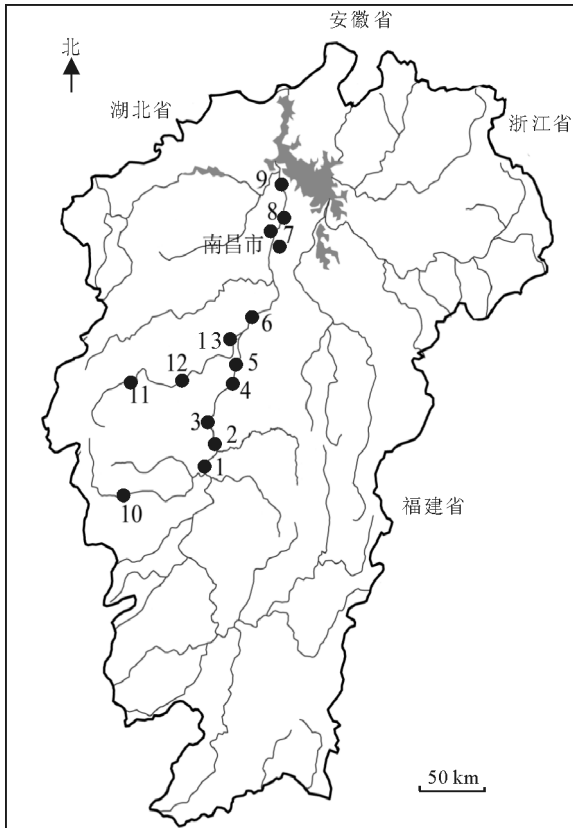


图 1 赣江中下游采样点位置

Fig.1 Sample site locations for the middle and lower Ganjiang River

1.2 浮游植物样品采集与鉴定

采集浮游植物定性样品时,将 25 号浮游生物网(64 μm)在水中往复做 ∞ 形回旋多次,收集样品。采集定量样品时,用 5 L 有机玻璃采水器每隔 0.5 m 或 1 m 分 3 层采集,每层取水样 5 L,混合后取 1 L 水样,现场用 Lugol 氏液固定,带回实验室沉淀 48 h 后,小心吸取上清液,浓缩至 50 mL。定性样品在显微镜下进行分类鉴定。定量样品用 0.1 mL 浮游生物计数板在显微镜下通过视野计数法计数。浮游植物密度计算方法如下:

$$N = \frac{C_s}{F_s \times F_n} \times \frac{V}{U} \times P_n$$

式中: N —1 L 水中浮游植物的密度(个/L); C_s —计数框的面积(mm^2); F_s —每个视野的面积

(mm^2), F_n —计数视野数; V —样品浓缩后的体积(mL); U —计数框容积(0.1 mL); P_n —计数所得到的浮游植物总数。种群密度以个/L 表示;浮游植物生物量的估算参照章宗涉等(1991)的研究方法;浮游植物种类鉴定主要参照胡鸿钧等(2006)。

1.3 浮游植物多样性指数

Shannon-Weiner 指数计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$

式中: H' —Shannon-Weiner 指数; S —种类总数; P_i —第 i 种密度占总密度的比例。 H' 值在 0~1 为重度污染,1~2 为中度污染,2~3 为轻度污染,大于 3 为清洁(周谐等,2006;段学花等,2010)。

Margalef 多样性指数计算公式如下:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中: D —Margalef 多样性指数; S —种类总数; N —所有物种总密度。 D 值在 0~1 为重度污染,1~2 为中度污染,2~3 为轻度污染,大于 3 为清洁(纪磊等,2016;孔俊霞等,2016)。

1.4 浮游植物优势度

浮游植物的优势度计算公式如下:

$$Y = n_i \times f_i / N$$

式中: Y —浮游植物优势度; n_i —物种 i 的密度; N —所有物种的总密度; f_i —物种 i 出现的频率,以 $Y \geq 0.02$ 的种类为优势种(徐兆礼等,1989)。

1.5 数据分析

采用统计软件 SPSS 17.0 对浮游植物密度、生物量及生物多样性指数的季节变化进行单因素方差(One-way ANOVA)分析,所有数据都用 $\ln(x+1)$ 进行标准化处理。

2 结果

2.1 浮游植物种类组成

赣江中下游水域共记录浮游植物 6 门、55 属、95 种。其中,绿藻门 24 属、44 种,占总浮游植物种类的 46%;硅藻门 17 属、29 种,占 30.5%;蓝藻门 10 属、15 种,占 16%;隐藻门 2 属、3 种,甲藻门 2 属、2 种,裸藻门 1 属、2 种(表 1)。

从空间分布来看,赣江干流共记录浮游植物 6 门、52 属、80 种,支流 6 门、46 属、71 种。从时间上看,赣江干流秋季、冬季、春季和夏季的种类数分别为 36 种、35 种、41 种和 45 种,支流分别为 33 种、21 种、34 种和 35 种。赣江干流 4 个季度的种类数均分别高于支流。

表1 赣江干流及支流浮游植物种类组成

Tab.1 Phytoplankton species composition in the main stream and tributaries of the Ganjiang River

种 类	干流	支流
绿藻门		
球衣藻 <i>Chlamydomonas globosa</i>	+	+
微芒藻 <i>Micractinium pusillum</i>		+
转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.	+	
螺旋弓形藻 <i>Schroederia spiralis</i>		+
拟菱形弓形藻 <i>S. nitzschioides</i>	+	+
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	+	+
纤细月牙藻 <i>Selenastrum gracile</i>	+	
蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i>	+	+
狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	+	+
针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	+	+
卷曲纤维藻 <i>A. convolutus</i>	+	+
拟新月藻 <i>Closteriopsis longissima</i>	+	+
湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i>	+	+
单生卵囊藻 <i>O. solitaria</i>	+	
小形卵囊藻 <i>O. parva</i>	+	+
椭圆卵囊藻 <i>O. elliptica</i>		+
并联藻 <i>Quadrigula chodatii</i>	+	
集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>	+	+
美丽胶网藻 <i>Mucidosphaerium pulchellum</i>		+
三角四角藻 <i>Tetraedron trigonum</i>	+	
三叶四角藻 <i>T. trilobulatum</i>	+	
微小四角藻 <i>T. minimum</i>	+	+
双射盘星藻 <i>Pediastrum biradiatum</i>	+	
单角盘星藻 <i>P. simplex</i>	+	
单角盘星藻具孔变种 <i>P. simplex</i> var. <i>duodenarium</i>		+
四角盘星藻 <i>P. tetras</i>	+	
二角盘星藻纤细变种 <i>P. duplex</i> var. <i>gracillimum</i>	+	+
爪哇栅藻 <i>Scenedesmus javaensis</i>		+
四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>	+	+
二形栅藻 <i>S. Dimorphus</i>	+	+
弯曲栅藻 <i>S. arcuatus</i>	+	+
齿牙栅藻 <i>S. denticulatus</i>	+	
双对栅藻 <i>S. bijuga</i>	+	+
弯曲栅藻扁盘变种 <i>S. arcuatus</i> var. <i>platydiscus</i>	+	
丝藻 <i>Ulothrix</i> sp.	+	
十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	+	
四角十字藻 <i>C. quadrata</i>	+	+
四足十字藻 <i>C. tetrapedia</i>	+	
小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>		+
纤细新月藻 <i>Closterium gracile</i>	+	+
纤细角星鼓藻 <i>Staurastrum gracile</i>	+	+
异刺四星藻 <i>Tetrastrum heterocanthum</i>	+	+
长绿梭藻 <i>Chlorogonium elongatum</i>	+	+
粗刺四棘藻 <i>Treubaria crassisпина</i>	+	
蓝藻门		
针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococopsis raphidioides</i>	+	+
点形平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	+	
微小平裂藻 <i>M. tenuissima</i>	+	+
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	+	+
细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	+	+
极大螺旋藻 <i>Spirulina maxima</i>	+	
小席藻 <i>Phormidium tenue</i>	+	+
窝形席藻 <i>P. foveolarum</i>	+	
小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	+	+
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	+	+

续表 1

种 类	干流	支流
水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flosaquae</i>	+	+
螺旋鱼腥藻 <i>Anabaena spiroides</i>	+	+
卷曲鱼腥藻 <i>A. circinalis</i>	+	+
弯形尖头藻 <i>Raphidiopsis curvata</i>	+	+
中华尖头藻 <i>R. sinensia</i>	+	+
隐藻门		
尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	+	+
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	+	+
啃蚀隐藻 <i>C. erosa</i>		+
甲藻门		
裸甲藻 <i>Cymnodinium aeruginosum</i>	+	+
二角多甲藻 <i>Peridinium bipes</i>	+	+
硅藻门		
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	+	+
变异直链藻 <i>M. varians</i>	+	+
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	+	+
窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i>	+	+
钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	+	+
短线脆杆藻 <i>F. brevistriata</i>	+	
钝脆杆藻中狭变种 <i>F. capucina</i> var. <i>mesolepta</i>		+
膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>	+	+
极小桥弯藻 <i>Encyonema perpusillum</i>	+	+
尖针杆藻 <i>Fragilaria acus</i>	+	+
近缘针杆藻 <i>Tabularia fasciculata</i>	+	+
短小曲壳藻 <i>Achnantheidium exiguum</i>	+	
隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>	+	+
扁圆舟形藻 <i>N. placentula</i>	+	
英吉利舟形藻 <i>N. anglica</i>	+	+
窄异极藻 <i>Gomphonema angustaum</i>	+	+
窄异极藻延长变种 <i>G. angustatum</i> var. <i>productum</i>		+
微细异极藻 <i>G. parvulum</i>	+	+
缢缩异极藻头状变种 <i>G. constrictum</i> var. <i>capitatum</i>	+	
间断羽纹藻 <i>Pinnularia interrupta</i>		+
羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	+	
双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i>	+	+
紫心辐节藻 <i>S. phoenicenteron</i>		+
尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>	+	+
扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	+	+
粗壮双菱藻 <i>Surirella robusta</i>	+	
线形菱形藻 <i>S. linearis</i>		+
卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>	+	
弯形弯楔藻 <i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	+	+
裸藻门		
尾裸藻 <i>Euglena caudata</i>		+
鱼形裸藻 <i>E. pisciformis</i>	+	+

注：“+”表示出现的种类。

Note: “+” stands for observed species.

2.2 浮游植物密度和生物量的时空分布

赣江中下游浮游植物密度为 $82.3 \times 10^4 \sim 906.0 \times 10^4$ 个/L, 平均值为 315.0×10^4 个/L; 生物量为 $0.43 \sim 1.26$ mg/L, 平均值为 0.69 mg/L。最大密度和最大生物量均出现在夏季, 最小密度和最小生物量均出现在冬季(图 2)。浮游植物密度和生物量均具有显著的季节差异($P < 0.05$)。

赣江干流和支流浮游植物密度均呈显著的季节变化($P < 0.05$), 支流的平均密度(546.0×10^4 个/L)明显高于干流(212.0×10^4 个/L); 干流和支流最大密度(589.0×10^4 个/L 和 1620×10^4 个/L)均出现在夏季, 其最小值(67.2×10^4 个/L 和 73.4×10^4 个/L)分别出现在秋季和冬季; 支流在春、夏、秋季的密度均高于干流(图 3)。

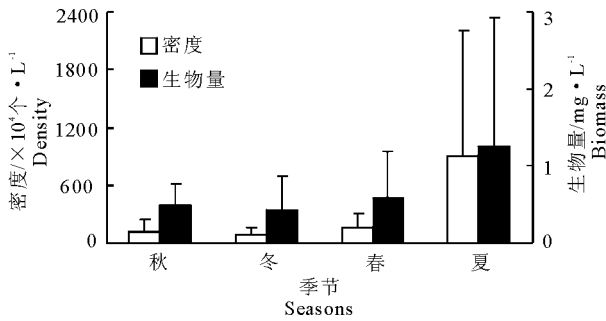


图2 赣江中下游浮游植物密度和生物量的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of phytoplankton density and biomass in the middle and lower Ganjiang River

赣江干流浮游植物生物量的季节差异显著 ($P < 0.05$), 而支流无显著性差异 ($P > 0.05$), 支流的平均生物量 (1.07 mg/L) 明显高于干流 (0.52 mg/L)。干流和支流的最高生物量 (0.86 mg/L 和 2.15 mg/L) 均出现在夏季, 最小值 (0.38 mg/L 和 0.49 mg/L) 分别出现在春季和秋季。支流在 4 个季节的生物量均高于干流(图 3)。

2.3 赣江中下游浮游植物优势种的时空分布

赣江干流浮游植物优势种在春季为小席藻

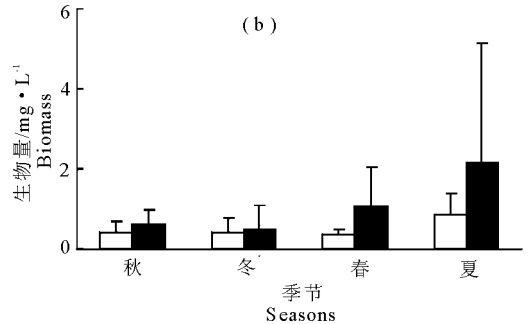
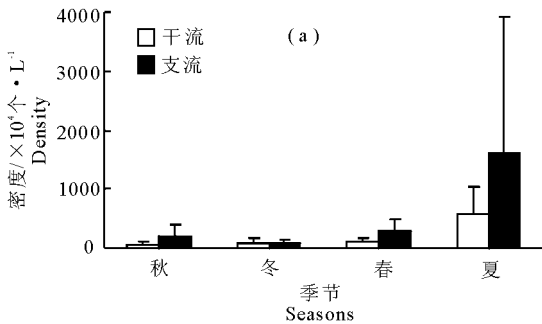


图3 赣江干流和支流浮游植物密度(a)和生物量(b)的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of phytoplankton density(a) and biomass(b) in the main stream and tributaries of Ganjiang River

2.4 浮游植物多样性指数的时空变化与水质评价

赣江中下游浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 的变化范围为 $1.57 \sim 2.12$, 平均值为 1.87 (表 3)。干流浮游植物的 H' (1.88) 大于支流 (1.86), 且干流呈现极显著的季节变化 ($P < 0.01$)。干流和支流 H' 的最大值 (2.13 和 2.15) 分别出现在春季和秋季, 最小值 (1.57 和 1.57) 均出现在夏季。Margalef 丰富度指数 (D) 的变化范围为 $0.78 \sim 1.08$, 平均值为 0.94 。干流浮游植物的 D 值 (0.93) 小于支流 (1.02), 干流和支流均无显著的季节差异 ($P > 0.05$)。干流和支流 D 的最大值 (1.03 和 1.19) 均出现在秋季, 最小值 (0.83 和 0.85) 均出现在冬季。

根据 Shannon-Wiener 多样性指数的评价标准, 赣江干流和支流均处于中度污染, 其中干流和支流

(*P. tenue*) 和卵形隐藻 (*C. ovata*), 优势度分别为 0.16 和 0.09 ; 在夏季为弯形尖头藻 (*R. curvata*) 和小席藻, 优势度分别为 0.10 和 0.51 ; 在秋季为小席藻和尖尾蓝隐藻 (*C. acuta*), 优势度分别为 0.15 和 0.09 ; 在冬季为颗粒直链藻 (*M. granulata*), 优势度为 0.11 ; 其中, 小席藻年均密度最大, 为 $87.9 \times 10^4 \text{ 个/L}$, 占总密度的 41.46% (表 2)。

支流优势种在春季为颤藻 (*Oscillatoria* sp.), 优势度为 0.08 ; 在夏季为微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 和小席藻, 优势度分别为 0.10 和 0.64 ; 在秋季为水华束丝藻 (*A. flos-aquae*), 优势度为 0.07 ; 在冬季为小席藻和四尾栅藻 (*S. quadricauda*), 优势度分别为 0.13 和 0.09 。其中, 小席藻年均密度最大, 为 $277.0 \times 10^4 \text{ 个/L}$, 占浮游植物总密度的 50.7% 。

本次调查发现, 在春季和冬季, 干流优势种数多于支流, 秋季支流优势种数多于干流。在干流和支流中, 小席藻、四尾栅藻、颗粒直链藻、梅尼小环藻、钝脆杆藻和卵形隐藻作为优势种在不同季节出现频率较高。

秋季处于轻度污染, 而冬季和夏季处于中度污染。根据 Margalef 丰富度指数的评价标准, 赣江干流和支流分别处于重度和中度污染, 其中秋季处于中度污染, 而冬季处于重度污染。

3 讨论

3.1 赣江浮游植物优势种变化及其成因

自 20 世纪 80 年代以来, 赣江浮游植物群落结构发生了较大的变化 (表 4)。1982 - 1983 年, 赣江浮游植物密度仅为 $6.0 \times 10^4 \text{ 个/L}$, 且以硅藻为优势类群; 2009 - 2010 年, 浮游植物密度达到 $83.9 \times 10^4 \text{ 个/L}$, 优势类群转变为硅藻和绿藻; 2011 年, 赣江的优势类群为硅藻、绿藻和蓝藻。随着赣江水体污染的不断加剧, 2016 - 2017 年, 浮游植物密度达

到 315.0×10^4 个/L, 蓝藻成为第一优势类群, 水质 为中度—重度污染。

表 2 赣江干流及支流浮游植物优势种及优势度

Tab.2 Dominant phytoplankton species and their dominance values in the main stream and tributaries of Ganjiang River

种类	秋季		冬季		春季		夏季	
	干流	支流	干流	支流	干流	支流	干流	支流
绿藻门								
狭形纤维藻 <i>A. angustus</i>					0.03			
针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>					0.03			
四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>	0.05	0.03		0.09	0.06	0.05		
四角十字藻 <i>C. quadrata</i>			0.04					
蓝藻门								
微小平裂藻 <i>M. tenuissima</i>			0.02				0.05	0.10
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.		0.04						
小席藻 <i>P. tenue</i>	0.15	0.04	0.06	0.13	0.16	0.04	0.51	0.64
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	0.04	0.04			0.03	0.08		
水华束丝藻 <i>A. flos-aquae</i>		0.07						
螺旋鱼腥藻 <i>A. spiroides</i>		0.04						
卷曲鱼腥藻 <i>A. circinalis</i>				0.05		0.03		
弯形尖头藻 <i>R. curvata</i>							0.10	0.02
硅藻门								
颗粒直链藻 <i>M. granulata</i>	0.04	0.07	0.11		0.07	0.04		
变异直链藻 <i>M. varians</i>				0.03				
梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.04	0.05	0.02	0.08	0.02	0.04		
钝脆杆藻 <i>F. capucina</i>		0.03	0.02			0.03	0.04	0.03
尖针杆藻 <i>F. acus</i>				0.04				
近缘针杆藻 <i>T. fasciculata</i>					0.04	0.04		
英吉利舟形藻 <i>N. anglica</i>	0.02							
双头辐节藻 <i>S. anceps</i>	0.04							
隐藻门								
尖尾蓝隐藻 <i>C. acuta</i>	0.10	0.02	0.06	0.04	0.03			
卵形隐藻 <i>C. ovata</i>	0.07	0.05	0.04		0.09	0.06		

表 3 赣江中下游浮游植物群落多样性指数

Tab.3 Diversity indices of the phytoplankton community in the middle and lower Ganjiang River

指数	水域	秋季	冬季	春季	夏季	均值
H'	干流	2.10 ± 0.29	1.72 ± 0.50	2.13 ± 0.30	1.57 ± 0.34	1.88 ± 0.12
	支流	2.15 ± 0.27	1.92 ± 0.04	1.79 ± 0.53	1.57 ± 0.20	1.86 ± 0.20
D	干流	1.03 ± 0.17	0.83 ± 0.19	0.97 ± 0.17	0.88 ± 0.21	0.93 ± 0.10
	支流	1.19 ± 0.11	0.85 ± 0.08	1.01 ± 0.23	1.03 ± 0.22	1.02 ± 0.12

表 4 赣江浮游植物优势种的历史变化

Tab.4 Historical data on dominant phytoplankton species in Ganjiang River

年份	密度/ $\times 10^4$ 个 \cdot L $^{-1}$	优势种	污染状态	参考文献
1982-1983	6.0	颗粒直链藻、中型脆杆藻、粗壮双菱藻	中污	胡美琴等, 1988
2009-2010	83.9	梅尼小环藻、舟形桥弯藻、四尾栅藻、小球藻	中污	刘足根等, 2012
2010-2011	64.0	舟形藻、针杆藻、团藻、栅藻和颤藻、螺旋藻	轻度-严重	计勇等, 2012
2016-2017	315.0	小席藻、微小平裂藻、弯形尖头藻、颗粒直链藻、梅尼小环藻、四尾栅藻、卵形隐藻	中度-重度	本研究

朱宜平等(2010)认为水体流速影响浮游植物的生长;在汉江,水流缓慢是影响汉江中下游硅藻水华发生的重要原因(吴兴华等,2017);王静雅等(2015)对三峡水库坝前水域的研究表明,支流水体流速缓慢和营养物质富集,有利于浮游植物的生长,而干流水体流速较快、营养盐易扩散,不利于浮游植物的生

长。在赣江,支流浮游植物的年平均密度(546.0×10^4 个/L)高于干流(212.0×10^4 个/L)。这可能是由于江口水库采样点位于袁河的中游,属于湖库型水体,其水流缓慢、外源性营养物质不断积累,为浮游植物的生长提供了良好的条件(张柱等,2011);而干流水流较快,不利于浮游植物的生长,从而造成了

干流浮游植物的密度较低,这与朱爱民等(2013)研究结果一致。

3.2 浮游植物密度及优势种与水质评价

根据藻类污染指示种,菱形藻、直链藻、舟形藻、针杆藻、栅藻和颤藻是 α -中污和 β -中污指示种(林碧琴等,1998;计勇,2012),梅尼小环藻和微小平裂藻为 α -中污指示种(沈蕴芬等,1990),小球藻和隐藻是中污指示种(况琪军等,2005)。本次调查中,赣江中下游主要以小席藻、弯形尖头藻、颤藻、四尾栅藻、尖尾蓝隐藻、卵形隐藻、梅尼小环藻和颗粒直链藻为优势种;此外,作为富营养化指示种的小席藻和隐藻(潘双叶等,2008;彭凯等,2018)在本次调查中出现频率较高,小席藻的年均密度占浮游植物总密度的46.30%。因此,从优势种的组成来看,赣江水质处于中度污染,且达到富营养化状态。另一方面,沈蕴芬等(1995)认为浮游植物密度小于 10^6 个/L的为贫营养型水体,密度大于 10^6 个/L的为富营养型水体。本研究中,赣江中下游浮游植物的密度为 315.0×10^4 个/L,表明赣江中下游水体已处于富营

养化状态,这与优势种类污染指示种的评价结果一致。

3.3 浮游植物多样性与水质评价

生物多样性作为反映浮游植物群落生态特征的重要指标,不仅可以用来评价水体的污染程度,还可以从生态系统层面反映其稳定性(高世荣等,2006);而多样性指数和水质的关系复杂,受水体类型、计数方法和种类鉴定等因素影响(孙军等,2004)。本研究中,根据浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Margalef 丰富度指数(D)的评价标准,赣江中下游水质处于中度-重度污染,干流受污染程度高于支流,这与用浮游甲壳动物和底栖动物多样性指数评价的赣江水质结果相一致(杨威等,2011;丁建华等,2012)。因此,利用浮游植物群落的多样性指数能够较好地评价赣江水质状况。

3.4 与长江流域其他支流浮游植物群落结构比较

与嘉陵江、沱江、乌江、香溪河和湘江等长江流域的支流相比,赣江中下游浮游植物的群落结构存在明显的差异(表5)。

表5 与长江其它支流浮游植物群落结构的比较

Tab.5 Comparison of phytoplankton community structure in tributaries of Yangtze River

河流	密度/ $\times 10^4$ 个 \cdot L $^{-1}$	主要优势种属	多样性指数 (H')	污染状态	文献来源
嘉陵江	47	隐藻、甲藻、硅藻	2.30~2.80	中度	杨敏等,2016
沱江	380	梅尼小环藻、微小平裂藻、脆杆藻、直链藻、尖尾蓝隐藻	3.67	中度-重度	陶敏等,2016a;2016b
乌江	94.4	小环藻、脆杆藻、舟形藻、针杆藻、顶棘藻	1.02	中度	肖晶,2017
香溪河	735~4482	小环藻、直链藻、小球藻、衣藻	1.52~2.24	中度	方丽娟等,2014
湘江	12.5	变异直链藻、双菱藻、颤藻、二角多甲藻、栅藻、纤维藻、黄丝藻	3.71	中度	王晓清等,2013
赣江中下游	315	小席藻、弯形尖头藻、颗粒直链藻、微小平裂藻、四尾栅藻、卵形隐藻	1.87	中度-重度	本研究

沱江、乌江、香溪河和湘江都是以硅藻为第一优势类群,嘉陵江以隐藻为第一优势类群,而赣江中下游以小席藻为第一优势种类。就密度而言,赣江中下游浮游植物密度(315×10^4 个/L)高于嘉陵江(47×10^4 个/L)、乌江(94.4×10^4 个/L)和湘江(12.5×10^4 个/L),而低于沱江(380×10^4 个/L)和香溪河($735 \times 10^4 \sim 4482 \times 10^4$ 个/L)的密度;此外,湘江(3.71)、沱江(3.67)和嘉陵江(2.30~2.80)的 Shannon-Wiener 多样性指数均高于赣江(1.87)。从污染状态来看,嘉陵江、乌江、湘江和香溪河都处于中度污染状态,而赣江处于中度-重度污染状态。因此,长江流域主要支流均处于不同程度的污染水平,需加强河流水环境保护,防止水质进一步恶化。

参考文献

- 陈彦良,吴志强,王玉彬,等,2009. 赣江中游冬季浮游生物的调查分析[J]. 南昌大学学报, 33(3): 285-289.
- 丁建华,杨威,金显文,等,2012. 赣江下游流域大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 24(4): 593-599.
- 段学花,王兆印,徐梦珍,2010. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京:清华大学出版社.
- 方丽娟,刘德富,张佳磊,等,2014. 三峡水库175 m蓄水前后香溪河库湾浮游植物的群落结构[J]. 水生态学杂志, 35(3): 1-9.
- 高世荣,潘力军,孙凤英,等,2006. 用水生生物评价环境水体的污染和富营养化[J]. 环境科学与管理, 31(6): 174-176.

- 巩俊霞, 张金路, 王新美, 等, 2016. 采煤塌陷区池塘夏季浮游植物群落结构及环境评价[J]. 水产学杂志, 29(6): 41-46.
- 胡翠林, 王圣瑞, 过龙根, 等, 2014. 洱海鲢、鳙的食物组成及与太湖新银鱼的食性重叠研究[J]. 水生生物学报, 38(4): 706-713.
- 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.
- 胡美琴, 林锡芝, 1988. 万安大坝截流前赣江的浮游植物[J]. 淡水渔业, (3): 39-43.
- 计勇, 张洁, 樊后保, 等, 2012. 赣江中下游浮游藻类群落结构与水质评价[J]. 中国农村水利水电, (5): 28-31.
- 纪磊, 李晓明, 邓道贵, 2016. 淮北煤矿区塌陷湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 水生生物学报, 40(1): 147-156.
- 林碧琴, 谢淑琦, 1998. 水生藻类与水体污染监测[MJ]. 沈阳: 辽宁大学出版社.
- 刘足根, 张柱, 张萌, 等, 2012. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分[J]. 长江流域资源与环境, 21(3): 375-384.
- 潘双叶, 陈元, 翁燕波, 等, 2008. 东钱湖浮游生物调查以及水质生态学评价[J]. 中国环境监测, 24(6): 96-99.
- 彭凯, 李太民, 刘利, 等, 2018. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 30(1): 183-191.
- 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.
- 沈韞芬, 冯伟松, 顾曼如, 等, 1995. 河流的污染监测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 孙军, 刘东艳, 2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报, 26(1): 62-75.
- 陶敏, 谢碧文, 齐泽民, 等, 2016a. 沱江浮游植物群落特征及水质评价[J]. 海洋与湖沼, 47(4): 854-861.
- 陶敏, 王永明, 谢碧文, 等, 2016b. 沱江浮游生物群落时空分布及相关环境因子分析[J]. 水生生物学报, 40(2): 301-312.
- 王静雅, 汪志聪, 李翀, 等, 2015. 三峡水库坝前水域浮游植物群落时空动态研究[J]. 水生生物学报, 39(5): 877-884.
- 王毛兰, 周文斌, 胡春华, 2007a. 赣江流域水体无机氮分布特征[J]. 南昌大学学报, 31(3): 271-275.
- 王毛兰, 周文斌, 胡春华, 2007b. 枯水期赣江流域氮磷的分布特征[J]. 地球与环境, 35(2): 166-170.
- 王鹏, 陈多多, 陈波, 2015. 赣江水体氮磷营养盐分布特征与污染源[J]. 江西师范大学学报, 39(4): 435-440.
- 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等, 2013. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. 水生生物学报, 37(3): 488-494.
- 吴兴华, 殷大聪, 李翀, 等, 2017. 2015-2016年汉江中下游硅藻水华发生成因分析[J]. 水生态学杂志, 38(6): 19-26.
- 肖晶, 2017. 梯级筑坝对浮游植物功能群变化的影响—以乌江流域为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学.
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与蛤蜊渔场的关系[J]. 生态学杂志, 8(4): 13-15.
- 杨敏, 马芊芊, 黄婧, 2016. 嘉陵江浮游植物群落及富营养化变化趋势分析[C]. 北京: 中国环境科学学会学术年会议论文集(第2卷).
- 杨威, 邓道贵, 孟小丽, 等, 2011. 赣江下游及其支流浮游甲壳动物的群落结构[J]. 生态科学, 30(5): 547-552.
- 张柱, 刘足根, 张萌, 等, 2011. 赣江一级支流浮游植物群落动态特征分析—以袁河为例[J]. 长江流域资源与环境, 20(5): 546-552.
- 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.
- 周谐, 郑坚, 黄书铭, 等, 2006. 三峡库区重庆段浮游藻类调查及水质评价[J]. 中国环境监测, 22(4): 70-73.
- 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.
- 朱宜平, 张海平, 李飞鹏, 等, 2010. 水动力对浮游生物影响的围隔研究[J]. 环境科学, 31(1): 69-75.
- Deng D G, Xie P, Zhou Q, et al, 2007. Studies on temporal and spatial variations of phytoplankton in Lake Chaohu [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 49(4): 409-418.
- Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, et al, 1986. The PEG model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters[J]. Archiv für Hydrobiologie, 106: 433-471.

(责任编辑 万月华)

Phytoplankton Community Structure and Biological Evaluation of Water Quality in the Middle and Lower Ganjiang River

YANG Wei¹, LIU Qi², ZHANG Ting-ting², SUN Yu-chen², HE Ping²,
JI Lei², ZHANG Meng³, DENG Dao-gui²

(1. Information College, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, P.R.China;

2. School of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, P.R.China;

3. Jiangxi Provincial Institute of Environmental Protection Sciences, Nanchang 330029, P.R.China)

Abstract: Phytoplankton is the primary producer in aquatic ecosystems and plays an important role in maintaining the ecological balance. Thus, phytoplankton community structure is an important indicator of water quality. In this study, we explored the seasonal variation of phytoplankton community structure in the middle and lower reaches of Ganjiang River, aiming to provide a reference for sustainable utilization of fishery resources, water quality evaluation and biodiversity protection. Samples were collected at 13 sampling stations in both the main stream and tributaries during October 2016, and January, April and July 2017. Sample analyses focused on phytoplankton density, dominant species and species diversity. A total of 95 species, belonging to 55 genera and 5 phyla, were collected and Chlorophyta (44 species) dominated, followed by Bacillariophyta (29 species) and Cyanophyta (15 species), accounting respectively for 46.0%, 30.5% and 16.0% of the total species. The ranges of phytoplankton density and biomass were $82.3 \times 10^4 - 906.0 \times 10^4$ cells/L and 0.43 mg/L - 1.26 mg/L, with average values of 315.0×10^4 cells/L and 0.69 mg/L. The annual density and biomass of phytoplankton in tributaries (546.0×10^4 cells/L, 1.07 mg/L) were higher than in the main stream (212.0×10^4 cells/L, 0.52 mg/L). Dominant species in the main stream were *Phormidium tenue*, *Melosira granulata*, *Cryptomonas ovata* and *Chroomonas acuta*, while tributaries were dominated by *P. tenue*, *Merismopedia tenuissima*, *Scenedesmus quadricauda* and *Aphanizomenon flos-aquae*. The mean values of the Shannon-Wiener diversity index and Margalef abundance index of the phytoplankton community in the middle and lower Ganjiang River were 1.87 and 0.94, respectively. The Shannon-Wiener diversity index in the main stream was higher than that in tributaries, while the Margalef abundance index in the main stream was lower. Our results indicate that water quality in the middle and lower Ganjiang River is influenced by varying degrees of pollution and that pollution is heavier in the main stream than in tributaries.

Key words: Ganjiang River; phytoplankton; community structure; biological evaluation of water quality