

doi: 10.7541/2021.2021.026

刘家峡水库浮游植物群落结构与环境因子的关系

杜岩岩¹ 廖传松² 杨濯羽¹ 娄忠玉¹ 张艳萍¹ 王宏³ 王太¹

(1. 甘肃省水产研究所, 兰州 730030; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 甘肃省玛曲青藏高原土著鱼类自然保护区管理局, 玛曲 747300)

摘要: 研究分析刘家峡水库浮游植物群落结构的变化, 探讨西北地区河道型水库环境因素对浮游植物群落结构的影响, 为刘家峡水库增殖渔业提供科学依据。2020年3—10月, 在刘家峡水库设置11个采样点, 每月对浮游植物进行定性和定量采集, 同时采集水样监测总氮、总磷和高锰酸盐指数等水环境指标, 分析水质变化规律, 及浮游植物的优势种、多样性和群落结构的季节变化特征。结果表明: 刘家峡水库共检测到浮游植物7门35属63种, 其中硅藻门种类最多, 共17属40种; 其次为绿藻门8属12种; 蓝藻门4属4种, 裸藻门1属2种, 黄藻门2属2种, 甲藻门2属2种, 金藻门1属1种。浮游植物密度在 $(3.17—59.09) \times 10^4$ 个/L, 平均密度为 13.54×10^4 个/L。浮游植物生物量在0.0370—0.5004 mg/L, 平均生物量为0.2137 mg/L。浮游植物密度和生物量均有在4、5月份上升和6月份骤然下降的趋势, 最高值均出现在5月份。多样性指数 H' 值在1.16—2.43, 平均值为1.84; 丰富度指数 D 值在1.22—1.57, 平均值为1.42; 均匀度指数 J 值在0.23—0.51, 平均值为0.38。丰富度指数 D 值变化趋势与均匀度指数 J 值刚好相反。RDA分析显示, 对浮游植物影响最强的环境因子是总氮和透明度, 其次为溶解氧和水温。综合浮游植物和水质指标评价刘家峡水库处于I或II类水, 是极贫营养至贫营养类型。研究可为刘家峡水库水生态保护和渔业资源的可持续利用提供科学依据。

关键词: 浮游植物; 密度; 生物量; 冗余分析; 刘家峡水库

中图分类号: S932.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)06-1299-09



浮游植物是水体中最主要的初级生产者, 也是水体中食物链的重要组成部分, 对水生态系统的物质循环、能量流动和维持水生态系统健康有重要作用^[1]。浮游植物群落结构组成变化规律受生物和非生物因子等环境的影响, 同时浮游植物的群落结构组成对环境变化也有指示作用^[2]。在不同的水体中, 影响浮游植物群落的环境因子各不相同^[3—9]。水库作为人工筑坝形成的特殊类型水体, 受外界环境因子影响更为明显, 浮游植物群落结构变化与自然水体有一定差异^[10—12]。

刘家峡水库地处青藏高原东北边缘向甘肃中部黄土高原过渡地带, 位于黄河干流, 主要来水包括黄河上游干流及其支流洮河和夏河, 总库容 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年交换量8次, 水域面积 130 km^2 , 是一座以发电为主, 兼有防洪、灌溉、防凌、养殖和饮用等功能于一体

的大型水利水电枢纽工程^[13]。2014年刘家峡水库被作为兰州市第二饮用水源地, 库区水生态环境问题备受关注^[14]。20世纪80年代, 刘阳光等^[13]对刘家峡水库浮游植物进行了调查, 后来也有少量的报道^[15, 16], 但关于浮游植物与环境因子的相关关系的研究还未见报道。本文通过对刘家峡水库浮游植物和水体主要理化因子的调查研究, 阐述了刘家峡水库浮游植物群落结构特征及其变化情况, 并通过冗余分析(RDA), 来揭示刘家峡水库浮游植物对环境变量的响应, 为刘家峡水库水环境保护、渔业资源合理利用和可持续发展提供背景数据。

1 材料与方法

1.1 采样点与采样方法

根据刘家峡水库形态、地理状况和水文特征,

收稿日期: 2021-03-01; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 甘肃省省级财政农业资源及生态保护补助资金项目(202001)资助 [Supported by the Gansu Provincial Financial Resources and Ecological Protection Subsidy Project]

作者简介: 杜岩岩(1983—), 女, 工程师; 研究方向为鱼类资源保护。E-mail: 273639273@qq.com

通信作者: 王太(1983—), 男, 高级工程师; 研究方向为鱼类资源保护。E-mail: 5279292@qq.com

共设置11个采样站点(图1), 其中S1为黄河入库口, S3为夏河入库口, S11为洮河入库口, S9为网箱养殖区。视水深情况设置采样水层, 水深大于10 m站点取0.5、5和10 m混合水样, 水深小于10 m站点取0.5和5 m混合水样。2020年3—10月份每月采样1次。

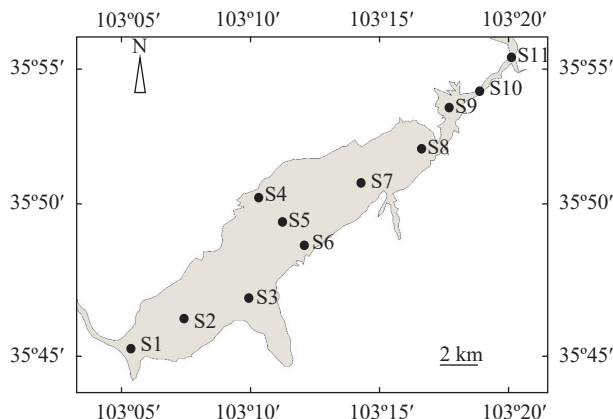


图1 刘家峡水库浮游植物采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of phytoplankton in Liujiaxia Reservoir

1.2 测定方法

溶解氧(DO)、水温(WT)和pH采用美国YSI Pro Plus手持式多参数水质分析仪现场测定, 透明度(SD)采用塞氏盘测定。总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})和五日生化需氧量(BOD_5)等指标按照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)在实验室内测定。

浮游植物采样方法参照《淡水浮游生物调查技术规范》(SC/T 9402-2010), 定性样品采用25号浮游生物网在表层(0.5 m)处作“∞”字形缓慢拖曳, 收集于采样瓶后加入鲁哥试液固定; 定量样品把不同水层水样混合后取1 L, 加10 mL鲁哥试液进行现场固定^[17]。样品带回实验室后倒入浮游生物沉降器, 静置48h后, 将沉淀物倒入定量瓶后定容至30 mL。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(20 mm×20 mm), 在光学显微镜(Olympus CX33)下进行观察鉴定和计数。由于刘家峡水库浮游植物密度较低, 为避免视野计数带来的误差, 采用全片计数办法。浮游植物种类鉴定参照文献[18, 19]。

1.3 数据分析

优势度(Y)用如下公式计算:

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

式中, Y 表示物种优势度, n_i 为第 i 种的个体数, f_i 为该

种出现的频度, N 为所有个体总数的和, $Y \geq 0.02$ 时, 此物种即可视为优势种类。

采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef指数(D)和Pielou's均匀度指数(J)来反映刘家峡水库浮游植物的生物多样性情况, 计算公式分别如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N$$

$$J = H' / \log_2 S$$

式中, S 为浮游植物总种数, P_i 为第 i 物种的个体数与样品总个体数的比值(n_i/N), n_i 为 i 物种的个体数, N 为浮游植物总个体数^[20]。

在Canoco for Windows 5.0 统计分析软件中进行浮游植物的优势物种的冗余分析(Redundancy analysis, RDA), 选取密度前10位的浮游植物分析前对数据进行 $\lg(x+1)$ 转换, 使数据符合正态分布, 经过蒙特卡洛检验(Monte Carlo Test), 剔除对浮游植物群落影响不显著的环境因子。

2 结果

2.1 理化因子及营养盐特征

刘家峡水库11个采样点的水体理化参数变化趋势见图2。库区水位(以海拔表示)呈先下降再升高的变化趋势, 由3月份采样时的1733.76 m下降至6月份的1722.96 m, 再升高至9月份的1729.83 m, 10月份又下降为1726.87 m(图2a); 水体透明度为1.8—4.3 m, 变化较大, 3—6月的水体透明度明显大于7—10月(图2b); 水温季节变化明显, 6—8月库区水温最高(图2c); 溶解氧为8.49—10.03 mg/L(图2d); pH的变化范围在8.21—8.69。

在研究期间, 总氮平均值为1.19 mg/L, 总磷平均值为0.01 mg/L, 氨氮平均值为0.072 mg/L, 硝态氮平均值为0.88 mg/L, 亚硝态氮平均值为0.01 mg/L, 高锰酸盐指数平均值为1.98 mg/L, 化学需氧量平均值为8.3 mg/L, 五日生化需氧量平均值为1.1 mg/L, 以上指标浓度均没有明显的变化规律(图2e—i)。

2.2 浮游植物种类组成及优势种

共鉴定浮游植物63种, 隶属于7门35属。其中硅藻门最多40种, 占总种数的40.6%, 其次为绿藻门12种, 占总种数的12.2%。其余依次为蓝藻门4种, 裸藻门2种, 黄藻门2种, 甲藻门2种, 金藻门1种。在研究期间形成优势种群($Y \geq 0.02$)的种类有7种(表1), 分别为尖针杆藻(*Synedra acus*)、巴豆叶脆杆藻(*Fragilaria crotonensis*)、美丽星杆藻(*Asterionella*

formosa)、密集锥囊藻(*Dinobryon sertularia*)、飞燕角藻(*Ceratium hirundinella*)、尖尾裸藻(*Euglena oxyuris*)和放射舟形藻(*Navicula radiosa*)。其中, 在

3—10月份的优势种有尖针杆藻、巴豆叶脆杆藻和美丽星杆藻, 在浮游植物群落中优势明显。在4—8月份密集锥囊藻为优势种, 尤其在4月和5月份

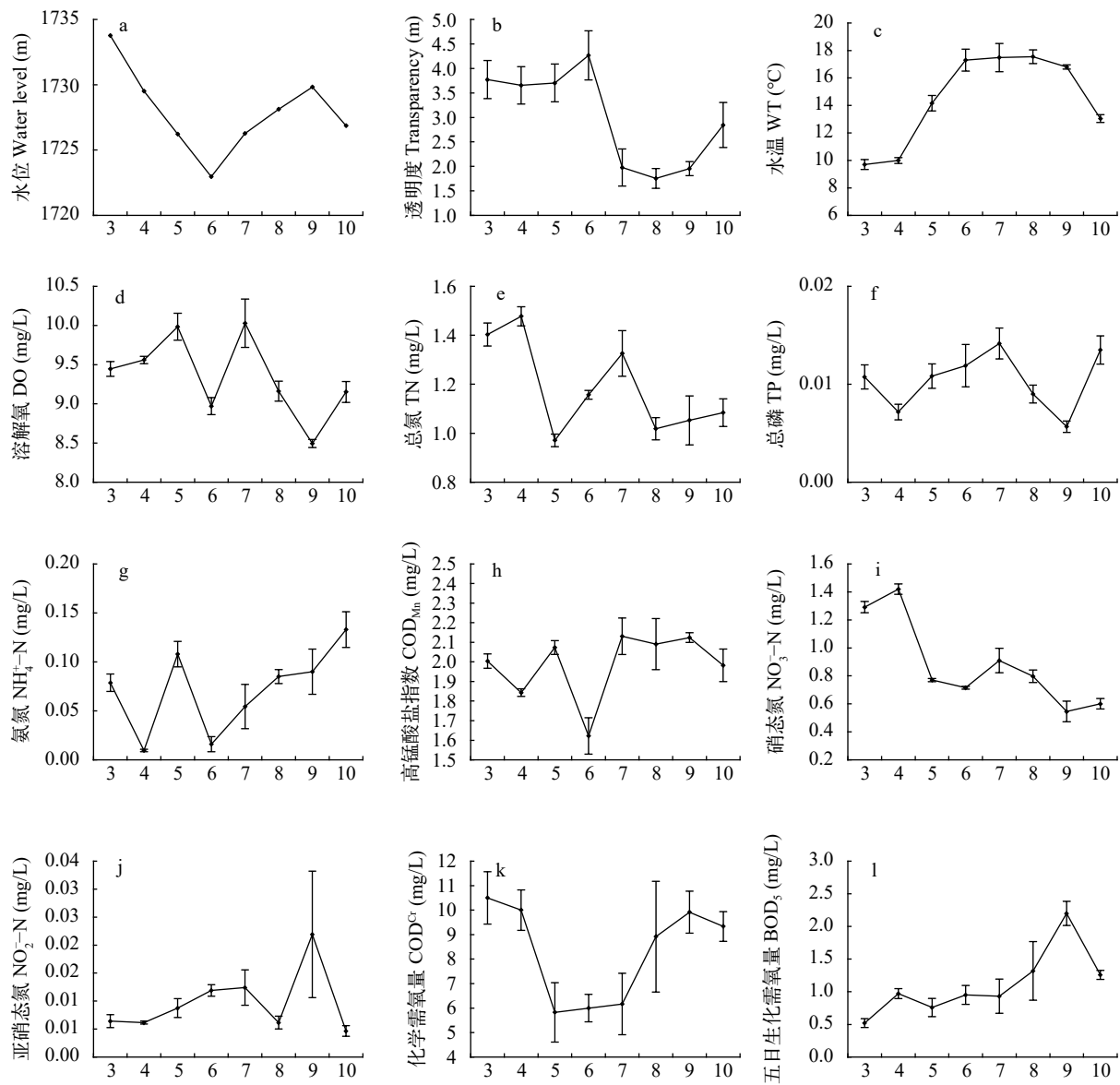


图2 2020年3—10月份刘家峡水库水体理化参数变化
Fig. 2 The physicochemical parameters in Liujiaxia Reservoir from March to October 2020

表1 刘家峡水库浮游植物优势种及优势度

Tab. 1 The dominant phytoplankton species and their dominance in Liujiaxia Reservoir

优势种Dominant species	优势度Dominance							
	3月March	4月April	5月May	6月June	7月July	8月August	9月September	10月October
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.168	0.048	0.041	0.133	0.149	0.218	0.311	0.204
巴豆叶脆杆藻 <i>Fragilaria crotonensis</i>	0.494	0.026	0.023	0.025	0.157	0.077	0.465	0.349
美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	0.229	0.071	0.334	0.437	0.416	0.350	0.085	0.031
密集锥囊藻 <i>Dinobryon sertularia</i>		0.847	0.559	0.221	0.189	0.097		
飞燕角藻 <i>Ceratium hirundinella</i>				0.031	0.020	0.045	0.078	0.034
尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuris</i>					0.028			
放射舟形藻 <i>Navicula radiosa</i>								0.02

时优势度分别为0.847和0.559。飞燕角藻在6—10月为优势种。

2.3 浮游植物密度及生物量

研究发现,从时间变化来看,刘家峡水库浮游植物的密度先呈现急剧上升再骤然下降,然后缓慢上升后缓慢下降的趋势(图 3a)。第一次密度高峰出现在5月份采样时,为 59.09×10^4 个/L,第二次高峰出现在8月份采样,为 8.29×10^4 个/L,最小密度出现在6月份采样,为 3.17×10^4 个/L。浮游植物生物量变化趋势与密度基本一致(图 3b),最大值为5月份,为0.5004 mg/L,第二次高峰在8月份,为0.2897 mg/L,但最小值与密度不同,不是出现在6月份而是出现在3月份,为0.0317 mg/L。生物量与密度趋势不同的是6月份后上升和下降的幅度相对较大一些。从空间来看,库区下游的5个采样点浮游植物的密度和生物量都高于库区上游的6个采样点,最大密度和生物量均出现在9号采样点(图 4)。

2.4 浮游植物多样性指数

浮游植物Shannon-Weiner多样性指数(H')呈升高趋势,最高值出现在10月份采样,为2.43;最低值出现在4月份采样,为1.16。Margalef丰富度指数(D)平均值为1.42,变化范围为1.22—1.57。前3个月采样期间丰富度升高,在6月份和7月份开始降低,然后升高。Pielou's均匀度指数(J)变化范围为0.23—0.51,4、5月份样品均匀度较低外,其他6个月样品均匀度变化较小(图 5)。

2.5 浮游植物与环境因子的关系

冗余分析(RDA)的第一轴特征值为0.6703,第二轴特征值为0.3001,环境变量对响应变量总解释率为97.2%,调整后的方差解释度是80.6%。经前向选择和蒙特卡罗检验,显示7个环境因子(水位、水温、溶解氧、透明度、总磷、总氮和5日生化需氧量)与浮游植物群落结构相关性较强($P < 0.05$)。其中对浮游植物影响最强的环境因子是总氮和透明度,其次为溶解氧和水温(图 6)。不同的物种受环境因子影响差异较大,密集锥囊藻主要受溶解氧的影响,飞燕角藻和尖尾裸藻的主要影响因子是水温。大部分种类与总氮、透明度呈负相关。

3 讨论

3.1 刘家峡水库浮游植物群落结构特征

刘家峡水库为典型的河道型高原水库,与其他河道、高寒地区水库类似,浮游植物已形成硅藻为优势类群的群落特征^[21, 22]。刘家峡水库浮游植物物种组成简单,丰富度较低,共采集到物种数量为63种,显著低于低海拔、高水温的水库^[4, 11]。春末夏初浮游植物组成为硅藻-金藻型,这与硅藻和金藻适应的温度较低一致^[2],优势种类为硅藻门的尖针杆藻、巴豆叶脆杆藻、美丽星杆藻和金藻门的密集锥囊藻等;夏秋季逐渐形成硅藻-甲藻型,浮游植物以硅藻门的尖针杆藻、美丽星杆藻和甲藻门的飞燕角藻等为优势类群,另外裸藻门的尖尾裸藻

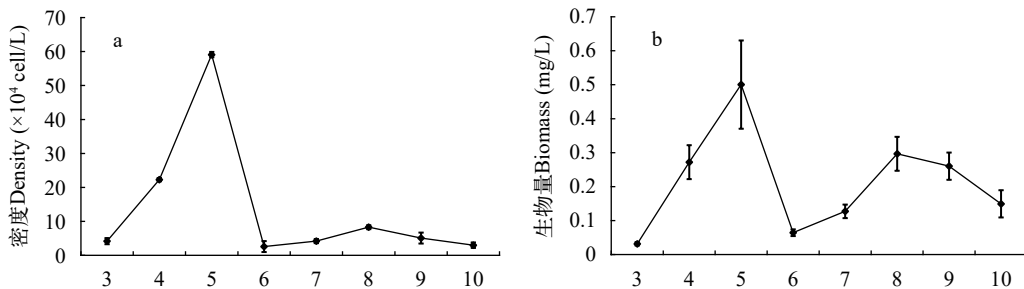


图3 刘家峡水库浮游植物密度和生物量月度变化

Fig. 3 Monthly changes in phytoplankton density and biomass in Liujiaxia Reservoir

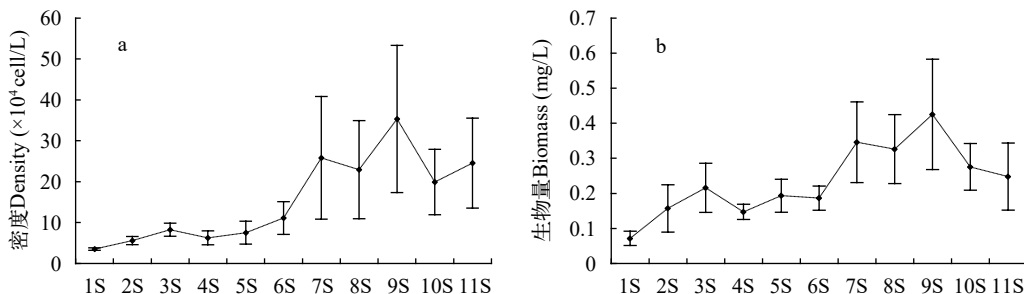


图4 刘家峡水库不同采样点浮游植物密度和生物量

Fig. 4 Phytoplankton density and biomass at different sampling points in Liujiaxia Reservoir

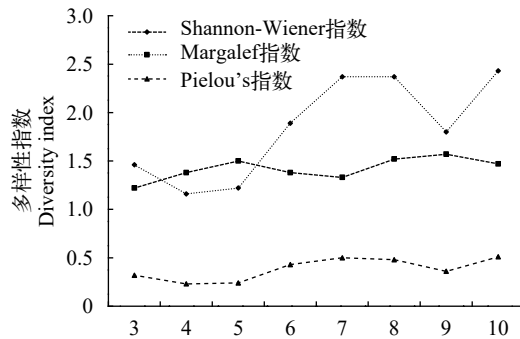


图5 刘家峡水库浮游植物多样性指数月度变化

Fig. 5 Monthly change of phytoplankton diversity index in Liujiaxia Reservoir

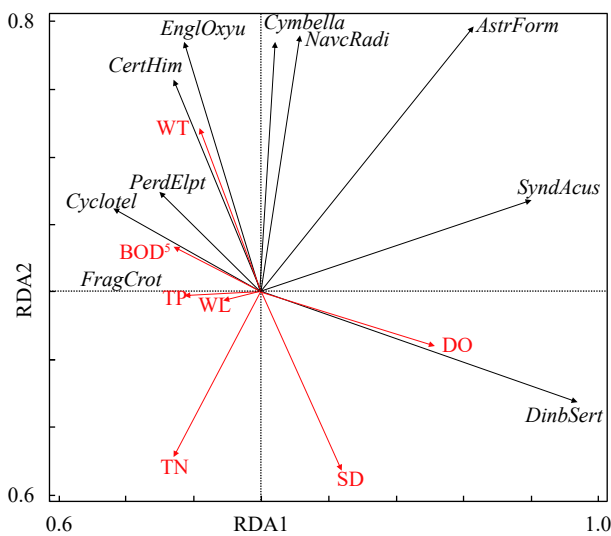


图6 浮游植物与环境因子间的RDA排序图

Fig. 6 RDA biplot of species and environment factors of phytoplankton

WL. 水位; DO. 溶解氧; SD. 透明度; WT. 水温; TN. 总氮; TP. 总磷; BOD₅. 五日生化需氧量; *DinbSert*. 密集锥囊藻; *SyndAcus*. 尖针杆藻; *AstrForm*. 美丽星杆藻; *NavcRadi*. 放射舟形藻; *Cymbella*. 胀大桥弯藻; *EuglOxyu*. 尖尾裸藻; *CertHirm*. 飞燕角藻; *PerdElpt*. 埃尔多甲藻; *Cyclotel*. 小环藻; *FragCrot*. 巴豆叶脆杆藻也在各个采样点检测到。

20世纪80年代调查的刘家峡水库浮游植物组成呈硅藻-绿藻型^[13]。本次调查与历史数据相比, 刘家峡水库浮游植物组成均以硅藻占优势, 优势种也基本没变, 有些优势种类的主导地位更加明显, 针杆藻、脆杆藻和星杆藻优势度个别月份接近0.5。绿藻门的主要种类盘星藻、栅列藻依然存在, 但本次调查空球藻已超过以上两种成为绿藻门新的主要种类, 但没形成优势种群。大型浮游藻类增加。20世纪80年代调查没有飞燕角藻, 而本次调查每个采样点基本都有其分布, 并且在6—10月份各个位点都形成优势种群。变化比较大的是金藻门

种类密集锥囊藻的大量出现。历史资料显示金藻在个别月份会出现, 但是数量较少^[13]。但是本次调查每次采样均可见到, 尤其在4、5月份繁殖迅速形成优势种群, 优势度高达0.8, 说明刘家峡水库还是贫营养型水体^[23]。与20世纪80年代相比, 刘家峡水库总磷降低, 总氮略有升高, 营养盐的变化导致浮游植物群落结构从20世纪80年代到现在有着很大的变化^[13], 这与密云水库相似, 浮游植物受环境影响显著, 随时间推移变化较大^[24, 25]。

本次调查浮游植物的生物量各月变动较大(图3b), 月变化趋势呈现4、5月份上升, 6月份急剧下降的趋势, 5月份最高值约是3月份最低值的16倍。各门藻类对生物量的贡献在不同月份变化也比较明显。3月份硅藻在数量和生物量上均占优势; 4、5月份金藻门的密集锥囊藻出现, 并快速繁殖, 成为这2个月的主要优势种, 且个体较大, 生物量占比较高; 6月份样品, 各优势种均减少, 尤其是锥囊藻尤为明显, 但甲藻门的飞燕角藻开始增多, 在后几个月中成为优势种, 且体积较大, 生物量比重较大。裸藻通常出现在有机质丰富的水体, 刘家峡水库7月份尖尾裸藻形成了优势种群, 分析与刘家峡水库的总氮丰富有关, 且7月份的总氮与总磷相对于全年较高。裸藻总生物量占比与20世纪80年代相比, 基本一致^[13]。自然淡水水体浮游植物季节变化一般规律是春季以适宜低温的硅藻和金藻为主, 夏季以适宜高温的蓝藻和绿藻为主, 秋季类似于春季, 冬季则很少^[25]。刘家峡水库春季以硅藻和金藻为主, 而夏季和秋季还是硅藻为主, 金藻减少, 甲藻增多, 绿藻和蓝藻则很少, 说明刘家峡水库受水库调蓄及流域内人类生活和生产活动的影响较明显。

与历史数据^[13]相比, 浮游植物平均生物量减小, 季节分布规律也略有不同, 应该是水库调蓄作用对刘家峡水库的藻类生长有明显影响所致。7月汛期来临之前, 水库泄洪, 从3月份采样水位1733.6 m, 6月份水位降到1722.96 m, 导致本该在6月份持续迅速繁殖的藻类密度和生物量迅速下降。从7月份开始, 水库水位持续缓慢上涨, 比较稳定。随着温度的升高, 浮游植物的密度和生物量也缓慢上升, 8月达到第二个高峰, 随着温度下降, 浮游植物繁殖速度逐渐下降, 这与其他一些水库浮游植物变动情况类似^[6]。

本次调查与20世纪80年代相比, 密度和生物量均有所降低, 除了与人为调蓄和自然环境有关之外, 分析原因可能与投放鲢也有一定关系。鉴于刘家峡水库供水和渔业的重要性, 政府部门通过放养滤食性鲢和鳙来达到水环境保护和净水渔业效益双

丰收, 2020年向刘家峡水库累计投放鲢1463万尾, 平均92尾/亩, 远远高于推荐的放养量24尾/亩^[13], 故水库浮游植物被摄食压力较大, 造成现存量较低的局面。刘家峡水库作为高原河道型水库, 年水交换量较大, 不适宜浮游植物生长繁殖, 其密度和生物量均较小, 所以人工放养滤食性鱼类量需通过合理的评估来确定, 本研究的结果可为评估放养量提供数据依据。刘家峡水库环境因素、滤食性浮游动物和鱼类摄食等对浮游植物种类组成和丰度都会产生较大影响, 所以研究浮游植物长期变化特征需要长期跟踪调查数据的积累^[26-29]。

3.2 刘家峡水库浮游植物优势种与环境因子的关系

RDA排序可以分析不同物种与环境因子的关系, 反映环境对物种的影响程度^[30]。水温是影响浮游植物生长的重要环境因素^[10], RDA分析显示, 大部分物种与水温呈正相关, 但是相关性并不是特别显著($P=0.5$)。因此, 在水温达到最高时浮游植物丰度仅仅是有较小幅度的增加, 而后随着温度降低, 浮游植物丰度又开始缓慢降低。采样期间刘家峡水库水温变幅相差近13℃, 但硅藻在全年均为优势种, 这与云贵高原鱼洞水库^[12]、三峡水库^[31]和广东流溪河水库^[32]情况类似, 说明水库受人为调蓄作用明显, 水体年交换量大, 水流速波动较大, 比较适合具有硅质壁耐磨损和抗机械损伤的硅藻类生存^[33], 所以硅藻在刘家峡水库全年均占优势。大部分物种与透明度呈负相关, 由于汛期来水带来大量泥沙, 使得库尾水域透明度降低, 浮游植物光合作用减弱, 是影响这些物种生长繁殖的限制条件^[34]。密集锥囊藻与水温呈负相关, 与溶解氧呈正相关, 且在春季温度较低时优势明显, 这与其耐低温的特性有关, 也反映出刘家峡水库春季的水质状况较好^[35]。溶解氧来源于植物的光合作用和溶解空气中的氧, 刘家峡水库水体交换量大, 水流快, 可增加空气中氧的溶解率, 同时水温低也会增加水体溶解氧^[11], 所以刘家峡水库溶解氧较高, 8.49—10.03 mg/L, 平均为9.35 mg/L。

水体中营养盐特别是N、P是浮游植物生长最主要的元素, Redfield定律认为, 浮游植物组成N:P=16:1, 如果氮磷比超过16:1, 磷被认为是限制性因素^[36], 当水库总氮和总磷浓度的比值在10—15时, 最适宜于浮游植物生长繁殖^[37]。刘家峡水库平均N/P值约为119, 远远超过这一比值, 说明总磷已成为刘家峡水库浮游植物生长的限制因子。同时RDA分析显示, 大部分物种与总氮呈负相关, 与总磷呈现正相关, 也说明刘家峡水库浮游植物生长繁殖限制因子是总磷。

3.3 刘家峡水库水质总体评价

刘家峡水库是黄河上游重要的水库之一, 也是甘肃省最大的水体资源, 在发电、防洪、灌溉和饮用等各方面发挥着重要作用, 尤其是被选为兰州市第二饮用水源地以后, 水库水质更是备受关注。本研究测定的刘家峡水库理化指标除总氮处于IV类以外, 其余水质指标均符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) I 或 II 类。彭近新等^[38]和张远等^[39]认为我国大部分河道型水库的限制性因素是总磷, 是水库富营养化控制的关键因子。根据水体营养化评价标准^[21,40], 刘家峡水库总磷浓度0.01 mg/L, 为贫营养型水体。研究发现, 刘家峡水库不同月份浮游植物密度和生物量变化较大, 范围分别为3.17—59.09×10⁴个/L和0.0317—0.5004 mg/L, 与龙羊峡浮游植物密度和生物量相似^[21], 浮游植物种群结构以硅藻、金藻和甲藻为主, 按况琪军等^[41]评价标准, 刘家峡水库水质可定为极贫营养至贫营养类型。

4 总结

(1)刘家峡水库水质较好, 除了总氮较高之外, 其余指标均符合《地表水环境质量标准》II类标准, 溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数、总磷等几个指标达到I类标准。(2)调查期间, 刘家峡水库共鉴定浮游植物7门63种, 硅藻门种类最多, 为40种。优势种有7种($Y \geq 0.02$)。刘家峡水库浮游植物全年优势种为硅藻门的尖针杆藻、巴豆叶脆杆藻和美丽星杆藻。(3)浮游植物密度和生物量的月度变化趋势受人为调蓄作用明显, 最高值不是在水温最高的8月份。空间分布在网箱养殖区相对较高。(4)RDA分析表明, 水环境因子总氮、透明度、溶解氧和水温是影响刘家峡水库浮游植物群落结构特征的主要因素。

参考文献:

- [1] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes [J]. *Limnology and Management of Inland Waters*, 2004, 34(3): 236-248.
- [2] Zhang Y, Ma X F, Guo F F, et al. Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 902-910. [张云, 马徐发, 郭飞飞, 等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 902-910.]
- [3] Wang C M, Wu K F, Zhang Y, et al. The analysis of spa-

- tial and temporal variations characteristics and driving factors of phytoplankton in Dongting Lake [J]. *Freshwater Fisheries*, 2018, **48**(4): 52-57. [王丑明, 吴可方, 张屹, 等. 洞庭湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析 [J]. *淡水渔业*, 2018, **48**(4): 52-57.]
- [4] Zhang H, Hu H J, Chao A M, *et al.* Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinshuitan Reservoir, Zhejiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 944-956. [张华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等. 浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 944-956.]
- [5] Xu J, Gu J G, Yang Y, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton morphological characters and driving factors in tropical reservoirs: A case study from Gaozhou Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 825-836. [徐珏, 顾继光, 杨阳, 等. 热带水库浮游植物形态性状的季节变化及影响因子分析-以高州水库为例 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 825-836.]
- [6] Li H, Ma Y W, Qi F, *et al.* Phytoplankton in Bosten Lake: community characteristics and driving factors [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(5): 921-928. [李红, 马燕武, 祁峰, 等. 博斯腾湖浮游植物群落结构特征及其影响因子分析 [J]. *水生生物学报*, 2014, **38**(5): 921-928.]
- [7] Feng Q Y, Wang S R, Liu X Q, *et al.* Seasonal and spatial variations of phytoplankton communities and correlations with environmental factors in Lake Dianchi [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, **56**(1): 184-192. [冯秋园, 王姝然, 刘学勤, 等. 滇池浮游植物群落结构的时空变化及与环境因子的关系 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, **56**(1): 184-192.]
- [8] Hao Y B, Liu J D, Zhang A J, *et al.* Phytoplankton community structure in the downstream section of Fuchun River in summer and its relationship with environmental factors [J]. *Freshwater Fisheries*, 2020, **50**(4): 52-59. [郝雅宾, 刘金殿, 张爱菊, 等. 富春江下游段夏季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *淡水渔业*, 2020, **50**(4): 52-59.]
- [9] Hao Y Y. Studies on the community characteristics of the phytoplankton and the relationship with environment factors in Heihe River basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013: 23-30. [郝媛媛. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 23-30.]
- [10] Sun Y B, Luo L C, Wei G F, *et al.* Species composition and seasonal variation in phytoplankton at Dashahe Reservoir [J]. *Resources Science*, 2014, **36**(8): 1732-1738. [孙莹蓓, 罗潋葱, 韦桂峰, 等. 大沙河水库浮游植物种类组成及季节性变化 [J]. *资源科学*, 2014, **36**(8): 1732-1738.]
- [11] Ma D C, Hu W G, Zhang Y D, *et al.* Community structure of phytoplankton and relationship to environmental factor in Daquangou Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(5): 47-54. [马得草, 胡文革, 张映东, 等. 大泉沟水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *水生态学杂志*, 2018, **39**(5): 47-54.]
- [12] Wu W J, Yang K, Wang Z C, *et al.* Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yudong Reservoir of Yungui-plateau [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(2): 69-75. [吴卫菊, 杨凯, 汪志聪, 等. 云贵高原鱼洞水库浮游植物群落结构及季节演替 [J]. *水生态学杂志*, 2012, **33**(2): 69-75.]
- [13] Liu Y G. Fishery Resources and Division in Gansu [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2000: 117-130. [刘阳光. 甘肃渔业资源与区划 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2000: 117-130.]
- [14] Qiu L P, Liu Q Y, Wang P. Analysis of countermeasures for protecting water quality in Liujiaxia drinking water source area [J]. *Gansu Science and Technology*, 2018, **34**(7): 16-18. [邱莉萍, 刘全咏, 王鹏. 浅谈刘家峡饮用水源地水质保护对策分析 [J]. *甘肃科技*, 2018, **34**(7): 16-18.]
- [15] Gao Y. Characteristics of algae community in the Liujiaxia Reservoir and water quality assessment [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2010: 37-38. [高洋. 刘家峡水库水体浮游藻类群落特征及水质生态评价 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2010: 37-38.]
- [16] Li Q S, Kang P T, Qin Y, *et al.* Investigation report on fishery resources and utilization in Liujiaxia Reservoir [J]. *Gansu Agricultural*, 2012(1): 23-28. [李勤慎, 康鹏天, 秦勇, 等. 刘家峡水库渔业资源及利用调查报告 [J]. *甘肃农业*, 2012(1): 23-28.]
- [17] Parsons R T, Maita Y, Lalli C M. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis [M]. Oxford: Pergamon Press, 1984: 94-97.
- [18] Hu H J, Wei Y X. The Freshwater Algae of China-Systematic, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 79-285. [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: 79-285.]
- [19] Zhou F X, Chen J H. Atlas of Microbiology in Freshwater [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35-191. [周凤霞, 陈剑虹. 淡水微生物图谱 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 35-191.]
- [20] Nie X, Hu X R, Liu G H, *et al.* Effects of water level on zooplankton community during "Plate-shaped lake enclosed in autumn" in a sub-lake of the Poyang Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 402-414. [聂雪, 胡旭仁, 刘观华, 等. 鄱阳湖子湖“蜆秋湖”过程中水位变化对浮游动物群落结构的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(2): 402-414.]
- [21] Chen Y Q. Investigation of net cage aquaculture area on phytoplankton in Longyangxia Reservoir [J]. *Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2015(2): 24-28. [陈燕琴. 龙羊峡水库网箱养殖区浮游植物调查 [J]. *青海农林科技*, 2015(2): 24-28.]
- [22] Zhang J L, Gou N N, Bian K, *et al.* Structure characteris-

- tic of plankton community in spring in the Qinlinghehe-River basin [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2016, **35**(5): 1168-1176. [张建禄, 苟妮娜, 边坤, 等. 秦岭黑河流域春季浮游生物群落结构特征 [J]. 基因组学与应用生物学, 2016, **35**(5): 1168-1176.]
- [23] Jiang X D. Phylogenetic analysis of the *Dinobryon* [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019: 1-3. [姜小蝶. 锥囊藻属植物的系统发育研究 [D]. 太原: 山西大学, 2019: 1-3.]
- [24] Zhang Y. Study of phytoplankton specific composition and biomass in Miyun Reservoir [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017: 15-17. [张颖. 密云水库浮游植物种类组成及生物量的研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2017: 15-17.]
- [25] Du G S, Wang J T, Wu D W, *et al.* Structure and density of the phytoplankton community of Miyun Reservoir [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, **25**(4): 501-504. [杜桂森, 王建厅, 武殿伟, 等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度 [J]. 植物生态学报, 2001, **25**(4): 501-504.]
- [26] Sakshaug E. Problems in the Methodology of Studying Phytoplankton [M]//Mormis L(Eds.), The Physiological Ecology of Phytoplankton. Oxford: Blackwell, 1980: 57-91.
- [27] Chisholm S W. Phytoplankton Size [M]//Falkowski P G, Woodhead A D (Eds.), Primary Productivity and Biogeochemical cycles in the Sea. New York: Plenum Press, 1992: 213-273.
- [28] Wang X D, Sun J, Liu D Y, *et al.* Control of phytoplankton community by marine Mesozooplankton selective grazing [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, **23**(4): 524-535. [王小冬, 孙军, 刘东艳, 等. 海洋中型浮游动物的选择性摄食对浮游植物群落控制 [J]. 海洋科学进展, 2005, **23**(4): 524-535.]
- [29] Zeng X B, Huang B Q. Grazing pressure and production of microzooplankton in Southern Taiwan Strait in summer [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2006, **25**(1): 1-9. [曾祥波, 黄邦钦. 台湾海峡南部夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力及其生产力 [J]. 台湾海峡, 2006, **25**(1): 1-9.]
- [30] Zhang J T. Quantitative Ecology (3rd edition) [M]. Beijing: Science Press. 2018: 78-94. [张金屯. 数量生态学(第三版) [M]. 北京: 科学出版社. 2018: 78-94.]
- [31] Zhang Y, Zheng B H, Liu H L. Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, **15**(2): 254-258. [张远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 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, 2006, **15**(2): 254-258.]
- [32] Lin Q Q, Hu R, Han B P. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2278-2284 [林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响 [J]. 生态学报, **23**(11): 2278-2284.]
- [33] Reynolds C S, Descy J P, Padisak J. Are phytoplankton dynamics in rivers so different from those in shallow lakes [J]? *Hydrobiologia*, 1994(289): 1-7.
- [34] Parkhill J, Cembella A. Effects of salinity, light and inorganic nitrogen on growth and toxigenicity of the marine dinoflagellate *Alexandrium tamarense* from northeastern Canada [J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, **21**(5): 939-955.
- [35] Ma J M, Chu Y F, Zhao S S, *et al.* Relationship between phytoplankton community structure and environmental factors in Chenqiao East Lake [J]. *Journal of Henan Normal University* (Natural Science Edition), 2019, **47**(2): 83-91. [马剑敏, 褚一凡, 赵闪闪, 等. 陈桥东湖浮游植物群落结构与环境因子的关系 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, **47**(2): 83-91.]
- [36] Redfield A C. The biological control of Chemical factors in the environment [J]. *Science Progress*, 1960(46): 561-600.
- [37] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, *et al.* Preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in sea water [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(3): 445-448. [曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 445-448.]
- [38] Peng J X, Chen H J. Water Eutrophication and Its Control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 64-69. [彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 64-69.]
- [39] Zhang Y, Zheng B H, Fu G, *et al.* On the assessment methodology and standards for nutrition status in channel type reservoirs based on zoning of eutrophication sensitivity [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 1016-1021. [张远, 郑丙辉, 富国, 等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1016-1021.]
- [40] SL 218-98. Institute of Reservoir Fisheries. Ministry of water Resources and C. A. S. Standard for the Fishery Trophic Classification of Reservoirs [S]. Beijing: China Water Power Press, 1998: 2-3. [水利部、中国科学院水库渔业研究所. 水库渔业营养类型划分标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 2-3.]
- [41] Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(2): 87-91. [况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.]

COMMUNITY STRUCTURES OF PHYTOPLANKTON AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE LIUJIAxia RESERVOIR

DU Yan-Yan¹, LIAO Chuan-Song², YANG Zhuo-Yu¹, LOU Zhong-Yu¹,
ZHANG Yan-Ping¹, WANG Hong³ and WANG Tai¹

(1. Gansu Fisheries Research Institute, Lanzhou 730030, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Maqu Tibetan Plateau Native Fish Nature Reserve Administration of Gansu Province, Maqu 747300, China)

Abstract: Liujiaxia Reservoir is an important conservancy and hydroelectric project in the Yellow River which is the second largest river in China. With Liujiaxia Reservoir as the second water source of Lanzhou, water quality have drawn more and more attention from the government and researchers. Phytoplankton as the main primary producer, plays an important role in aquatic food, web ecosystem, and is a sensitive environmental indicator of water quality in lakes and reservoir. In this study, to understand the phytoplankton status and the nutritional conditions of Liujiaxia Reservoir, eleven sampling sites were established across the reservoir. We conducted 8 times qualitative and quantitative phytoplankton acquisitions from 11 sampling sites in Liujiaxia Reservoir. To analyze the phytoplankton community structure during March to October in 2020 and discussed the impact of water level and other possible influencing factors on the phytoplankton community structure, a total of 63 species of phytoplankton were identified, which belonged to 35 genera and 7 phyla. Among which, the most abundant group was Bacillariophyta, with 40 species in 17 genera, followed by Chlorophyta (12 species in 8 genera), Cyanophyta (4 species in 4 genera), Pyrrophyta (2 species in 2 genera), Xanthophyta (2 species in 2 genera), Euglenophyta (2 species in 1 genera), Chrysophyta (1 species in 1 genera). The dominant species were *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis* and *Synedra acus*, they all belong to Bacillariophyta. The density of phytoplankton varied from 3.17×10^4 ind./L to 59.09×10^4 ind./L, with an average density of 13.54×10^4 ind./L. The biomass of phytoplankton varied from 0.0370 mg/L to 0.5004 mg/L, and the average biomass was 0.2137 mg/L. The indices of Shannon-Wiener H' , Margalef richness index D and Pielou uniformity index J were 1.16—2.43 (averaging 1.84), 1.22—1.57 (averaging 1.42), and 0.23—0.51 (averaging 0.38), respectively. Due to release flood waters during flood season, phytoplankton community structure of Liujiaxia Reservoir did not change regularly, the results indicated that artificial regulation and storage had obvious effects on phytoplankton community structure. The phytoplankton in Liujiaxia Reservoir are mainly diatoms and Chrysophyta, indicating that it is a poor nutritive water body. RDA indicated that the most influential environmental factors on phytoplankton were total nitrogen and transparency, followed by dissolved oxygen and water temperature. Water quality results show except for the total nitrogen, the other water quality indexes of Liujiaxia Reservoir meet the water quality standards of class I or class II of the National Surface Water Quality Standards (GB3838-2002). This study provides background data for water environment protection, rational utilization of fishery resources and sustainable development of Liujiaxia Reservoir.

Key words: Phytoplankton; Density; Biomass; RDA; Liujiaxia Reservoir