

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.010

梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响

许 栋¹, 张博曦¹, 及春宁¹, 王旭涛², 李龙兵³

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2. 珠江流域水环境监测中心, 广东 广州 510611;
3. 海南省水文水资源勘测局, 海南 海口 570203)

摘要:为探讨梯级水库影响下河流底栖动物种群在河流丰枯水期的沿程变化规律, 通过对丰水期(8月)和枯水期(1月)采样处理和计量鉴定, 对我国大型热带河流——海南南渡江干流的底栖动物的生物量、丰度、多样性、均匀度在丰枯水期的沿程变化进行了分析。结果表明: 丰枯水期共检测出底栖动物2门4纲22种, 各物种丰度在0~236个/m²之间, 生物量在0.27~31.5 g/m²之间; 底栖动物种群结构沿程变化受梯级水库建设影响较大; 丰、枯水量变化对底栖动物群落影响显著, 受枯水期水库蓄水大幅度改变水流连通性影响, 枯水期底栖动物种类沿程变化幅度大于丰水期; 与温带河流不同, 南渡江干流大多数底栖动物种类在冬季仍能较好繁殖, 枯水期底栖动物丰度和生物量均大于丰水期。

关键词:底栖动物; 梯级水库; 丰水期; 枯水期; 丰度; 生物量; 沿程变化; 南渡江

中图分类号: TV147; Q179.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2019)02-0060-07

Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nandujiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs // XU Dong¹, ZHANG Boxi¹, JI Chunling¹, WANG Xutao², LI Longbing³ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Monitoring Centre of Pearl River Valley Aquatic Environment, Guangzhou 510611, China; 3. Bureau for Hydrology and Water Resource Survey of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: In order to investigate the streamwise variation of zoobenthos communities along the river in wet and dry seasons under the influence of cascade reservoirs, sampling processing and metrological identification were carried out in wet season (August) and dry season (January) along Nandujiang River in Hainan Province, which is a large tropic river in China. The biomass, abundance, diversity and uniformity of zoobenthos were analyzed. The results show that there are 22 species of zoobenthos in 4 classes, 2 phyla in wet and dry seasons. The abundance of each species ranges from 0 to 236 ind/m², and the biomass ranges from 0.27 g/m² to 31.5 g/m². The streamwise variation of zoobenthos communities along main stream of Nandujiang River is greatly influenced by the cascade hydropower constructions. Water discharges in wet and dry seasons have significant influence on zoobenthos communities. Influenced by the water storage in reservoirs and the corresponding change of hydraulic connectivity during the dry season, the streamwise variation amplitude of zoobenthos in dry season is larger than that in wet season. Unlike temperate rivers, most of the zoobenthos in the main stream of Nandujiang River can reproduce well in winter, and the abundance and biomass of zoobenthos in dry season are larger than those in wet season.

Key words: zoobenthos; cascade reservoirs; wet season; dry season; abundance; biomass; streamwise variation; Nandujiang River

河流既是水沙通道,也是水生生物栖息生境,河流的生态保护正受到越来越多的关注^[1]。大型河流自发源地起流经上、中、下游,河流特征(坡降、流量、河型等)沿程变化,水生生物群落也相应呈现沿程变化特征^[2-4]。除自然条件外,水生生物群落的沿

程变化受人类活动的影响程度也不容忽视,例如河流梯级开发、河道采砂以及水体污染等^[5-6]。大型河流生态保护及修复应充分考虑生物群落沿程变化^[7]。底栖动物被认为是受水坝运行影响最为敏感的生物种群之一^[8-10],也是水生生态系统退化和

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFC0407505)

作者简介:许栋(1980—),男,副教授,博士,主要从事河流动力学研究。E-mail: xudong@tju.edu.cn

生境条件改变的重要指示生物^[11-13],底栖动物群落组成及分布作为河流水生态健康指标,受到广泛关注^[14-15]。对底栖动物的研究目前主要集中在底栖动物多样性分布特征及其影响因子方面,例如大型藻类、潮汐、氧含量、磷浓度、高程及季节变化等对底栖动物群落的影响^[16-19]。目前对大型河流底栖动物沿程变化的调查研究仍较少,且受地理位置影响,我国对底栖动物的研究多集中在温带河流^[6, 8-10],对热带河流调查研究较少。海南省南渡江是一条大型热带河流,本文通过南渡江上、中、下游河段底栖动物群落的监测数据,分析底栖动物群落的沿程变化,探讨梯级水库建设后的生境变化原因。

1 研究方法

1.1 监测站点设置

南渡江是海南省第一大河流,干流长 334 km,多年平均流量 225 m³/s。松涛水库坝址以上为上游,松涛水库坝址至金江电站为中游,金江电站以下为

下游。作为一条大型热带河流,南渡江具有丰富的水量、阳光和热能,年平均气温 23.5℃,四季界线不明显。河流水资源丰富,水生态环境健康具有良好基础。监测站点沿南渡江干流上、中、下游布置。综合考虑河流特性及水利工程情况,沿程共设置 10 个监测站点:上游段设福才、南丰站,其中南丰站设在松涛水库中;中游段设九龙、金江站,其中九龙站位于九龙滩电站与谷石滩电站之间,金江站位于金江电站上游段附近;下游段设永发、安定、龙塘、南渡江大桥、龙塘和流水坡站,其中永发站设在距龙塘坝较远的上游河道内,龙塘站设在龙塘坝下游附近,流水坡站位于河口段,各监测站点位置如图 1 所示。分别于 2014 年 8 月 1—5 日(丰水期)与 2015 年 1 月 21—26 日(枯水期)对底栖动物采样,控制站点龙塘站枯水期流量为 77.4 m³/s,丰水期为 269.0 m³/s。

各监测站点的河岸带基本情况调查结果见表 1,表中植被覆盖度、河岸基质、坡脚冲刷强度和底质由目测估计,其他由手持设备测量获得。监测

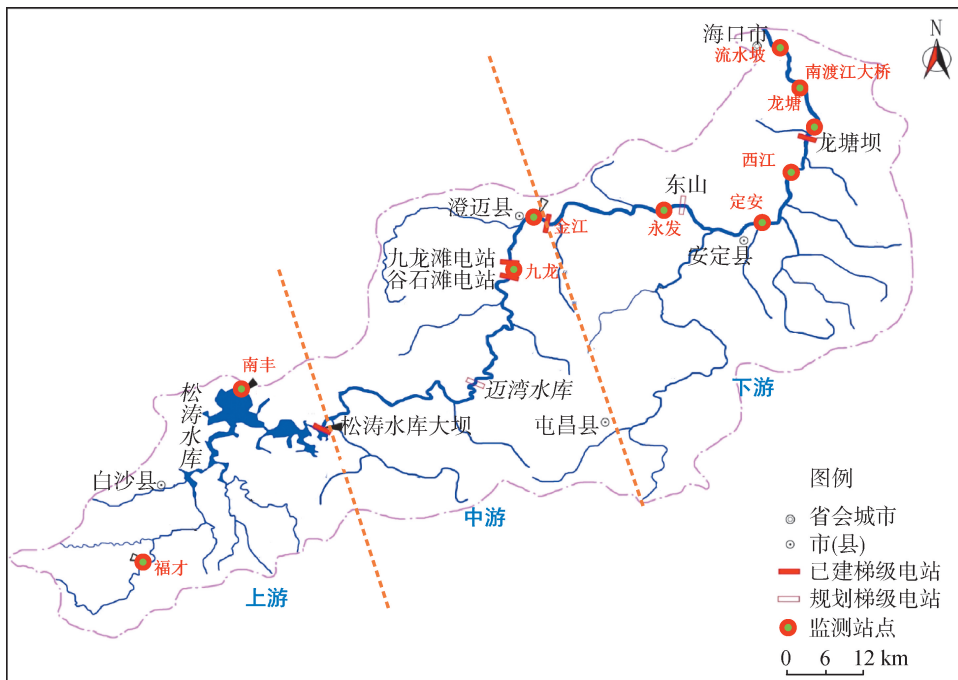


图 1 南渡江干流底栖动物监测站点设置

表 1 南渡江干流底栖动物监测站点河岸带基本情况

监测站点	斜坡倾角/(°)	植被覆盖度/%	河岸基质	坡脚冲刷强度	水深/m	流速/(m·s ⁻¹)	河宽/m	底质
福才	15	0.75	无黏性沙	无冲刷迹象	0.80	1.0	15.5	卵石
南丰	15	0	无黏性沙	轻度冲刷	0.50	0.1		沙
九龙	15	0.75	基岩	无冲刷迹象	1.00	0.1	170.0	砾石
金江	50	0	基岩(固化)	无冲刷迹象	2.55	2.7	371.0	沙
永发	15	0	无黏性沙	重度冲刷	1.50	1.2	213.0	沙
安定	45	0.25	无黏性沙	无冲刷迹象	0.50	0.2	160.0	沙
西江	45	0.50	黏土	中度冲刷	1.25	0.2	195.0	泥
龙塘	45	0	黏土	重度冲刷	1.50	0.2	228.0	石块
南渡江大桥	15	0.75	黏土	轻度冲刷	10.00	0.2	1200.0	泥、沙
流水坡	15	0	无黏性沙	中度冲刷	1.70	0.7	423.0	沙

站点水温丰水期为 25 ~ 29℃, 枯水期为 19 ~ 24℃。

1.2 底栖动物样本采集与计量鉴定

底栖动物采集包括定性采集和定量采集。定量采集依据断面长度布设采样点, 用 Petersen 氏底泥采集器采集定量样品, 每个采样点采泥样 2 个或 3 个。定性采集分类别进行, 软体动物定性样品用 D 形踢网(kick-net)采集, 水生昆虫定性样品采集同定量样品。对砾石底质, 捞取砾石后用 60 目筛绢网筛选或直接翻起石块在水流下方用筛绢网捞取。

样品处理包括洗涤、分拣与保存。分拣采用 40 目分样筛筛选, 拣出大型动物, 残余杂物在白色解剖盘中用细吸管、尖嘴镊、解剖针分拣。软体动物用 5% 甲醛或 75% 乙醇溶液保存; 水生昆虫用 5% 甲醛溶液固定, 75% 乙醇保存。

底栖动物计量包括丰度及生物量计量。丰度按种类计数; 生物量采用质量计量, 其中软体动物使用电子秤, 水生昆虫使用扭力天平。软体动物鉴定到种, 水生昆虫鉴定到科, 摇蚊幼虫鉴定到属。

底栖动物优势种类采用相对重要性指数确定, 按下式计算:

$$C_{IRI} = (B + D)F \quad (1)$$

式中: C_{IRI} 为相对重要性指数; B 为相对生物量, 即某一物种的生物量占底栖动物总生物量的百分比; D 为相对丰度, 即某一物种丰度占底栖动物总丰度的百分比; F 为该物种出现的频率。

底栖动物多样性采用 Shannon-Wiener 指数 H 表征, 计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (2)$$

其中

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

式中: P_i 为第 i 种底栖动物的个体数占总个体数的比例; n_i 为第 i 种底栖动物的个体数; N 为总个体数。

生物均匀度指数 J 采用 Pielou 指数, 即

$$J = \frac{H}{H_{\max}} \quad (3)$$

式中 H_{\max} 为最大可能 Shannon-Wiener 指数。

2 底栖动物水质生境

水质环境是底栖动物的重要生境^[4-6], 本文对监测站点丰水期和枯水期水质采样化验, 典型水质指标包括溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、浊度、总磷(TP)、总氮(TN)及五日生化需氧量(BOD₅), 见表 2。显著度计算结果表明, 除总磷含量存在显著差异外, 其余指标在各监测站点均不存在显著差异。

根据各监测站点水质条件, 运用 Primer 5.28 软件进行 Bray-Curtis 相似性聚类分析, 结果见图 2。在 80% 相似性水平上, 将监测站点分为 4 个典型生境: 生境 A 包含龙塘、安定、永发、西江站, 受下游段龙塘坝影响; 生境 B 中南丰、福才站位于松涛水库大坝上游, 受梯级水库影响小, 流水坡站受河口影响大; 生境 C 为南渡江大桥站, 由于距入海口较近, 生境与其他监测站点差异稍大; 生境 D 包含金江、九龙站, 受中游段九龙滩、谷石滩电站及金江电站影响。整体来看, 各监测站点水质情况存在较高的相

表 2 南渡江干流底栖动物监测站点典型水质指标

监测站点	季节	$\rho(\text{DO}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{BOD}_5) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/NTU	$\rho(\text{TN}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
福 才	丰水期	6.74	1.62	0.45	2.20	0.43	0.16
	枯水期	6.65	0.93	0.72	1.80	0.43	0.21
南 丰	丰水期	5.22	2.03	0.30	3.82	0.23	0.11
	枯水期	6.87	1.51	0.05	3.00	0.72	0.24
九 龙	丰水期	5.49	2.09	0.72	8.43	0.43	0.21
	枯水期	6.21	1.72	0.90	5.79	4.23	0.31
金 江	丰水期	6.31	2.39	0.72	98.07	14.81	0.52
	枯水期	6.46	1.72	2.69	11.78	3.02	0.40
永 发	丰水期	6.45	2.11	0.65	284.12	1.72	1.34
	枯水期	5.89	1.42	0.38	128.43	5.12	0.72
安 定	丰水期	0.02	3.02	0.61	0.51	0.02	0.00
	枯水期	6.91	1.21	1.43	107.26	3.02	0.09
西 江	丰水期	0.01	2.52	0.66	0.33	0.02	0.00
	枯水期	6.82	1.51	0.09	60.72	4.22	0.33
龙 塘	丰水期	6.11	2.63	0.56	151.24	1.12	0.56
	枯水期	5.93	1.42	1.20	86.28	2.82	0.65
南渡江大桥	丰水期	6.75	3.32	1.18	53.66	0.12	0.21
	枯水期	6.87	2.41	0.74	4.79	0.72	0.19
流水坡	丰水期	6.40	2.82	1.63	9.97	0.12	0.08
	枯水期	7.91	4.33	0.00	1.80	1.22	0.23

似性,从水环境方面为底栖动物提供了较一致的生态环境条件。

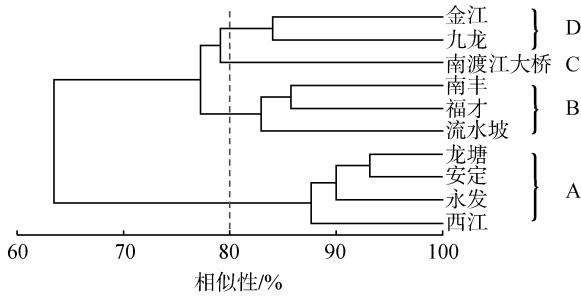


图2 基于水质条件的监测站点 Bray-Curtis 相似性聚类分析

3 底栖动物监测结果与分析

南渡江干流丰枯水期两期生物监测共检出底栖

动物 2 门 4 纲 22 种(表 3),其中软体动物门双壳纲 1 种,占 4.2%;腹足纲 7 种,占 30.4%;节肢动物门软甲纲 4 种,占 17.4%;昆虫纲 10 种,占 45.5%。在优势种方面,丰水期绝大部分腹足纲及软甲纲底栖动物均为优势种,且腹足纲底栖动物种类在优势种中数量占极大优势;枯水期腹足纲的淡水壳菜、放逸短沟蜷及软甲纲的钩虾为优势种。

底栖动物各生物指标丰枯水期沿程变化见表 4。

a. 生物种类。南渡江干流区域底栖动物种类整体较少,部分监测站点未采集到底栖动物。在季节变化方面,枯水期(1 月)底栖动物种类 16 种,丰水期(8 月)12 种,枯水期多于丰水期,尤其是昆虫纲,从丰水期 3 种增加至 7 种,其中适应溪流环境的昆虫纲种类 6 种,以摇蚊及蜉属类底栖动物为主。在沿程变化方面,底栖动物种类的沿程分布整体很

表 3 底栖动物丰度、生物量及相对重要指数

纲	科(属、种)	丰度/(个·m ⁻²)		生物量/(g·m ⁻²)		相对重要性指数	
		丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
双壳纲	河 蚬	1	6	2.13	5.46	0.004	0.007
	淡水壳菜	32	100	5.28	7.38	0.034	0.057
	放逸短沟蜷	12	18	14.68	10.40	0.032	0.017
	梨形环棱螺	9		3.40		0.025	
腹足纲	奥莱彩螺	21		12.33		0.036	
	斜粒粒蜷	24	1	3.40	0.32	0.024	0.000
	田 螺	7	1	8.56	0.07	0.019	0.000
	蜒 螺		1		1.81		0.001
软甲纲	匙指虾科	9	7	5.59	6.49	0.063	0.008
	长臂虾科	4		9.55		0.036	
	钩 虾		231		231.00		0.141
	束腰蟹属		2		3.32		0.002
昆虫纲	纹石蛾科	1		0.03		0.001	
	麻 虻 属	1				0.001	
	蠓亚科若虫	5		0.02		0.004	
	摇蚊幼虫		5		5.00		0.003
	虻 科		1		1.00		0.001
	鹬 虻 科		1		1.00		0.001
	宽基蜉属		1		1.00		0.001
	扁 蜉 属		3		3.00		0.002
河花蜉属		6		6.00		0.004	
晏 蜓 科		1		1.00		0.001	

表 4 底栖动物生物指标丰枯水期沿程变化

监测站点	种类/种		丰度/(个·m ⁻²)		生物量/(g·m ⁻²)		Shannon-Wiener 指数		均匀度指数	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
福 才	3	7	8	25	9.82	25.75	0.97	1.83	0.89	0.88
南 丰	0	1	0	4	—	4.00	—	—	—	—
九 龙	4	4	59	24	31.50	8.87	1.18	1.19	0.85	0.86
金 江	2	0	2	0	2.95	—	0.69	—	1.00	—
永 发	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
安 定	4	0	8	0	4.70	—	1.07	—	0.77	—
西 江	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
龙 塘	2	2	4	96	0.27	10.43	0.56	0.17	0.81	0.25
南渡江大桥	2	6	45	236	15.73	235.20	0.69	0.14	1.00	0.08
流水坡	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—

不均匀,福才站底栖动物最多,丰枯水期两次采样合计达 10 种,其中枯水期适应溪流环境的 6 种昆虫均出现在福才测站;九龙及南渡江大桥站次之;南丰站仅在枯水期监测到 1 种底栖动物。丰水期底栖动物沿程分布较枯水期均匀。

b. 丰度。南渡江干流区域底栖动物丰度整体在 0~236 个/m²之间。季节变化方面,枯水期总丰度达 385 个/m²,软甲纲丰度(其中钩虾占软甲纲生物的 96%)占比最大,达 62%,腹足纲(特别是淡水壳菜)次之,达 31.4%;丰水期总丰度达 126 个/m²,其中腹足纲丰度占比最大,达 83.3%;整体而言,枯水期丰度远大于丰水期丰度,且枯水期软甲纲生物大幅增加。沿程变化方面,底栖动物丰度沿程变化相比门类更加不均匀,在检出底栖动物的监测站点中,金江站丰度最低,仅 1 个/m²;南渡江大桥站所在河段最高,达 281 个/m²,其中钩虾丰度占比最高,达 82.2%。

c. 生物量。南渡江干流区域底栖动物生物量整体在 0.27~31.5 g/m²之间。季节变化方面,枯水期各监测站点合计总生物量达 284.25 g/m²,软甲纲生物量占比最大,达 84.7%,其中软甲纲以钩虾为主,占 96%;丰水期总生物量合计达 64.97 g/m²,其中腹足纲生物量占比最大,达 73.3%;整体而言,枯水期生物量远大于丰水期,且枯水期软甲纲生物量大幅增加。沿程变化方面,底栖动物生物量沿程变化不均匀,变化趋势与丰度相近,在检出底栖动物的监测站点中,软体动物腹足纲和节肢动物软甲纲在各个监测站点优势度较高,其中南渡江大桥站附近河段的生物量最大,达 235.20 g/m²。

d. 物种多样性及均匀度。除个别监测站点种类数极少而无法计算多样性和均匀度指数外,丰水期各监测站点物种多样性及均匀度方面沿程变化不大,Shannon-Wiener 指数在 0.69~1.18 之间,均匀度在 0.77~1.0 之间;枯水期物种多样性及均匀度沿程变化明显,呈递减趋势,上游监测站点 Shannon-Wiener 指数平均为 1.83,中游平均为 1.19,下游平均为 0.16。

4 底栖动物群落沿程变化影响因素

底栖动物群落的种群数量和生物量在同一条河流上下游发生沿程变化的影响因素众多,包括河流自然条件以及人类活动影响等。就自然条件而言,河流的水流动力条件以及生态系统经长期自然演变和自调整,在没有人类活动影响下,水生态系统一般处于较健康的自然状态,且沿程变化一般为渐变状态^[12-13];随着人类活动范围不断扩大和工程建设能

力不断增强,人类活动对于河流流速、水深、水温、水质等生物生境因子的改变强度越来越大,生态扰动日益增多,对河流底栖动物群落结构造成较大影响,主要体现在以下几个方面:

a. 梯级水库的建设极大地减小了库区水流流速,为适应静水环境的底栖动物生存提供了有利条件。上游福才、南丰站生境类似,但福才站距松涛水库较远,流速可达 1 m/s,底栖动物群落以河流型底栖动物为主,枯水期适应溪流环境的昆虫纲达 6 种;松涛水库大坝建成后,松涛水库内南丰站流速仅 0.1 m/s,河流型底栖动物消失,适应静水的软甲纲底栖动物占主导,与简东等^[20]得到的红水河干流梯级水库建设导致底栖动物种群结构由急流型向静水、缓流型转化的结论一致。中游段九龙站受九龙滩电站及谷石滩电站影响,流速为 0.1 m/s,丰水期河流型底栖动物均为腹足纲生物,枯水期腹足纲生物丰度亦占总丰度的 79%。因此梯级水库建设使得库区内的原生河道生境转变为接近静水区,导致适应静水环境的腹足纲底栖动物大量繁殖,在南渡江干流大部分站点形成种群优势。李晋鹏等^[21]研究发现,漫湾库区梯级水库建设导致底栖动物优势种组成逐渐由寡毛纲和昆虫纲演变为软体动物,与本文监测结果一致。

b. 梯级水库的建设对底栖动物的季节性演变有较大影响。以龙塘站为例,冬季枯水期,水库长期蓄水,坝体上下游库区水体均滞留时间长,快繁底栖动物成为优势种群,如淡水壳菜丰度从丰水期(8月)32 个/m²快速上升至枯水期(1月)100 个/m²。这是因为一方面枯水期为淡水壳菜繁殖旺季,另一方面,龙塘站位于龙塘坝下游,冬季该监测站点为典型的低流速水体环境,且南渡江干流冬季水温在 19~24℃之间,适合淡水壳菜生存,因此淡水壳菜在枯水期大量繁殖。

c. 梯级水库的建设导致底栖动物沿程分布不均匀。由监测结果可知,底栖动物种类多样性和均匀性都存在沿程变化,这一现象在枯水期表现尤其明显。朱苏葛等^[22]研究表明,浮游植物通过分解大量溶解氧等作用,对底栖动物群落结构有较大影响,为此,本文将浮游植物与底栖动物种类及生物量沿程分布作一对比,结果见表 5。以典型梯级水库影响段——九龙至龙塘段为例,监测结果表明:①浮游植物方面。丰水期水量较大,水库下泄流量大,水体沿程连续性高于枯水期,虽存在水库阻隔,但浮游植物的生长、繁殖、休眠都在同一水体中,因此浮游植物种属在坝体上下游可表现一定的趋同性^[23];枯水期由于水量减少及水库蓄水发电破坏了河流水体连

表5 丰枯水期浮游植物与底栖动物种类及生物量沿程分布

监测站点	种类/种				生物量/(g·m ⁻²)			
	浮游植物		底栖动物		浮游植物		底栖动物	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
福才	11	6	3	7	0.90	0.09	9.82	25.75
南丰	31	23	0	1	3.79	3.79	0.00	4.00
九龙	16	11	4	4	0.47	0.38	31.5	8.87
金江	17	13	2	0	0.37	0.63	2.95	0
永发	23	15	0	0	1.33	0.88	0.00	0.00
安定	24	0	4	0	1.28	0.00	4.7	0.00
西江	26	0	0	0	3.69	0.00	0.00	0.00
龙塘	26	17	2	2	0.92	7.35	0.27	10.43
南渡江大桥	31	20	2	6	2.65	5.57	15.73	235.20
流水坡	34	20	0	0	6.46	8.0	0.0	0.0

续性,导致浮游植物沿程变化较丰水期不均匀。②底栖动物方面。丰水期底栖动物沿程较均匀,龙塘坝上游安定站及下游龙塘站均为软甲纲匙指虾生物量占优,同样存在一定的趋同性;枯水期上游安定站未检测出底栖生物,下游龙塘站以腹足纲淡水壳菜生物量占优,占比达65%,存在较大不均匀性。对比浮游植物,枯水期龙塘站浮游植物生物量大幅增加,与刘唱等^[24]得到的水生植被区腹足纲为主要优势种的结论一致。浮游植物坝体上下游分布同底栖动物类似,表明梯级水库建设通过改变水体连续性影响底栖动物沿程分布。

d. 底栖动物丰度受采样点底质状况、水文环境和水质状况影响。流水坡站受河口影响严重,环境具有较大波动性,因此未能检测到底栖生物,这与张敏等^[25]对香溪河库湾研究中得到的环境变化导致底栖动物丰度急剧降低的结论一致。龙塘站河流底质为石块,由于龙塘滚水坝建设,龙塘站流速仅0.2 m/s,浊度较大(枯水期浊度达86 NTU),平均水深1.5 m,冬季水温在19~24℃之间,枯水期水质为中-富营养型。该环境适合淡水壳菜生存,石块底质为淡水壳菜附着提供了良好环境;淡水壳菜生存适宜温度为16~21℃且其幼体发育对光度敏感,强光照射可引起幼虫的趋光移动,甚至造成幼虫的堆积和死亡^[26]。龙塘站水深较大,浊度较大,光线条件弱,为淡水壳菜幼体发育提供了较好的环境,而小流速及适宜的水温为淡水壳菜的生长提供了保障,因此淡水壳菜在枯水期大量繁殖。南渡江大桥站由于水深较深,其生境与其他监测站点大不相同,底质为淤泥和沙,流速约为0.2 m/s,浊度较小(枯水期浊度为8.5 NTU),水深10 m,冬季水温在19~24℃之间,溶解氧质量浓度为6.9 mg/L,该监测站点浮游动物以轮虫为优势种;钩虾宜生存于泥沙底质,冬季水位要求1.5 m以上,溶解氧质量浓度应在4 mg/L以上;南渡江大桥站水质条件为钩虾提供了良

好生境,轮虫具有较高营养价值,为钩虾提供了较好的食物来源,因此枯水期钩虾在南渡江大桥站处大量繁殖,占到枯水期物种总丰度的60%。而南渡江干流其他监测站点,虽然温度及溶解氧符合钩虾生存条件,但大部分监测站点水深较浅,不适合钩虾生存。南渡江上游福才站植被较为茂密,植被覆盖率达75%,水深0.8 m,底质为细小卵石,流速1 m/s,适合河花蜉属昆虫纲生存。Bae等^[27]研究发现,河花蜉属幼虫主要生活在0.4 m左右深的急流底部,底质为粗沙砾和鹅卵石,而在细沙和淤泥底质区域中很少分布,尤其体型较大的幼虫喜好选择鹅卵石,该条件与福才站条件极为类似。因此,在枯水期福才站昆虫纲生物大量繁殖,其中河花蜉属占昆虫纲比重最大,丰度占比达37.5%。此外,南渡江为热带河流,与温带河流最大的不同在于水温对底栖动物群落影响较大,其冬季水温仍可达19~24℃,该温度下,大多数种类的底栖动物均能较好繁殖,加上其他水文地理条件共同作用,枯水期底栖动物的丰度、生物量等均较丰水期为大,如淡水壳菜等北方枯水期河流少见的底栖动物物种亦能较好生存。

5 结论

a. 梯级水库的建设通过减小河流流速,为包括腹足纲在内的适应静水环境的底栖动物生存提供了有利条件,腹足纲生物在丰枯水期两期监测中均占较大优势。

b. 梯级水库的建设对底栖动物季节性变化有较大影响,特别是冬季枯水期,水库长期蓄水,水体滞留时间延长,导致快繁底栖动物如淡水壳菜等成为优势种群。

c. 梯级水库的建设通过改变水体连续性而影响浮游生物沿程分布,最终导致底栖动物整体沿程分布不均匀甚至出现突变趋势,尤其是在水流连续性较差的枯水期。

d. 与温带河流不同,热带河流冬季水温较高,大多数种类底栖动物仍能较好繁殖,枯水期底栖动物丰度、生物量等均较丰水期为大。

参考文献:

- [1] 唐克旺. 中国治水已进入大保护的新时代[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 16-17. (TANG Kewang. Water control in China has entered a new era of great protection[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 16-17. (in Chinese))
- [2] 蒋晓辉, 王洪铸. 黄河干流水生态系统结构特征沿程变化及其健康评价[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 991-998. (JIANG Xiaohui, WANG Hongzhu. Change of structural characteristics and health assessment of aquatic ecosystems along the mainstream of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 991-998. (in Chinese))
- [3] 邹红娟, 余秋梅, 沈蕴芬, 等. 汉江中下游河段生态系统结构特征及其沿程变化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 99-101. (WU Hongjuan, YU Qiumei, SHEN Yunfen, et al. A structure characteristics of ecosystem along the middle and lower reaches of Han River in spring[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(10): 99-101. (in Chinese))
- [4] 徐宗学, 顾晓响, 刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 1-7. (in Chinese))
- [5] 胡征宇, 蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 1-6. (HU Zhengyu, CAI Qinghua. Preliminary report on aquatic ecosystem dynamics of the Three Gorges Reservoir before and after impoundment[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(1): 1-6. (in Chinese))
- [6] 麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 748-753. (MA Zelong, CHENG Genwei. Progress in research on impacts of river hydro-power engineering on eco-environment[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 748-753. (in Chinese))
- [7] 刘静玲, 尤晓光, 史璇, 等. 滦河流域大中型闸坝水文生态效应[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 23-28. (LIU Jingling, YOU Xiaoguang, SHI Xuan, et al. Hydrological and ecological effects of dams in Luanhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 23-28. (in Chinese))
- [8] 盛萧, 毛建忠, 曹然, 等. 基于5种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J]. 水资源保护, 2017, 33

- (1): 75-82. (SHENG Xiao, MAO Jianzhong, CAO Ran, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 75-82. (in Chinese))
- [9] 张欣, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 应用底栖动物完整性指数评价济南市水生态健康状况[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 123-130. (ZHANG Xin, XU Zongxue, LIU Linfei, et al. Health assessment of aquatic ecology in Ji'nan City using benthic-index of biotic integrity [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 123-130. (in Chinese))
- [10] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 136-140. (ZOU Jiaxiang, ZHAI Hongjuan. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 136-140. (in Chinese))
- [11] TERRA B D F, ARAUJO F G. A preliminary fish assemblage index for a transitional river-reservoir system in southeastern Brazil[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(3): 874-881.
- [12] LARSEN L G, CHOI J, NUNGESSER M K, et al. Directional connectivity in hydrology and ecology [J]. Ecological Applications, 2012, 22(8): 2204-2220.
- [13] YANYGINA LV. Macrozoobenthos as an indicator of the ecological state of mountain watercourses [J]. Russian Journal of Ecology, 2017, 48(2): 185-190.
- [14] HELSON J E, WILLIAMS D D. Development of a macroinvertebrate multimetric index for the assessment of low-land streams in the neotropics [J]. Ecological Indicators, 2013, 29(3): 167-178.
- [15] CHEN Q, YANG Q, LI R, et al. Spring micro-distribution of macroinvertebrate in relation to hydro-environmental factors in the Lijiang River, China [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2013, 7(2): 103-112.
- [16] 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2803-2815. (LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al. Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2803-2815. (in Chinese))
- [17] HANN B J, WISHART M J, Watson S B. Long-term trends in benthic invertebrate populations (1929-2013) in Lake Winnipeg [J]. Journal of Great Lakes Research, 2017, 43(5): 938-952.
- [18] BEDNAR J P, TROBEJ M, SCHAGERL M, et al. Which factors shape macrozoobenthic communities in tufa springs? Results from Austrian meteorite travertine-depositing sites [J]. Hydrobiologia, 2017, 799(1): 293-307.

(下转第84页)

- with non-hydrostatic pressure [J]. Coastal Engineering, 2008, 55 (10): 780-790.
- [9] 张二骏, 张东生, 李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学报, 1982, 10 (1): 1-13. (ZHANG Erjun, ZHANG Dongsheng, LI Ting. "Three Steps Method" to Compute Unsteady Flow for River Networks[J]. Journal of Hohai University, 1982, 10 (1): 1-13. (in Chinese))
- [10] 许益新, 王文才, 曾伟峰, 等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 70-75. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 70-75. (in Chinese))
- [11] 顾庐华, 赖锡军. 七浦塘引水对阳澄湖河网水环境影响模拟研究[J]. 水资源保护, 2018, 34 (2): 88-95. (GU Luhua, LAI Xijun. Simulation study of water environment influence on Yangcheng Lake river networks by Qipu River water diversion project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 88-95.)
- [12] 杜建, 陈晓宏, 陈志和, 等. 珠江三角洲感潮河网区水环境引水调控研究[J]. 水文, 2012, 32 (4): 16-21. (DU Jian, CHEN Xiaohong, CHEN Zhihe, et al. Water Diversion and Control for Water Environment in Tidal Network of Pearl River Delta [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32 (4): 16-21. (in Chinese))
- [13] 郭海荣, 焦文海, 杨元喜. 1985 国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J]. 测绘学报, 2004, 33 (2): 100-104. (GUO Haiyong, JIAO Wenhai, YANG Yuanxi. The systematic difference and its distribution between the 1985 national height datum and the global quasigeoid [J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2004, 33 (2): 100-104. (in Chinese))
- [14] 张莉莉, 王峰. 水力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [15] 王玲玲, 钟娜, 成高峰. 基于奇异矩阵分解法的河道糙率反演计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010 (4): 359-363. (WANG Lingling, ZHONG Na, CHENG Gaofeng. Inversion method of river roughness based on singular matrix decomposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010 (4): 359-363. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-05-18 编辑: 彭桃英)

(上接第 66 页)

- [19] VORONKOV A, HOP H, GULLIKSENB. Zoobenthic communities on hard-bottom habitats in Kongsfjorden, Svalbard [J]. Polar Biology, 2016, 39 (11): 1-19.
- [20] 简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替[J]. 水生态学杂志, 2010, 3 (6): 12-18. (JIA Dong, HUANG Daoming, CHANG Xiuling, et al. The succession of zoobenthos in the mainstream of Hongshui River after the formation of the cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3 (6): 12-18. (in Chinese))
- [21] 李晋鹏, 董世魁, 彭明春, 等. 梯级水坝运行对漫湾库区底栖动物群落结构及分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (12): 4101-4108. (LI Jinpeng, DONG Shikui, PENG Mingchun, et al. Effects of cascading hydropower dams operation on the structure and distribution pattern of benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (12): 4101-4108. (in Chinese))
- [22] 朱苏葛, 刘凌, 罗娟, 等. 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (3): 99-104. (ZHU Suge, LIU Ling, LUO Juan, et al. Correlation analysis between macrozoobenthos and environmental factors in lakes of Lixia River Area [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 99-104. (in Chinese))
- [23] 林彰文, 林生, 顾继光, 等. 浮游植物群落对海南小水电建设的响应[J]. 生态学报, 2013, 33 (4): 1186-1194. (LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al. Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (4): 1186-1194. (in Chinese))
- [24] 刘唱, 刘凌, 张又, 等. 阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征[J]. 水资源保护, 2017, 33 (2): 79-87. (LIU Chang, LIU Ling, ZHANG You, et al. Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake, China [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2): 79-87. (in Chinese))
- [25] 张敏, 蔡庆华, 渠晓东, 等. 三峡成库后香溪水库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态[J]. 生态学报, 2017, 37 (13): 4483-4494. (ZHANG Min, CAI Qinghua, QU Xiaodong, et al. Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (13): 4483-4494. (in Chinese))
- [26] 徐梦珍, 王兆印, 段学花. 输水管道中淡水壳菜的防治研究[J]. 给水排水, 2009, 35 (5): 205-208. (XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, DUAN Xuehua. Study on prevention and control of Limnoperna fortunei in Water Pipelines [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35 (5): 205-208. (in Chinese))
- [27] BAE Y J, MCCAFFERTY W P. Microhabitat of *Anthopotamus verticis* (ephemeroptera: potamanthidae) [J]. Hydrobiologia, 1994, 288 (2): 65-78. (收稿日期: 2018-04-10 编辑: 熊水斌)