

大渡河乐山段 2013—2016 年浮游动物群落特征变化

方艳红¹, 王文君¹, 王 崇¹, 陈 锋¹, 杨 钟¹, 汪应文²

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 长阳土家族自治县水产技术推广站, 湖北 长阳 443500)

摘要: 为了解大渡河沙湾至乐山段安谷水电站建设过程中浮游动物群落变化, 于施工期 2013—2014 年和运行期 2015—2016 年的每年春、秋两季对主河道、左侧河网及支流浮游动物群落进行监测。结果显示, 2013—2016 年调查共鉴定出浮游动物 263 种, 优势种为 12 种属, 旋轮虫属(*Philodina*) 为施工期、运行期共有优势种属。浮游动物平均密度为 658.55 个/L, 平均生物量为 0.1102 mg/L; 施工期和运行期浮游动物密度和生物量差异不显著, 春季平均密度最高值出现在 2014 年(621.15 个/L), 秋季平均密度最高值出现在 2015 年(674.19 个/L), 2013 年春、秋季的生物量均为最高(0.1324 mg/L、0.1070 mg/L), 浮游动物密度和生物量在季节分布上差异不大。在空间分布上, 支流高于主河道、左侧河网、岷江。施工期、运行期浮游动物密度、生物量与环境因子溶解氧(DO)、流速(V)呈负相关, 与水温(WT)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)、磷酸盐(H₃PO₄)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})呈正相关。RDA 显示, NO₃⁻-N 在 2014 年、2015 年对浮游动物影响占主导作用, 2016 年透明度(SD)是影响浮游动物群落的主要因子。不同时期浮游动物现存量对比, 蓄水期因水温偏低导致密度和生物量最低; 在空间分布上坝前受安谷水电站建设影响较大。研究表明, 安谷水电站在建设过程中浮游动物群落特征差异不大。

关键词: 大渡河乐山段; 浮游动物; 群落特征; 环境因子

中图分类号: Q145 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)03-0094-08

浮游动物是水域生态系统的重要组成部分, 在淡水生态系统结构、功能和生物生产力的相关研究中, 原生动物、轮虫、枝角类和桡足类四大类占有重要地位(章宗涉和黄祥飞, 1991)。浮游动物对环境变化极其敏感, 在不同的生境下, 其种类、密度会产生不同的响应。

随着水电工程开发和工农业的高速发展, 在产生巨大经济效益和社会效应的同时, 人类活动干扰也考验着水生态健康。如河道趋向单一化、工农业废水和城镇生活污水排放使水质发生改变, 采砂使生境不断丧失和遭到破坏(陈宇顺, 2019)。大渡河沙湾至乐山段长约 35 km, 伴随青衣江、峨眉河等支流的汇入, 形成了典型的发辫状河网结构, 生境复杂, 物种多样性丰富; 该水域已建成绿色水电站——安谷水电站, 采取混合式开发, 水库正常蓄水位 398 m, 总利

用落差 36 m, 正常蓄水位时库容 $6.33 \times 10^7 \text{ m}^3$, 回水总长度约 11.4 km, 与上游水库联合运行时具有日调节性能, 电站总装机容量 772 MW(曹小红和步青云, 2011)。2012 年 3 月 29 日, 四川大渡河安谷水电站正式开工, 2014 年 12 月 4 日环保部发布《关于四川省大渡河水电站蓄水阶段环境保护验收意见的函》, 2015 年 8 月 31 日安谷水电站正式投产营运。作者在安谷水电站建设前后做了大量工作, 2007 年对安谷水电站进行环评阶段的调查, 2010 年对沙湾至乐山段进行了全面调查(方艳红等, 2012)。本次调查是在 2013—2016 年安谷水电站的施工期和运行期进行的, 其中 2014 年 11—12 月开展了蓄水期间浮游动物监测(方艳红等, 2014)。2013—2016 年安谷水电站完成了从河流到水库的水动力学转变, 浮游动物栖息地生境由急流转变为静缓流。浮游动物对环境变化较为敏感, 其群落结构也随环境变化而改变(Guevara et al, 2009)。

目前, 有关大型水库浮游动物群落结构的报道较多, 对河流到水库浮游动物演变连续监测的相关研究较少。本次调查安谷水电站环评期、施工期、蓄水期和运行期大渡河河口浮游动物群落特征, 旨在了解该水域浮游动物群落结构的较长序变化, 为探讨大渡河下游水生生物的长期生态效应和水域生态

收稿日期: 2021-08-23 **修回日期:** 2023-02-05

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200901009); 水利部重大科技项目(SK-2022015); 中国水利水电建设集团公司科研项目(AG2012/S-46-D); 中国水利水电建设集团公司监测项目(AG2014/S-83)。

作者简介: 方艳红, 1982 年生, 女, 高级工程师, 主要从事水生态调查与评价工作。E-mail: fyh1901@126.com

修复提供基础资料,对研究丘陵地带生态环保型水电工程建设背景下浮游动物变化趋势提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 样点设置

2013–2016 年的每年春季(5 月)和秋季(10 月),根据安谷水电站施工期、运行期间的水文情势变化,定点对沙湾至大渡河河口、岷江大渡河汇口下江段、左侧河网和支流进行浮游动物监测(图 1),采样点设在大渡河主河道安谷电站库尾(S1)、库区(S2)、坝下(S3)、大渡河河口(S4)、岷江(S5),左侧河网许坝(S6)、黄荆坝(S7)、周陆坝(S8)以及支流临江河(S9)、峨眉河(S10)和青衣江(S11)。



图 1 大渡河乐山段采样点

Fig.1 Location of the sampling sites in the Leshan section of Dadu River

1.2 样品采集与鉴定

原生动物和轮虫以 25 号浮游生物网、枝角类和桡足类以 13 号网在水下 0.5 m 呈“∞”字形捞取 5–8 min,过滤后的样品放入 50 mL 样品瓶中,加 5% 的甲醛溶液固定后镜检观察。原生动物、轮虫定量样品采集用 2.5 L 有机玻璃采水器取上、下水层各 10 L,取混合 2 L 水样,用 15% 鲁哥液固定,静置 48 h 后浓缩至 50 mL,摇匀后原生动物移取到 0.1 mL 计数框,在显微镜下放大 200 倍镜检计数(平行 2 次);轮虫移取 1 mL 计数框,在镜头下放大 100 倍镜检计数(平行 2 次),枝角类、桡足类分多次全部计数。枝角类和桡足类定量采集时,用 2.5 L 有机玻璃采水器采集 40 L,经过 25 号浮游生物网过滤,用 5% 甲醛溶液固定,浓

缩后在解剖镜下解剖定种。原生动物、轮虫、枝角类、桡足类参照相关文献进行镜检鉴定(王家楫, 1961;蒋燮治和堵南山, 1979;沈嘉瑞等, 1979;沈韞芬等, 1990);浮游动物定量参考相关文献和规范进行计算和体重换算(章宗涉和黄祥飞, 1991; 中国人民共和国农业部, 2010)。

2014–2016 年春秋季调查期间(2013 年未测水质),透明度(SD)使用塞氏盘现场测定,流速(V)使用 LS300–A 型便携式流速测算仪测定,酸碱度(pH)、水温(WT)、溶解氧(DO)等数据现场使用 SX751 型便携式多参数测量仪测量,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺–N)、磷酸盐(H₃PO₄)、硝氮(NO₃[–]–N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})水质指标采用《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局, 2002)的标准和方法进行监测与检测分析。

1.3 分析方法

采用优势度指数(Y)和 Shannon–Wiener 多样性指数(H)对群落结构进行分析(杨亮杰等, 2014; 张亚洲等, 2016),计算公式如下:

$$Y = \frac{N_i}{N} f_i$$
 ①

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N}$$
 ②

式中: N_i 为第 i 种物种密度, N 为该物种群落总密度, f_i 为第 i 种物种出现频率, S 为该物种群落总种类数; 以 Y ≥ 0.02 为优势种。

所有数据均通过 Excel 整理, 采用 IBM SPSS Statistic 22 进行方差分析和 Pearson 相关性检验, 采用 Canoco 4.5 对物种数据和环境因子数据进行分析。

2 结果

2.1 浮游动物群落结构

2.1.1 种类组成与分布 大渡河乐山段 4 年监测共鉴定出浮游动物 263 种(图 2)。其中原生动物 63 属 130 种, 占鉴定总种数的 49.43%; 轮虫 30 属 80 种, 占 30.42%; 枝角类 13 属 23 种, 占 8.75%; 桡足类 15 属 30 种, 占 11.41%。2013–2016 年春、秋季差异显著(T=14.18, P=0.04)。春季检出浮游动物 205 种, 2014 年的种类最丰富, 出现 106 种, 2015 年最少, 仅有 53 种; 秋季共检出浮游动物 178 种, 2013 年种类最高, 出现 102 种, 2014–2016 年浮游动物种类数接近, 为 71–79 种。

大渡河乐山段施工期、运行期浮游动物种类数在时空分布上存在极显著差异(T=4.152, P=0.002)。施工期 2013 年的浮游动物种类最为丰富, 有 147 种,

2014 年稍有下降,为 143 种;运行期 2015 年共检出 101 种,2016 年在 2015 年的基础上增加到 119 种。施工期(2013 年、2014 年)优势种($Y \geq 0.02$)有钟虫(*Vorticella* sp.)、旋轮虫(*Philodina* sp.);运行期(2015 年、2016 年)优势种有绿急游虫(*Strombidium viride*)、旋回侠盗虫(*Strobilidium gyrans*)、旋轮虫等;施工期和运行期浮游动物共同优势种有旋轮虫属(表 1)。

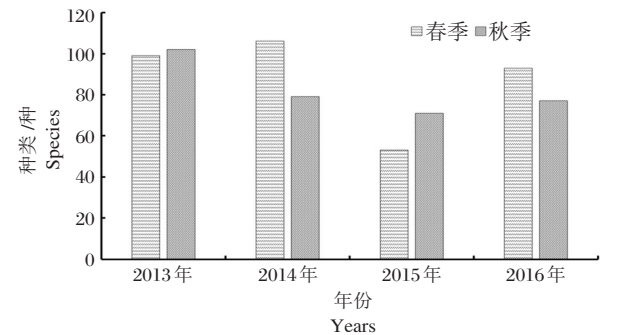


图 2 大渡河乐山段 2013–2016 年春夏季浮游动物种类分布
Fig.2 Zooplankton species number in the Leshan section of Dadu River in spring and autumn (2013–2016)

2.1.2 密度和生物量 大渡河乐山段 2013–2016 年浮游动物平均密度为 658.55 个/L,其中原生动物平均密度最高,为 596 个/L,其次是轮虫 62 个/L,枝角类和桡足类密度较少,仅 0.42 个/L 和 0.13 个/L。春季浮游动物平均密度为 621.15 个/L,最高值出现在 2014 年;秋季平均密度为 674.19 个/L,最高值出现在 2015 年(图 3-a)。2013–2016 年平均生物量为 0.1102 mg/L。其中轮虫贡献最大,占总生物量的 68.10%;其次是原生动物,占总生物量的 27.02%;枝角类和桡足类占比较少、仅占 2.24% 和 2.64%。春季平均生物量为 0.1033 mg/L,秋季平均生物量为

0.0738 mg/L,2013 年春、秋季的生物量均为最高(0.1324 mg/L、0.1070 mg/L),春、秋季浮游动物密度和生物量差异不大(图 3-b)。

表 1 大渡河乐山段浮游动物优势种及优势度指数
Tab.1 Dominant species of zooplankton in the Leshan section of Dadu River during each period

优势种	施工期		运行期	
	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
褐砂壳虫 <i>Diffugia avellana</i>	0.05			
小匣壳虫 <i>Centropyxis minuta</i>	0.02			
短刺刺胞虫 <i>Acanthocystis brevicirrhys</i>		0.02		
筒裸口虫 <i>Holophrya simplex</i>				0.02
钟虫 <i>Vorticella</i> sp.	0.04	0.03		
绿急游虫 <i>Strombidium viride</i>			0.02	0.02
旋回侠盗虫 <i>Strobilidium gyrans</i>			0.10	0.02
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	0.03			
西氏晶囊轮虫 <i>Asplancha sieboldi</i>				0.03
疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> sp.		0.04		
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>		0.02		
旋轮虫 <i>Philodina</i> sp.	0.02	0.05	0.09	0.04

大渡河乐山段浮游动物现存量年际变化见图 4。施工期、运行期浮游动物平均密度差异不显著($T=0.645, P=0.533$),最高值出现在施工期 2014 年(831.62 个/L),最低值出现在运行期 2016 年(453.81 个/L);施工期、运行期的平均生物量差异也

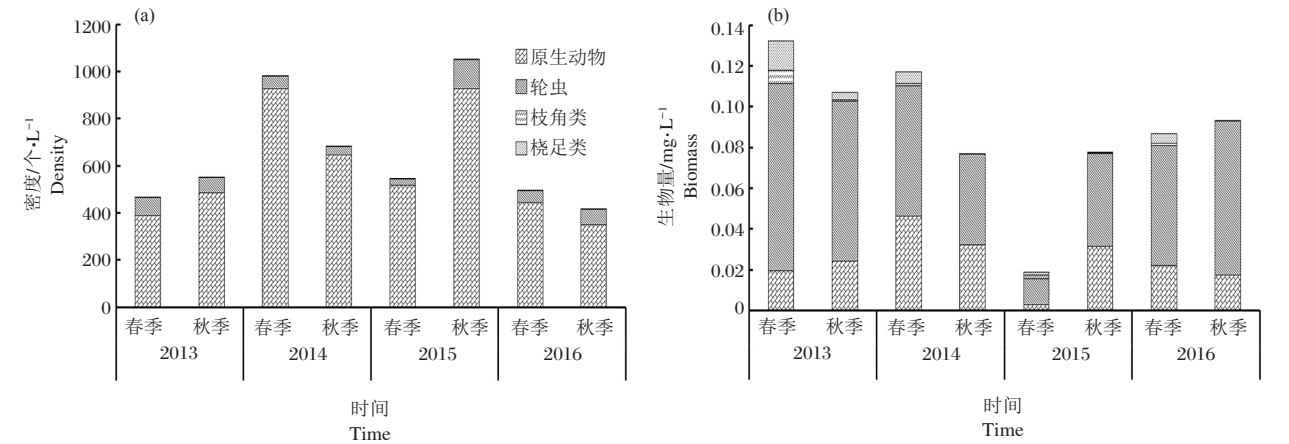


图 3 大渡河乐山段 2013–2016 年浮游动物密度(a)和生物量(b)变化
Fig.3 Composition of zooplankton density (a), biomass (b) in the Leshan section of Dadu River in the spring and autumn (2013–2016)

不显著($T=2.006,P=0.073$),生物量最高值出现在施工期2013年(0.1197 mg/L),2015年生物量最低(0.0478 mg/L)。

大渡河乐山段浮游动物现存量空间分布见图5。乐山段支流营养盐来源丰富,浮游动物密度最高,其次是左侧河网,干流主河道和岷江较低。主河道运行期浮游动物平均密度为503.52个/L,施工期平均密度为372.01个/L,运行期高于施工期;施工期和运行期平均生物量相差不大。左侧河网施工期密度和生物量高于运行期,最高平均密度和生物量出现在监测点S8;支流位于施工区下游,不受工程影响,S9的密度最高,其次是S10,S11密度相对较小;对于S9和S10,施工期生物量显著高于运行期,S11在两个期生物量几乎不变。岷江受工程影响偏小,大渡河汇入后(S5)水流量加大,流速急,浮游动物具有随波逐流的特性,其密度和生物量均较少。

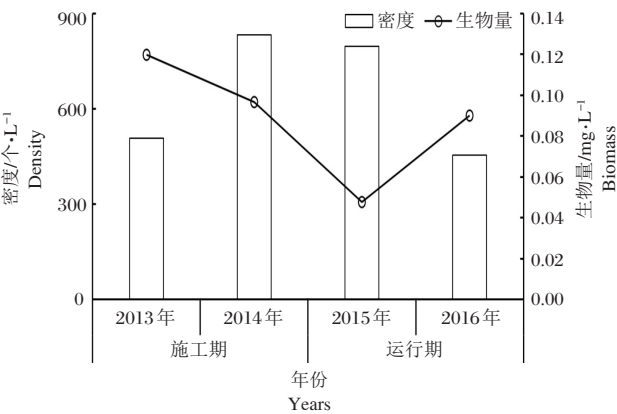


图4 大渡河乐山段浮游动物现存量年际变化
Fig.4 Annual variation of the zooplankton standing crop in the Leshan section of Dadu River

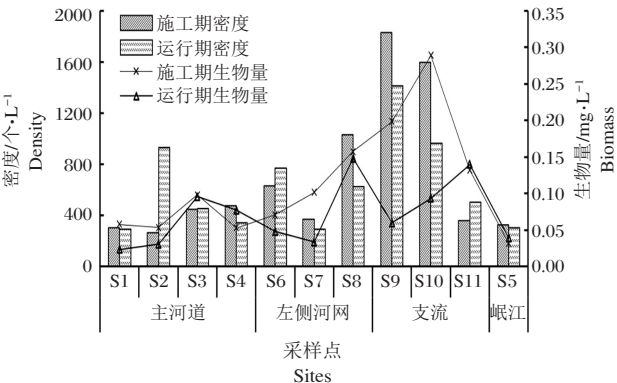


图5 大渡河乐山段浮游动物现存量空间分布
Fig.5 Spatial distribution of the zooplankton standing crop in the Leshan section of Dadu River by period

2.2 多样性指数

安谷水电站 Shannon–Wiener 多样性指数(H)时

空分布见表2。施工期、运行期监测点S10的种类多,浮游动物多样性指数最高;多样性最低值无明显变化规律,施工期2013年出现在S5,2014年出现在S4;运行期2015年出现在S2,2016年最低值均出现在S11。

表2 大渡河乐山段 Shannon–Wiener 多样性指数的时空分布
Tab.2 Temporal and spatial distribution of Shannon–Wiener diversity index (H) in the Leshan section of the Dadu River

时间		主河道				左侧河网			支流		岷江	
		S1	S2	S3	S4	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S5
施工期	2013年	1.31	1.67	1.28	1.69	0.86	1.58	2.29	1.90	3.26	1.74	0.51
	2014年	1.61	1.26	2.95	0.89	1.23	1.86	1.42	2.30	3.35	1.37	1.47
运行期	2015年	0.75	0.12	1.00	0.38	1.07	1.80	0.98	1.89	2.01	1.07	0.56
	2016年	1.69	0.79	2.25	1.13	1.73	0.96	0.82	1.80	2.45	0.41	1.34

2.3 水质指标

2014–2016年各项水质指标平均值见表3。WT、DO、TN平均最高值均出现在运行期2015年,WT最低值出现在施工期2014年,pH、 H_3PO_4 、TP随时间推移逐渐增加; NO_3^- -N随工程进度变化逐渐减少; NH_4^+ -N、 COD_{Mn} 平均值最高出现在运行期2016年。

表3 水体理化指标
Tab.3 Primary physical and chemical parameters of the water body by year

理化指标	施工期	运行期	
	2014年	2015年	2016年
WT/℃	18.55±1.56	20.15±1.21	20.02±1.49
pH	7.24±0.20	8.19±0.19	8.42±0.33
DO/mg·L ⁻¹	8.67±1.34	10.76±3.08	8.84±1.79
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.30±0.39	0.27±0.20	0.50±0.35
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	1.78±1.43	1.75±1.44	1.66±0.95
TN/mg·L ⁻¹	2.18±1.83	2.38±1.95	2.34±1.36
H ₃ PO ₄ /mg·L ⁻¹	0.11±0.12	0.11±0.12	0.13±0.09
TP/mg·L ⁻¹	0.13±0.15	0.13±0.13	0.15±0.10
COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	1.15±0.98	0.99±0.73	1.31±0.72

2.4 浮游动物群落与环境因子的关系

选取浮游动物密度和生物量对环境因子进行相关性分析(表4)。施工期密度和生物量与DO、V、SD呈负相关,与WT、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN、 H_3PO_4 、TP、 COD_{Mn} 呈正相关。运行期密度和生物量与pH、DO、V呈负相关,与WT、SD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN、

表 4 浮游动物密度和生物量与环境因子的相关性

环境因子		WT	pH	DO	V	SD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	H ₃ PO ₄	TP	COD _{Mn}
施工期	密度	0.72	-0.23	-0.78	-0.28	-0.17	0.75	0.84	0.82	0.82	0.80	0.78
	生物量	0.42	0.18	-0.40	-0.17	-0.51	0.41	0.51	0.48	0.40	0.37	0.34
运行期	密度	0.58	-0.41	-0.02	-0.26	0.23	0.34	0.54	0.52	0.40	0.43	0.43
	生物量	0.39	-0.32	-0.07	-0.07	0.10	0.27	0.55	0.50	0.36	0.39	0.42

H₃PO₄、TP、COD_{Mn}呈正相关。

运用 Canoco 软件对浮游动物群落进行冗余分析 (RDA), 选取 2014–2016 年各年的优势种进行 DCA 分析。结果显示, 2014 年最大梯度为 2.607, 2015 年为 1.791, 2016 年为 3.017。因此, 选择 RDA 分析 2014–2016 年各年优势种密度与环境因子的关系。

通过前选法和蒙特卡罗检验, 排除贡献小的因子。施工期 2014 年环境因子 SD、NO₃⁻-N、H₃PO₄、TN、TP 对浮游动物影响较大, 前两个排序轴特征值是 0.81 和 0.72, 其解释率为 77.5%, 浮游动物群落结构变化主要由 H₃PO₄、NO₃⁻-N、TP 主导, 从物种与环境夹角可以看出, 钟虫 (*Vorticella* sp.) 与 TN、H₃PO₄、NO₃⁻-N 呈正相关 (图 6-a)。运行期 2015 年环境因子中 TN、NO₃⁻-N、TP、H₃PO₄、WT 对浮游动物影响较大, 前两个排序轴特征值是 0.78 和 0.65, 其解释率为 88.3%, 浮游动物群落变化主要由 WT、NO₃⁻-N、TN 主导, 物种与环境夹角可以看出旋轮虫 (*Philodina* sp.) 与 TP 和 H₃PO₄ 关系较为紧密, 旋回侠盗虫 (*Strobilidium gyrans*) 与 TN 关系紧密 (图 6-b)。运行期 2016 年环境因子中, SD、V、DO、H₃PO₄、WT 对浮游动物影响较大, 前两个排序轴特征值是 0.96 和 0.70, 其解释率为 84.4%, 浮游动物群落变化由 SD、V、WT 主导, 物种与环境夹角可以看出西氏晶囊轮虫 (*Asplancha sieboldi*) 与 H₃PO₄ 关系较为紧密,

旋轮虫 (*Philodina* sp.) 与 DO 关系紧密。NO₃⁻-N 在 2014–2015 年对浮游动物影响占主导作用, 2016 年对浮游动物影响较大的是 SD (图 6-c)。

3 讨论

3.1 乐山段浮游动物群落特征及不同时期变化

通过对大渡河乐山段施工期、运行期连续 4 年的监测, 共鉴定出浮游动物 263 种, 其中原生动物种类最丰富, 其次为轮虫, 枝角类和桡足类种类所占比例较少。春季回暖, 水温升高, 浮游动物种类比秋季丰富, 这与浮游植物变化一致 (王文君等, 2019), 密度和生物量的季节变化不明显。施工期、运行期浮游动物优势种以原生动物、轮虫为主, 随着工程推进, 大渡河乐山段浮游动物优势种相似度较低, 仅旋轮虫每年出现。安谷水电站建设运行前后, 受大坝影响的库区河段由湍急河流生境演变为静缓流类似湖泊生境, 坝下河道渠化, 生境趋向单一, 而浮游动物生长周期短, 能快速响应其环境变化。选取安谷水电站建设的环评期 (2007 年)、施工前 (2010 年)、施工期 (2013 年、2014 年)、蓄水期 (2014 年 11–12 月)、运行期 (2015 年、2016 年) 相同监测点浮游动物数据进行对比分析 (图 7-a, b)。可以看出, 因安谷水电站蓄水期为冬季, 平均水温 13.9℃, 低温水对浮游动物生

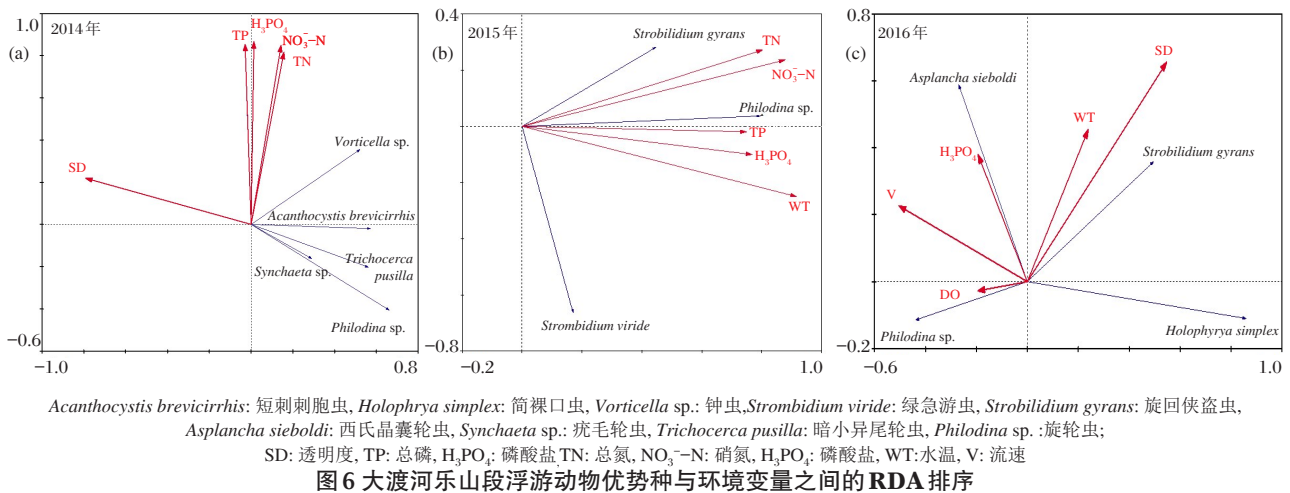


Fig.6 RDA ordination diagram between zooplankton dominant species and environmental variables in the Leshan section of Dadu River

长有一定的抑制作用(章宗涉和黄祥飞,1991),密度和生物量偏低。库尾位于安谷水电站施工区上游,环评期2007年至运行期2016年水流环境变化不大,浮游动物密度年变化在260.15~345.05个/L,变幅较小。因各时期检出的浮游动物大小个体不同,2013年生物量最高,运行期2015年稍低。坝前位于安谷电站施工区域,环评期2007年至运行期2016年,浮游动物密度变化为188.32~1 515.00个/L,变化幅度较大,安谷水电站蓄水后的第一年(2015年),水动力减弱,为静缓流河段,水库库底营养物质的渗入,适合小个体原生

动物纤毛虫的生长,密度升高,但生物量偏低;2016年水文情势稳定,浮游动物密度与2014年相似,生物量与2013年接近。坝下位于施工区的下游,因电厂尾水进入尾水渠,来水主要依赖于坝址下泄流量和左侧河网,浮游动物密度在323.33~744.44个/L,浮游动物密度差异在2013-2015年呈增长趋势;2016年水文情势稳定,浮游动物密度有所减少,大个体轮虫、枝角类和桡足类占比上升,生物量增加(表5)。总体来讲,安谷水电站建设环评期,施工前、后,运行期浮游动物密度、生物量存在一定差异,但幅度不大。

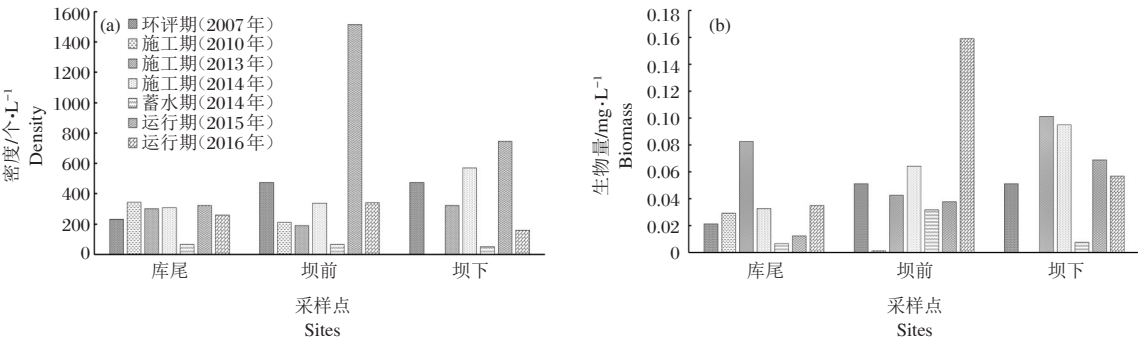


图7 不同时期浮游动物群落变化

Fig.7 Temporal-spatial variation of zooplankton density (a) and biomass (b)

表5 不同时期浮游动物现存量变化

Tab.5 Temporal-spatial changes in zooplankton standing crop					
指标	时间	库尾	坝前	坝下	参考文献
密度 /个·L ⁻¹	环评期 (2007年)	232.58	472.60	472.6	方艳红等,2016
	施工前 (2010年)	345.05	210.17	/	方艳红等,2012
	施工期 (2013年)	301.27	188.32	323.33	本研究
	施工期 (2014年)	308.63	337.70	571.50	本研究
	蓄水期 (2014年)	65.46	65.46	51.83	方艳红等,2016
	运行期 (2015年)	322.61	15150	744.44	本研究
	运行期 (2016年)	260.15	340.9	160.55	本研究
生物量 /mg·L ⁻¹	环评期 (2007年)	0.0211	0.0511	0.0511	方艳红等,2016
	施工前 (2010年)	0.0290	0.0012	/	方艳红等,2012
	施工期 (2013年)	0.0826	0.0425	0.1012	本研究
	施工期 (2014年)	0.0327	0.0640	0.0950	本研究
	蓄水期 (2014年)	0.0064	0.0315	0.0074	方艳红等,2016
	运行期 (2015年)	0.0122	0.0131	0.0323	本研究
	运行期 (2016年)	0.0347	0.0985	0.1091	本研究

3.2 浮游动物群落结构影响因素

大渡河乐山段位于三江汇流上游,受岷江的顶托,形成了大量边滩和心滩,河滩湿地水网交错,生境复杂多样。随着安谷水电站的建设,河网结构趋向简单化,河滩湿地面积缩小,大渡河主河道、左侧河网、支流水文情势、水环境因子发生变化。在水生态系统中,水环境因子对浮游动物的作用有所不同,存在起主导作用的环境因子(韩茂森,1992)。本研究发现,施工期、运行期浮游动物密度、生物量与环境因子DO、V呈负相关,与WT、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、H₃PO₄-TP、COD_{Mn}呈正相关。RDA分析表明,NO₃⁻-N在施工期2014年、运行期2015年的浮游动物群落变化中起主导作用,运行期2016年SD对浮游动物影响较大(张爱菊等,2016;Picapedra et al,2021)。大渡河支流临江河S9、峨眉河S10两岸居民、工农业较为密集,汇入水体的氮磷等营养物质丰富,加上适宜的温度,使得浮游动物密度、生物量和多样性指数明显高于干流、左侧河网及青衣江其他监测点(胡国成等,2013;陈海生和朱兆平,2018)。对浮游动物的影响除环境因子外,还有其他很重要的因素,如水生植物、叶绿素、人类的干预等(Illyová & Pastuchová,2012),为了更好地了解大渡河三江汇流之地浮游动物的群落特征,还需结合其他因素进行长期监测。

3.3 不同水库类型对浮游动物影响

自然河流筑坝后,原河流水文情势发生改变,原河岸生态转化为钢筋水泥堤岸工程。不同调节类型的水库,水体滞留时间的长短不同,对营养物质累积产生影响有所差异(陈庆伟等,2007)。紫坪铺水库具有不完全年调节性能,成库初期浮游动物种类是成库前的10.05倍,密度和生物量明显增加(方艳红等,2014);龙滩水库具有年调节性能,建成后浮游动物种类远远高于成库前,密度是成库前的25倍,生物量是成库前的14倍(方艳红等,2011);三峡水库试验性蓄水期间浮游动物密度显著增加(王英才等,2012);径流式桥巩水电站浮游动物种类建库前后变化不大(熊姁,2013);新建水库飞来峡(何国全,2006)、剑潭水库(李莹等,2010)均为无调节径流水体,浮游动植物密度和生物量较低,因此水体滞留时间长短是影响浮游动物丰度的关键因素。本次调查的大渡河安谷水电站水体滞留时间较短,在成库第一年(2015年)蓄水后,坝前小型原生动物密度明显增加,2016年浮游动物群落特征与2013年相似。径流式水电站与调节类型强的水电站建库前后浮游动物群落变化差异较大。径流式水电站成库后,浮游动物种类、密度与原河流相似。本次调查结果可为丘陵地区河流型水库建设及环境评价提供借鉴,为大渡河乐山段长期生态监测和水域生态修复提供参考数据。

参考文献

曹小红,步青云,2011. 环境评估在加强水电建设项目生态保护中的作用——以安谷水电站为例[J]. 中国水能及电气化, 83(12):17-19.

陈海生,朱兆平,2018. 浙南山区水库浮游生物群落结构研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 30(2):42-45.

陈庆伟,刘兰芬,刘昌明,2007. 筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 43(5):578-582.

陈宇顺,2019. 多重人类干扰下长江流域的水生态系统健康修复[J]. 人民长江, 50(2):19-23.

方艳红,常秀玲,黄道明,等,2011. 红水河龙滩水库浮游动物群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 32(5):50-54.

方艳红,黄道明,王文君,等,2012. 大渡河河口秋季浮游动物的群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 33(3):34-40.

方艳红,王文君,黄道明,等,2014. 岷江紫坪铺水库夏、秋两季浮游动物群落结构特征[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集: 第12卷: 6641-6646.

方艳红,黄道明,方红伦,等,2016. 大渡河安谷水电站蓄水期间浮游动物群落动态监测[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集: 第14卷: 1860-1865.

国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社.

韩茂森,1992. 淡水生物[M]. 北京: 高等教育出版社.

何国全,2006. 飞来峡水库运行初期水质和浮游生物群落结构的动态特征[D]. 广州: 暨南大学.

胡国成,姚玲爱,张丽娟,等,2013. 广东长潭水库浮游生物群落结构特征[J]. 动物学杂志, 48(6): 824-833.

蒋燮治,堵南山,1979. 中国动物志:节肢动物门:甲壳纲:淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社.

李莹,肖利娟,林秋奇,等,2010. 一座新建水库——广东剑潭水库浮游植物动态特征[J]. 湖泊科学, 22(2):227-234.

沈嘉瑞,戴爱云,宋大祥,1979. 中国动物志:节肢动物门:甲壳纲:淡水桡足类[M]. 北京:科学出版社.

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.

王家楫,1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京:科学出版社.

王文君,方艳红,李洪军,等,2019. 安谷水电站施工期浮游植物群落结构[J]. 水生态学杂志, 40(1):48-54.

王英才,邱光胜,陈水松,等,2012. 三峡库区实验性蓄水期间浮游生物群落特点研究[J]. 人民长江, 43(12):4-9.

熊姁,2013. 红水河桥巩水电站工程运行初期水生生物调查[J]. 企业科技与发展, 345(3):49-50.

杨亮杰,吕光汉,竺俊全,等,2014. 横山水库浮游动物群落特征及水质评价[J]. 水生生物学报, 38(4):720-728.

张爱菊,丁新新,刘金殿,等,2016. 浙江老虎潭水库后生浮游动物群落组成及环境影响因子[J]. 水生态学杂志, 37(1): 62-69.

张亚洲,蒋日进,李凯,等,2016. 瓯江水域春、夏季浮游动物群落结构特征[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 35(3): 201-206.

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.

中华人民共和国农业部,2010. 淡水浮游生物调查技术规范: SC/T 9402-2010[S]. 北京: 中国农业出版社.

Guevara G, Lozano P, Reinoso G A, et al, 2009. Horizontal and seasonal patterns of tropical zooplankton from the eutrophic Prado Reservoir (Colombia) [J]. Limnologia, 39 (2):128-139.

Illyová M, Pastuchová Z, 2012. The zooplankton communities of small water reservoirs with different trophic conditions in two catchments in western Slovakia[J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 42(4):271-281.

Picapedra P H S, Fernandes C, Baumgartner G, et al, 2021. Zooplankton communities and their relationship with water quality in eight reservoirs from the Midwestern and southeastern regions of Brazil[J]. Brazilian Journal of Biology, 83(3):701-713.

Zooplankton Community Characteristics in the Leshan Section of Dadu River from 2013 to 2016

FANG Yan-hong¹, WANG Wen-jun¹, WANG Chong¹, CHEN Feng¹, YANG Zhong¹, WANG Ying-wen²

(1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China;

2. Changyang Tujia Autonomous County Aquatic Technology Promotion Station, Changyang 443500, P.R. China)

Abstract: Angu hydropower station is on the Shawan–Leshan section of Dadu River. In this study, we analyzed the zooplankton community in the mainstream, left river network and tributaries of the Leshan section during the construction (2013–2014) and operation (2015–2016) of the hydropower station. We aimed to understand the long term changes in the structure of the zooplankton community, and provide basic data to guide continuing research on the long-term ecological effects on aquatic organisms in the lower Dadu River and ecological restoration in the watershed. In May (spring) and October (autumn) of 2013–2016, monitoring of zooplankton and water quality was carried out at 11 sampling sites in the main stream, left river network and tributaries of the Leshan section of Dadu River. A total of 263 zooplankton species were identified, consisting of protozoans (130 specie, 63 genera), rotifers (80 specie, 30 genera), cladocerans (23 specie, 13 genera) and copepods (30 specie, 15 genera). Zooplankton species numbers were significantly different between the construction period and operation period, with higher species richness in 2013 (147 species) and 2014 (143 species), than in 2015 (101 species) and 2016 (119 species). A total of 12 dominant species (genera) were detected during the investigation, and *Philodina* was the dominant genus in both the construction and operation periods. The average zooplankton density and biomass were 658.55 ind/L and 0.1102 mg/L, with no significant differences between construction and operation periods. Seasonally, the highest average spring density (621.15 ind/L) occurred in 2014 and the highest average autumn density (674.19 ind/L) occurred in 2015, and the highest biomasses for spring and autumn (0.1324 mg/L, 0.1070 mg/L) both occurred in 2013. However, none of the seasonal differences were significant. Spatially, zooplankton density and biomass in the tributaries were higher than those in the mainstream, left river network and Minjiang River. Zooplankton density and biomass during the construction and operation periods were negatively correlated with the environmental factors DO and velocity (V), and positively correlated with WT, NH_4^+-N , NO_3^--N , TN, H_3PO_4 , TP, and COD_{Mn} . Redundancy analysis shows that NO_3^--N had a dominant effect on zooplankton in 2014 and 2015, and SD became the primary affecting factor in 2016. Zooplankton standing crops in different periods were compared in this study, and results show that the zooplankton community presented few changes during construction of Angu hydropower station. The lowest density and biomass were recorded during the water impoundment period due to low water temperature, and zooplankton above the dam were most affected by the construction of Angu hydropower station.

Key words: Leshan section of the Dadu River; zooplankton; community structure characteristics; environmental factors