

金沙江下游浮游植物群落生态特征及与环境因子关系

李 博^{1,2}, 苏 巍^{1,2}, 黄 涛^{1,2}, 胡凡旭^{1,2}, 姜 伟^{1,2}, 唐锡良³, 孙 干³

(1. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 湖北宜昌 443100;

2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443100;

3. 中国三峡建工集团有限公司, 四川成都 610041)

摘要:为探究金沙江下游干流江段浮游植物群落特征及物种与生境之间的关系,于2019年6月和10月对金沙江下游攀枝花至水富段因梯级电站蓄水产生的3类不同水体(自然河流型、过渡型、类湖泊型)开展浮游植物与水环境调查,结果显示:2次调查共鉴定出浮游植物7门53属74种,主要以硅藻(47.30%)、绿藻(33.78%)和隐藻(6.76%)为主;浮游植物密度变化范围为 $13.9 \times 10^4 \sim 105 \times 10^4$ 个/L,其中6月平均密度(54.92×10^4 个/L)高于10月(27.22×10^4 个/L),自然河流型水体平均密度低于其他2种类型水体。硅藻在自然河流型水体为绝对优势种,在过渡型水体和类湖泊型水体中其优势度降低,而蓝藻和绿藻优势度增加,但3种水体中以小环藻(*Cyclotella* sp.)平均优势度最大。各优势种6月生态位宽度 B_i 和生态位重叠 ΔS_{ij} 分别为0.13~0.77和1.04~38.46,10月分别为0.10~0.80和3.55~39.48,和10月份相比,6月各优势种生态位宽度 B_i 较高,而优势种间生态位重叠 ΔS_{ij} 数值较低,表明6月各优势种种间竞争态势相对均衡,群落状态相对稳定。Shannon-Wiener指数(H')、Margalef指数(D)及Pielou均匀度指数(J)变化范围分别为1.99~2.69、2.56~5.88和0.50~0.78,总体表现为6月>10月,自然河流型水体>过渡型水体>类湖泊型水体,各江段水体处于 α - β 中污染状态。浮游植物与环境因子的典范分析(Canonical Analysis)结果表明:透明度、流速、水温、溶解氧、总氮是影响浮游植物群落的主要环境因子,且不同优势种对环境因子的响应有所不同。研究可为金沙江下游梯级库区水资源保护和生态修复提供科学依据。

关键词:浮游植物;群落结构;优势种;生态位;环境因子;金沙江下游

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)04-0018-11

浮游植物是水体中重要的初级生产者,在生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用(秦雪等,2016)。浮游植物因其个体微小、细胞结构简单、生命周期短等特点,相比于其他生物类群,其群落结构的组成和变化对环境的变化响应更为迅速,对环境的变化更具指示作用(高琦等,2019)。生态位理论已广泛应用于解释物种群落结构的研究(杨文焕等,2020a),物种的生态位宽度和种间生态位重叠反映了浮游植物群落的基本结构及发展状态,解释了其丰富度和分布情况,有助于了解优势物种对资源利用的生态习性及其相互关系(王翠红和张金屯,2001)。

金沙江下游是指从攀枝花(雅砻江河口)到宜宾(岷江河口)的长江干流江段,流程约782 km(张雄

等,2014)。该河段为西南山地急流地段,河床深切,滩潭交替,缓急相间,复杂多样的水域和沿岸带生境孕育了丰富的水生生物资源(唐会元等,2014)。与此同时,金沙江下游作为我国规划的大型水电基地(王导群等,2019),规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4个梯级电站,其中向家坝和溪洛渡电站(简称一期工程)分别于2012年10月和2013年5月下闸蓄水,乌东德和白鹤滩分别于2020年1月和2021年4月蓄水,蓄水使得金沙江下游干流江段形成首尾相连的梯级水库。根据水库的流速特征,将各梯级库区水体划分为自然河流型水体(Natural riverine zone)(>0.5 m/s)、过渡型水体(Transition zone)($0.2 \sim 0.5$ m/s)和湖泊型水体(Analogous lacustrine zone)(<0.2 m/s)(吴光应等,2012)。自然河流型水体受蓄水影响最小,主要位于各梯级水库库尾江段;类湖泊型水体受蓄水影响最大,水体常年趋于静止,主要位于各梯级水库库首江段;过渡型水体主要位于2类水体之间,受水库调蓄影响最大,水文条件波动频繁。不同类型水体水动力学因子(流速、水深、滞留时间等)、营养盐浓度以及气象因子(光照等)等方面都存在差异(杨浩等,2012),因此浮游植物群落结构和生态特征也不

收稿日期:2021-11-30 修回日期:2023-04-21

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(JG18001/B、NBWL202200489-07),国家重点研发计划(2022YFC3204202)。

作者简介:李博,1992年生,男,工程师,主要从事渔业资源保护和鱼类生态学研究。E-mail:li_bol1@ctgpc.com.cn

通信作者:姜伟。E-mail:jiang_wei16@ctgpc.com.cn

同。目前金沙江流域大多数研究关注的焦点是珍稀鱼类、鸟类等分布格局和受危状况(魏秘等,2022),对浮游植物这类指示环境生态状况的初级生产者的研究仅有零星报导,且多集中在不同江段群落结构特征及不同梯级电站建设施工对其的影响方面(龚廷登等,2014;高琦等,2019;魏志兵等,2020;王宁等,2021;陈俭勇等,2021),而有关金沙江下游梯级水库不同江段浮游植物群落生态特征差异及物种与生境之间的关系仍缺乏系统研究。

基于此,本研究将金沙江下游干流梯级水库按流速划分为3种水体,结合生态位理论,研究浮游植物群落结构现状及生态特征,系统分析不同类型水体优势种类差异及对环境资源的利用状况,再耦合关键环境要素数据,探讨浮游植物群落变化与环境要素变化的响应关系,以此充实金沙江下游水生态环境本底数据,提高对金沙江下游河库生态状况和生态系统运作的了解,为研究金沙江下游生态系统对外部环境压力的响应机理及保护修复提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 采样时间与断面

2019年6月和10月各进行了1次调查,监测断面上到下依次为攀枝花(乌东德库尾,距坝址190 km)、乌东德坝下(即白鹤滩库尾,距白鹤滩坝址162 km)、巧家(距溪洛渡坝址248 km)、码口(距溪洛渡坝址约109 km)、新安(距向家坝坝址51 km)、锦屏(距向家坝30 km)、水富(距向家坝坝址10 km)。每个监测断面设置1~2个测点:岸边(有明显的流水处)和河心(图1)。

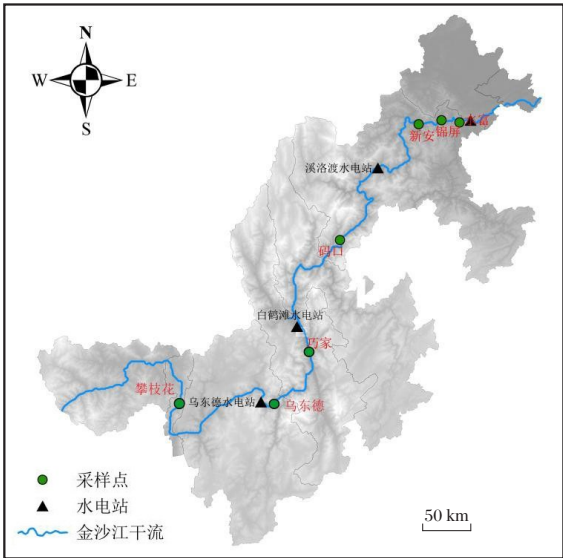


图1 调查区域

Fig.1 Schematic diagram of the monitored area

根据水库的流速划分标准,本次调查中,攀枝花和巧家江段为典型的自然河流型水体,码口和新安为过渡型水体,锦屏和水富为类湖泊型水体。

1.2 样品的采集和处理

浮游植物采样参考《内陆水域渔业自然资源调查手册》(张觉民和何志辉,1973),定性样品用25号浮游生物网在水面下0.5 m、5 m处作“∞”形循环拖动采集,3~5 min后,将浓缩的水样50 mL放入标本瓶中,用鲁哥氏液固定。定量样品通过采集表层(0.5~1 m)1 L水样并现场加入10 mL鲁哥氏剂,带回实验室并沉淀48 h后,虹吸浓缩至30 mL获得。将浓缩样品充分摇匀后取0.1 mL放置于浮游植物计数框中,在显微镜下进行观察鉴定和计数,每样品计数2次,每次观察100个视野,若2次计数个数相差15%以上,则进行第3次计数,取2次计数平均值换算成每升水细胞个数,即为浮游植物密度。根据形态相似的几何学方法计算浮游植物体积,并转换为生物量(单位mg/L)(董贯仓等,2022)。浮游植物种类鉴定方法参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》(胡鸿钧和魏印心,2006)与《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉,1991)。

本次调查测定项目包括:水温(WT)、pH、流速(FV)、透明度(TRA)、溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、化学需氧量(COD)等10项指标。其中,水温、pH、流速(表层)、溶解氧、透明度、叶绿素a等6项指标采用YSI 6820型多参数水质监测仪和LS300-A型便携式流速仪现场测定,其余指标采集水样后装入具塞聚乙烯瓶带回实验室测定,全部项目在取样后24 h内测定完毕,各项指标按照《地表水和污水监测技术规范》(中华人民共和国生态环境部,2002)测定。

1.3 数据分析

1.3.1 优势度及生物多样性指数 浮游植物优势度指数采用McNaughton指数(Y):

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$
 ①

利用香农威纳 Shannon-Weiner 指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)进行浮游植物生物多样性计算(孙军和刘东艳,2004),计算公式如下:

$$H' = -\sum (n_i/N) \ln (n_i/N)$$
 ②

$$D = (S - 1)/\ln N$$
 ③

$$J = H' / \ln S$$
 ④

式中: n_i 为水样中第*i*种的个体数; N 为水样中浮游植物的总个体数; f_i 为第*i*种物种的出现频率; S 为物种总数目。

优势度评价标准为:当 $Y>0.02$ 时,表示该物种为优势种(王云龙等,2005)。各生物多样性指数评价标准如下: H' 值在0~1为重度污染,1~2为 α -中污染,2~3为 β -中污染; D 值在0~1水质重度污染,1~2为 α -中污染,2~3为 β -中污染,大于3为轻污染或无污染; J 值在0~0.3为重度污染,0.3~0.5为中度污染,0.5~0.8为轻度污染(代培等,2018)。

1.3.2 生态位 采用修正后的Levins指数(郭坤等,2016)计算生态位宽度,公式如下:

$$B_i = 1 / (r \sum_{j=1}^r p_{ij}^2) \quad (5)$$

式中: B_i 为种*i*的生态位宽度; $p_{ij}=n_{ij}/N_i$,代表种*i*在第*j*个资源状态下的个体数占该种所有个体数的比例, r 为样点数。

对生态位重叠的标准化度量采用Petratis指数(徐春燕,2012),同时为了更准确地确定优势种的生态响应,本研究结合群落中物种的地位即生态位宽度 B_i 来计算生态响应速率 R (杨文焕等,2020b)。

计算公式如下:

$$\begin{aligned} S_{ik} &= e^{E_{ik}} \\ E_{ik} &= \sum_{j=1}^r (p_{ij} \ln p_{ij}) - \sum_{j=1}^r (p_{ij} \ln p_{ij}) \\ \Delta S_{ij} &= \sum_{j=1}^n S_{ij} - \sum_{i=1}^m S_{ij} \\ R_i &= \frac{B_i}{\Delta S_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, S 为成对种间生态位特定重叠; k 为不同于*i*的另一种浮游植物; $\sum_{i=1}^m S_{ij}$ 为种*i*占用其他种的资源量; $\sum_{j=1}^n S_{ij}$ 为种*j*被其他种侵占的资源量; R_i 为生态响应速率。 S_{ij} 是种*i*占用种*j*资源的大小,当*i=j*时,通过比较 ΔS_{ij} 大小来说明不同的环境条件下不同种属的发展衰退状况。当 ΔS_{ij} 值为正表明该种属处于发展状态,为负时表明处于衰退状态,0时则表明该种属为中性种;差值的大小反映了该种发展或衰退的程度(郭坤等,2016)。

1.3.3 应用层次分割和变差分解的典范分析 本研究参考赖江山方法(Lai et al, 2022),将多元回归中“应用层次分割(hierarchical partitioning)”的概念引

入典范分析(Canonical analysis),并将变差分解(variation partitioning)和层次分割建立起数学联系,通过平均分配共同解释的组分的方法很好解决了典范分析中评估单个(组)解释变量重要性的难题。该过程物种数据按以下条件筛选:该物种在1个以上的采样点出现,至少在1个点的相对密度大于1%(Muylaert et al, 2000; Lopes et al, 2005)。为确定浮游植物丰度数据满足正态分布,对物种矩阵和环境矩阵数据(pH除外)进行 $\lg(x+1)$ 转换(秦雪等,2016)。利用SPSS18.0和R4.0.3软件中vegan包和rdacca.hp包进行数据分析(赖江山和米湘成,2010),利用Origin2016和R4.0.3中ggplot包绘图。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构

2.1.1 种类组成 通过定性和定量样本分析,2019年6月和10月在金沙江7个断面共检测出浮游植物7门53属74种,其中硅藻门(Bacillariophyta)35种,占种类数的47.30%;绿藻门(Chlorophyta)25种,占33.78%;隐藻门(Cryptophyta)5种,占6.76%;蓝藻门(Cyanophyta)4种,占5.41%;金藻门(Chrysophyta)3种,占4.05%;裸藻门(Euglenophyta)和甲藻门(Pyrrophyta)各1种,各占1.35%。从时间上看,6月浮游植物总种类数高于10月,6月检出7门40属58种,10月检出6门30属44种,2次监测均以硅藻门、绿藻门和隐藻门种类数较高,蓝藻门仅在6月检出,甲藻门和裸藻门仅在10月检出。从空间上看,浮游植物种类数量依次表现为自然河流型水体>过渡型水体>类湖泊型水体,硅藻门种类数量从自然河流型水体到类湖泊型水体总体表现出递减趋势,绿藻、金藻、甲藻门种类数量在过渡型水体和类湖泊型水体中呈增加趋势(图2)。

2.1.2 群落结构 调查期间金沙江下游各江段浮游植物密度和生物量范围如图3所示,在时间上,6月各江段浮游植物密度变化范围为 $13.9 \times 10^4 \sim 105 \times 10^4$ 个/L,平均为 54.92×10^4 个/L,10月密度变化范围为 $14.40 \times 10^4 \sim 48.80 \times 10^4$ 个/L,平均为 27.22×10^4 个/L。6月各江段浮游植物生物量变化范围为0.09~0.80 mg/L,平均为0.40 mg/L,10月浮游植物生物量变化范围为0.05~1.09 mg/L,平均为0.61 mg/L。在时间上浮游植物密度表现出6月显著高于10月($T=2.63, P=0.02$),而生物量2个月份差异不显著($T=1.32, P=0.21$)。在空间上浮游植物平均密度和生物量变化趋势较不一致,浮游植物密度以自然河流型水体较低,而生物量以过渡型水体较低,最高密度和最高生物量均出现在类湖泊型水体锦屏江段,最小密度出现在

过渡水体码口江段,最小生物量出现在过渡水体新安江段。

不同水体6月和10月浮游植物相对密度变化分别如图4a和图4b所示:自然河流型水体6月和10月浮游植物均以硅藻为绝对优势种,占比分别为86.42%和77.19%,其次为绿藻;随着水体流速逐渐减缓,硅藻占比逐渐降低,在类湖泊型水体中占比已不足30%,而绿藻、隐藻、金藻等占比逐渐增加,其中绿藻和隐藻在6月由自然河流型水体中的12.13%和

1.13%,分别增加到类湖泊型水体中的38.12%和16.83%,10月由自然河流型水体中的19.45%和2.96%,分别增加到类湖泊型水体中的40.15%和37.01%;金藻在6月由自然河流型水体中的0.07%增加到类湖泊型水体的13.37%。和自然河流型水体相比,过渡型水体和类湖泊型水体浮游植物密度在6月和10月组成差异较大,蓝藻在6月过渡型水体中占比较高,但到10月被绿藻取代,金藻在6月类湖泊型水体占比较高,但到10月被隐藻取代。

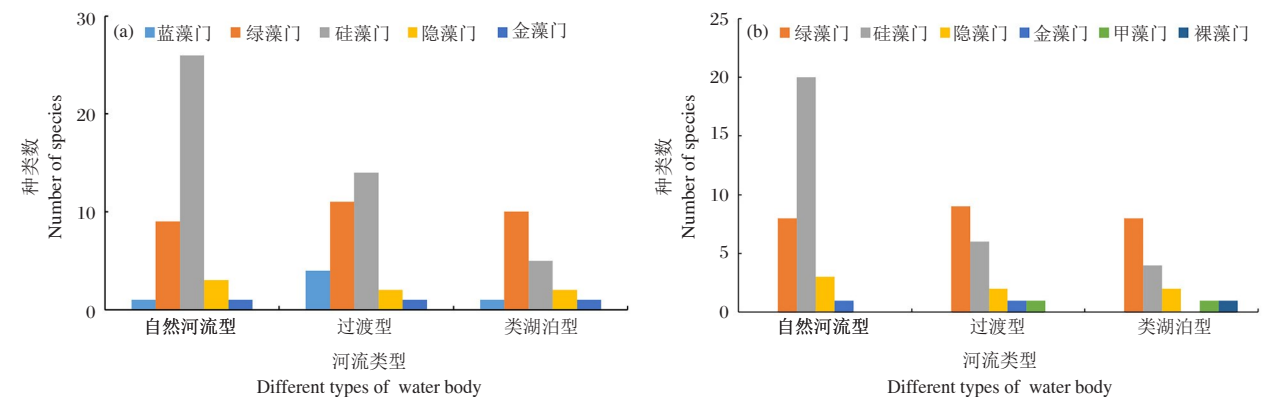


图2 2019年6月(a)和10月(b)金沙江下游各江段浮游植物各门类种类
Fig.2 Species number of each phytoplankton taxon in the three hydrologic zones of the lower Jinsha River in June (a) and October (b) of 2019

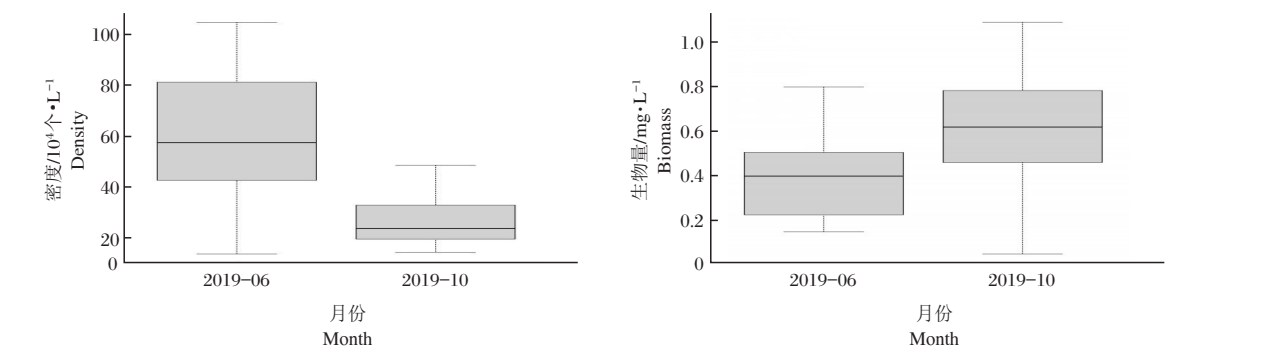


图3 金沙江下游库区江段浮游植物密度和生物量季节变化
Fig.3 Seasonal variation of phytoplankton density and biomass in the lower Jinsha River

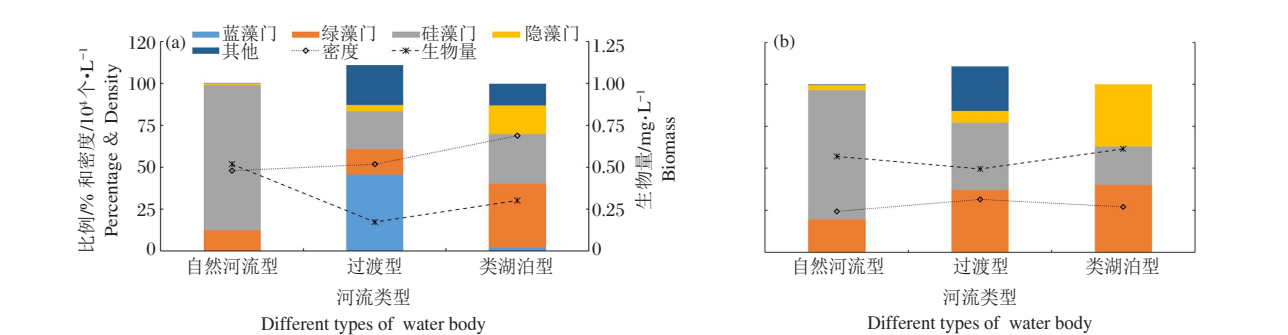


图4 2019年6月(a)和10月(b)金沙江下游库区各江段浮游植物相对丰度变化
Fig.4 Spatial variation of relative abundance of phytoplankton in June (a)and October (b) 2019 in the lower Jinsha River

2.1.3 多样性指数分析 金沙江下游各采样江段浮游植物多样性指数如图 5 所示:Shannon-Wiener 指数(H')变化范围为 1.99~2.69, Margalef 指数(D)变化范围为 2.56~5.88, Pielou 均匀度指数(J)变化范围为 0.50~0.78。Shannon-Wiener 指数(H')和 Margalef 指数(D)总体表现出 6 月高于 10 月;除过渡型水体外,其余 2 类水体 Pielou 均匀度指数均表现为 6 月高于 10 月。空间上 Shannon-Wiener 指数(H')和 Margalef 指数(D)整体呈现出自然河流型水体>过渡型水体>类湖泊型水体的趋势,Pielou 均匀度指数(J)表现出类湖泊型水体高于其他 2 类水体。根据多样性指数平均值的分布来看,各断面主要处于 α - β 中污染状态。

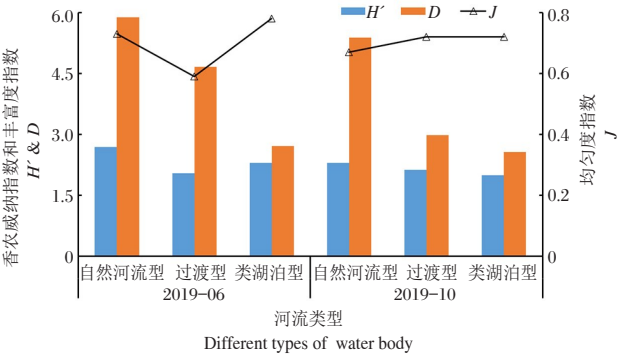


图 5 金沙江下游库区江段浮游植物多样性指数
Fig.5 Spatial variation of phytoplankton diversity in the lower Jinsha River in June and October 2019

2.2 优势种

2.2.1 优势种类及生态位 根据优势度及生态位计算结果,金沙江下游不同水体浮游植物优势种($Y>0.02$)共有 5 门 22 种(表 1),以硅藻种类最多(10 种),绿藻次之(7 种)。优势种类时空差异较大,6 月有优势种 5 门 17 种,其中自然河流型水体、过渡型水体和类湖泊型水体中优势种类数分别为 7 种、8 种和 9 种,共同优势种($Y>0.02$)有 7 种,各优势种生态位宽度 B_i 范围 0.13~0.77;10 月有优势种 3 门 13 种,其中自然河流型水体、过渡型水体和类湖泊型水体中优势种类数分别为 9 种、5 种和 6 种,共同优势种($Y>0.02$)有 7 种,各优势种生态位宽度 B_i 范围 0.10~0.80。和 6 月相比,10 月优势种类生态位宽度较低,且优势种类中无蓝藻门、金藻门种类,硅藻门种类减少,而隐藻门种类增加。硅藻在自然河流型水体中为绝对优势种,优势度较大的有小环藻(*Cyclotella* sp.)、克罗顿脆杆藻(*Fragilaria crotonensis*)、卵形藻(*Cocconeis* sp.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)等,其中小环藻在不同水体不同季节优势度和生态位宽度均最高,这表明其在金沙江下游江段对环境的适应能力

强,利用资源能力高。过渡型水体和类湖泊型水体优势种类中硅藻优势度降低,蓝藻和绿藻优势度增加,如小球藻(*Chlorella vulgaris*)、游丝藻(*Planctonema* sp.)、衣藻(*Chlamydomonas* sp.)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)等在 6 月和 10 月均为优势种,表明它们在这 2 类水体中在不同季节均能充分利用资源,具有较广的生态适应幅度。蓝纤维藻(*Dactylococcopsis* sp.)、立方体空星藻(*Coelastrum cubicum*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、冠盘藻(*Stephanodiscus ehrenberg*)、卵形藻(*Cocconeis* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.)以及伪暗色金藻(*Chromulina pseudonebulosa*)等仅在 6 月单一类型水体中形成优势种, B_i 范围为 0.13~0.51,卵囊藻(*Oocystis* sp.)、空球藻(*Eudorina elegans*)、异极藻(*Gomphonema* sp.)及普通等片藻(*Diatoma vulgare*)等仅在 10 月形成优势种, B_i 范围为 0.07~0.39,这一类藻类仅在某一季节或单一水体中成为优势种,表明它们对生态因子有一定的依赖性,仅在适宜的环境条件下才能充分地利用资源。

2.2.2 生态位重叠 对 6 月和 10 月浮游植物优势种($Y>0.02$)进行生态位重叠分析,结果如表 2,6 月除泽丝藻(*Limnithrix* sp.) ΔS_{ij} 值为负属衰退型外,其余优势种均属于发展型,以小环藻和肘状针杆藻(*Synechra ulna*)发展空间较大。10 月除小环藻和颗粒直链藻最窄变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*) ΔS_{ij} 值为正属发展型外,其余优势种均属衰退型,发展空间缩小,并以游丝藻和尖尾蓝隐藻衰退程度较大。和 6 月相比,10 月 ΔS_{ij} 绝对值整体较大,各优势种生态位重叠较高;2 个月中,硅藻种类 ΔS_{ij} 值为正属发展型,且均以小环藻 ΔS_{ij} 值最高,表明它们与其他优势种在资源利用上占据竞争优势,发展空间大;绿藻和隐藻种类如小球藻、游丝藻、衣藻和尖尾蓝隐藻等从 6 月到 10 月由发展型物种转变为衰退型物种。

2.3 浮游植物与环境因子相关性分析

对金沙江下游江段环境因子与浮游植物群落进行 RDA 分析,结果如表 3 所示,10 个环境因子对浮游植物分布的解释量 R^2 经校正后相对较高,为 0.552,其中大部分是环境因子之间的共同解释部分,为 0.514,而所有环境因子的独自解释部分比例较小,仅为 0.038。根据各环境因子单独贡献(Individual importance)排序,影响浮游植物群落结构的主要因素为:透明度、流速、水温、溶解氧、总氮(图 6)。各环境因子中,透明度独自效应(0.048)和平均共同解释部分(0.080)均较高,使其具有最高的单独贡献(0.128),流速具有最高的独自效应(0.114),使其具有第二高的单独贡献(0.110),pH 的独自效应为负,与其他的

表 1 金沙江下游库区江段浮游植物主要优势种优势度(Y)及生态位宽度(B_i)

Tab.1 Phytoplankton dominant species and their corresponding dominance and ecological niche breadth in each hydrologic zone of the lower Jinsha River

类别	优势种	6月					10月				
		Y _{Nrz}	Y _{Tz}	Y _{Alz}	Y	B _i	Y _{Nrz}	Y _{Tz}	Y _{Alz}	Y	B _i
蓝藻门	蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.			0.02		0.50					
	泽丝藻 <i>Limnothrix</i> sp.		0.24		0.03	0.19					
绿藻门	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>		0.02	0.09	0.02	0.37		0.08	0.08	0.02	0.22
	游丝藻 <i>Planctonema</i> sp.		0.07	0.08	0.03	0.51			0.19	0.04	0.25
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.		0.02	0.06	0.02	0.48		0.14	0.04	0.04	0.21
	立方体空星藻 <i>Coelastrum cubicum</i>			0.04		0.13					
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.05				0.48					
	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.						0.03				0.12
	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>						0.04				0.10
硅藻门	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.38	0.17	0.25	0.27	0.77	0.44	0.37	0.18	0.30	0.80
	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>		0.02	0.03	0.02	0.69					
	克罗顿脆杆藻 <i>Fragilaria crotonensis</i>	0.03				0.26	0.10				0.15
	冠盘藻 <i>Stephanodiscus ehrenberg</i>	0.03				0.31					
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.		0.02			0.32	0.02				0.33
	异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.						0.02				0.21
	卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.	0.05				0.29					
	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	0.02				0.29					
	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>						0.08				0.13
	颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.03				0.19	0.10			0.02	0.28
隐藻门	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	0.03	0.16	0.05	0.37	0.02	0.03	0.06	0.03	0.43	
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> sp.						0.02	0.27	0.07	0.33	
金藻门	伪暗色金藻 <i>Chromulina pseudonebulosa</i>			0.12		0.51					

注:Y_{Nrz}为自然河流型水体浮游植物优势度;Y_{Tz}为过渡型水体浮游植物优势度;Y_{Alz}为类湖泊型水体浮游植物优势度;Y为金沙江下游库区江段浮游植物平均优势度。

Note:Y_{Nrz} is the dominance of phytoplankton in natural riverine zone; Y_{Tz} is the dominance of phytoplankton in transition zone; Y_{Alz} is the dominance of phytoplankton in lacustrine zone; Y is the average dominance of phytoplankton in the lower Jinsha reservoir area.

表 2 金沙江下游库区江段浮游植物优势种生态位重叠(ΔS_{ij})和生态响应速率(R)

Tab. 2 Niche overlap (ΔS_{ij}) and ecological response rate (R) of dominant phytoplankton species

类别	优势种	6月		10月	
		ΔS _{ij}	R	ΔS _{ij}	R
蓝藻门	泽丝藻 <i>Limnothrix</i> sp.	-12.25	-0.01		
	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	2.44	0.11	-3.81	-0.21
绿藻门	游丝藻 <i>Planctonema</i> sp.	1.04	0.25	-7.70	-0.03
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	4.92	0.08	-5.59	-0.05
	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	10.91	0.01		
硅藻门	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	38.46	0.01	39.48	0.02
	颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>			3.55	-0.02
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	5.68	0.03	-6.51	0.25
隐藻门	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>			-4.31	0.03

变量共同解释部分平均值虽然为正,但总和依然是负的,表明pH是真正不重要的变量,这可能与pH值在取样点之间的变化很小(7.15~7.4)有关。化学需氧量、硝态氮、叶绿素a和总磷都具有较高的平均共同解释部分(表3),表明这4个变量对模型的贡献可以完全被其他解释变量替代,从而导致它们的独自解释部分均为负。

表 3 金沙江下游江段浮游植物群落与环境因子RDA分析

Tab.3 Redundancy analysis of phytoplankton community and environmental factors in the lower Jinsha reservoir area

环境因子	独自效应	平均共同解释量	单独贡献值	单独效应比例/%
透明度	0.048	0.080	0.128	23.19
流速	0.114	-0.004	0.110	19.93
水温	0.076	-0.002	0.074	13.41
溶氧	0.010	0.062	0.072	13.04
总氮	0.020	0.036	0.056	10.14
化学需氧量	-0.038	0.084	0.046	8.33
硝态氮	-0.048	0.082	0.034	6.16
叶绿素a	-0.042	0.072	0.030	5.43
总磷	-0.072	0.078	0.006	1.09
pH	-0.030	0.026	-0.004	-0.72
总计	0.038	0.514	0.552	100.00

注:“独自效应/Unique”为环境因子独自效应值;“平均共同解释量/Average share”为环境因子总平均共同解释变量;“单独贡献值/Individual importance”为各环境因子单独贡献值;“单独效应比例/ I.perc (%)”为单独效应占总校正R²的比例。

Note: Unique is the independent effects of environmental factors; Average share is the total average shared effects with other predictors; Individual importance is the individual contribution value of each environmental factor. I.perc (%) is the individual effect divided by total adjusted R² found in column Individual importance.

不同种的浮游植物对环境因子的响应有所不同(图7),硅藻种类脆杆藻、等片藻、异极藻等与流速呈显著正相关,与透明度呈负相关,稍浑浊的水体对其生长有利;蓝纤维藻和绿藻中的游丝藻、小球藻、小型月牙藻(*Selenastrum minutum*)、卵囊藻等则适合生活在透明度与水温较高的水体中;硅藻中的小环藻、冠盘藻、针杆藻以及蓝藻中的蓝纤维藻与总磷呈正相关,与总氮、硝态氮呈负相关,表现为磷限制,卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)、网状星空藻(*Coelastrum reticulatum*)和颗粒直链藻最窄变种等现存量和总氮、硝态氮相关性高。

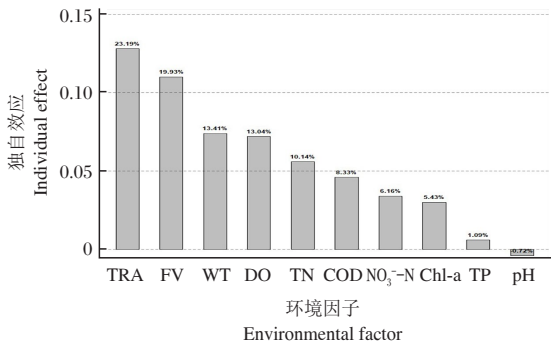


图 6 基于rdacca.hp分析的环境因子的独自效应
Fig.6 Individual importance of environmental factors based on rdacca.hp analysis

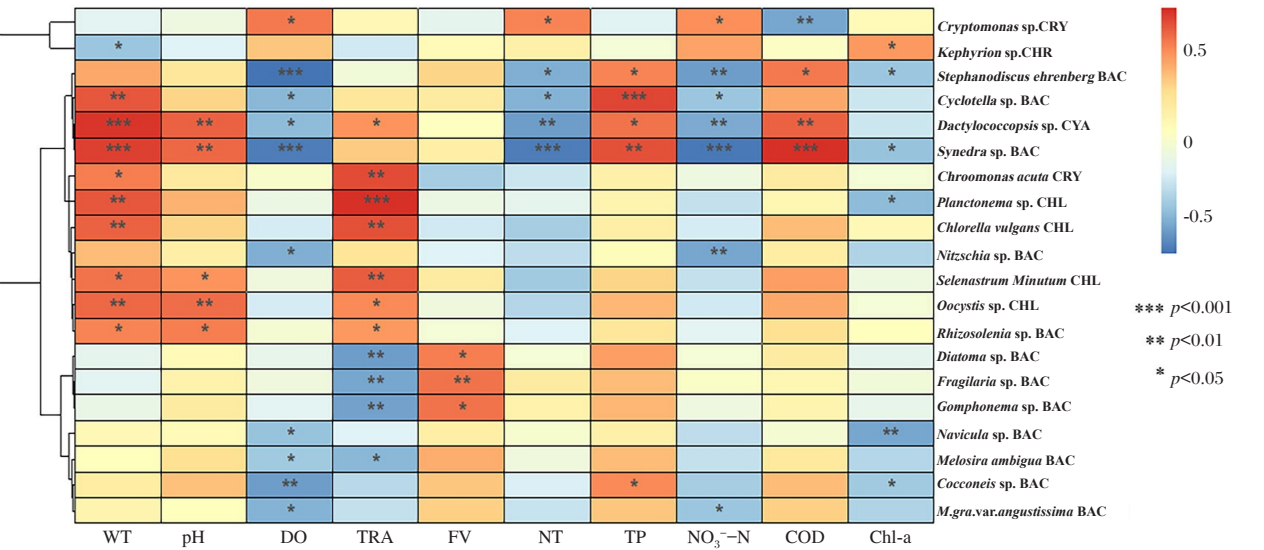
3 讨论

3.1 浮游植物群落结构变化分析

本研究通过2019年6月和10月对金沙江下游江

段进行浮游植物调查研究,共检测出7门53属74种,和该区域近些年来已知的调查结果相比,浮游植物种类数量高于2007–2008年宜宾段(56种),2014年石鼓–宜宾江段(52种)以及2017–2018年金沙江下游段(53种)调查结果(高琦等,2019;魏志兵等,2020),但低于2013–2014年宜宾段(95种)和水富段(127种)(龚廷登等,2014;谭巧等,2017)。历次调查种类差异较大,这主要是由于金沙江流域范围广、海拔落差大,生境条件多样化,浮游植物表现出典型的区域分布特征(魏志兵等,2020),且浮游植物具有短的世代周期与生活史,群落组成季节变化差异大,调查结果受采样江段、采样数量、采样次数及频次不同而差异较大。本次调查在每个监测断面岸边和河心各设置1个采样点开展浮游植物和水环境调查,每个采样点均采集水下0.5 m和5 m水样进行混合,采样过程相对于以往的调查更严谨细致,所得结果能较好地反映金沙江下游浮游植物现状。本次调查中浮游植物种类组成上仍主要以硅藻门种类为主,这和大部分的天然河流调查结果相似(舒俭民等,1998;吴恢碧等,2004;王岳等,2015)。本次调查6月浮游植物平均密度为 54.92×10^4 个/L,平均生物量为0.40 mg/L,10月平均密度为 27.22×10^4 个/L,平均生物量为0.61 mg/L,普遍高于2013–2018年该区域已有的调查结果。总体来看,金沙江下游攀枝花–水富江段浮游植物整体呈现种类相对稳定、现存量上升的变化趋势。

本次调查中,自然河流型水体中浮游植物群落以在湍流期或低光照、低温、非极度贫营养的水体环



CRY:隐藻门;CHR:金藻门;BAC:硅藻门;CYA:蓝藻门;CHL:绿藻门
CRY: Cryptophyta; CHR: Chrysophyta; BAC: Bacillariophyta; CYA: Cyanophyta; CHL: Chlorophyta
图7 浮游植物优势种与环境因子相关性
Fig.7 Correlation between dominant phytoplankton species and environment factors

境中有竞争优势的硅藻群落为优势种类(高琦等, 2019), 其种类组成占比 68.59%~72.75%, 密度占比 68.6%~91.6%, 表现为典型的河流型藻类生态特征。在环境异质性较高、变化频繁的自然河流型水体中, 生物群落中优势种群组成和演替较快, 其生物多样性相对较高(杨浩等, 2012), 这也和本研究中 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数总体表现出自然河流型水体较高的趋势一致。进入过渡型水体后, 随着水体流速降低, 光照条件的改善以及营养物质的富集, 浮游植物密度逐渐增加(图4), 在码口和新安等缓水江段, 虽然硅藻仍然占优势, 但是蓝藻、绿藻种类如泽丝藻、游丝藻、衣藻等检出频率相较于自然河流型水体增加, 表现出过渡型水体生态特征。进入类湖泊型水体, 流速进一步减缓, 低的流速适合嫌水流藻类的生长, 绿藻、隐藻和金藻种类如小球藻、立方体空星藻、尖尾蓝隐藻和伪暗色金藻所占比例明显增加, 在局部时段成为绝对优势种, 这主要与藻类的特征及生活习性有关, 硅藻等因具硅质壁导致其细胞比重较大, 需要较大的流速来支持其悬浮于水中, 而硅质壁的存在又使得其在环境不稳定水体中能抗机械损伤(胡建林等, 2006), 因此适宜生长在流速较快、环境波动频繁的水体中, 而绿藻、蓝藻和有鞭毛的隐藻类则适合在水流缓、水力滞留时间长的水体中(邬红娟和郭生练, 2001; 代玲玲, 2007)。在这类水环境较为稳定的类湖泊型水体中, 生物群落中优势种类较稳定, 生物多样性指数也相对较低, 这种变化和三峡库区蓄水后干流浮游植物种类变化趋势表现一致(张远等, 2006; 杨浩等, 2012)。

3.2 优势种生态位分析

生态位宽度是种群对资源的利用程度和对环境适应能力的总体表现, 生态位宽度的大小主要用来解释生境变化是如何影响泛化种和特化种的分布和数量。具有广阔生态位的种群通常被称为泛化种, 意味着它可以在不同的生境下繁殖, 生态适应性强, 通过监测生态位宽度较大的藻类的状况, 可判断出水质的变化。而对生境耐受范围有限的物种被称为特化种, 其生态位宽度窄, 生态适应幅度较小, 在生物监测中可视为指示种或敏感种(王翠红和张金屯, 2001; 杨文焕等, 2020b)。本研究6月优势度和生态位较大的为小环藻、肘状针杆藻和四尾栅藻, 10月为小环藻、尖尾蓝隐藻和菱形藻(*Nitzschia* sp.), 这些藻类多属R和CR生长策略, 对低温、低光照、冲刷及水体分层有较高的耐受性(胡韧等, 2015), 表明它们对梯级开发下的金沙江流域水环境适应性较好, 利用

资源的能力和多样化程度较高, 且多以 α -中污染和 β -中污染带种类为主(林碧琴和谢淑琦, 1998)。除小环藻外, 自然河流型水体中优势度较高的为硅藻种类克罗顿脆杆藻、颗粒直链藻、卵形藻和普通等片藻, 这些藻类多适合在贫-中营养、持续或半持续混合水体中生长, 对低光照、低营养、低碳含量有较高的耐受性, 对高光照、水体分层以及硅缺失敏感性较高; 过渡型水体和类湖泊型水体中优势度较高的有小球藻、衣藻、肘状针杆藻、尖尾蓝隐藻和卵形隐藻, 这些藻类适宜在中-富营养的浅水环境, 对营养缺乏及滤食作用敏感性较高(肖晶, 2019)。综合以上分析表明, 目前金沙江下游水质整体处于 α - β 中污染状态, 且在不同时空条件下水质营养状态差异较大, 过渡型水体和类湖泊型水体中水质面临富营养化压力较大, 这也与水质生物多样性指数评价结论一致。

生态位重叠体现了生态群落中的物种分配可利用资源的方式和适应不同生境能力的相似程度, 因此它被认为是群落物种多样性的主要决定因素(李兴等, 2017; 杨文焕等, 2020a)。本研究中, 6月各优势种生态位宽度较10月高, 优势种之间的生态位重叠值较10月低, 表明6月各优势种对资源的利用能力较强, 共性较小, 种间竞争态势相对均衡, 此时种内竞争就会成为一种强大的进化力量, 导致物种迅速出现多样化, 群落状态保持相对稳定, 这也与6月浮游植物群落多样性较10月高的结果相一致。此外, 许多研究表明, 生态位宽度较大的物种, 对资源的利用能力也强, 因而与其他种群间的生态位重叠也较大(郭燕等, 2018), 这与本研究中小环藻、肘状针杆藻和尖尾蓝隐藻情况一致。

3.3 浮游植物与环境因子之间的关系探讨

浮游植物生长繁殖除受到自身生物学特性的影响, 还受到周围环境因子如温度、营养盐等因素的影响, 而不同水体环境中的主要影响因子不同(陶志英等, 2018)。本研究中透明度、流速、水温、溶解氧、总氮是影响浮游植物群落结构的重要影响因子。水温可通过影响浮游植物生命活动的活性、速率来直接影响藻类的增殖, 也可通过控制水体中各类营养物的分解率等理化过程间接影响藻类的生长。水温每升高10℃, 浮游植物生长率就增加1倍多(Braud, 1961), 这也解释了本研究中浮游植物各优势种现存量与水温呈显著正相关的现象。此外, 温度的改变往往导致其他环境因子如溶解氧等发生变化, 如本研究中溶解氧也是影响浮游植物群落的关键因子。

氮磷营养盐对浮游植物群落有较大影响,它们既是浮游植物生长最重要的营养物质,也是生长限制元素,营养盐的不足或过量都会影响浮游植物的生长和群落结构,本研究采用应用较广的Rredfield比例(Shane, 2015),即浮游植物对营养物质的吸收是按照C:N:P=106:16:1的化学计量比,结果显示,金沙江下游各江段水体平均氮磷比均高于16,因此推断与氮相比,磷对浮游植物的限制性作用更强,尤其在过渡型水体和类湖泊型水体中处于优势地位的小球藻、冠盘藻、针杆藻以及蓝纤维藻,其现存量与总磷呈显著正相关,与总氮、硝态氮呈显著负相关。磷对浮游植物种类组成特别是蓝藻的丰度有着重要作用(Reynolds, 1983),而目前蓝藻在过渡型水体和类湖泊型水体中局部时段(如6月新安江段和锦屏江段)形成优势种,蓝藻优势种类主要以不产生微囊藻毒素且没有固氮能力的泽丝藻为主,其危害略低于铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)等种类(张会敏, 2010),但在这2类水体中水温较高季节仍要严格限制磷的输入以防止蓝藻水华发生。此外,本研究中,硅藻的优势种小环藻现存量与总磷也呈显著正相关,小环藻是引起河流型水体爆发硅藻水华的主要种类,汉江硅藻水华及相关研究表明,较缓的流速、适宜的水温及充足的营养成分,是引起小环藻爆发的充分条件(卢大远等, 2000),本研究表明研究区域内流速已不构成小环藻的限制因子,因此应通过加强水体监测与营养调控避免硅藻水华的发生。本研究典范分析中,总氮是与浮游植物群落结构变化显著相关的环境因子,与之相关性较高的种类多为适应富营养水体的种类如卵形隐藻、网状星空藻以及变异直链藻(*Melosira varians*)等,这些可作为水体氮浓度指示种。有研究表明,浮游植物对水体pH的变化十分敏感,碱性环境更有利于浮游植物进行光合作用从而促进其生长繁殖(陈立婧等, 2012),这与本研究中pH与多数优势种现存量呈正相关的结果一致。

流速和泥沙含量等水动力学条件的变化会引起悬浮质、透明度、水下光照、营养盐浓度及相关比值的变化,进而影响浮游植物群落组成、数量和优势种的演替(代玲玲, 2007)。本研究中透明度和流速是与浮游植物群落结构变化显著相关的环境因子,但对不同种类浮游植物影响效果不同,有研究表明,有悬浮物的浑浊水不利于蓝藻生长,但对硅藻却有利无害(谭铁强等, 2002),本研究中,除蓝藻(蓝纤维藻、伪鱼腥藻等)种类外,绿藻种类(游丝藻、小球藻、小型月牙

藻)也表现出相似特征,其现存量和透明度呈正相关、与流速呈负相关,而硅藻种类(脆杆藻、等片藻、异极藻等)现存量和透明度呈负相关,与流速呈正相关。

参考文献

- 陈俭勇, 孙婷婷, 李红涛, 等, 2021. 金沙江上游苏洼龙水电站建设期影响区域浮游植物群落结构与水质现状分析[J]. 淡水渔业, 51(2):87-97.
- 陈立婧, 景钰湘, 吴艳芳, 等, 2012. 人工滩涂湖泊滴水湖浮游藻类群落特征[J]. 生态学杂志, 31(7):1771-1779.
- 代玲玲, 2007. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- 代培, 阎明军, 周游, 等, 2018. 太湖五里湖沿岸带浮游植物群落生态特征(2014—2015年)[J]. 长江流域资源与环境, 27(10):199-208.
- 董贯仓, 冷春梅, 丛旭日, 等, 2022. 南水北调东线工程运行3年后东平湖浮游植物群落特征及环境驱动因子[J]. 湖泊科学, 34(1):61-73.
- 高琦, 倪晋仁, 赵先富, 等, 2019. 金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究[J]. 北京大学学报, 55(3):571-579.
- 龚廷登, 杨伟阶, 何滔, 等, 2014. 金沙江水富段水生生物的群落结构及水质监测[J]. 淡水渔业, 44(4):25-34.
- 郭坤, 杨德国, 彭婷, 等, 2016. 湖北省长湖浮游植物优势种生态位分析[J]. 湖泊科学, 28(4):825-834.
- 郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 等, 2018. 三峡库区消落带现存草本植物组成与生态位[J]. 应用生态学报, 29(11):3559-3568.
- 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.
- 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等, 2006. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查[J]. 水生生物学报, 30(1):116-119.
- 胡昝, 蓝于倩, 肖利娟, 等, 2015. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法及应用[J]. 湖泊科学, 27(1):11-23.
- 赖江山, 米湘成, 2010. 基于Vegan软件包的生态学数据排序分析[C]//中国生物多样性保护与研究进展IX. 第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集.
- 李兴, 李建茹, 李畅游, 2017. 内蒙古乌梁素海浮游植物优势种的生态位分析[J]. 水生态学杂志, 38(6):40-47.
- 林碧琴, 谢淑琦, 1998. 水生藻类与水体污染监测[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社.
- 卢大远, 刘培刚, 范天命, 等, 2000. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 13(2):28-31.
- 秦雪, 徐宾铎, 杨晓改, 等, 2016. 黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 40(5):711-720.
- 舒俭民, 宋福, 傅德黔, 等, 1998. 长江源区浮游生物调查初报[J]. 中国环境监测, (5): 9-11.
- 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(中文版), 26(1):62-75.

- 谭巧, 马芊芊, 李斌斌, 等, 2017. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康[J]. 淡水渔业, 47(3):97-104.
- 谭铁强, 黄渤, 徐立, 等, 2002. 汉江枯水期藻类生长调查[J]. 环境与健康杂志, (2):40-41.
- 唐会元, 杨志, 高少波, 等, 2014. 金沙江下游巧家江段鱼类生物多样性及群落结构的年际动态[J]. 水生态学杂志, 35(6):7-15.
- 王翠红, 张金屯, 2001. 汾河水库及河道中优势硅藻生态位的研究[J]. 生态学杂志, 23(3):58-62.
- 王导群, 田辉伍, 唐锡良, 等, 2019. 金沙江攀枝花江段产漂流性卵鱼类早期资源现状[J]. 淡水渔业, 49(6):41-47.
- 王宁, 2021. 乌东德水电站建设对金沙江下游浮游生物群落特征影响分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 王岳, 夏爽, 裴国风, 等, 2015. 长江干流湖北段浮游藻类群落结构特征[J]. 生态与农村环境学报, 31(6):916-922.
- 王云龙, 袁琪, 沈新强, 2005. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学, 12(3):300-306.
- 魏秘, 朱爱民, 王瑞, 等, 2022. 赤水河春季浮游植物群落结构变化及其优势种生态位分析[J]. 水生态学杂志, 43(3):26-34.
- 魏志兵, 何勇凤, 龚进玲, 等, 2020. 金沙江干流浮游植物群落结构特征及其时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 29(6):1356-1365.
- 吴恢碧, 何力, 倪朝辉, 等, 2004. 长江沙市江段的浮游生物[J]. 淡水渔业, 34(6):9-11.
- 邬红娟, 郭生练, 2001. 水库水文情势与浮游植物群落结构[J]. 水科学进展, 12(1):51-55.
- 吴光应, 刘晓霏, 万丹, 等, 2012. 三峡库区大宁河2010年春季水华特征[J]. 中国环境监测, (3):100-104.
- 肖晶, 王宝利, 张海涛, 等, 2019. 乌江河流-水库体系浮游植物功能群演替及其环境影响因子辨识[J]. 地球与环境, 47(6):10.
- 徐春燕, 俞秋佳, 徐国洁, 等, 2012. 淀山湖浮游植物优势种生态位[J]. 应用生态学报, 23(9):2550-2558.
- 杨浩, 曾波, 孙晓燕, 等, 2012. 蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响[J]. 水生生物学报, 36(4):715-723.
- 杨文焕, 申涵, 周明利, 等, 2020a. 冻融期包头南海湖浮游植物群落及优势种生态特征[J]. 湖泊科学, 32(2):450-461.
- 杨文焕, 申涵, 周明利, 等, 2020b. 包头南海湖浮游植物优势种生态位及种间联结性季节分析[J]. 中国环境科学, 40(1):383-391.
- 张会敏, 2010. 产微囊藻毒素藻株的PCR检测方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 张觉民, 何志辉, 1973. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社.
- 张雄, 刘飞, 林鹏程, 等, 2014. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J]. 长江流域资源与环境, 23(4):496-503.
- 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, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 中华人民共和国生态环境部, 2002. 地表水和污水监测技术规范: HJ/T 91-2002[S]. 北京: 中国标准出版社.
- Braaud T, 1961. Cultivation of marine organization as a means of understanding environment influence on populations [J]. *Oceanography (Washington D.C.)*, 67:271-298.
- Lai J, Zou Y, Zhang J, Peres-Neto P, 2022. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(4):782-788.
- Lopes M R M, Bicudo C E M, Ferragut M C, 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 542(1):235-247.
- Muyllaert K, Sabbe K, Vyverman W, 2000. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(5):673-687.
- Shane M W, 2015. Metabolic Adaptations of the Non-Myco-trophic Proteaceae to Soils With Low Phosphorus Availability[M]//Plaxton C W, Lambers H. *Annual Plant Reviews Volume 48 (Phosphorus Metabolism in Plants)*. UK: Wiley-Blackwell: 289-336.
- Reynolds C S, 1983. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 83-122.

(责任编辑 张俊友 熊美华)

Phytoplankton Community Ecology and Its Relationship with Environmental Factors in the Lower Jinsha River

LI Bo^{1,2}, SU Wei^{1,2}, HUANG Tao^{1,2}, HU Fan-xu^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}, TANG Xi-liang³, SUN Gan³

(1. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Yichang 443100, P.R. China;

2. Chinese Sturgeon Research Institute, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, P.R. China;

3. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Chengdu 610041, P.R. China)

Abstract: In this study, we explored the phytoplankton community structure and their relationship with habitat in the Panzhihua–Shuifu section of the lower Jinsha River based on ecological niche theory. The study section was divided into three hydrological zones resulting from the cascaded power stations on the lower Jinsha River: The Panzhihua–Qiaojia section is riverine; the Matou and Xin'an sections, are transition zones; and the Jinping and Shuifu sections are lacustrine. In June (summer) and October (autumn) of 2019, a field investigation of phytoplankton and the water environment was carried out at seven monitoring transects representing the three hydrologic zones. A total of 74 phytoplankton species from 53 genera and 7 phyla were collected during the investigation, with dominance by Bacillariophyta (47.30%), Chlorophyta (33.78%) and Cryptophyta (6.76%). Phytoplankton density varied from 13.9×10^4 – 105×10^4 ind/L, with the maximum average value of 54.92×10^4 ind/L in June and minimum value of 27.22×10^4 ind/L in October. The average phytoplankton density in the riverine zone was lower than that in the other two zones. Bacillariophyta was the absolute dominant taxa in the riverine zone, and its dominance decreased in the transition and lacustrine zones, while dominance by Chlorophyta and Cyanobacteria increased. *Chlorella* sp. maintained the highest average dominance in all three zones. The niche width (B_i) and niche overlap (ΔS_{ij}) of the dominant species were, respectively, in the range 0.13–0.77 and 1.04–38.46 in June, 0.10–0.80 and 3.55–39.48 in October. The higher niche width and lower niche overlap in June indicates that competition among dominant species was relatively balanced and community composition was relatively stable. The Shannon–Wiener index (H'), Margalef index (D) and Pielou evenness index (J) ranges were, respective, 1.99–2.69, 2.56–5.88 and 0.50–0.78. The biodiversity indices in June were higher than in October, and the biodiversity indices of the three zones were in the order riverine > transition > lacustrine. The water quality of the lower Jinsha River showed moderate α – β pollution status. Canonical analysis of the relationship between phytoplankton and environmental factors shows that transparency (TRA), flow velocity (FV), water temperature (WT), dissolved oxygen (DO) and total nitrogen (TN) were the primary environmental factors affecting phytoplankton community structure, and different species had different responses to environmental factors. This study provides background data for water resource protection and ecological restoration in the cascaded reservoir area of the lower Jinsha River.

Key words: phytoplankton; community structure; dominant species; ecological niche; environmental factors; lower reaches of Jinsha river