

金沙江中下游浮游植物功能群与环境因子的关系

龚进玲, 朱挺兵, 杨德国, 胡飞飞, 杜红春, 李学梅, 孟子豪, 吴兴兵

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223)

摘要: 分析不同季节浮游植物群落结构组成, 明确主要环境影响因子, 为金沙江干流水生生物保护和生态修复提供理论依据。于 2019 年春夏秋三季对金沙江中下游(河流水体和库区)浮游植物群落组成、功能群以及多样性指数进行调查, 并分析了浮游植物功能群与环境因子的关系。结果表明: 金沙江中下游共鉴定出浮游植物 8 门 32 科 54 属 96 种, 以硅藻门(39.58%)为主, 其次是绿藻门(31.25%), 河流水体与库区在浮游植物群落组成上差异不显著; Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数平均值分别为 2.42、1.81 和 0.92, 单因素方差分析表明, 3 项多样性指数在各采样点之间、各季节之间无显著差异; 浮游植物共划分出 24 种功能群, 其中 8 种(D、P、X1、J、C、LM、F、G)为该区域的优势功能群。河流水体出现频率大于 30% 的浮游植物功能群有 12 种, 主要优势功能群以 D 和 P 为主; 库区有 15 种, 主要优势功能群以 D、J、P 和 X1 为主。Pearson 相关性分析和冗余分析(RDA)结果显示, 温度、浊度、海拔、氨氮和硝态氮是影响金沙江中下游流域浮游植物功能群分布格局的主要因子。

关键词: 浮游植物; 功能群; 环境因子; 金沙江

中图分类号: S91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)03-0086-08

浮游植物作为水体中最重要的初级生产者, 其生产力几乎占全球总初级生产力的 50%(Field et al, 1998), 是水生态系统中物质和能量流动的驱动因子。浮游植物群落结构与环境因子关系密切, 能够敏感地反映水生态系统对水环境污染和生态破坏的响应, 是水质评价的重要指示生物。由于传统的藻类分类法未考虑藻类对环境响应的物种特异性和环境特异性, 导致水质评价结果存在差异(Reynolds et al, 2002)。为了进一步探究藻类群落结构变化与环境因子之间的关系, Reynolds 等(2002)提出了对淡水浮游植物进行功能群划分, 将相同生态环境下能共同生长的浮游植物归为同一功能群, 以便最大限度揭示浮游植物与环境因子的动态关系。Reynolds 等(2002)和 Padisák 等(2009)确定了 40 组不同的功能群(Functional Group, FG), 其中有 39 组功能群应用广泛。近年来, 浮游植物功能群分类方法逐渐成为国内外学者研究的热点, 被广泛应用于群落生态学研究领域(王汭等, 2020; Ma et al, 2019; 赵耿楠等, 2021)。

金沙江属长江上游江段, 起于青海省玉树州直门达, 止于四川省宜宾市长江岷江交汇处, 是长江的重要组成部分。受大规模水资源开发利用影响, 金沙江流域生态系统面临着诸多问题, 如梯级开发对流水生境的破坏、沿江排污、过度捕捞等。提高对金沙江水环境保护的关注度, 对维持整个长江水生态系统健康有着重要的意义(和晓荣等, 2015)。目前关于金沙江浮游植物的研究主要集中于长江源区、金沙江干支流及其附属水库(崔玉香等, 2020; 魏志兵等, 2020; 马宝珊等, 2020; 陈俭勇等, 2021)。金沙江中下游是水电开发的重要区域, 有关中下游浮游植物群落结构及其与水环境关系的研究较少, 本研究以金沙江中下游(河流水体和库区)为研究对象, 分析不同季节浮游植物群落结构组成, 划分功能群通过 Pearson 和 RDA 分析其与水环境因子之间的相关性, 明确影响该区域浮游植物功能群的主要环境因子, 为金沙江干流水生生物保护和生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

参考《水域生态系统观测规范》(蔡庆华等, 2007)并根据实际地形地貌结合采样的可行性, 在金沙江中下游设置了 11 个采样点, 并通过水流速度将采样点划分为河流水体(>0.3 m/s)和库区(0~0.03 m/s)。其中河流水体 7 个, 分别为金安桥(JA)、龙开口

收稿日期: 2021-08-20 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 农业财政专项“长江渔业资源与环境调查”; 财政部和农业农村部: 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-46); 中国水产科学研究院院级创新团队项目(2020TD57)。

作者简介: 龚进玲, 1990 年生, 女, 硕士, 主要从事水生生物学研究。E-mail: jlgong123@163.com

通信简介: 杨德国, 1964 年生, 男, 研究员。E-mail: yangdg@yfi.ac.cn

(LK)、雅江汇口上游(YS)、雅江汇口下游(YX)、皎平渡(JP)、巧家(QJ)和水富(SF),库区4个,分别为鲁地拉(LD)、观音岩(GY)、溪洛渡(XL)和新市(XS)。具体采样断面见图1。

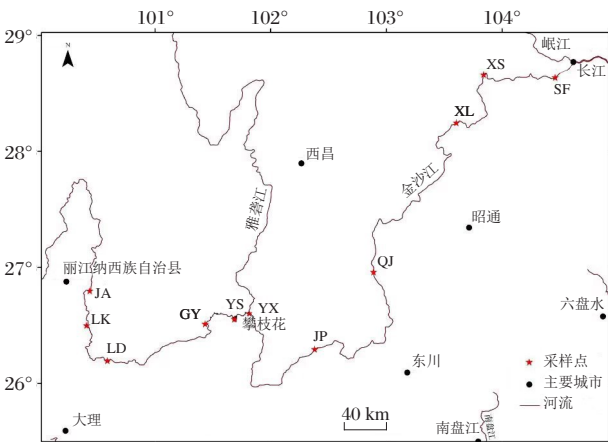


图1 金沙江中下游干流采样断面分布

Fig.1 Location of the sampling transects in the middle and lower reaches of Jinsha River

1.2 样品采集与处理

于2019年春季(4月)、夏季(8月)和秋季(11月)对金沙江中下游浮游植物和水环境参数进行调查。2019年冬季因新冠疫情未能开展调查。

浮游植物的定性、定量样品采集及保存方法参考文献(章宗涉和黄祥飞,1991)。用1 L采水器在相同水层取水样10 L,混合均匀后取1 L水样作为定量样本,加入鲁哥试剂固定,静置48 h后浓缩至30 mL备检。采集的样品通过奥林巴斯显微镜(CX41)进行观察,浮游植物种类鉴定和计数参考相关资料(胡鸿钧和魏印心,2006;章宗涉和黄祥飞,1991)。

采集样本的同时现场对各采样断面的环境参数进行检测,包括海拔(EL)、透明度(SD)、浊度(TUR)、溶氧(DO)、pH、和水温(WT)等参数;实验室内分别对总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)等指标进行检测,所有指标的测定参照《水与废水监测分析方法》(国家环保局,1989)中的方法进行。

1.3 数据处理与分析

浮游植物群落优势种由Mcnaughton优势种指数(Y)确定优势种(Y≥0.02);浮游植物群落多样性由Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef种类丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)进行分析(Belaoussoff et al, 2003; Lampitt et al, 1993),公式如下:

$$Y = F_i \times P_i$$
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$
$$J = H' / \ln S$$
$$D = (S-1) / \ln N$$

①
②
③
④

式中: f_i 是第*i*物种的出现频率, $P_i=n_i/N$,是第*i*物种个数在总个数的比例, S 为种类数, N 为总密度。

参照Reynolds等(2002)和Padisák等(2009)对浮游植物功能群划分的标准,对具有相同适应性特征、易于在相同生境条件下共存的浮游植物种类进行功能分组。

利用SPSS 20.0对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),采用Duncan's多重比较进行差异显著性检验;采用Pearson相关性分析对浮游生物群落结构与环境因子进行分析;采用CANOCO 5.0软件对浮游生物和水环境因子进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 种类组成

共检测到浮游植物8门32科54属96种。种类组成以硅藻门(38种)、绿藻门(30种)和蓝藻门(13种)为主,共占总种类数的84.37%,裸藻门(7种)、甲藻门(3种)、黄藻门(3种)、隐藻门(1种)和金藻门(1种)物种数较少,占总种类数的15.63%(图2)。

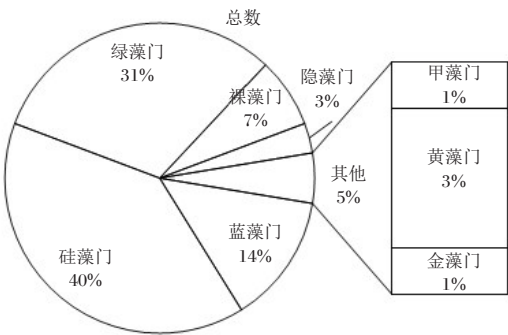


图2 金沙江中下游浮游植物种类组成比例

Fig.2 Proportional composition of phytoplankton taxa in the middle and lower reaches of Jinsha River

从空间分布上看,各采样点浮游植物种类较为丰富,巧家和新市最高,为44种,河流水体的龙开口最少,为36种。河流水体的7个采样点物种平均数为40种,略低于4个库区平均数42种。从季节上看,春秋两季种类数最多,各70种;夏季较少,为56种(图3)。浮游植物种类组成均以硅藻门为主,占比多超过50%。

2.2 浮游植物功能群

2019年金沙江中下游浮游植物可划分为24个功能群(表1):D、C、P、E、F、G、H1、J、K、Lo、LM、MP、N、S2、TC、W1、W2、X1、X2、X3、Y。河流水体共鉴定出24个功能群,其中功能群D和P的出现频率最高,为100%,在所有采样点全年均有出现,出现频率大于30%的功能群有12种;而库区共鉴定出23个功能群,其中功能群D的出现率为100%,出现频率大于30%的功能群有15种。

2019年金沙江中下游流域浮游植物功能群相对生物量情况见图4。按采样点相对生物量>20%的功能群定义为优势功能群,共有8个,分别为D、P、X1、J、C、LM、F和G。从空间分布上看,河流水体主要以D和P为主,所有采样点相对生物量平均后,在优势功能群中分别占比22.83%和31.26%,相对比例最高的点位分别在巧家(34.05%)和金安桥(44.46%)。库区D、J、P和X1优势度相对较大,在优势功能群中分别占比21.23%、16.75%、15.38%和12.89%,各点位中最高相对比例分别在鲁地拉(24.99%)、新市(33.88%)、观音岩(18.39%)和鲁地拉(20.07%)。从季节上看,春季以D+P+C功能群类为主导,相对比例之和为51.79%;夏季C功能群消退,J功能群大量生长繁殖,D+P+J功能类群逐渐发展并占优势;秋季X1功能群取代J功能群,以D+P+X1为主导,相对比例之和为64.32%。综上所述,金沙江不同采样点的浮游植物功能群存在一定差异,D和P功能群是金沙江中

下游各样点常年共有的优势种功能群,这些功能群主要分布在浑浊和中富营养的水体中。

2.3 浮游植物多样性变化

金沙江中下游浮游植物Shannon–Wiener多样性指数(H')为1.49~2.84,均值2.42。Pielou均匀度指数(J')的变化范围为0.83~0.98,均值为0.92。Marglef丰富度指数(D')为0.83~2.62,均值1.81。金沙江中下游河流水体的3项指数平均值较库区低(图5)。通过单因素方差分析比较金沙江中下游时空差异,结果表明,3类多样性指数在各采样点之间、各季节之间无显著差异。

2.4 浮游植物功能群与环境因子关系

2.4.1 Pearson 相关性分析 金沙江中下游 8 个优势功能群生物量与水环境因子的相关性分析结果表明(表2),D功能群与硝态氮呈极显著负相关($R^2=-0.476, P<0.01$),与海拔呈极显著正相关($R^2=0.448, P<0.01$);X1功能群与氨氮呈显著负相关($R^2=-0.379, P<0.05$);F功能群与浊度呈极显著负相关($R^2=-0.480, P<0.01$);G功能群与总氮呈显著正相关($R^2=0.426, P<0.05$);LM功能群与氨氮呈极显著正相关($R^2=0.536, P<0.01$)。总体来说,功能群浮游植物优势功能群生物量与浊度、海拔、氨氮、硝态氮和总氮等环境因子的关系密切。

2.4.2 RDA 分析 对12项水环境因子进行主成分分析,提取特征值大于1的主成分,共有5个,累积贡献

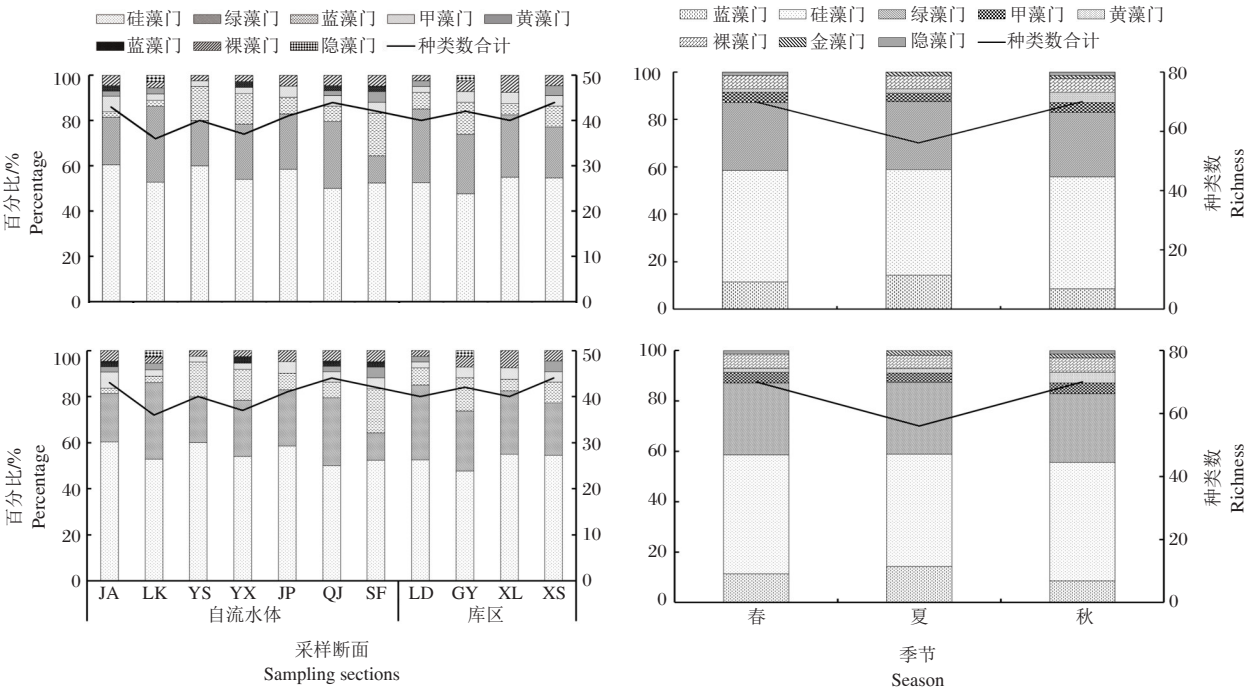


图3 金沙江中下游浮游植物种类数时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variation of phytoplankton species composition in the middle and lower reaches of Jinsha River

表1 金沙江中下游浮游植物功能群

Tab.1 Functional group composition of phytoplankton community in the middle and lower reaches of Jinsha River

功能类群	代表性藻种(属)	功能群生境特征	出现频率/%	
			河流水体	库区
C	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i> 、梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> 、科曼小环藻 <i>Cyclotella comensis</i>	富营养型的中小型水体	90.48	83.33
D	针杆藻属 <i>Synedra</i> 、菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	浑浊型富营养浅水体、透明度低	100.00	100.00
E	纤细月芽藻 <i>Selenastrum gracile</i> 、圆筒锥囊藻 <i>Dinobryon cylindricum</i>	贫营养或中营养型小型浅水水体	23.81	8.33
F	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i> 、蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i>	中或富营养型、均匀清澈的深水	28.57	66.67
G	美丽盘藻 <i>Gonium formosum</i> 、空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	富营养型停滞水体	28.57	50.00
H1	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i> 、水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flosaquae</i>	富营养型、含氮低的水体	23.81	33.33
J	四角藻属 <i>Tetraedron</i> 、盘星藻属 <i>Pediastrum</i> 、集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i> 、龙骨栅藻 <i>Scenedesmus carinatus</i>	富营养型的混合浅水	66.67	83.33
K	细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	浅型、富营养水体	4.76	8.33
Lo	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i> 、不定腔球藻 <i>Coelosphaerium dubium</i> 、羽纹藻属 <i>Pinnularia</i>	贫到富营养型的中型或大型水体、持久或深度混合	9.52	16.67
LM	飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	高度富营养水体,受光照和混合影响强烈	80.95	33.33
M	具缘微囊藻 <i>Microcystis marginata</i> 、卵圆双壁藻 <i>Diploneis ovalis</i>	稳定的中富营养水体,高透明度	19.05	25.00
MP	颤藻属 <i>Oscillatoria</i> 、舟形藻属 <i>Navicula</i> 、桥弯藻属 <i>Cymbella</i> 、异极藻属 <i>Gomphonema</i> 、双菱藻属 <i>Surirella</i> 、双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i> 、蓖形短缝藻 <i>Eunotia pectinialis</i> 、环丝藻 <i>Ulothrix zonata</i>	经常受到搅动的无机的浑水水体	85.71	75.00
N	平板藻属 <i>Tabellaria</i> 、鼓藻属 <i>Cosmarium</i> 、纤细角星鼓藻 <i>Stauroneis gracile</i>	持续或半持续的混合水层	76.19	58.33
P	直链藻属 <i>Melosira</i> 、脆杆藻属 <i>Fragilaria</i> 、新月藻属 <i>Closterium</i>	中到富营养、持续或半持续混合水体	100.00	83.33
S2	大螺旋藻 <i>Spirulina major</i>	温度、高碱度、浅水水体	4.76	8.33
T	小转板藻 <i>Mougeotia parvula</i> 、小型黄丝藻 <i>Tribonema minus</i>	持续混合水层	61.90	25.00
TC	席藻属 <i>Phormidium</i> 、湖泊鞘丝藻 <i>Lyndbya limnetica</i>	富营养、净水或者流动缓慢、具有挺水植物	61.90	50.00
TD	异形水绵 <i>Spirogyra varians</i>	中营养、静水活流动缓慢、具有沉水植物	52.38	41.67
W1	扁裸藻属 <i>Phacus</i> 、裸藻属 <i>Euglena</i>	小型有机水体、浅水	52.38	66.67
W2	棘刺囊裸藻 <i>Trachelomonas granulosa</i>	中营养、浅水水体	9.52	25.00
X1	布纹藻属 <i>Gyrosigma</i> 、针状纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i> 、小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> 、拟菱形弓形藻 <i>Schroederia nitzschoides</i>	营养型到超富营养型浅水水体	57.14	91.67
X2	简单衣藻 <i>Chlamydomonas simplex</i>	中营养型到富营养型浅水水体	4.76	0.00
X3	草鞋形波缘藻 <i>Cymatopleura solea</i>	浅水、清水、混合呈	28.57	8.33
Y	啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> 、裸甲藻 <i>Gymnodinium aeruginosum</i> 、薄甲藻 <i>Glenodinium pulvisculum</i>	中到富营养、静水环境	47.62	66.67

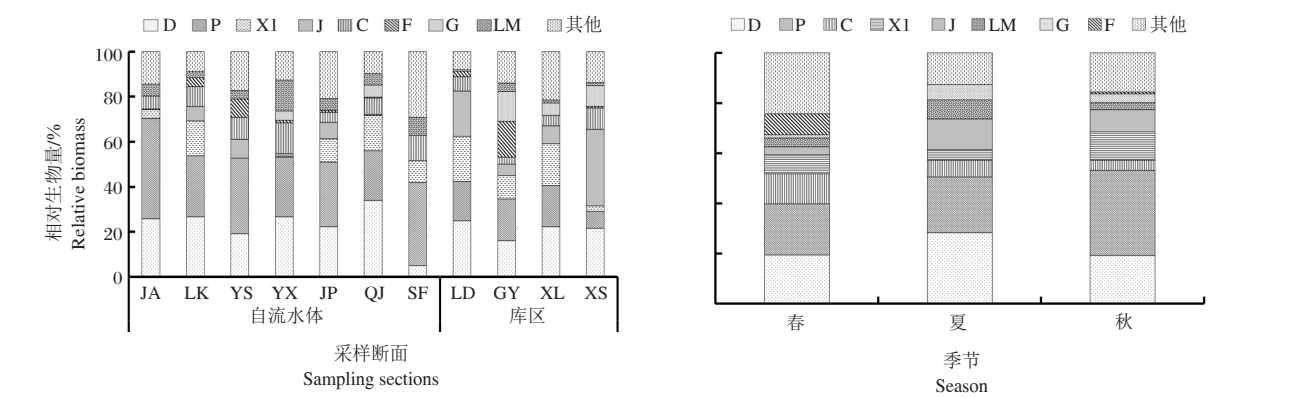


图4 金沙江中下游浮游植物功能群相对生物量时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation of relative biomass for each phytoplankton function group in the middle and lower reaches of Jinsha Rive

表 2 浮游植物优势功能群与水环境因子的 Pearson 相关性

Tab.2 Pearson correlation analysis between dominant functional groups of phytoplankton and water environmental variables

功能群	pH	WT	DO	SD	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	EL	TUR
D	-0.068	-0.075	-0.222	0.096	0.211	-0.055	0.164	-0.476**	0.054	-0.035	0.448**	0.262
P	0.199	-0.142	0.134	0.199	0.047	-0.151	0.056	-0.027	0.147	0.121	-0.074	0.094
X1	0.312	-0.072	0.146	0.101	-0.196	0.000	-0.379*	0.075	-0.159	-0.024	-0.011	-0.046
C	-0.177	-0.104	0.104	-0.186	-0.197	0.227	-0.318	-0.137	0.106	-0.162	0.071	-0.109
F	-0.414*	-0.404*	-0.216	-0.259	-0.237	0.015	-0.254	-0.042	-0.198	-0.248	0.279	-0.480**
J	0.086	0.235	0.124	0.118	0.072	-0.032	-0.017	0.110	0.076	0.253	0.108	-0.034
G	0.066	0.234	-0.239	0.056	0.426*	0.038	0.260	0.138	-0.176	0.057	-0.170	0.167
LM	-0.197	-0.02	-0.257	-0.032	0.15	-0.071	0.536**	-0.139	0.126	0.145	0.074	0.250

注:*在0.05水平显著相关;**在0.01水平显著相关。
Note:* denotes significant correlation at 0.05 level; ** denotes significant correlation at 0.01 level.

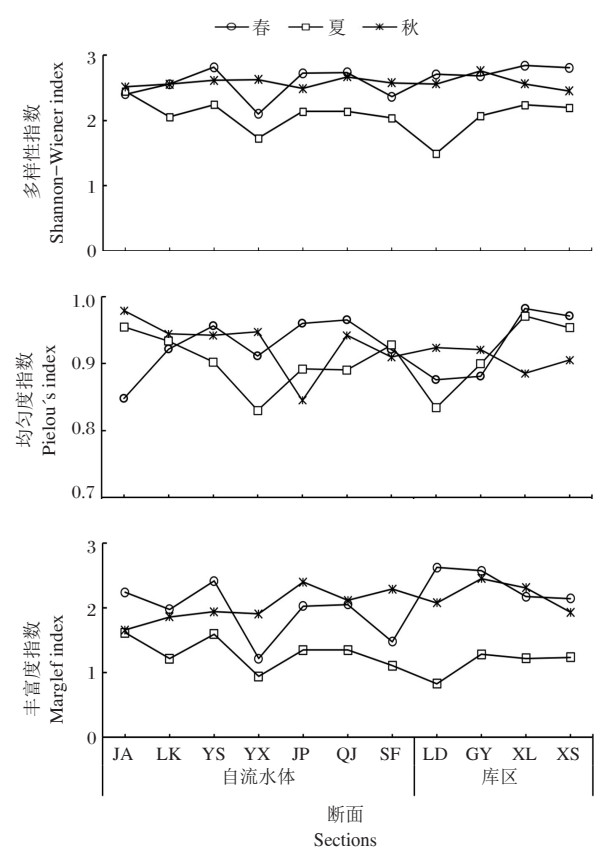


图 5 金沙江中下游浮游植物多样性指数

Fig. 5 Temporal and spatial variation of phytoplankton diversity indices in the middle and lower reaches of Jinsha River

率 76.74%。选取载荷量超过 0.4 的指标作为主要影响因素,筛选出 5 项环境因子指标,分别是 NH₄⁺-N (0.633)、TN (0.626)、WT (0.614)、TUR (0.611) 和 PO₄³⁻-P (0.415)。对浮游植物优势功能群与 5 项水环境因子进行 DCA 分析,结果显示最大的梯度长度为 1.8,小于 3,因此选择对浮游植物优势功能群与水环境因子做 RDA 分析。分析结果表明,轴一与轴二共

解释了优势功能群数据累积变化率 19.6%(表 3),优势功能群与环境因子的相关性分别为 0.662 和 0.550,前两轴累积方差为 79.0%,表明排序能够较好的反映浮游植物优势功能群与环境因子的关系。

表 3 浮游植物优势功能群与环境因子冗余分析统计参数

Tab.3 Redundancy analysis between the phytoplankton dominant functional groups and environmental variables

项目	排序轴				
	1	2	3	4	合计
特征值	0.115	0.080	0.032	0.016	
物种-环境相关性	0.662	0.550	0.547	0.405	
物种累积方差/%	11.5	19.6	22.8	24.5	
物种-环境关系累积方差/%	46.5	79.0	92.0	98.7	
所有特征值之和					1
所有典范特征值之和					0.248

RDA 分析排序(图 6)显示,对优势功能群影响较大的环境因子是水温 and 氨氮。其中排序轴 1 与氨氮 (0.4863) 的正相关性较大,其次是水温 (0.4419)。排序轴 2 与水温正相关性最大 (0.3477),与氨氮呈负相关较大 (-0.2720)。优势功能群在各象限均存在,其中 LM、P 与氨氮、浊度及总氮呈正相关;C 与浊度呈正相关;G、J、D 与水温呈较强正相关性;F、X1 与所有水环境因子呈负相关。

3 讨论

3.1 浮游植物功能群及其群落结构特征

2019 年金沙江中下游共发现浮游植物 96 种,与魏志兵等(2020)的调查结果(100 种)接近,但低于龚廷登等(2014)在金沙江水富段的调查结果(124 种),造成这种差异可能与采样点不完全一致、调查时间相隔久远等因素有关。本研究中,浮游植物种类组

成主要集中在硅藻、绿藻和蓝藻,这与往年关于长江干流的研究结果相似(魏志兵等,2020;王岳等,2015)。金沙江中下游河流水体与库区的浮游植物种类数差异不大,4个库区平均数略高于河流水体,这表明金沙江中下游梯级水电建设对浮游植物的影响是一个相对缓慢长期的过程。同时季节上差异明显,春秋两季种类数较夏季丰富,可能是夏季处于丰水期,河流内水体流速较快,含沙量高且透明度低,使水体中藻类减少。

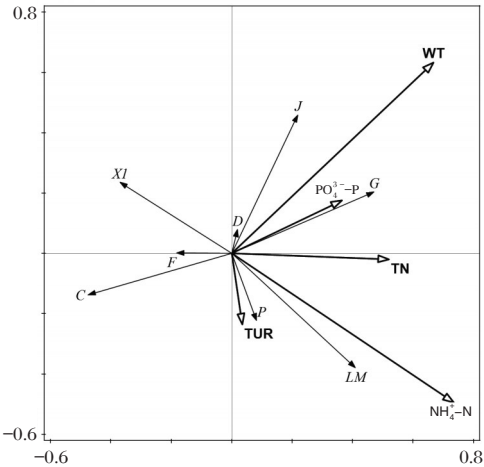


图6 浮游植物优势功能群与环境因子典范对应分析
Fig.6 Canonical correspondence analysis (CCA) biplot of phytoplankton dominant functional groups and environmental variables

通过Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Marglef丰富度指数对水质级别进行划分,结果显示金沙江中下游的水体基本处于中污染,这与魏志兵等(2020)2017-2018年对金沙江干流流域研究结果一致,说明水质并未进一步恶化。

金沙江中下游共划分24种浮游植物功能群,其中D、P、X1、J、C、LM、F和G为优势功能群。河流水体出现的24种功能群中只有12种的出现频率超过30%,其中以适应透明度低、浊度高的功能群D和P为主要优势功能群。金沙江干流含沙量高,光照强度弱的特点刚好适合这些类群的生长繁殖(王岳等,2015)。库区共鉴定23种功能群,其中出现频率大于30%的有15种。其种数稍低于河流水体,但从出现频率上看,明显高于河流水体,这可能是大坝拦截增加了水库水体滞留时间和营养盐累计效率,使水库产生热力学分层,从而促进浮游植物快速繁殖(申恒伦等,2012)。库区主要演替功能群为D、J、P和X1,这些功能群均适应中-富营养水体,本研究中水体偏碱性,营养盐含量高,有利于这些类群的生长。浮游

植物功能群在3个季节上呈P+D+C→D+P+J→P+D+X1的变化趋势,D和P功能群占绝对优势,所指示的生境特征表明金沙江中下游为浑浊的富营养型水体。春季水温低,光照强度弱,适宜C功能群生长繁殖。夏季C功能群逐渐消退,J功能群成为优势功能群。金沙江干流7-8月降雨丰沛,水体混合均匀,水体中TN和NH₄⁺-N的含量较高,丰富的营养元素有利于J功能群的生长繁殖(张俊芳等,2021)。X1功能群对水体混合敏感,适应生境为营养型-超富营养型水体。秋季降雨量小,水体稳定性较好,适合其生长繁殖。

3.2 浮游植物群落结构与水环境因子的关系

浮游植物功能群与水体生境特征相对应,温度、光照、水体动力学特征、营养盐状况、浮游动物觅食压力等因素能在特定生境中影响浮游植物功能群的组成(黄国佳等,2015)。研究表明,不同种类的浮游植物适宜生长的温度不同,而硅藻一般适宜较低的温度(张欢等,2017)。这与金沙江中下游浮游植物优势功能群多为硅藻的现象一致。RDA排序显示,水温是影响浮游浮游植物功能群较显著的环境变量,这与汉江(杜红春,2020)、汤浦水库(张俊芳等,2021)等研究结果相似。与水温直接关联的海拔对浮游植物生长影响较大。Pearson相关性分析中优势功能群D与海拔呈极显著正相关,表明海拔是影响浮游植物功能群的关键因子之一。研究表明,水体中颗粒物对光的吸收和反射会导致进入水体的光照发生衰减,浮游植物等的生产力将会将低(Obrador & Pretus,2008)。金沙江中下游被水库分割成几段不连续的河流水体,自然河道中含沙量较大,加上该区域内采砂活动多,造就了高浊度的生态环境。相对静止的库区在流水的作用下发生上下层交换,导致颗粒物增加,使浮游植物的生长受到一定程度的限制。Pearson相关性分析表明,优势功能群F与浊度呈极显著负相关,与同为长江水系的西江(陶峰等,2019)浮游植物的研究相一致,说明浊度在一定程度上影响浮游植物功能群。氮、磷是浮游植物生长必须的营养盐,对浮游植物的密度、生物量和种类组成有显著的影响(刘林峰等,2018)。RDA排序图中,第一轴、第二轴与氨氮相关性较大,表明氮对金沙江中下游浮游植物功能群的影响较大。相关分析中,D、LM、P优势功能群与氨氮呈正相关,而部分功能群与硝态氮呈负相关。金沙江中下游随着海拔降低,城市人口活动较密集,农业污染和生活废水逐渐增多,导致水体营养盐浓度升高。有研究表明,大气

沉降也是水体氮的最主要来源(Pitkänen et al, 2001)。降雨的冲刷和搅拌提高了水体中氮的浓度, 因此氮的影响比较复杂。

综上所述, 浮游植物功能群演替受不同环境因子影响。总体而言, 水温、浊度、海拔、氨氮、硝态氮是金沙江中下游浮游植物功能群演替的关键驱动因子。

参考文献

- 蔡庆华, 曹明, 黄祥飞, 2007. 水域生态系统观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 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.
- 崔玉香, 张静, 柴元冰, 等, 2020. 长江源区浮游植物群落特征研究[J]. 环境科学与技术, 43(1): 20-25.
- 杜红春, 2020. 汉江干流浮游生物群落结构和功能群特征及水质评价[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 国家环保局, 1989. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 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, (4): 25-34, 22.
- 和晓荣, 王秀英, 和武, 2015. 金沙江中游库区水污染综合治理措施研究[J]. 水利水电技术, 506(12): 76-81.
- 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.
- 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等, 2015. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征[J]. 环境科学学报, 35(2): 418-428.
- 刘林峰, 周先华, 高健, 等, 2018. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J]. 湖泊科学, 30(2): 417-430.
- 马宝珊, 徐滨, 魏开金, 等, 2020. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 39(10): 3332-3341.
- 申恒伦, 蔡庆华, 邵美玲, 等, 2012. 三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 24(2): 197-205.
- 陶峰, 刘凯, 蔺丹清, 等, 2019. 安庆市西江浮游植物群落多样性时空格局[J]. 大连海洋大学学报, 34(2): 90-97.
- 王汭, 杨柏贺, 马思琦, 等, 2020. 北运河水系浮游植物功能群与水体环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 33(2): 70-76.
- 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时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 29(6): 1356-1365.
- 王岳, 夏爽, 裴国凤, 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.
- 赵耿楠, 潘保柱, 丁一桐, 等, 2021. 渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价[J]. 生态学报, 41(8): 3226-3237.
- 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.
- 张俊芳, 胡晓红, 马沛明, 等, 2021. 汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子[J]. 水生态学杂志, 42(3): 55-62.
- 张欢, 张佳磊, 刘德富, 等, 2017. 三峡水库水温对浮游植物群落演替和多样性的影响[J]. 环境工程技术学报, 7(2): 134-139.
- Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, et al, 2003. Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles(Coleoptera: carabidae) by using a range of ecological indices[J]. Biodiversity & Conservation, 12(5): 851-882.
- Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al, 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 281(5374): 237-240.
- Pitkänen H, Lehtoranta J, Räike A, 2001. Internal Nutrient Fluxes Counteract Decreases in External Load: The Case of the Estuarial Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. Ambio A Journal of the Human Environment, 30(4): 195-201.
- Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al, 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. Marine Biology, 116(4): 689-702.
- Ma C, Chula M P, Yu H, et al, 2019. Spatial and temporal variation of phytoplankton functional groups in extremely alkaline Dali Nur Lake, North China[J]. Journal of Freshwater Ecology, 34(1): 91-105.
- Obrador B, Pretus J L, 2008. Light regime and components of turbidity in a Mediterranean coastal lagoon[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 77(1): 123-133.
- Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L, 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 621(1): 1-19.
- Reynolds C S, Vera H, Carla K, et al, 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, (5): 417-428.

(责任编辑 郑金秀)

Relationship between Phytoplankton Functional Groups and Environmental Factors in the Middle and Lower Reaches of Jinsha River

GONG Jin-ling, ZHU Ting-bing, YANG De-guo, HU Fei-fei, DU Hong-chun,
LI Xue-mei, MENG Zi-hao, WU Xing-bing

(Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs of China, Yangtze River Fisheries Research Institute,
Chinese Academy of Fisheries Science, Wuhan 430223, P.R. China)

Abstract: In this study, an investigation of phytoplankton community structure, functional group composition and diversity indices was conducted in the middle and lower reaches of Jinsha River (in both riverine and reservoir waters) in spring, summer and autumn of 2019. The relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors was then analyzed based on the results. Water samples were collected at 11 sampling transects (7 in riverine water, 4 in reservoir water) for quantitative and qualitative evaluation of phytoplankton and the water environment. A total of 96 phytoplankton species were identified, belonging to 54 genera, 32 families and 8 phyla, with dominance by Bacillariophyta (39.58%) and Chlorophyta (31.25%). No significant difference in phytoplankton community composition was observed between the riverine and reservoir waters ($P<0.05$), with an average of 40 phytoplankton species in riverine water and slightly under 42 species in reservoir water. In terms of seasonal variation, the species richness of phytoplankton in spring and autumn (70 species in both seasons) was higher than in summer (56 species). The Shannon–Wiener diversity, Margalef richness and Pielou evenness indices of the phytoplankton community were, respectively, 2.42, 1.81 and 0.92, and one-way analysis of variance showed no significant differences in diversity indices among different sampling sites or seasons. A total of 24 phytoplankton functional groups were observed during the investigation, with 8 dominant functional groups (D, P, X1, J, C, LM, F, G). There were 12 functional groups in the riverine water ecosystem with an occurrence frequency exceeding 30%, and the dominant functional groups were D and P. There were 15 functional groups in the reservoir and D, J, P and X1 were dominant. Pearson correlation analysis and redundancy analysis show that water temperature (WT), turbidity (TUR), elevation (EL), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) were the primary environmental factors affecting the functional groups in the middle and lower reaches of Jinsha River. This study provides scientific evidence and a theoretical basis for aquatic conservation, ecological restoration, and water quality assessment of the main stem of Jinsha River.

Key words: phytoplankton; functional groups; environmental factors; Jinsha River