

澜沧江下游梯级水库浮游动物群落结构与 环境因子关系

雷琦¹,包宇飞²,谭庆军³,许元钊¹,龚斌³,简云忠³,金磊¹,熊丹妮¹,李天翠¹

(1.生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心,武汉 430010;
2.中国水利水电科学研究院,北京 100038;3.华能澜沧江股份有限公司,昆明 650214)

摘要:澜沧江是世界著名河流,也是我国 13 个水电基地之一.为了解本区域梯级电站对下游水生态的影响,2021 年 3 月、6 月和 9 月对澜沧江下游糯扎渡和景洪水库进行调查,采用水质综合指数法(WQI)、主坐标分析(PCoA)和典范对应分析(CCA)等方法研究澜沧江下游梯级水库浮游动物群落特征及其与环境因子的关系.结果显示糯扎渡和景洪水库水质为Ⅱ~Ⅲ类,水体营养状态为贫营养~中营养;浮游动物密度组成以原生动物和轮虫为主,生物量构成以桡足类和轮虫为主.糯扎渡和景洪库区上游的浮游动物组成与坝下和坝前均差异明显,TN 和 Chl.a 显著影响了糯扎渡水库浮游动物的群落结构,WT、TN 和 DO 显著影响了景洪水库浮游动物的群落结构.

关键词:澜沧江;梯级水库;浮游动物;环境因子

中图分类号:X835

文献标志码:A

澜沧江是我国西南地区重要的河流之一,发源于青海省杂多县,流经我国青海、西藏和云南三省.澜沧江流域全长 2 198 km,落差约 5 000 m,流域面积 17.4 万 km²,水资源量及水能资源蕴藏丰富,是我国 13 个水电基地之一^[1].根据云南省“两库八级”规划,澜沧江下游已建立了大朝山、糯扎渡和景洪等多座梯级电站.由于梯级电站的建设改变了澜沧江河道原本的水文地势,虽然可以调节下游河段径流量,但可能会影响澜沧江尤其是下游河段水质和水生生物群落结构以及生物多样性^[2-3].

浮游动物具有个体小、繁殖世代短,对环境因子变化敏感的特点,环境条件的改变会引起其种类及密度的差异,进而对环境的变化起到一定程度的指示作用.此外浮游动物是维持水体物质循环和能量流动不可或缺的一部分,通过监测浮游动物群落变化可间接反映水体营养状态^[4-5].通过多元统计方法分析不同时期浮游动物群落特征能够反映水体水生态状况及水质变化趋势.主坐标分析(Principal Co-ordinates Analysis,PCoA)作为典型的非限制性排序方法,可以计算浮游动物种类之间的距离(如 Bray-Curtis),然后对距离矩阵进行处理,能有效反映浮游动物群落组成的相似性或相异性.而典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis,CCA)将对应分析与多元回归分析结合,在对应分析的迭代过程中,将每次浮游动物排序坐标值与环境因子进行多元线性回归,从而得到影响浮游动物群落结构的关键因子.

目前关于澜沧江梯级水库浮游动物等相关研究主要集中在澜沧江中上游,如青海源区和小湾水库等,而下游地区相关研究较少.因此本研究基于 2021 年 3 月、6 月和 9 月澜沧江下游糯扎渡和景洪水库的水生态调查结果,重点探讨澜沧江下游梯级水库浮游动物时空群落变化特征,以为澜沧江下游水质监测及水生态健康评价提供基础数据.

收稿日期:2022-10-26;**修回日期:**2023-01-31.

基金项目:国家自然科学基金(92047204);长江水科学研究联合基金(U204020117).

作者简介:雷琦(1996—),男,河南商丘人,生态环境监测与科学研究中心工程师,硕士,主要从事水生生物监测评价,
E-mail:aqualeiq@163.com.

通信作者:李天翠(1989—),女,湖北十堰人,生态环境监测与科学研究中心高级工程师,博士,主要研究领域为水体生态修复、水体富营养化和污损生物防治,E-mail:litiancui@cjjg.mee.gov.cn.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

糯扎渡水库位于云南省普洱市思茅区,是澜沧江中下游河段梯级开发的第5梯级,上游与大朝山衔接,下游与景洪相连.糯扎渡水库最大坝高261.5 m,水库正常蓄水位812.0 m,总库容227.41亿 m^3 ,同时作为多年调节水库,是澜沧江水电工程的核心工程.景洪水库位于云南省西双版纳州景洪市,是澜沧江中下游河段规划的第6梯级,于2009年全部建造完成,最大坝高108.0 m,水库正常蓄水位602.0 m,总库容11.39亿 m^3 ,对澜沧江下游水电生产以及航运具有重要意义^[6].

1.2 采样点位布设

根据澜沧江下游水位和季节变化情况,于2021年3月、6月和9月对糯扎渡和景洪上游、坝前和坝下区域的浮游动物及水质进行监测(图1).根据水库地貌以及生境特征,共设置17个采样点,其中糯扎渡8个采样点,景洪9个采样点,具体点位信息见附表I.

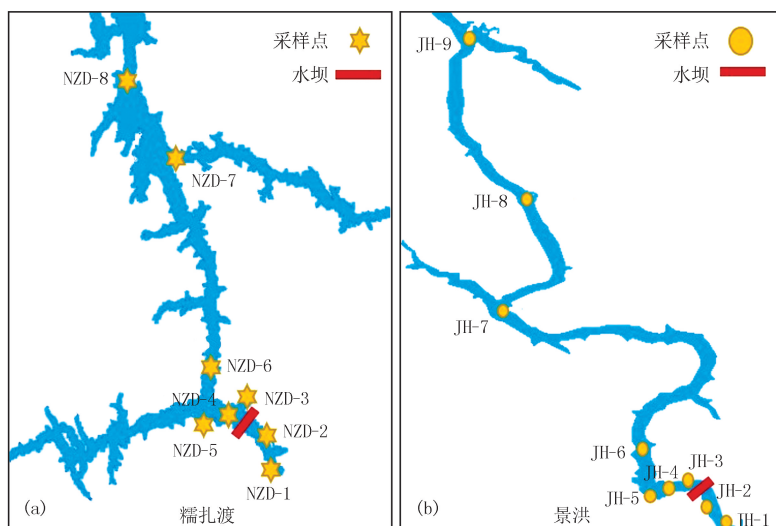


图1 澜沧江下游糯扎渡(a)和景洪(b)水库采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling stations of Nuozhadu(a) and Jinghong(b) reservoirs in the lower reaches of the Lancang River

1.3 样品采集与分析

浮游动物定量样品采集时,取0.5 m和1.5 m水深混合水样30 L,经25号浮游生物网过滤后装入100 mL塑料采样瓶中,加入鲁哥氏溶液固定.具体方法参照文献^[7].浮游动物种类鉴定和生物量换算参考文献^[8-12].水样采集参照《水环境监测规范》(SL219-2013).使用5 L有机玻璃采水器采集0.5 m水深水样,保存于1.5 L水样瓶中.现场用YSI EXO2测定水体的pH值、水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率等理化指标;总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、叶绿素 a (Chl. a)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})测定参照文献^[13].

1.4 数据处理

依据McNaughton优势度指数($Y > 0.02$)确定2个水库的浮游动物优势种;运用Shannon-Wiener和Margalef多样性指数分析浮游动物多样性;基于水质综合指数法(WQI)和修正后的卡尔森营养状态指数(TSIM),选取TN、TP、 COD_{Mn} 和DO等指标评价水库水质^[14];运用SPSS 21.0进行正态分布和方差齐性检验,根据LSD法进行单因素方差分析探究2个水库浮游动物生物量和水环境因子的时空差异;运用R 4.1.2的“vegan”和“ggplot 2”软件包对上游、坝前和坝下3个区域浮游动物群落进行PCoA分析,并设置80%为椭圆统计样本;运用Canoco 5.0^[15]进行CCA分析,探究澜沧江下游梯级水库浮游动物优势种类生物量和环境因子的关系.

2 结 果

2.1 浮游动物群落结构组成

澜沧江下游梯级水库共鉴定出浮游动物 4 类 66 种,其中原生动物 22 种,轮虫 21 种,枝角类 11 种,桡足类 12 种.糯扎渡共检出浮游动物 55 种,略少于景洪的 62 种.

糯扎渡和景洪水库各区域浮游动物密度及生物量变化如图 2 所示,各季节性变化详见附表 II.糯扎渡浮游动物平均密度为 $593.41 L^{-1}$,平均生物量为 $1.094 1 mg \cdot L^{-1}$;原生动物平均密度为 $501.55 L^{-1}$,平均生物量为 $0.070 2 mg \cdot L^{-1}$;轮虫平均密度为 $109.70 L^{-1}$,平均生物量为 $0.547 5 mg \cdot L^{-1}$;枝角类平均密度为 $0.37 L^{-1}$,平均生物量为 $0.010 1 mg \cdot L^{-1}$;桡足类平均密度为 $5.22 L^{-1}$,平均生物量为 $0.466 3 mg \cdot L^{-1}$.景洪浮游动物平均密度为 $2 225.36 L^{-1}$,平均生物量为 $2.751 6 mg \cdot L^{-1}$;原生动物平均密度为 $1 741.29 L^{-1}$,平均生物量为 $0.24 mg \cdot L^{-1}$;轮虫平均密度为 $481.98 L^{-1}$,平均生物量为 $2.408 0 mg \cdot L^{-1}$;枝角类平均密度为 $1.02 L^{-1}$,平均生物量为 $0.004 2 mg \cdot L^{-1}$;桡足类平均密度为 $1.07 L^{-1}$,平均生物量为 $0.095 6 mg \cdot L^{-1}$.

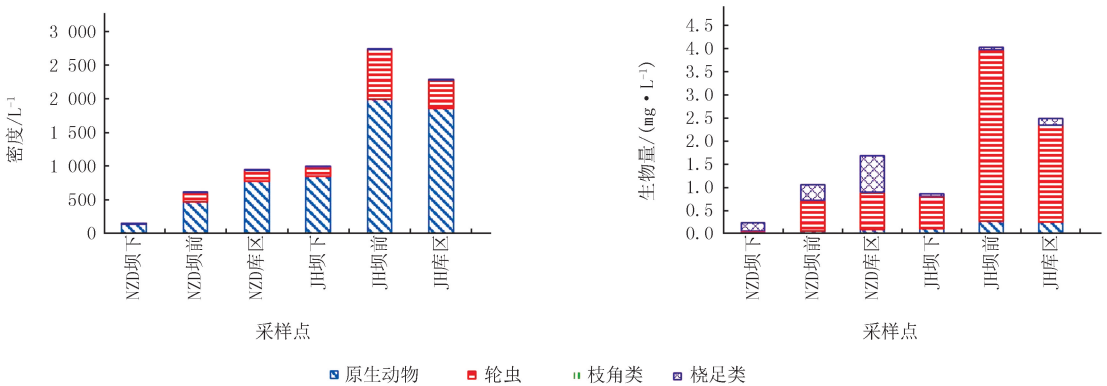


图2 糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库浮游动物密度及生物量变化

Fig.2 Changes of zooplankton density and biomass in Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) reservoirs

由图 3 可知,糯扎渡和景洪水库浮游动物密度组成主要以原生动物和轮虫为主,而生物量组成以桡足类和轮虫为主.糯扎渡优势种为原生动物、轮虫和桡足类,景洪优势种为原生动物和轮虫(表 1).此外,糯扎渡 3 月坝下浮游动物密度和生物量与坝前和上游均有明显差异.景洪 9 月坝前和上游的浮游动物密度和生物量高于 3 月和 6 月,同时上游的浮游动物密度和生物量显著高于坝下,坝下无季节性差异.

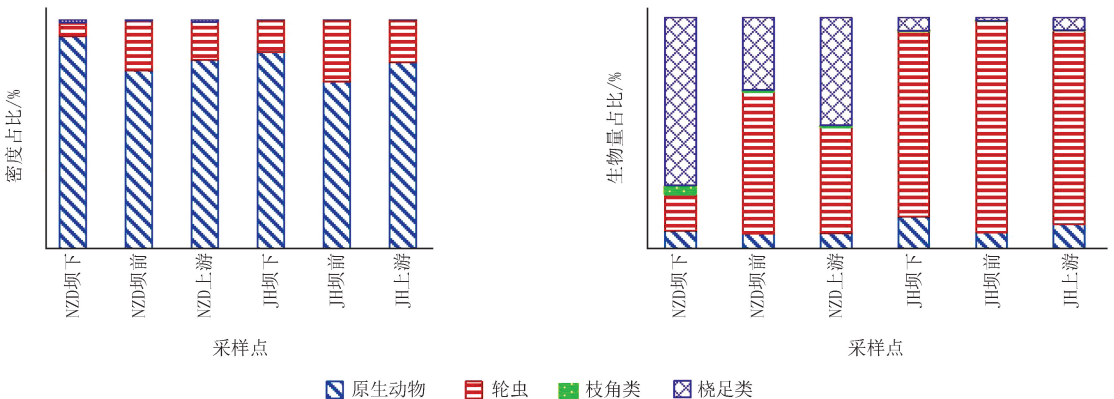


图3 糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库各区域浮游动物密度及生物量变化

Fig.3 Zooplankton density and biomass in each area of Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) reservoirs

澜沧江下游梯级水库浮游动物 Shannon-Wiener 和 Margalef 多样性指数分别为 $0.86 \sim 1.79$ 和 $1.48 \sim 2.48$.糯扎渡浮游动物 Shannon-Wiener 及 Margalef 多样性指数平均值分别为 1.50 和 2.10 ,景洪浮游动物 Shannon-Wiener 及 Margalef 多样性指数平均值分别为 1.40 和 2.05 .糯扎渡上游浮游动物 Shannon-Wiener

多样性指数高于坝下和坝前,而糯扎渡坝下浮游动物 Margalef 多样性指数高于上游和坝前;景洪上游浮游动物 Shannon-Wiener 及 Margalef 多样性指数均高于坝前和坝下(附表 III)。

表 1 糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库浮游动物群落优势种类

Tab. 1 Predominant species of zooplankton community in Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) reservoirs

糯扎渡			景洪		
优势种	学名	优势度	优势种	学名	优势度
钟虫	<i>Vorticella</i> sp.	0.039	急游虫	<i>Strombidium</i> sp.	0.070
侠盗虫	<i>Strobilidium</i> sp.	0.144	侠盗虫	<i>Strobilidium</i> sp.	0.081
睥睨虫	<i>Askenasia</i> sp.	0.058	睥睨虫	<i>Askenasia</i> sp.	0.031
砂壳虫	<i>Difflugia</i> sp.	0.091	似铃壳虫	<i>Tintinnopsis</i> sp.	0.116
裂痕龟纹轮虫	<i>Anuraeopsis fissa</i>	0.027	麻铃虫	<i>Leprotintinnus</i> sp.	0.033
多突轮虫	<i>Asplanchnopus</i> sp.	0.130	疣毛轮虫	<i>Synchaetidae</i> sp.	0.095
胶鞘轮虫	<i>Collotheca</i> sp.	0.039	多肢轮虫	<i>Polyarthra</i> sp.	0.206
舌状叶镖水蚤	<i>Phyllodiatomus tunguidus</i>	0.134	无柄轮虫	<i>Ascomorpha</i> sp.	0.058

根据 PCoA 结果可知(图 4),降维后糯扎渡坝下的中心坐标为(-0.320,0.004),坝前的中心坐标为(-0.080,0.098),上游的中心坐标为(0.293,-0.101);降维后景洪坝下的中心坐标为(0.27,0.07),坝前的中心坐标为(0.290,-0.016),上游的中心坐标为(-0.360,-0.023)。糯扎渡和景洪均表现坝下和坝前浮游动物群落相互交叉,而上游浮游动物与坝下和坝前有明显区分。

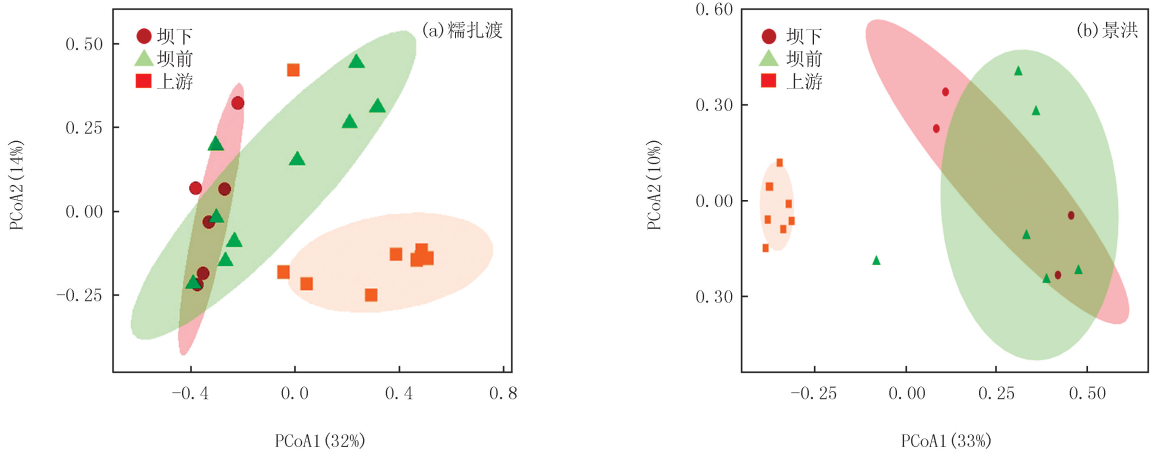


图4 糯扎渡(a)和景洪水库(b)浮游动物PCoA分析

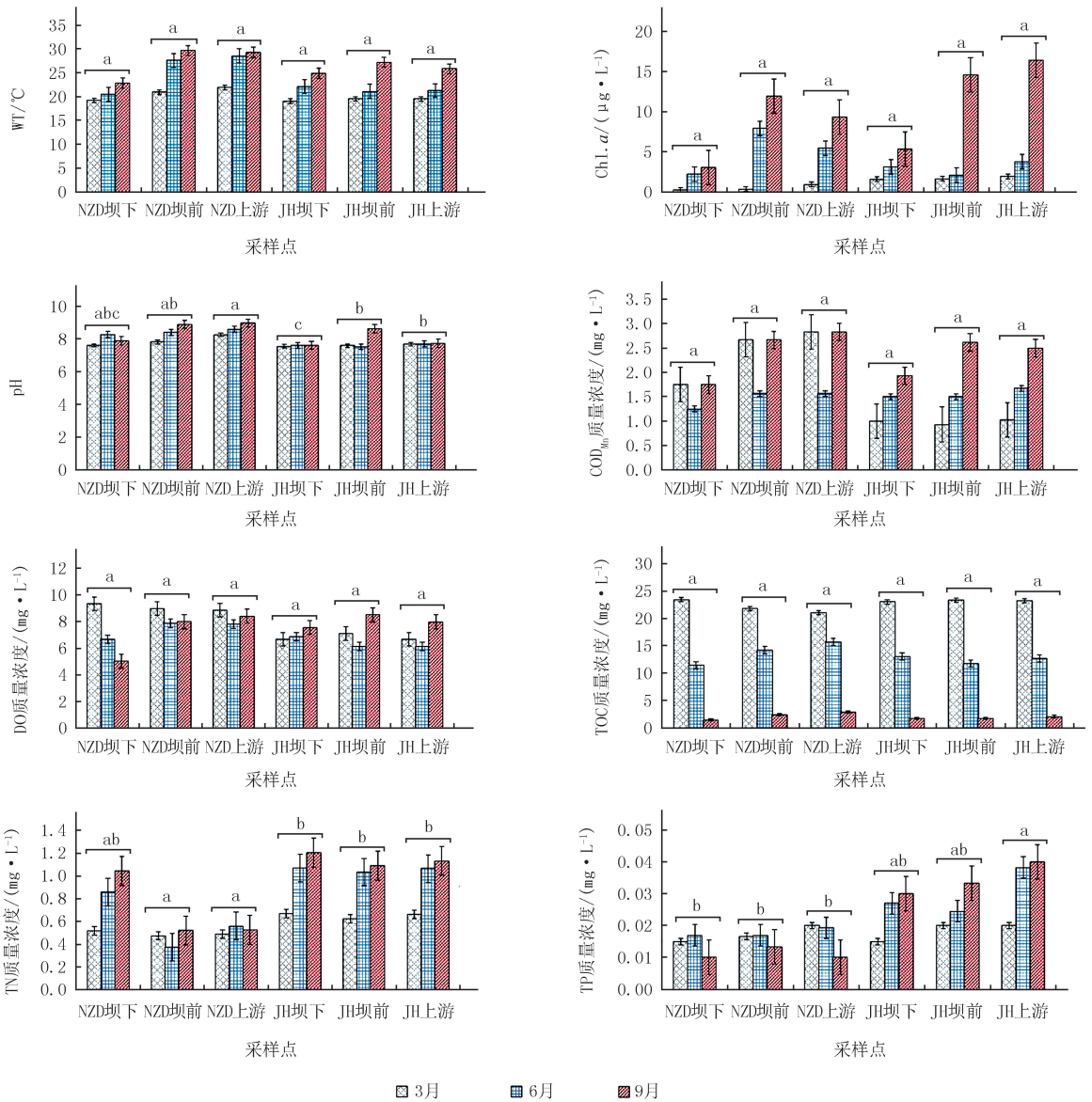
Fig. 4 PCoA analysis of Nuozhadu(a) and Jinghong(b) reservoirs

2.2 水环境现状及评价

糯扎渡和景洪不同区域环境因子季节性变化如图 5 所示。糯扎渡水体平均 WT 为 24.9 °C, DO 整体较高, 3 月、6 月和 9 月 DO 平均值为 9.03 mg · L⁻¹、8.36 mg · L⁻¹和 7.41 mg · L⁻¹。水体营养盐浓度较低, COD_{Mn} 平均值为 2.20 mg · L⁻¹, TN 平均值为 0.57 mg · L⁻¹, TP 平均值为 0.016 mg · L⁻¹。3 月、6 月和 9 月糯扎渡水体 Chl.a 质量浓度的平均值分别为 0.47 μg · L⁻¹、8.19 μg · L⁻¹和 10.46 μg · L⁻¹。景洪平均 WT 为 22.4 °C, 水体 DO 平均值为 7.18 mg · L⁻¹, 略低于糯扎渡。水体营养盐平均浓度均高于糯扎渡(COD_{Mn} 为 1.67 mg · L⁻¹, TN 为 0.94 mg · L⁻¹, TP 为 0.03 mg · L⁻¹)。此外, 3 月至 9 月景洪 Chl.a 质量浓度范围为 1.00~19.20 μg · L⁻¹, 平均值为 6.20 μg · L⁻¹, 同样高于糯扎渡。

糯扎渡水体中除 TN、TP 外, 其余环境因子时间分布上均有一定显著差异, 而景洪各环境因子时间分布上均有一定显著差异(附图 I)。9 月糯扎渡和景洪水体的 WT 和 pH 显著高于 3 月(P<0.05), 而 DO 显著低于 3 月; 6 月糯扎渡水体 COD_{Mn} 显著低于 3 月和 9 月, 而景洪 COD_{Mn} 则显著高于 3 月(P<0.05); 此外, 糯扎

渡和景洪水体 Chl.a 质量浓度均显著升高,而 TOC 质量浓度均显著降低.空间分布上糯扎渡坝下 TP 质量浓度显著高于坝前和上游,而景洪坝下 pH 显著小于坝前和上游($P < 0.05$).



相同字母代表区域之间环境因子不存在显著差异($p > 0.05$),不同字母代表区域之间环境因子存在显著差异($p < 0.05$).

图5 糯扎渡(Nzd)和景洪(Jh)水库各区域环境因子变化

Fig.5 Changes of environmental factors in various regions of Nuozhadu(Nzd) and Jinghong(Jh) reservoirs

根据 WQI 指数(表 2),糯扎渡水质类别为 II ~ III 类,其中坝下为 III 类水质,坝前和上游均为 II 类水质.此外,糯扎渡 TSIM 指数范围为 29.90~36.24,3 个区域水体均为中营养状态.景洪 3 个区域均为 III 类水质,略差于糯扎渡.此外,景洪 TSIM 指数范围为 25.89~35.52,坝下和坝前水体均为中营养状态,而上游水体为贫营养状态.

2.3 浮游动物群落与环境因子关系

根据 CCA 分析(图 6)可知,糯扎渡轴一、轴二的特征值为 0.247 和 0.211,显著影响浮游动物群落的环境因子为 Chl.a ($F = 3.1, P = 0.024$)和 TN ($F = 2.5, P = 0.034$).浮游动物优势种类中裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)与 TN 正相关,多突轮虫(*Asplanchnopus* sp.)与 Chl.a 呈正相关.景洪轴一、轴二的特征值为 0.347 和 0.136,显著影响浮游动物群落的环境因子为 WT ($F = 4.6, P = 0.002$)、TN ($F = 3.7, P = 0.008$)和

DO($F=3.1, P=0.026$).浮游动物优势种类中麻铃虫(*Leprotintinus* sp.)与 TN 为正相关,似铃壳虫(*Tintinnopsis* sp.)、无柄轮虫(*Ascomorpha* sp.)与 WT 为正相关,多肢轮虫(*Polyarthra* sp.)与 DO 为正相关.

表 2 糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库各断面水体类别和营养状态

Tab. 2 Water types and nutritional status of section Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) reservoirs

点位	WQI	TSIM	水质类别	水体营养状态	点位	WQI	TSIM	水质类别	水体营养状态
NZD-1	2.733 6	30.84	Ⅲ	中营养	JH-1	2.879 6	32.52	Ⅲ	中营养
NZD-2	2.425 2	29.90	Ⅲ	贫营养	JH-2	2.994 6	31.01	Ⅲ	中营养
NZD-3	2.000 2	35.10	Ⅱ	中营养	JH-3	2.889 0	30.33	Ⅲ	中营养
NZD-4	1.902 0	34.52	Ⅱ	中营养	JH-4	2.955 8	30.16	Ⅲ	中营养
NZD-5	1.995 3	34.55	Ⅱ	中营养	JH-5	2.865 1	31.24	Ⅲ	中营养
NZD-6	1.974 7	33.92	Ⅱ	中营养	JH-6	2.729 7	29.16	Ⅲ	贫营养
NZD-7	1.998 0	34.51	Ⅱ	中营养	JH-7	2.866 4	29.39	Ⅲ	贫营养
NZD-8	2.222 9	36.24	Ⅱ	中营养	JH-8	2.904 9	25.89	Ⅲ	贫营养
					JH-9	2.837 3	26.95	Ⅲ	贫营养

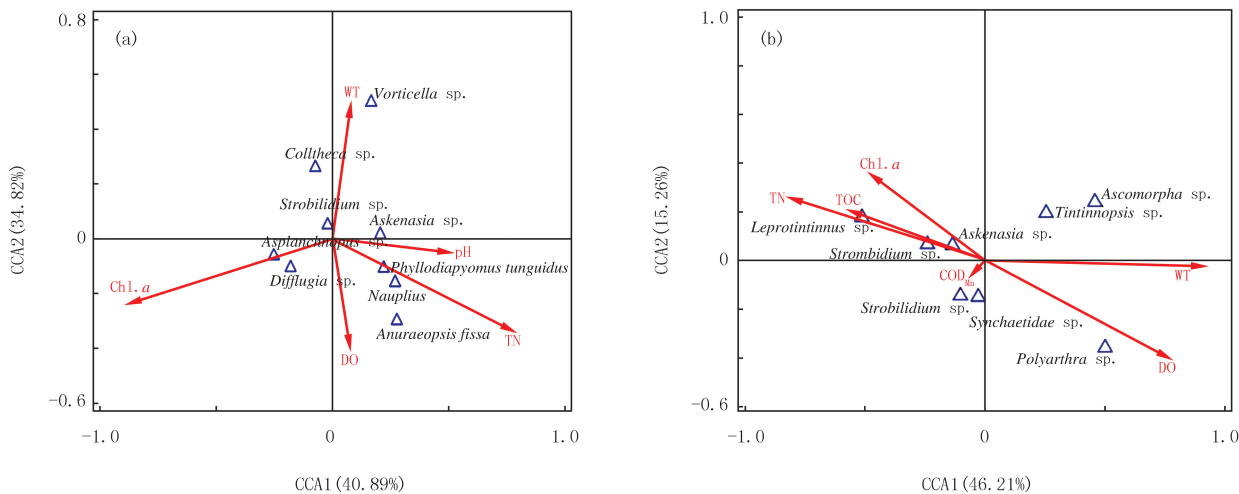


图6 糯扎渡(a)和景洪水库(b)浮游动物优势类群与环境因子的CCA分析

Fig. 6 CCA analysis of dominant zooplankton and environmental factors in Nuozhadu(a) and Jinghong reservoirs(b)

3 讨论

3.1 澜沧江下游梯级水库浮游动物群落特征及水质现状分析

2021 年糯扎渡和景洪水库浮游动物种类组成中原生动物和轮虫等小型浮游动物种类较多,且浮游动物密度和生物量随时间变化呈现显著增加趋势,与文献[16]对于小湾水库浮游动物研究结果相似,即轮虫这类小型浮游动物的种类和密度显著高于桡足类和枝角类,且呈现典型的季节变化.主要原因是原生动物和轮虫因食物来源广、繁殖周期短,更容易形成优势群体,而枝角类和桡足类随着种间竞争以及鱼类对捕食压力增加,具有较大波动[17].

本研究中景洪的浮游动物密度和生物量显著大于糯扎渡,这可能主要与水体径流量变化以及营养盐堆积有关.相关研究表明,流域面积越大,径流量越小[18].糯扎渡作为多年调节水库,库容远大于景洪;其次,景洪电站 2008 年投入生产,时间早于糯扎渡,小黑江、勐养河等支流受人为活动影响较大,水体营养盐和 Chl.a 质量浓度均高于糯扎渡.水体营养盐能促进浮游植物生长,而 Chl.a 质量浓度能直接反应浮游植物密度,浮游植物作为浮游动物(如轮虫、枝角类)的食物来源,是水生态系统中最不可或缺的生产者.因此景洪相对于糯扎渡,更适合浮游动物尤其是原生动物和轮虫的生长.

2015年FAN等^[19]指出梯级电站的建设会影响澜沧江浮游生物的生存以及水质。2020年,CONG等^[20]研究表明境外湄公河某些断面轮虫和桡足类等大型浮游动物密度高达 19 L^{-1} ,远远高于本研究的结果。同时根据PCoA结果可知,糯扎渡和景洪上游与坝前、坝下均具有明显差异,而坝前与坝下结果重合,差异较小;同时糯扎渡和景洪库区上游和坝前浮游动物密度和生物量远高于坝下,这些表明电站建设对浮游动物群落存在一定影响。

本研究中糯扎渡和景洪水质处于Ⅱ~Ⅲ类,主要原因是澜沧江梯级电站的建造改变了澜沧江干流水体的流速和流量,同时造成下游水体输沙量水质自然净化能力降低差。同时澜沧江下游梯级电站除景洪库区外其余水体均为中营养状态,浮游动物优势种中多肢轮虫属^[21]也为富营养水体指示种,因此要加强水质监测,防治水体富营养化出现。

3.2 澜沧江下游梯级水库浮游动物优势群落影响因素分析

浮游动物个体运动能力较弱,对环境变化敏感,群落结构的组成受到周围水环境的影响。根据CCA结果可知,澜沧江下游梯级水库浮游动物优势群落结构主要受Chl.a、WT、TN和DO影响。小湾水库同样作为多年调节水库,其浮游动物群落结构与WT、TP和Chl.a呈正相关,而与TN呈负相关。对于浮游动物群落组成而言,小湾水库优势种类群与景洪相似,主要是钟虫和无柄轮虫等小型浮游动物与WT显著相关。而糯扎渡除小型浮游动物外,桡足类舌状叶镖水蚤占据一定优势。

澜沧江下游梯级水库多种浮游动物优势种类均与WT、DO呈正相关。WT不但直接影响浮游动物的生长繁殖,还会通过改变浮游植物的群落结构,间接影响浮游动物的群落结构。夏季坝下区域WT低于坝上和上游,而冬季则高于坝上和上游^[22]。但是糯扎渡电站在进水口安装有三维数值模拟装置和叠梁门^[23],一定程度减轻了不同区域WT的差异,因而WT不是显著影响糯扎渡浮游动物群落结构的主要环境因子。此外,DO浓度的高低可直接表征浮游动物的生境状况,而且WT和水质营养状态改变,都会显著影响水体DO的浓度。整体而言,澜沧江下游梯级水库DO变化显著影响着浮游动物的群落结构。

对于原生动物而言,氮、磷等营养盐可以通过调节渗透和离子运输机制对浮游动物产生影响。此外,营养盐浓度可进一步反映水质营养状态。相关研究表明澜沧江下游TN与WT负相关,与DO和pH呈正相关,在分布空间上,坝前区域明显高于坝下和上游^[24-25],结果符合本研究对于3个区域浮游动物群落结构的分布特征。此外,景洪区域靠近边境,人为活动频繁,因此TN变化更易受人为活动影响,更应加强澜沧江下游各梯级水库水生态监测,减轻人为影响,预防浮游动物种类组成向单一化、小型化的趋势发展。

附 录

附表 I ~ III 及附图 I 见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.06.016)。

参 考 文 献

- [1] 吴洪石.澜沧江下游水库生态-发电多目标优化调度研究[D].西安:西安理工大学,2019.
WU H S.Research on eco-power generation multi-objective optimal operation of reservoirs in the lower reaches of Lancang River[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2019.
- [2] 钟华平,刘恒,耿雷华.澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应[J].水利学报,2007,38(S1):577-581.
ZHONG H P,LIU H,GENG L H.Cumulative effects of Lancang River Basin cascade hydropower development on ecology and environment[J].Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(S1):577-581.
- [3] 杨云源,彭海英,陈瑞,等.基于CSPI的云南省1961—2016年六大流域季节干旱差异分析[J].灌溉排水学报,2022,41(8):130-138.
YANG Y Y,PENG H Y,CHEN R,et al.Seasonal droughts from 1961 to 2016 in the six basins across Yunnan Province[J].Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(8):130-138.
- [4] 夏品华,马健荣,李存雄,等.红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J].环境科学研究,2011,24(4):378-386.
XIA P H,MA J R,LI C X,et al.Canonical correspondence analysis between the plankton community and environmental factors in Hongfeng Lake reservoir in winter and spring[J].Research of Environmental Sciences,2011,24(4):378-386.
- [5] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等.武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):135-142.
SONG G F,ZHU Y X,MI W J,et al.Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(3):135-142.

- [6] 冯嘉.实现景洪水电站发电与下游航运双赢的措施和建议[J].云南水力发电,2010,26(4):107-108.
FENG J.Measures and proposals for implementation of two-win of power generation and downstream navigation of Jinghong hydropower project[J].Yunnan Water Power,2010,26(4):107-108.
- [7] 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.
- [8] 王家楫.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1961.
- [9] 中国科学院中国动物志编辑委员会.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,1979.
- [10] 中国科学院中国动物志编辑委员会.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,1979.
- [11] 沈韞芬.原生动物学[M].北京:科学出版社,1999.
- [12] 赵文.水生生物学[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [13] 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].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 胡成,苏丹.综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J].生态环境学报,2011,20(1):186-192.
HU C,SU D.Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River[J].Ecology and Environmental Sciences,2011,20(1):186-192.
- [15] 赖江山.生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍[J].生物多样性,2013,21(6):765-768.
LAI J S.Canoco 5;a new version of an ecological multivariate data ordination program[J].Biodiversity Science,2013,21(6):765-768.
- [16] WU X D,HE D M,YANG G J,et al.Seasonal variability of water quality and metazooplankton community structure in Xiaowan Reservoir of the upper Mekong River[J].Journal of Limnology,2014,73(1):167-176.
- [17] 彭久赞,王丽卿,王奕君,等.鱼类视觉胁迫与利它素对大型溞生长繁殖的影响[J].上海海洋大学学报,2022,31(1):97-106.
PENG J Z,WANG L Q,WANG Y J,et al.Effects of fish visual stress and kairomone on the growth and reproduction of *Daphnia magna* [J].Journal of Shanghai Ocean University,2022,31(1):97-106.
- [18] 李海川,王国庆,郝振纯,等.澜沧江流域水文气象要素变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):21-27.
LI H C,WANG G Q,HAO Z C,et al.Characteristics analysis of hydrometeorological elements in Lancang River Basin[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2017,28(4):21-27.
- [19] FAN H,HE D M,WANG H L.Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River:a review[J].Earth-Science Reviews,2015,146:77-91.
- [20] CONG T N,VILS G A,QUINTANT X D,et al.Effects of salinity on species composition of zooplankton on Hau River,Mekong Delta,Vietnam[J].Annales de Limnologie-International Journal of Limnology,2020,56:20.
- [21] 查睿.城市景观河道浮游生物群落结构特征研究[D].武汉:湖北大学,2015.
ZHA R.Study on the characteristics of plankton community structure in urban landscape river channels[D].Wuhan:Hubei University,2015.
- [22] 毕晓静.糯扎渡水库 WT 变化模拟研究[D].昆明:云南大学,2019.
BI X J.Simulation study on water temperature change in Nuozhadu Reservoir[D].Kunming:Yunnan University,2019.
- [23] 李坤,曹晓红,温静雅,等.糯扎渡水电站叠梁门试运行期实测水温与数值模拟水温对比分析[J].水利水电技术,2017,48(11):156-162.
LI K,CAO X H,WEN J Y,et al.Comparative analysis between numerically simulated water temperature and measured water temperature during commissioning of stoplog gate for Nuozhadu Hydropower Station[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(11):156-162.
- [24] 鲁洪均.澜沧江下游表层沉积物碳氮磷的时空分布特征及其污染评价[D].昆明:云南大学,2019.
LU H J.Spatial and temporal distribution of carbon,nitrogen and phosphorus in surface sediments of the lower reaches of Lancang River and its pollution assessment[D].Kunming:Yunnan University,2019.
- [25] 唐咏春.梯级水库建设对澜沧江水体典型氮素来源影响研究[D].宜昌:三峡大学,2019.
TANG Y C.Effects of cascade reservoir construction on typical nitrogen sources in Lancang River[D].Yichang:China Three Gorges University,2019.

Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in cascade reservoirs in the lower reaches of the Lancang River

Lei Qi¹, Bao Yufei², Tan Qingjun³, Xu Yuanzhao¹, Gong Bin³,
Jian Yunzhong³, Jin Lei¹, Xiong Danni¹, Li Tiancui¹

- (1. Yangtze River Basin Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecological Environment, Wuhan 430010, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: The Lancang River is a famous river in the world. It is also one of the 13 hydropower bases. In order to under-

stand the impact of cascade power station on downstream water ecology in this region, Nuozhadu and Jinghong reservoirs in the lower reaches of Lancang River have been investigated in March, June and September 2021, and water quality composite index (WQI), principal coordinate analysis(PCoA) and canonical correspondence analysis(CCA) were used to study the zooplankton community characteristics and the relationship between environmental factors in the cascaded reservoirs in the lower reaches of Lancang River. The results showed that the water quality of Nuozhadu and Jinghong reservoirs was class II to III, and the water nutrition state was poor to medium nutrition. Zooplankton density composition was dominated by protozoa and rotifers, while biomass composition was dominated by copepods and rotifers. The zooplankton composition in the upper reaches of Nuozhadu and Jinghong Reservoir was significantly different from that under and in front of the dam. TN and Chl.*a* were the environmental factors that significantly affected the zooplankton community in Nuozhadu Reservoir, and WT, TN and DO in Jinghong Reservoir.

Keywords: Lancang River; cascade reservoirs; zooplankton; environmental factors

[责任编辑 刘洋 杨浦]

(上接第 127 页)

A new-record species of genus *Saurogobio* in Henan Province—*Saurogobio gymnocheilus*

Zhou Chuanjiang, Ding Qiqi, Li Juyan, Tang Yongtao, Liu Ruyao, Nie Guoxing

(College of Fisheries; College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: From 2012 to 2021, the fish resources survey team of Henan Province conducted a comprehensive and systematic survey of fish resources in our province. During the preparation of the specimens, it was found that the some specimens of genus *Saurogobio* collected in the Yellow River and Huaihe River were significantly different in morphology from *Saurogobio dabryi* and *Saurogobio dumerili* previously recorded in Henan, and should be different species. In this study, the morphological and molecular systematic methods were used to identify them. It was found that the lip of *Saurogobio* species need to be identified in Henan Province was thin, simple and underdeveloped, and there were no obvious papillae on the upper and lower lips. Other measurable and countable characters were also completely consistent with the *Saurogobio gymnocheilus*. In addition, the molecular phylogenetic analysis based on the *Cyt b* gene also showed the closest relationship between the specimen and *Saurogobio gymnocheilus* in the Yangtze River, with a genetic distance of only 0.9%, which supports the morphological identification result. Therefore, it is determined that the specimen is *Saurogobio gymnocheilus*, which is a new-record species in Henan Province and the first record of its distribution in the Yellow River and Huaihe River(the previous record was only distributed in the middle and upper reaches of the Yangtze River).

Keywords: *Saurogobio gymnocheilus*; Henan Province; morphology; molecular phylogeny

[责任编辑 刘洋 杨浦]

附表 I 澜沧江下游糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库采样点名称

Attached tab. I Names of sampling points in the reservoirs of Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) of the Lancang River

区域名称	点位名称	采样断面名称	区域名称	点位名称	采样断面名称
糯扎渡坝下	NZD-1	糯扎渡尾水 1	景洪坝下	JH-1	景洪尾水 1
	NZD-2	糯扎渡尾水 2		JH-2	景洪尾水 2
糯扎渡坝前	NZD-3	糯扎渡坝前左岸	景洪坝前	JH-3	景洪坝前左岸
	NZD-4	糯扎渡坝前(中)		JH-4	景洪坝前(拦污漂)
	NZD-5	糯扎渡坝前右岸		JH-5	景洪坝前(升船机)
糯扎渡上游	NZD-6	黑河回水区	景洪上游	JH-6	景洪码头
	NZD-7	左岸小黑江回水区		JH-7	曼点河汇入区
	NZD-8	迁德码头		JH-8	勐养河汇入下游
				JH-9	勐养河汇入区

附表 II 糯扎渡和景洪浮游动物密度和生物量季节性变化

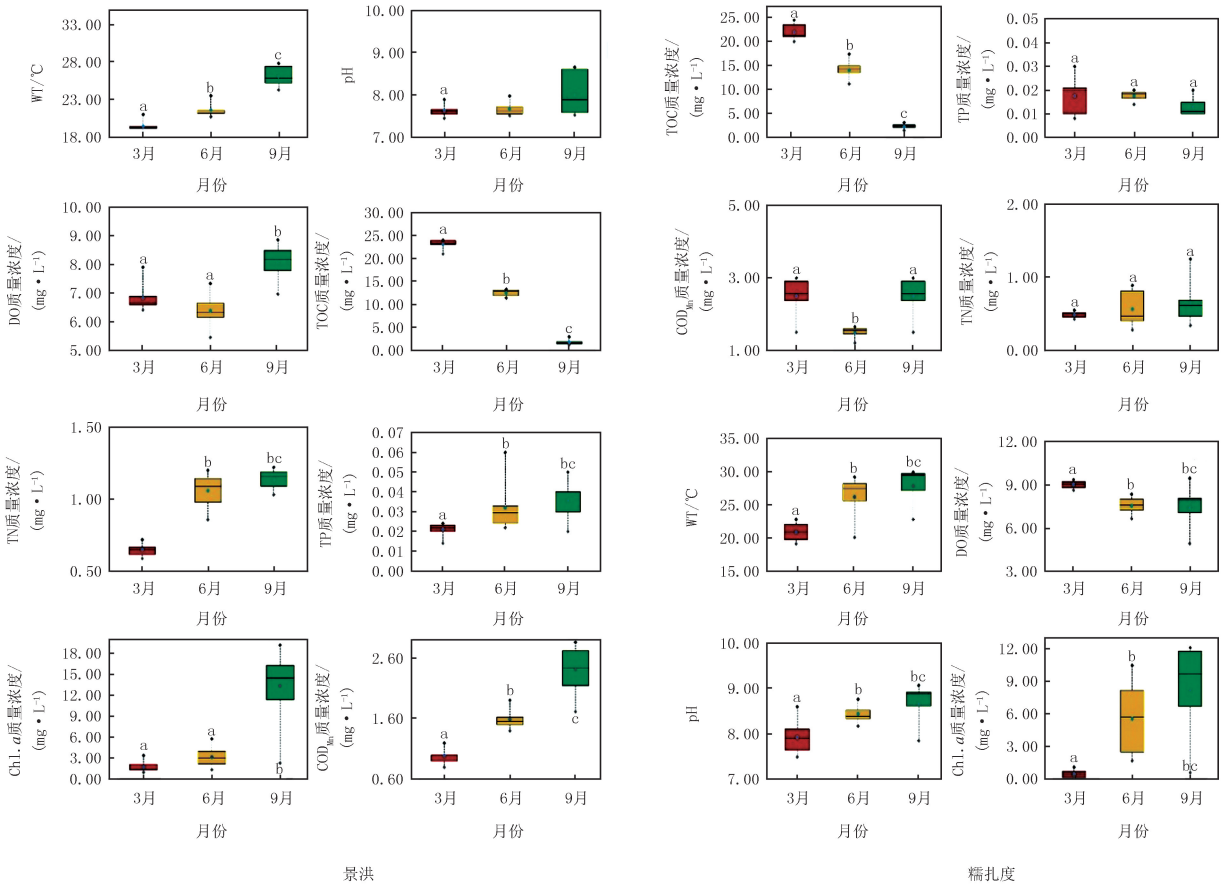
Attached tab. II Seasonal changes of zooplankton density and biomass in Nuozhadu(NZD) and Jinghong reservoirs(JH)

季节	类群	密度/(L ⁻¹)						生物量/(mg·L ⁻¹)					
		NZD		NZD		JH		NZD		NZD		JH	
		坝下	坝前	上游	坝下	坝前	上游	坝下	坝前	上游	坝下	坝前	上游
3月	原生动物 Protozoa	174.83	390.89	463.16	67.63	25.54	41.44	0.024 5	0.054 7	0.064 8	0.009 5	0.003 6	0.005 8
	轮虫 Rotifera	0.00	28.95	14.47	21.06	12.63	46.45	0.000 0	0.139 4	0.069 7	0.101 4	0.060 8	0.223 6
	枝角类 Cladocera	0.73	0.67	1.08	0.12	0.15	0.12	0.025 5	0.023 4	0.038 1	0.004 2	0.005 3	0.004 1
	桡足类 Copepoda	2.20	10.32	9.62	0.30	0.61	0.44	0.197 5	0.926 0	0.863 1	0.026 9	0.055 0	0.039 5
	浮游动物 Zooplankton	177.76	430.82	488.33	89.11	38.94	88.46	0.247 4	1.143 5	1.035 8	0.142 0	0.124 7	0.273 1
6月	原生动物 Protozoa	112.32	365.50	522.94	503.31	35.42	119.30	0.015 7	0.051 2	0.073 2	0.070 5	0.005 0	0.016 7
	轮虫 Rotifera	6.62	167.43	128.54	119.21	28.89	66.27	0.033 1	0.837 1	0.642 7	0.596 0	0.139 1	0.331 4
	枝角类 Cladocera	0.76	0.03	0.08	0.22	0.06	6.08	0.002 7	0.000 1	0.000 3	0.000 8	0.002 1	0.016 5
	桡足类 Copepoda	3.14	0.33	15.57	1.09	0.50	3.92	0.279 5	0.029 1	1.385 7	0.097 0	0.044 9	0.348 8
	浮游动物 Zooplankton	122.84	533.28	667.13	623.83	64.87	195.56	0.331 0	0.917 5	2.101 9	0.764 3	0.191 0	0.713 3
9月	原生动物 Protozoa	111.84	659.21	1 344.74	1 980.00	5 904.82	5 398.11	0.015 7	0.092 3	0.188 3	0.277 2	0.826 7	0.755 7
	轮虫 Rotifera	16.45	197.37	325.44	278.29	2 175.00	1 143.67	0.082 2	0.986 8	1.627 2	1.391 4	10.875 0	5.718 3
	枝角类 Cladocera	0.03	0.03	0.07	0.00	0.06	0.02	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.000 2	0.000 1
	桡足类 Copepoda	0.65	0.53	1.38	0.28	0.92	0.28	0.057 9	0.047 5	0.122 8	0.025 2	0.082 1	0.025 2
	浮游动物 Zooplankton	128.97	857.14	1 671.62	2 258.57	8 080.80	6 542.08	0.155 8	1.126 7	1.938 5	1.693 9	11.783 9	6.499 3

附表 III 糯扎渡(NZD)和景洪(JH)水库浮游动物多样性指数

Attached tab. III Zooplankton diversity index of Nuozhadu(NZD) and Jinghong(JH) reservoirs

	NZD 坝下	NZD 坝前	NZD 上游	JH 坝下	JH 坝前	JH 上游
Shannon-Wiener 平均值	1.42±0.21	1.50±0.04	1.60±0.15	1.26±0.19	1.29±0.24	1.64±0.11
Margalef 平均值	2.35±0.12	1.73±0.06	2.22±0.13	1.82±0.16	1.72±0.18	2.11±0.19



相同字母代表区域之间环境因子不存在显著差异 ($p > 0.05$), 不同字母代表区域之间环境因子存在显著差异 ($p < 0.05$).

附图 I 糯扎度和景洪水体环境因子季节性变化

Attached fig. I Seasonal variation of water environmental factors in Nuozhadu (NZD) and Jinghong reservoirs (JH)