

嘉陵江四川段浮游植物群落时空 分布及其环境影响因子

陶敏^{1,2} 熊钰¹ 李斌^{1,2} 王志坚³ 黄静³¹

(1. 内江师范学院生命科学学院, 四川 内江 641112;

2. 长江上游鱼类资源保护与利用四川省重点实验室, 四川 内江 641112;

3. 西南大学水产科学重庆市市级重点实验室, 重庆 400715)

【摘要】: 为掌握嘉陵江浮游植物群落结构现状, 了解环境变化对浮游植物种类组成、数量等造成的影响, 初步预测在高密度水电工程的影响下浮游植物群落发展方向, 于 2019 年对嘉陵江水工程最密集的中游河段进行了分季节调查研究。结果显示: (1) 研究水域存在一定程度的污染, 主要超标物为总磷。(2) 共检出浮游植物 7 门 91 属 196 种, 总密度年均值 $4.23 \times 10^6 \text{ cells/L}$, 以绿藻>硅藻>蓝藻为主要优势门类。与历史数据相比, 硅藻种类数与相对密度下降, 绿藻、蓝藻种类数和相对密度上升, 暗示着嘉陵江水体的富营养化趋势。生物多样性指数结果也显示研究江段存在一定程度的污染。(3) 分类回归树(CRT)结果显示, 在 TP 含量丰富, pH 较高、水体透光度适中的断面, 浮游植物可能会大量增殖。(4) 冗余分析(RDA)发现, 绿藻各优势种属均表现与水温、总磷的正相关; 硅藻中仅有优势度最高的小环藻喜好较高的 TP 和较低的流速; 以适应一定流速的丝状蓝藻为优势的蓝藻门除了喜好高温以外, 与水流速度也有一定正关联。总的说来, 目前嘉陵江富营养化、水流低速化正在导致喜好清洁、流水环境的硅藻逐渐丢失优势性, 喜好高营养、静水环境或微流水环境的绿藻门、蓝藻门与硅藻门小环藻属 *Cyclotella* 优势度逐渐增大。在各级电站库区, 存在夏季高温季节出现蓝、绿藻水华, 初春低温季节则可能出现小环藻优势的硅藻水华的危险。除对全流域水环境进行综合治理降低营养水平外, 适时开闸冲水, 增大库区流速以降低水华藻类的优势非常有必要。

【关键词】: 嘉陵江 浮游植物 梯级水电站 环境因子 水华

【中图分类号】: Q178;X17 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)07-1680-15

河流筑坝改变了天然河流的动力学特征和水文特征, 直接导致河流流速变缓, 使之产生类似湖泊的静水特性; 同时形成的水库又具有人为调节水位及底层泄水的特点, 最终影响元素的生物地化循环^[1]。通过大坝的拦截作用, 不但可使营养物质的绝对通量发生明显改变, 还可导致下游河流水体营养元素比例发生显著变化, 进而引起水质与水生生物群落结构的变化^[2-4]。浮游植物是水域生态系统中主要的初级生产者和食物链中重要的基础环节, 其群落结构是适应环境的结果, 不同水环境中浮游植物的

作者简介: 陶敏(1984~), 女, 副教授, 主要研究方向为淡水生态学. E-mail: celery_319_07@126.com

李斌 E-mail: libin2004xinyang@126.com

基金项目: 农业财政专项(CJDC-2017-12); 四川省科技厅项目(2019YJ0498, 2019YJ0397); 内江师范学院校级科研项目(2019YB10, 18ZL05); 四川省大学生创新创业训练计划项目(X2020019)

群落组成会主动或被动地适应环境的改变^[5],故其现状影响着水生生态系统的结构与功能,也反映了水环境的状态^[6~8]。水电站拦截河流形成水库,库区透明度较大^[9,10],富营养化程度提高^[11],有利于浮游植物的光合作用,其种类和密度可能会有明显升高,甚至有形成水华的可能^[12~14]。同时由于水动力学的变化,适宜在静水和缓流环境中生存的蓝藻、绿藻和甲藻门的在库区中的种类、数量均可能增加,原有的硅藻优势可能逐渐减弱^[15~17]。

嘉陵江是长江上游重要一级支流,是长江各一级支流中流域面积最大的大河^[18],水电开发力度大,干流中下游目前已建、在建及规划建设的梯级水电枢纽共 18 级,其中 15 座位于四川段。如此高密度的梯级电站形成的梯级水库由于水量与物质的上下游承接,表现出的生态环境影响更具累积效应^[4,19]。目前对嘉陵江干流浮游植物的研究大多数集中在下游江段,研究年份也大多集中在 2010 年以前^[2,20~30]。近 10 年间,随着梯级电站的持续运行以及人为因素的持续影响,嘉陵江的水文、水环境特征已发生明显变化^[4,18],浮游植物群落结构现状与发展趋势势必也随之发生了一系列的变化,在梯级电站密集分布的四川段该变化可能更为显著。故本研究主要对梯级电站密集的嘉陵江四川段进行浮游植物和水质调查,掌握嘉陵江浮游植物群落结构的现状,探讨及其与环境因子的关系,并与历史数据进行比较,讨论梯级电站带来的环境改变对嘉陵江浮游植物群落结构的形成和发展带来的影响,为流域水生态系统管理提供研究基础和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

嘉陵江发源于陕西省秦岭代王山,流经甘肃、陕西、四川、重庆四省市,干流全长 1120km,落差 2300m,流域面积 $1.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,是流域面积最大的长江支流^[4]。嘉陵江流域属亚热带季风湿润气候,其中 50%的降雨主要集中在 7~9 月份。按照流域及河道特征分为上、中、下游,通常广元以上为上游,长约 380km;广元至合川段为中游,长约 645km;合川至河口段为下游。其中中下游地区年平均降水量为 1010~1250mm,主要集中在 5~10 月份,占全年降水量的 85%左右^[18];本次调查区域范围为广元至南充下游河段,属于中游河段,长约 300km(图 1),区域内共 8 座已建成水电站,相邻电站的库区和库尾相互重叠。在 8 座电站中,考虑到电站位置、库区之间距离与自然生态环境差异,选择了 5 个库区,分别为研究江段上游上石盘电航枢纽(城市区),研究江段中游亭子口水电站(农业区)、红岩子电航枢纽(县城区)、马回水电站(农业区),以及研究江段下游的青居水电站(城市区),每个电站水库设置库尾、库中和坝前 3 个断面,共计 15 个采样断面开展调查研究,从上游到下游分别编号 JL01~JL15。

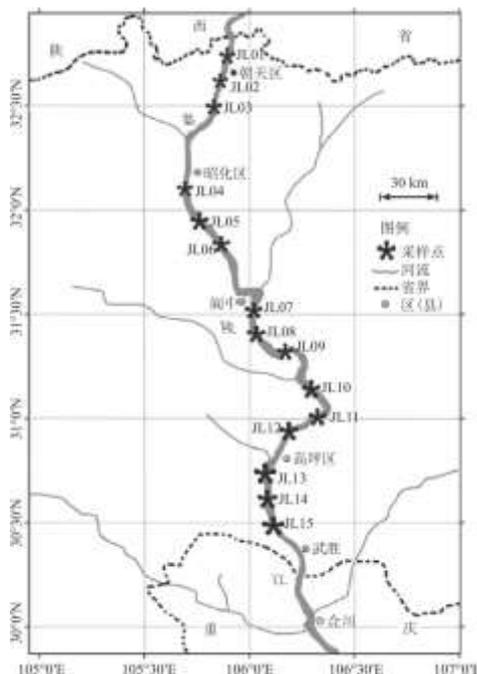


图 1 采样点分布图

1.2 样品的采集、处理与检测

于 2019 年 5 月、8 月、11 月对嘉陵江四川段 15 个断面进行采样调查。使用塞氏盘(Secchidisc)、便携式溶解氧测量仪(YSI-550A)、便携式 pH 计(METTLER TOLEDO Seven2Go)、便携式流速仪(Flowatch)等设备对研究区域透明度(Secchi Depth, SD)、水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、流速(Flow Velocity, FV)等进行原位测定。表层水样以有机玻璃定深采水器(北京普利特, WB-PM, 5L)采集。水化学样品直接装入干净的样品瓶密封, 冷藏带回实验室。浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网在水面下作“∞”字型捞取并过滤收集, 加入 4%甲醛现场固定。同时将 1L 浮游植物定量样品装入样品瓶并立即加入鲁哥氏试剂现场固定。

在实验室中将浮游植物定量样品在浮游生物沉淀器中避光静置沉降 48h, 以虹吸法去除上层清液后, 浓缩定容至 50mL, 加入数滴甲醛溶液保存。浮游植物计数、种类鉴定以及总磷(TP)与高锰酸钾指数(COD_{mn})含量测定参照相关文献^[31~33]在实验室中进行。

1.3 数据处理与分析

本文统计分析通过 SPSS19.0 与 CANOCO5.0 软件实现; 基本图形绘制在 Excel2007 软件中完成。

1.3.1 生物多样性指数计算

运用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)进行评价。各指数计算与评价标准参考杨敏等^[2]。

1.3.2 浮游植物优势度指数计算

优势种(属)以 Mcnaughton 优势度指数(Y)值进行鉴别^[34]:

$$Y = P_i \times f_i$$

式中: P_i 为第 i 种(属)丰度与样品中浮游植物种总丰度的比值(n_i/N), f_i 为第 i 种(属)在各采样点出现的频度。 $Y \geq 0.02$ 的种(属)为优势种(属)。

1.3.3 分类回归树分析

为分析环境因子与浮游植物总密度之间的关系, 以 COD_{mn}、TP、DO、SD、pH 为因变量, 以流速 FV 为影响变量, 采用分类回归树(classification and regression tree, CRT)评价这 5 个预测指标的对浮游植物密度的重要性。对参与分析的数据进行常用对数 $Lg(x+1)$ 转换, 并通过独立因子 t 检验对每个节点所分成的两个亚群之间的差异性进行检验。该部分所有统计均在 SPSS19.0 中完成。

1.3.4 排序分析

优势浮游植物与环境变量之间关系利用 CANOCO5.0 软件包, 通过冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)或典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)来实现。CANOCO5.0 与 CANOCO4.5 相比进步之一在于不需先做除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA), 可以直接根据数据的情况选择适宜的分析方法。对浮游植物优势门和种属均进行

排序分析，在进行分析之前对物种矩阵和环境变量均进行 $Lg(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 主要理化因子

研究期间，嘉陵江流速与流量在夏季丰水期较高，春季较低。透明度变化范围为 29.0~436.7cm，均值 102.9cm，呈现出春秋两季较大，夏季较小的趋势。TP 变化范围 0.15~0.83mg/L，均值为 0.40mg/L，春夏季节水平相近，秋季较低。pH 在 7.63~8.70 之间，为中性偏碱性水体。DO 含量充足，变化范围为 7.88~13.73mg/L。COD_{Mn} 季节间相差较小，在 1.22~3.49mg/L 之间，为 I-II 类水质。

表 1 研究期间嘉陵江主要理化指标均值与变化范围

指标	单位	春季		夏季		秋季		全年	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
流速	m/s	0.066	0.017~0.249	0.214	0.034~0.565	0.141	0.016~0.646	0.140	0.016~0.646
流量	m ³ /s	5.60	0.09~44.12	12.08	0.19~51.49	7.84	0.88~23.33	8.50	0.09~51.49
水温	°C	21	17.7~24.4	27.8	24.9~32.4	13.7	9.2~16.2	20.8	9.2~32.4
pH		8.12	7.63~8.47	8.31	7.94~8.70	8.28	8.02~8.46	8.24	7.63~8.70
溶氧	mg/L	9.54	7.88~13.73	9.21	8.17~12.02	10.43	9.20~12.32	9.73	7.88~13.73
透明度	cm	116.3	29.0~436.7	80.0	37.7~215.3	112.5	42.3~258.0	102.9	29.0~436.7
高锰酸盐指数	mg/L	2.40	1.28~3.49	2.28	1.22~3.32	2.33	1.51~3.17	2.34	1.22~3.49
总磷	mg/L	0.48	0.33~0.83	0.46	0.32~0.81	0.25	0.15~0.51	0.40	0.15~0.83

2.2 浮游植物种类组成与优势种

2.2.1 浮游植物种类组成

研究期间在嘉陵江四川段样品中共检出浮游植物 7 门 91 属 196 种(图 2)，其中绿藻最多为 38 属 76 种(占比 38.8%)，其次为硅藻 24 属 62 种(31.6%)，蓝藻 13 属 25 种(12.8%)，裸藻 5 属 14 种(7.1%)，甲藻 5 属 9 种(4.6%)，金藻 4 属 5 种(2.6%)，隐藻 2 属 5 种(2.6%)。夏季种类数最多，为 63 属 137 种，其中绿藻最多为 29 属 60 种，其次是硅藻 14 属 38 种；秋季种类数最少为 51 属 100 种，但硅藻种类为全年最多(18 属 46 种)；甲藻、金藻和裸藻则在春季出现种类最多。

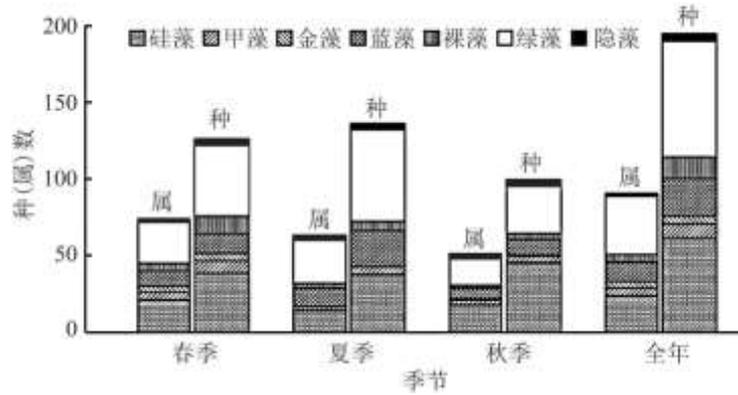


图2 浮游植物种(属)数季节分布

2.2.2 浮游植物密度与多样性指数时空分布

春季浮游植物密度均值为 $2.73 \pm 2.50 \times 10^6$ cells/L, 生物量均值为 1.76 ± 1.83 mg/L, 以 JL03 号断面现存量最大, JL07 号为最小。浮游植物数量主要贡献者为绿藻、硅藻和隐藻, 平均密度分别为 $8.21 \pm 12.86 \times 10^5$ cells/L、 $7.62 \pm 6.53 \times 10^5$ cells/L 和 $7.48 \pm 7.38 \times 10^5$ cells/L(图 3A)。

夏季浮游植物密度平均值为 $8.50 \pm 11.52 \times 10^6$ cells/L, 生物量为 1.74 ± 1.64 mg/L, JL03 号断面现存量最大, JL12 号为最小。浮游植物数量主要贡献者为绿藻和蓝藻, 平均密度达 $6.04 \pm 11.34 \times 10^6$ cells/L 和 $1.68 \pm 2.90 \times 10^6$ cells/L(图 3B)。

秋季浮游植物密度平均值为 $1.48 \pm 0.97 \times 10^6$ cells/L, 生物量平均值为 0.92 ± 0.49 mg/L, 以 JL10 号断面现存量最大, JL13 号为最小。浮游植物数量主要贡献者为硅藻、绿藻和隐藻, 平均密度分别为 $1.02 \pm 0.82 \times 10^6$ cells/L、 $2.24 \pm 1.41 \times 10^5$ cells/L 和 $1.10 \pm 1.13 \times 10^5$ cells/L(图 3C)。

从全年浮游植物空间分布可见, 密度均值为 $4.23 \pm 7.35 \times 10^6$ cells/L, 生物量均值为 1.48 ± 1.47 mg/L。绿藻门 ($2.36 \pm 6.96 \times 10^6$ cells/L) 在全年密度组成占优势地位, 其次为硅藻门 ($8.33 \pm 7.04 \times 10^5$ cells/L) 和蓝藻门 ($6.82 \pm 18.06 \times 10^5$ cells/L, 图 3D)。从空间分布来看, 位于广元境内的 1-6 号断面浮游植物现存量(平均 $6.45 \pm 9.01 \times 10^6$ cells/L) 高于南充境内 7-15 号断面(平均为 $2.76 \pm 5.72 \times 10^6$ cells/L, 独立样本 t 检验, $t=2.420, P=0.031$), 其差异主要体现在绿藻门和蓝藻门的数量差异上(图 3D), 上游断面蓝藻和绿藻丰度分别为下游断面的 4.16 和 2.1 倍, 且数量基数较大。

3 种多样性指数在上游广元段与下游南充段之间均无显著区别 ($P>0.05$, 表 2)。春秋季平水期 H' 较高(分别为 3.6 ± 0.5 和 3.5 ± 0.3), 夏季丰水期较低 (2.7 ± 1.2), 全年整体为轻污染或无污染状态 (3.3 ± 0.4)。J 也大致呈现出上述趋势, 其中秋季最高 (0.81 ± 0.1), 表现为清洁, 春 (0.77 ± 0.1)、夏 (0.62 ± 0.3) 季节稍低, 全年整体为寡污型 (0.73 ± 0.1)。D 值则春季最高 (5.4 ± 1.0) 表现为清洁, 夏季 (3.8 ± 1.1) 和秋季 (3.9 ± 1.0) 差异不大, 为 β -中污, 全年整体为寡污型 (4.4 ± 0.4)。总体来说嘉陵目前存在一定的污染, 为寡污型。

2.2.3 优势种组成的季节变化

硅藻和隐藻在水温较低的春秋两季优势度较大, 尤其是秋季, 夏季则主要以蓝、绿藻为优势。春季优势浮游植物共有 9 属, 其中优势度最大的是蓝隐藻 *Chroomonas*, 其次为小环藻 *Cyclotella*、衣藻 *Chlamydomonas* 和隐藻 *Cryptomonas*; 夏季优势属种类较少(5 属), 均为蓝、绿藻, 以绿球藻 *Chlorococcum* 优势度最大, 假鱼腥藻 *Pseudanabaena* 次之; 秋季硅藻和隐藻优势度明显上

升, 绿藻优势度降低, 12 个优势属中优势度最大的前 6 属均为硅藻, 尤其是曲壳藻 *Achnathes* 和脆杆藻 *Fragilaria* (表 3)。综合 3 个季节的情况, 全年优势属共 9 属, 优势度最大的为绿球藻, 其余种属优势度指数相近 (表 3)。

2.3.4 浮游植物总密度与环境因子的关系

CRT 模型将浮游植物密度数据作了 4 次细分, 在每个分支节点形成 2 个的子群之间差异性显著 (独立因子 T 检验, $P < 0.05$, 图 4)。第一个分支将 14 个 COD_{Mn} 含量相对较低 ($\leq 2.18\text{mg/L}$) 且浮游植物密度较高 ($7.70 \times 10^4 \text{cell/L}$) 的样点与其余 31 个样点 (密度均值 $2.67 \times 10^4 \text{cell/L}$) 分开; 第二个分支将上述的 14 个点按照 TP 水平进行细分, $TP > 0.34\text{mg/L}$ 的 9 个样点因具有较高的密度 ($11.07 \times 10^4 \text{cell/L}$) 而与剩下的 5 个点 (密度均值 $1.62 \times 10^4 \text{cell/L}$) 区别开来; 第一个分支中密度较低的 31 个点则以 $SD=103\text{cm}$ 为分界线, 分成了透明度较低、密度较高 ($3.46 \times 10^4 \text{cell/L}$, 21 样点) 和透明度较高、密度较低 ($1.02 \times 10^4 \text{cell/L}$) 的两群; 最后一个分支则将第三次细分中的 21 个样点组成的亚群分成了 pH 较高 (> 8.02)、浮游植物也较多 ($4.17 \times 10^4 \text{cell/L}$, 16 个样点) 的子群与 pH 较低、浮游植物较少 ($1.16 \times 10^4 \text{cell/L}$, 5 个样点) 的子群。该模型显示, 嘉陵江浮游植物总密度大致受到营养水平和透明度等因素的影响, 大致呈现出随着 TP 与 pH 升高而升高的趋势, 同时有机物含量和透明度的升高对浮游植物增殖有一定的负面影响。在 TP 含量丰富, 且有机物较少 (可理解为有机磷含量也较少)、pH 较高、水体透光度适中的断面, 浮游植物可能会大量增殖。

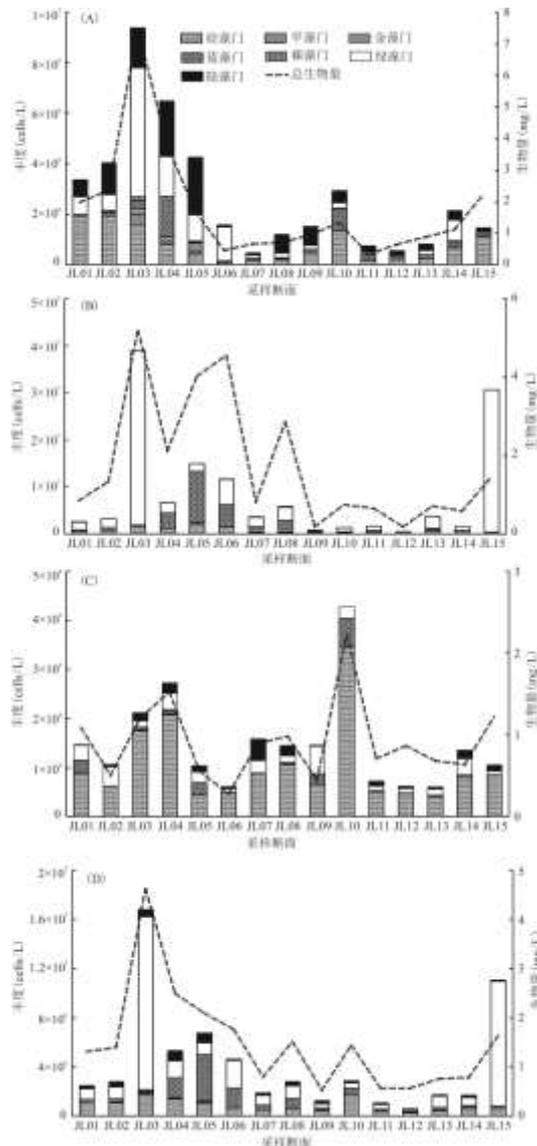


图 3 嘉陵江浮游植物丰度与生物量时空分布 (A-春季, B-夏季, C-秋季, D-全年)

表 2 研究江段多样性指数 H'、均匀度指数 J 和物种丰富度指数 D 的时空分布

	春季			夏季			秋季			全年		
	H'	J	D									
JL01	3.5	0.75	4.7	1.7	0.40	3.4	3.2	0.83	2.4	2.8±1.0	0.66±0.2	3.5±1.2
JL02	3.4	0.75	4.0	2.6	0.56	4.4	3.2	0.79	3.5	3.1±0.4	0.70±0.1	4.0±0.5
JL03	3.9	0.79	5.4	0.4	0.09	2.8	3.6	0.77	4.3	2.6±1.9	0.55±0.4	4.1±1.3
JL04	3.8	0.78	5.4	3.7	0.79	5.0	3.5	0.76	4.2	3.7±0.1	0.78±0.0	4.8±0.6
JL05	3.2	0.66	5.2	2.2	0.51	3.3	3.9	0.89	4.4	3.1±0.8	0.69±0.2	4.3±1.0
JL06	3.1	0.72	3.9	3.9	0.74	6.0	3.3	0.80	4.0	3.4±0.4	0.75±0.0	4.6±1.2
JL07	4.3	0.90	7.2	2.8	0.63	3.7	3.3	0.81	3.1	3.5±0.8	0.78±0.1	4.7±2.2
JL08	2.7	0.60	4.7	3.0	0.64	4.2	3.7	0.83	4.3	3.1±0.5	0.69±0.1	4.4±0.3
JL09	3.4	0.72	5.1	3.1	0.75	4.0	2.9	0.74	2.8	3.1±0.2	0.74±0.0	4.0±1.1
JL10	4.1	0.80	6.8	2.6	0.69	2.8	2.9	0.73	2.5	3.2±0.8	0.74±0.1	4.0±2.4
JL11	3.1	0.73	4.7	4.1	0.91	4.8	3.6	0.79	5.4	3.6±0.5	0.81±0.1	5.0±0.4
JL12	3.8	0.83	5.9	3.1	0.85	2.9	3.8	0.86	5.1	3.5±0.4	0.85±0.0	4.6±1.6
JL13	3.9	0.85	5.6	3.3	0.73	4.0	4.0	0.90	5.0	3.7±0.4	0.83±0.1	4.9±0.8
JL14	4.1	0.82	6.6	3.9	0.91	4.5	3.5	0.88	3.0	3.9±0.3	0.87±0.0	4.7±1.8
JL15	4.0	0.82	6.4	0.1	0.02	1.3	3.7	0.79	4.9	2.6±2.2	0.54±0.5	4.2±2.6
平均	3.6±0.5	0.77±0.1	5.4±1.0	2.7±1.2	0.62±0.3	3.8±1.1	3.5±0.3	0.81±0.1	3.9±1.0	3.3±0.4	0.73±0.1	4.4±0.4

表 3 浮游植物优势种及优势度指数 (Y)

门	属	拉丁名	序号	春季	夏季	秋季	全年	优势季节
蓝藻门	颤藻	Oscillatoriaspp.	1		0.0354	0.0212	0.0255	夏、秋
	假鱼腥藻	Pseudanabaenasp.	2		0.0694		0.0298	夏
绿藻门	空星藻	Coelastrumspp.	3			0.0297		夏、秋

	绿球藻	Chlorococcusspp.	4		0.3844		0.0857	夏
	塔胞藻	Pyramidomonasspp.	5	0.0566				春
	栅藻	Scenedesmuspp.	6		0.0298			春、夏
	小球藻	Chlorellaspp.	7	0.0431	0.0210		0.0263	春、夏、秋
	衣藻	Chlamydomonasspp.	8	0.0664				春、秋
隐藻门	蓝隐藻	Chroomonasspp.	9	0.2043		0.0300	0.0284	春、秋
	隐藻	Cryptomonasspp.	10	0.0652		0.0219		春、秋
硅藻门	脆杆藻	Fragilariaspp.	11	0.0460		0.0761	0.0243	春、秋
	等片藻	Diatomaspp.	12			0.0517		秋
	菱形藻	Nitzschiaspp.	13	0.0307				春
	桥弯藻	Cymbellaspp.	14			0.0259		秋
	曲壳藻	Achnanthespp.	15			0.1733	0.0228	秋
	小环藻	Cyclotellaspp.	16	0.0979		0.0708	0.0328	春、秋
	异极藻	Gomphonemaspp.	17			0.0401		秋
	针杆藻	Synedraspp.	18			0.0416	0.0266	秋
	直链藻	Melosiraspp.	19					秋
	舟形藻	Naviculaspp.	20	0.0220		0.0578		春、秋

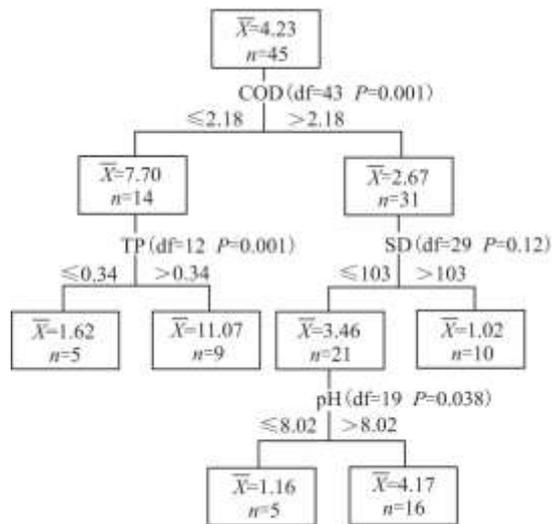


图 4 嘉陵江浮游植物现存量与环境因子之间的关系

注: \bar{X} : 浮游植物密度均值 ($\times 10^6$ cells/L); n: 样本数量; COD, TP 单位为 mg/L; SD 单位为 cm.

2.3.5 影响浮游植物组成的环境因子

RDA 结果显示, 嘉陵江浮游植物的主要贡献者—绿藻、硅藻、蓝藻和隐藻需求各不相同, 分布在排序图的 4 个象限中(图 5A)。种类数和密度最大的绿藻门主要与 WT、pH、TP 呈正相关关系, 与 SD、COD_{mn}、DO 呈负相关; 隐藻则与绿藻需求相反, 不喜高的 WT、pH 和 TP, 与 DO 和 SD 有一定正相关。硅藻与 FV、COD_{mn}、SD 负相关, 与 TP 有一定程度的正关联; 蓝藻门则表现为与硅藻大致相反的需求, 与 FV、COD_{mn}、WT 有一定程度的正相关, 与其他因子的关系不密切。从对营养(包括 TP 和 COD_{mn})、pH 和 SD 的需求来说, 嘉陵江浮游植物现存量组成贡献最大的绿藻与硅藻基本一致, 喜好较高的 TP、pH 以及较低的 COD_{mn}、SD, 这一结果与 CRT 结果相吻合。结合物种箭头长度不难发现, 对于同样的 TP 变化, 绿藻对其响应比硅藻更为明显。作为静水型类群, 绿藻喜好高温、高营养, 而主要为流水型的硅藻随着营养条件(TP)的提高其密度也有增长, 但其增长幅度不如绿藻。

从优势属来看, 蓝藻和绿藻的主要优势属(包括假鱼腥藻、颤藻 *Oscillatoria*、绿球藻)对环境条件的需求较接近, 喜好高 WT 与高 TP; 作为夏季的最重要优势种属($Y=0.3844$), 绿球藻还表现出与 SD 的负相关。硅藻中优势度最高的小环藻需求与小球藻 *Chlorella*、蓝隐藻较为相似, 在 FV、WT 较低, SD 较高的环境更容易占据优势地位, 此外该属还受到营养水平(TP 和 COD_{mn})的促进作用。另外 3 种优势硅藻(针杆藻 *Synedra*、曲壳藻和脆杆藻)之间需求较接近, 与小环藻不同, 喜好较低的营养水平与较低的 WT(图 5B)。上述结果说明, 随着营养水平的提高, 蓝藻、绿藻数量普遍增多, 硅藻中小环藻属也有明显的增加, 助其牢牢占据优势地位。

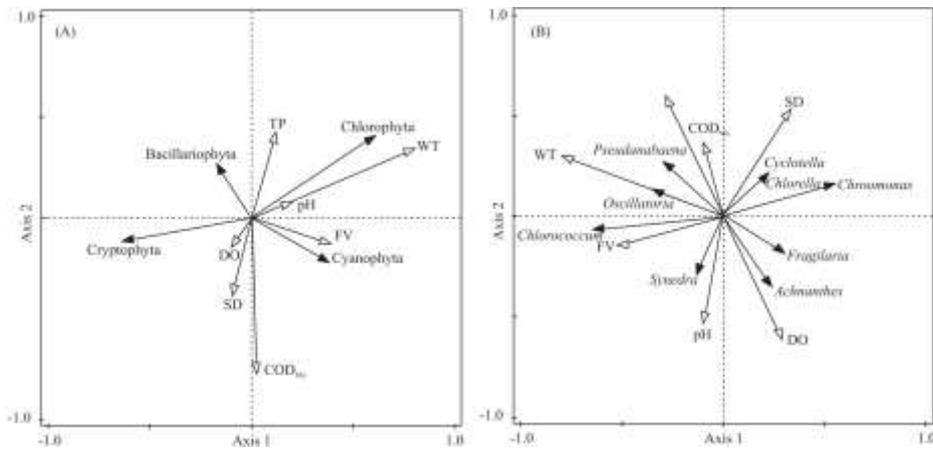


图 5 嘉陵江浮游植物主要门(A)和优势属(B)的种类—环境变量的 RDA 排序图

3 讨论

3.1 嘉陵江四川段水质与浮游植物群落结构现状

按照地表水环境质量标准(GB3838-2002), 研究水域存在一定程度的污染, 主要超标物为 TP, 除秋季为IV类水外, 春夏季节均为劣V类。结合嘉陵江历史数据^[2,20,21,23~30], 与 2006~2007 年南充段数据(TP0.21mg/L, 0.04~0.45mg/L)相比, 总磷水平(平均 0.40mg/L, 变化范围 0.15~0.83mg/L)有所提高(表 4, 图 6A), 也普遍高于重庆段 2007~2014 年间的水平(表 4)。对比历史数据, 四川段和重庆段 TP 数据均大致呈现出逐年上升趋势(表 2, 图 6A, 图 6B), 这与研究水域人口较密集、工农业发展水平相对较高有

关^[35],人为因素对水环境干扰的持续^[4],再加之水库对磷有较高的滞留效率^[36,37],导致了嘉陵江总磷在时间上的积累。

嘉陵江渠化对嘉陵江的水文与水环境特征带来了深远的影响,也对生活其中的水生生物群落带来了显著改变。对比历史数据^[2,20,21,23~30],嘉陵江浮游植物群落结构近15年来变化特点大致呈现为:绝对密度增大、硅藻物种数与相对密度降低、绿藻和蓝藻物种数与相对密度增加(表4、图6)。研究江段浮游植物共检出7门91属196种,其中硅藻种类数与历史数据相比^[20]相比有明显下降,蓝、绿藻种类数则有较大幅度增加^[27,28]。浮游植物总密度年均值 4.23×10^6 cells/L,与长江上游其他一级支流相比^[29,38,39],嘉陵江四川段浮游植物密度处于高水平;与2010年(1.275×10^5 cells/L)^[27,28]相比上升了一个数量级,其中蓝、绿藻涨幅最大,为2010年的58倍^[27,28],硅藻则为2010年的11倍^[27,28]和2006年的46倍^[20],这一变化导致了绿藻取代硅藻成为嘉陵江四川段目前现存量第一的优势类群。硅藻多为喜流水藻类,绿藻、蓝藻和隐藻则多为静水型,其中蓝藻和绿藻的大量生长还暗示着富营养化^[2,40],这一结果意味着嘉陵江目前静水化、富营养化较为明显。

综合H'、D、J3种生物多样性指数,嘉陵江目前处于轻度污染状态,支持了水化指标和浮游植物群落结构评价结果。与历史数据相比^[2,20,25,27,28],3种指数(均值分别为 3.3 ± 0.4 、 4.4 ± 0.4 、 0.73 ± 0.1)有升高的趋势,可能与沿江的人为干扰的加强以及渠化后浮游植物群落新结构逐渐稳定有关。

3.2 嘉陵江四川段浮游植物与环境因子的关系

嘉陵江四川段流速与各门藻类之间相关性不同,随着流速的增大,硅藻门、隐藻门数量减少,蓝藻门、绿藻门数量却呈增加趋势,特别是蓝藻,与流速之间的正相关最为明显。由于嘉陵江梯级电站的开发,河流连续性被破坏,采样断面流速普遍较低,80%的断面年均流速低于0.2m/s。硅藻(尤其是大型硅藻)由于硅质化细胞壁的存在比重大、易沉降^[39],需要借助一定流速冲击而悬浮水中进行光合作用^[24],流速的降低可能对其生长繁殖带来困难。本研究中,曲壳藻等喜流水硅藻^[20]与流速关系不明显,可能与筑坝导致的流速降低^[1]、流量差和流速差减小有关^[41]。嘉陵江水域流速趋向均匀化,流速变化范围小,对喜流水硅藻来说影响不明显。而占硅藻比例最大的小环藻属为单细胞,个体小,较易悬浮,与静水统适应者小球藻、蓝隐藻^[42]一样,对较为缓慢的水流状态有偏好^[43~45],因而造成了流速减小,硅藻门总密度与隐藻门一样增多的现象。嘉陵江重庆出口段自2005年起开始出现小环藻水华,在早春季节适宜的水温($8.5^\circ\text{C} \sim 13.5^\circ\text{C}$)和较低的流速($0.02 \sim 0.29\text{m/s}$)下周期性爆发^[46,47];对汉江小环藻水华的研究也发现,0.07m/s的较低流速是汉江硅藻水华爆发时的环境特征之一^[44]。研究期间嘉陵江四川段春季平均流速0.066m/s,变化范围0.017~0.24m/s,小环藻平均密度已达 2.7×10^5 cells/L,有一半左右的断面密度超过 1.0×10^5 cells/L,需要警惕春季硅藻水华。此外,丝状蓝藻在流水和浑浊水中具有一定优势^[42,48],本研究中的两种优势蓝藻(颤藻和假鱼腥藻)均为丝状,流速的适当增大对蓝藻增殖起到了一定的促进作用。尽管绿藻门与流速关联不大,但绿球藻属却呈现出与流速的正相关关系,可能与绿球藻占优势的夏季水温、流速均高有关,绿球藻属主要受二者的综合作用。

有研究发现,磷是嘉陵江浮游植物的主要限制性因子^[22,49,50]。本研究中,浮游植物总密度与TP呈现一定程度的正相关。将嘉陵江相同水域的历史数据进行线性拟合^[2,21,24,30],也可看出浮游植物密度随TP升高而升高的趋势(图6C)。对占总密度绝大多数的绿藻、硅藻和蓝藻而言,TP的升高对其增殖均呈现出促进作用,尤其是静水型的绿藻,对营养水平的响应最为明显。随着磷含量的提高,绿藻(占年均总密度55.8%)优势种属数量普遍增多,导致了绿藻在3个季节的持续优势,这与嘉陵江重庆段发现的绿藻优势情况相似^[23]。硅藻随着营养条件(TP)的提高其密度也有增长,但主要只是优势种属小环藻的增长,其他优势硅藻(针杆藻、曲壳藻、脆杆藻)则与TP呈现不同程度负相关。有研究发现,与绿藻和蓝藻相比,硅藻随磷浓度的增加其比生长速率虽也有所增加,但不显著,可能与硅藻对储存在体内的多聚磷酸体转化利用较慢有关^[51]。而在硅藻中,小环藻对磷吸收和利用的效率要高于针杆藻等藻种^[51]。同时由于多数硅藻对较低水温和一定流速的需求^[24,39,46,47],在夏季和低流速水域不能很好增殖,最终导致其优势度无法再重新超越绿藻。

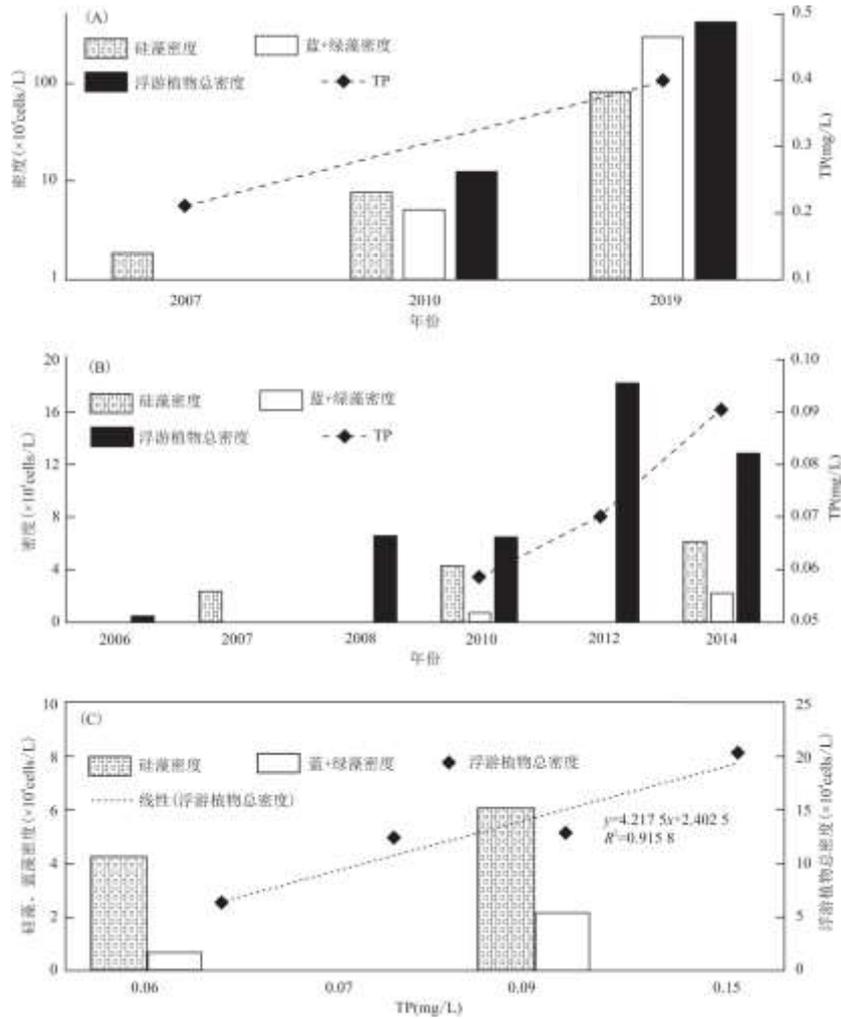


图6 近15年嘉陵江相关研究中浮游植物密度与TP含量的时间变化(A. 四川段; B. 重庆段)与浮游植物密度组成随TP变化趋势(C. 重庆段)

目前嘉陵江富营养化、水流低速化正在导致喜好清洁、流水环境的硅藻逐渐丢失优势性，喜好高营养、静水环境或微流水环境的绿藻门、蓝藻门、与硅藻门小环藻属优势度逐渐增大。按照这样的发展趋势，在各级水电站库区，夏季高温季节可能出现由颤藻、假鱼腥藻、绿球藻等形成的蓝、绿藻水华，冬春季低温期则可能出现小环藻优势的硅藻水华。除对全流域水环境进行综合治理降低营养水平外，适时开闸冲水，增大库区流速以降低水华藻类的优势非常有必要。

4 结论

(1) 研究水域存在一定程度的污染，主要超标物为总磷，除秋季为IV类水外，春夏季节均为劣V类，TP含量与嘉陵江干流历史数据相比有明显上升。

(2) 研究江段浮游植物共检出7门91属196种，总密度年均值 4.23×10^6 cells/L，以绿藻、硅藻和蓝藻为主要优势门类。其中种类数与密度最高均为绿藻，分别为38属76种和 2.36×10^6 cells/L；其次为硅藻，分别为24属62种和 8.33×10^5 cells/L；第三为蓝藻，分别为13属25种和 6.82×10^5 cells/L。与历史数据相比，硅藻种类数减少，绿藻和蓝藻种类数增多；浮游植物密度有明显增加，但硅藻相对密度下降，绿藻和蓝藻相对密度上升，暗示着嘉陵江水体的富营养化趋势。

(3)生物多样性指数在上游广元段与下游南充段之间均无显著区别($P>0.05$),春秋平水期水质略好于丰水期, H'、J、D 年均值分别为 3.3、0.73 和 4.4, 总体来看研究江段存在一定程度的污染, 与水化指标和浮游植物群落结构评价结果一致。

(4)CRT 结果显示, 在 TP 含量丰富, 且有机磷较少、pH 较高、水体透光度适中的断面, 浮游植物可能会大量增殖。RDA 则反映出嘉陵江浮游植物密度的主要贡献者—绿藻、硅藻、蓝藻需求各不相同, 绿藻优势种属均表现与水温、TP 的正相关; 硅藻中仅有优势度最高的小环藻喜好较高的 TP 和较低的流速; 以适应一定流速的丝状蓝藻为优势的蓝藻门除了喜好高温以外, 与水流速度也有一定正关联。

(5)目前嘉陵江富营养化、水流低速化正在导致喜好清洁、流水环境的硅藻逐渐丢失优势性, 喜好高营养、静水环境或微流水环境的绿藻门、蓝藻门与硅藻门小环藻属优势度逐渐增大。按照这样的发展趋势, 在各级水电站库区, 夏季高温季节可能出现由颤藻、假鱼腥藻、绿球藻等形成的蓝、绿藻水华, 初春低温季节则可能出现小环藻优势的硅藻水华。除对全流域水环境进行综合治理降低营养水平外, 适时开闸冲水, 增大库区流速以降低水华藻类的优势非常有必要。

参考文献:

[1]VER L M B, MACKENZIE F T, LERMAN A. Biogeochemical responses of the carbon cycle to natural and human perturbations: Past, present, and future[J]. *American Journal of Science*, 1999, 299(7-9): 762-801.

[2]杨敏, 张晟, 刘朔孺, 等. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2480-2486.

[3]CAPPELLEN P V, MAAVARA T. Rivers in the anthropocene: Global scale modifications of riverine nutrient fluxes by damming[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, 16(2): 106-111.

[4]李斯奇, 崔高仰, 李亲凯, 等. 嘉陵江梯级水库水化学特征及氮硅的时空分布研究[J]. *地球与环境*, 2018, 46(4): 321-330.

[5]REYNOLDS C S. *Vegetation processes in the Pelagic: A model for ecosystem theory*[M]. UK: Excellence in Ecology, 1997.

[6]PADISAK J, BORICS G, GRIGORSZKY I, et al. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: The assemblage index[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 553(1): 1-14.

[7]胡俊, 胡鑫, 米玮洁, 等. 多沙河流夏季浮游植物群落结构变化及水环境因子影响分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 1974-1982.

[8]邓乐, 戚菁, 宋勇军, 等. 程海湖夏季浮游植物功能群特征及其影响因子研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 8(11): 2281-2288.

[9]罗冬莲. 深沪湾溶解氧的分布及其与浮游植物悬浮物的相关性研究[J]. *海洋通报*, 2002, 21(1): 31-36.

[10]王文君, 方艳红, 胡晓东. 大渡河河口浮游植物群落时空分布及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(6): 16-23.

[11]况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(4): 353-358.

-
- [12] KIMOR B. Changes and stress signs in plankton communities as a result of man-induced perturbations in enclosed coastal seas (Mediterranean, Baltic) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1991, 23:171-174.
- [13] ASAEDA T, PHAM H S, PRIYANTHA D G N, et al. Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: A numerical analysis [J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(3):395-404.
- [14] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(3):337-341.
- [15] 吴乃成, 周淑婵, 傅小城, 等. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5):1091-1096.
- [16] 栾丽, 张陆良, 姜跃良, 等. 水库形成的湖库生态系统特征及其鱼类栖息地 [J]. *水力发电*, 2016, 42(1):10-13.
- [17] 黄勇. 西南山地河流梯级水电开发的生态影响研究 [D]. 东北林业大学, 2016:6-10.
- [18] 杨梦迪, 崔高仰, 李亲凯, 等. 梯级水库群水体碳, 硫元素循环及耦合效应——以嘉陵江为例 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(3):651-660.
- [19] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4):384-396.
- [20] 邓洪平, 陈锋, 王明书. 嘉陵江南充段硅藻群落结构及水环境分析 [J]. *水生生物学报*, 2008, 32(4):586-591.
- [21] 刘信安, 张密芳. 重庆主城区三峡水域优势藻类的演替及其增殖行为研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(7):1838-1843.
- [22] 曾婷. 重庆长江嘉陵江浮游藻类分布特征及水质状况研究 [D]. 重庆大学, 2008:1-58.
- [23] 邹小兵, 曾婷, TRINA MACKIE, 等. 嘉陵江下游江段春季浮游藻类特征及污染现状 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4):612-618.
- [24] 郭蔚华, 李楠, 张智, 等. 嘉陵江出口段三类水体蓝绿硅藻优势种变化机理 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1):51-56.
- [25] 邓洪平, 陈锋, 王明书, 等. 嘉陵江下游硅藻群落结构及物种多样性研究 [J]. *水生生物学报*, 2010, 34(2):330-335.
- [26] 郭蔚华, 王柱, 贺栋才, 等. 三峡 175 米蓄水期间春季嘉陵江出口段藻类变化 [J]. *中国环境监测*, 2011, 27(3):69-73.
- [27] 马永红, 曾燊, 任丽萍, 等. 嘉陵江四川段藻类植物群落结构及水质评价 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9):2573-2579.
- [28] 任丽平, 马永红. 嘉陵江浮游生物群落结构研究 [J]. *天然产物研究与开发*, 2012, 24(8):1129-1134, 1150.
- [29] 张秋劲, 何冬琼, 于飞, 等. 四川省重点流域浮游植物群落调查研究 [J]. *中国环境监测*, 2012, 28(5):53-56.
- [30] 薛秀园, 薛月圆. 嘉陵江合川段浮游藻类动态监测与水质评价 [J]. *唐山师范学院学报*, 2016, 38(5):52-54.

-
- [31]章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [32]胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006:23-915.
- [33]国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:88-284.
- [34]孙鑫, 李兴, 勾芒芒. 乌梁素海冻融前后浮游植物群落结构特征及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4):812-821.
- [35]罗君, 白永平. 嘉陵江流域经济空间分异研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4):364-369.
- [36]OUYANG W, SKIDMORE A K, TOXOPEUS A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3-4):373-380.
- [37]MAAVARA T, PARSONS C T, RIDENOUR C, et al. Global phosphorus retention by river damming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(51):15603-15608.
- [38]陶敏, 王永明, 谢碧文, 等. 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, 2016, 40(2):301-312.
- [39]魏志兵, 何勇凤, 龚进玲, 等. 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, 2020, 29(6):1356-1365.
- [40]金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:286-302.
- [41]段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):120-130.
- [42]REYNOLDS C S. The long, the short and the stalled: On the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers[J]. Hydrobiologia, 1994, (289):9-21.
- [43]杨敏, 毕永红, 艾鹰, 等. 人工控制条件下水流速对香溪河库湾浮游植物影响的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2):220-224.
- [44]卢大远, 刘培刚, 范天俞, 等. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2):28-31.
- [45]周静, 苟婷, 张洛红, 等. 流速对不同浮游藻类的生长影响研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6):75-82.
- [46]王敏, 张智, 郭蔚华, 等. 嘉陵江出口段硅藻水华发生规律[J]. 环境科学研究, 2001, 24(2):191-198.
- [47]王敏, 袁绍春, 徐炜, 等. 嘉陵江重庆出口段小环藻水华影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(6):86-90, 94.

-
- [48]宋晓兰, 吕伟民, 卞金良, 等. 江阴地区主要河道浮游藻类群落特征[J]. 环境监测管理与技术, 2013, 25(1):22-26.
- [49]罗荣祥. 长江嘉陵江交汇段营养限制因子生态幅研究[D]. 重庆大学, 2006:31-68.
- [50]李燕, 但言, 王恕桥, 等. 嘉陵江重庆段水体富营养化及底泥重金属污染评价[J]. 西南农业学报, 2020, 33(9):2069-2074.
- [51]唐佳. 典型藻种磷利用特性比较研究[D]. 重庆大学, 2016:10-41.