

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

李晋鹏^{1*} 董世魁² 彭明春³ 吴宣¹ 周芳¹ 于音¹

(¹交通运输部水运科学研究所, 北京 100088; ²北京师范大学环境学院, 北京 100088; ³云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

摘要 底栖动物是对水生态系统退化和生境条件改变最为敏感的生物类群之一,同时也是开展梯级水坝水生态系统变化和演替研究的指示生物.本研究以国际生物多样性保护及水电梯级开发生态影响研究的热点地区澜沧江中下游为例,以澜沧江干流兴建的第一座水坝漫湾库区为研究区域,分别于2011和2016年开展底栖动物定点采样,并结合其蓄水前(自然河段,1996年)和单级水坝蓄水初期(1997年)的历史调研数据,全面分析了梯级水坝运行前后漫湾库区底栖动物群落的结构、分布格局及演变趋势.结果表明:漫湾库区底栖动物群落的优势种组成逐渐由寡毛纲和昆虫纲种类演变为软体动物门类占绝对优势;沿库区生境的纵向梯度变化,底栖动物密度和生物量均表现为升高的趋势,而静水区增加更为显著;对底栖动物功能摄食群的分析表明,静水区由掠食者和收集者占优势演变为滤食者类占绝对优势;梯级水坝运行后,采用生物指数评价结果表明,2016年库区综合水质指标明显优于2011年.漫湾库区底栖动物群落的演变与上游梯级小湾水坝的调度运行及库区的水文状况和泥沙淤积情况密切相关,并随着梯级水坝的运行处于动态变化之中.

关键词 底栖动物群落; 功能摄食群; 生物指数; 澜沧江流域

Effects of cascading hydropower dams operation on the structure and distribution pattern of benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir, Southwest China. LI Jin-peng¹, DONG Shi-kui², PENG Ming-chun³, WU Xuan¹, ZHOU Fang¹, YU Yin¹ (¹China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China; ²School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100088, China; ³Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China).

Abstract: Benthic macroinvertebrate assemblages are one of the biological groups in aquatic ecosystem most sensitive to the habitat change and degradation, and can be a biological indicator for the aquatic ecosystem change and succession in cascading hydropower dam reservoir. The middle and lower reaches of the Lancang River are key spot for international biodiversity conservation and ecological studies on the effects of cascading hydropower dam exploitation. In this study, the reservoir of Manwan hydropower dam, the first dam in Lancang-Mekong river main stream, was selected as the study site. The benthic macroinvertebrate assemblages were sampled in 2011 and 2016 respectively. Meanwhile, the survey data before impounding (natural river, 1996) and early stage of single dam (1997) were collected to conduct the overall analysis for structure, distribution pattern and evolution of benthic macroinvertebrate assemblages. The results showed that the dominant biological group was gradually changed from the Oligochaeta and Insecta to the Mollusca. Along the longitudinal gradient, the density and biomass of the benthic macroinvertebrate assemblages were remarkably increased in reservoir, especially in the lacustrine zone. As for the functional feeding group, the predator and gatherer-collector changed into filter-collector predominantly in lacustrine zone. With the cascading dams operation, the biotic index indicated that the water quality of reservoir in 2016

本文由国家自然科学基金项目(51509116)和国家重点研发计划项目(2016YFC0503601)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51509116), and the National Key Research & Development Plan (2016YFC0503601).

2017-05-25 Received, 2017-09-08 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lij_p_cool@126.com

was better than in 2011. The evolution of benthic macroinvertebrate assemblages in the Manwan Reservoir was related to the operation of Xiaowan dam in the upper reach, the hydrological regime and siltation in the reservoir, and would continue with dynamic changes with the operation of the cascading hydropower dam.

Key words: benthic macroinvertebrate assemblages; functional feeding group; biotic index; Lancang River basin.

生境条件的变化是全球尺度上生物多样性丧失的主要原因.水坝的建设和运行对河流生态系统及整个流域具有深远的影响^[1-2].水坝的建设改变了自然河流的水文节律,阻碍了营养物质和生物体的迁移扩散路径^[3].底栖动物作为水生态系统的重要生物类群,栖息于水体和沉积物交界,其栖息地相对稳定,移动能力相对较弱,对于加速有机碎屑的分解,促进水泥界面的物质和能量流动,以及维持水生生态系统的健康具有重要作用^[4].大量研究表明,底栖动物是受水坝蓄水和运行影响最为敏感的生物类群之一,也是水生生态系统退化和生境条件改变的指示生物^[5-8].此外,底栖动物的群落组成及分布格局作为水质物理化学指标的补充,日益受到水质生态评价及水生生态系统健康研究领域的广泛关注^[9-12].

澜沧江中下游是中国十二个重点开发的水电基地,同时也是国际上生物多样性保护及水电梯级开发生态影响研究的热点地区^[13-14].漫湾水坝作为区内澜沧江干流上建设运行的第一座水坝,自 1997 年蓄水后,已连续运行 20 年,其库区先后经历了自然河段(1997 年之前),单级水坝(1997—2010 年)和梯级水坝(2011—目前)3 个阶段.目前,国内外在大型河流上开展梯级水坝运行条件下的底栖动物群落结构及分布格局长期演变研究相对较少^[8,15-17].因此,探究梯级水坝运行对底栖动物群落的长期影响

具有重要的生态学意义.本研究分别于 2011 年和 2016 年开展澜沧江中游漫湾水坝库区底栖动物群落落定点监测,并结合其蓄水前(自然河段,1996 年)和单级水坝蓄水初期(1997 年)的历史调研数据,分析梯级水坝运行对漫湾库区底栖动物群落的种类组成、优势种、群落密度和生物量、功能摄食群、分布格局的影响,并采用生物指数(BI)对库区水环境动态变化进行评价.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

选取云南省澜沧江中游的漫湾水坝库区为研究区(图 1).漫湾水坝是澜沧江中下游 2 库 8 个梯级水电开发中的第 3 级,为径流式水坝,工程于 1986 年 5 月开工建设,1993 年 6 月首台机组发电,1995 年 6 月一期工程全部投产.水库大坝全长 418 m、高 132 m,正常蓄水位海拔 994 m,总库容 10.6 亿 m³,水库面积 23.6 km²,装机容量 150 万 kW,干流回水 70 km 至上游的小湾水坝附近,其下游为大朝山水坝^[18-19].研究区地貌类型为高山峡谷,气候类型为亚热带低纬度山地季风气候,年内分为明显的两个季节,5—10 月受西南季风的控制为雨季,11 月至次年 4 月受大陆西风控制为旱季.

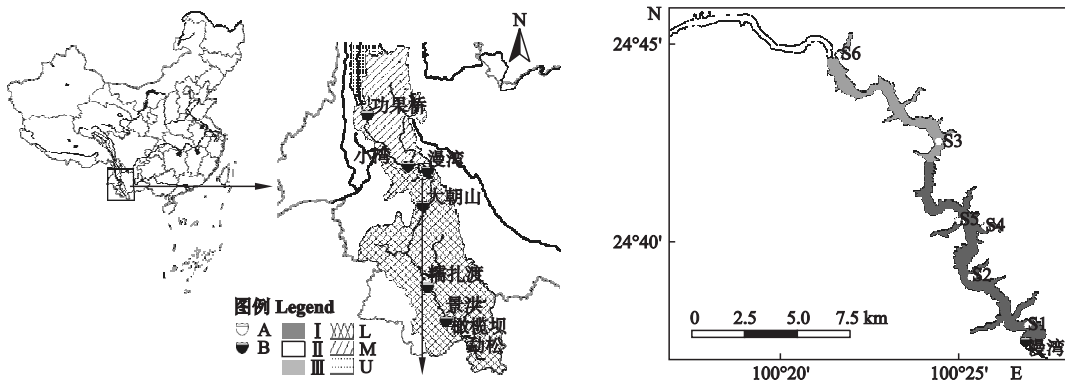


图 1 澜沧江中游漫湾库区和底栖动物采样点(S)位置分布
Fig.1 Location of the Manwan Reservoir and the sampling sites (S) of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle reach of Lancang River.
A: 规划和建设中水坝 Planning and under constructed dam; B: 现有水坝 Completed dam. I: 静水区 Lacustrine zone; II: 河流区 Riverine zone; III: 过渡区 Transitional zone; L: 下游 Lower reach; M: 中游 Middel reach; U: 上游 Upper reach.

1.2 采样调查

分别于 2011 和 2016 年开展漫湾水坝库区底栖动物群落结构和分布格局的采样调查.依据相关学者对建坝河流沿河流纵向梯度的生境划分^[20-22],并结合漫湾水坝的调度运行及库区水位变化情况(11 月至次年 5 月正常水位运行,海拔 994 m;6—10 月为汛期低水位运行,海拔 985 m),将库区生境条件划分为 3 个区域:静水区、过渡区(高水位为静水区,低水位为河流区)和河流区^[18,23](图 1).

结合 1996 和 1997 年漫湾库区底栖动物历史调查资料^[18],2011 和 2016 年漫湾库区底栖动物群落调查共设置 6 个采样点.这些采样点涵盖了漫湾库区底栖动物群落的多种生境类型,包括静水区、过渡区和相关的支流库区.其中,采样点 S₁和 S₂位于漫湾库区坝前,生境划分为静水区;S₃位于库区中游,生境划分为过渡区,受水库蓄水的水位变动影响处于静水区和河流区的过渡区;S₄、S₅和 S₆位于漫湾库区不同生境类型的支流库区,S₄和 S₅分别位于静水区的景繁河和芒甩河支流库区,S₆位于库区过渡区的落底河支流库区.结合漫湾水库的运行调度计划,每个采样点分别于旱季(4 月,正常水位)和雨季(10 月,低水位)进行 2 次调查.

从时间尺度上看,1996 年调查数据代表了未受漫湾水坝蓄水影响的澜沧江中游原生底栖动物群落分布状况;1997 年调查数据代表了漫湾水坝蓄水及运行初期的底栖动物群落分布状况^[18];2011 年调查数据代表了受上游梯级小湾水坝蓄水及运行初期影响条件下的漫湾水库底栖动物群落分布状况;2016 年调查数据代表了澜沧江中游梯级水坝稳定运行后的漫湾水库底栖动物群落分布状况.

底栖动物群落的调查采用开口面积 1/50 m²的 Peterson 采样器对每个采样点(3 个重复)进行底泥采样,然后立即经 40 目尼龙筛淘洗过滤,去除泥沙和杂物,将筛上肉眼可见的底栖动物用镊子挑出,置入盛有 75% 酒精的 50 mL 塑料标本瓶中杀死固定^[24-25].将采集到的样品带回实验室进行分类和鉴定(一般鉴定到种,部分为属),统计不同种类的个体数量,并用天平称量其湿质量,最后核算出每个采样点内底栖动物的个体密度(ind·m⁻²)和生物量(g·m⁻²).底栖动物中个体较大的软体动物用解剖镜进行鉴定,个体较小的寡毛类和摇蚊幼虫则需制成临时片子在显微镜下参考有关资料进行鉴定^[26-28].

1.3 数据处理

1.3.1 优势种的确定 相对重要性指数(index of

relative importance, IRI)^[4]计算公式为:

$$IRI = (RB + RD) \times F$$

其中:RB 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;RD 为相对密度,即某一物种密度占底栖动物总密度的百分比;F 为该物种出现的频率.

1.3.2 功能摄食群的划分 底栖动物功能摄食群(functional feeding group, FFG)的划分参照 Barbour 等^[29]的划分标准,共包括 6 种类型:滤食者(filter-collector, FC),掠食者(predator, PR),杂食者(omnivore, OM),撕食者(shredder, SH),收集者(gatherer-collector, GC),刮食者(scraper, SC).

1.3.3 生物指数的计算 生物指数(biotic index, BI)由 Chutter 提出并应用于水质的生物评价.该指数综合了底栖动物的耐污能力和底栖动物的物种多样性,因而被广泛应用于国内外水环境质量的生物评价研究领域^[30].

$$BI = \sum_{i=1}^n n_i t_i / N$$

其中:n_i为第 i 个分类单元(属或种)的个体数量;N 为总个体数;t_i为第 i 个分类单元(属或种)的耐污值.耐污值(tolerance values, TV)是底栖动物对水环境的忍耐能力,其值范围为 0~10,数值越高表示该底栖动物耐污性越强,反之则越低.耐污值的高低反映了底栖动物对水环境污染的敏感性.漫湾库区底栖动物的耐污值参照王备新与杨莲芳^[31]的方法.生物指数与水质评价分级标准对照见表 1^[4].

2 结果与分析

2.1 底栖动物种类组成及优势种

2011、2016 年漫湾库区 6 个采样点共采集到大型底栖动物 25 种,其中昆虫纲种类占绝对优势,共计 16 种,占到总种数的 64%(表 2).2016 年底栖动物物种数量变化不大,旱季 12 种、雨季 11 种,且软体动物种类旱季(4 种)明显多于雨季(2 种);2011 年底栖动物物种数量变化较大,旱季(11 种)明显多

表 1 生物指数与水质评价分级标准
Table 1 Biotic index and classification standard of water quality assessment

生物指数 Biotic index	状态 State	分级 Classification
0~5.5	清洁 Clean	I
5.5~7.5	轻污染 Light pollution	II
7.5~8.5	中污染 Medium pollution	III
8.5~10	重污染 Heavy pollution	IV

表 2 漫湾库区大型底栖动物种类组成及相对重要性指数 (IRI) 分析
Table 2 Species composition and index of relative importance (IRI) of benthic macroinvertebrates in Manwan Reservoir

类群 Group	编号 No.	物种 Species	IRI			
			2016-04	2016-10	2011-04	2011-10
寡毛纲	1	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiara sowerbyi</i>	5.82	15.50	78.53	245.35
Oligochaeta	2	水丝蚓 <i>Limnodrilus</i> sp.	0.00	22.26	39.61	0.00
	3	霍普水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	0.00	0.00	1.66	0.00
	4	铁线单向蚓 <i>Haplotaxis gordioides</i>	20.87	3.71	0.00	0.00
软体动物门	5	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	817.50	639.73	120.22	0.00
Mollusca	6	土蜗 <i>Galba perversa</i>	0.38	0.00	0.00	0.00
	7	具角无齿蚌 <i>Anodonta angula</i>	0.46	0.00	0.00	0.00
	8	静水椎实螺 <i>Lymnaea stagnalis</i>	1.30	0.00	0.00	0.00
	9	放逸短沟蜷 <i>Semisulcospira libertina</i>	0.00	2.70	0.00	0.00
	10	羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	1.14	0.00	4.09	0.00
昆虫纲	11	猛摇蚊 <i>Chironomus acerbiphilus</i>	0.00	1.96	0.00	0.00
	12	菱跗摇蚊 <i>Clinotanypus</i> sp.	9.75	0.00	0.00	0.00
	13	白色环足摇蚊 <i>Cricotopus albiforceps</i>	4.48	0.00	0.00	0.00
	14	结合隐摇蚊 <i>Cryptochironomus conjugens</i>	0.00	0.00	88.70	18.04
	15	指突隐摇蚊 <i>Cryptochironomus digitatus</i>	0.00	0.00	15.98	0.00
	16	褐跗隐摇蚊 <i>Cryptochironomus fuscimanus</i>	0.00	0.00	0.78	0.00
	17	隐摇蚊 <i>Cryptochironomus</i> sp.	0.00	0.00	0.00	26.02
	18	喙隐摇蚊 <i>Cryptochironomus rostratus</i>	5.20	0.00	0.00	0.00
	19	弯铗摇蚊 <i>Cryptotendipes</i> sp.	0.00	1.92	0.00	0.00
	20	异腹腮摇蚊 <i>Einfeldia insolita</i>	0.00	0.00	8.81	0.00
	21	拟摇蚊 <i>Paratendipes</i> sp.	0.00	12.76	0.00	0.00
	22	梯形多足摇蚊 <i>Polypedium scalaenum</i>	0.00	0.00	10.20	48.72
	23	小云多足摇蚊 <i>Polypedium nubeculosum</i>	21.87	7.58	0.00	0.00
	24	多距石蚕 <i>Polycentropodidae</i> sp.	0.00	1.37	0.00	0.00
	25	花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreas</i>	12.66	22.54	292.74	76.90

IRI 值加粗为优势种 Bold value of IRI meant dominant species.

于雨季(5 种),且雨季没有发现软体动物种类.

2016 年漫湾库区以河蚬 (*Corbicula fluminea*) 为优势种,并占绝对优势.2011 年漫湾库区 4 月以花纹前突摇蚊 (*Procladius choreas*) 和河蚬为优势种,10 月以苏氏尾鳃蚓 (*Branchiara sowerbyi*) 为优势种.总体来看,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门类占绝对优势.

2.2 底栖动物密度和生物量

梯级水坝运行后,沿漫湾库区纵向梯度变化,各采样点的底栖动物密度和生物量均表现为升高的趋势(图 2).从生境划分来看,静水区的采样点 S₁和 S₂底栖动物群落密度和生物量 2016 年相比 2011 年均显著的增大,密度组成和生物量组成也逐渐由寡毛纲和昆虫纲演变为软体动物门类占绝对优势;过渡区的采样点 S₃底栖动物群落密度和生物量 2016 相比 2011 年明显增加,软体动物的密度和生物量在旱季显著增加,雨季则全部为昆虫纲种类;漫湾库区支流库区(S₄、S₅)变化与静水区的采样点 S₁和 S₂相似,采样点 S₆的变化与 S₃类似.

2.3 底栖动物功能摄食群(FFG)

从图 3 可以看出,梯级水坝运行后,沿着漫湾库区纵向梯度生境变化,静水区的采样点 S₁和 S₂底栖动物功能摄食群密度和生物量组成,2016 年比 2011 年由掠食者(PR)和收集者(GC)占优势演变为滤食者(FC)占绝对优势;过渡区的采样点 S₃则由掠食者和撕食者(SH)演变为收集者和滤食者占优势;漫湾库区支流库区采样点 S₄和 S₅的变化与静水区的采样点 S₁和 S₂相似,S₆采样点雨季则由掠食者演变为刮食者(SC)占优势,旱季仍为掠食者占优势.

2.4 生物指数

从表 3 可以看出,梯级水坝运行后,2016 年漫湾库区各采样点(S₃除外)的生物指数(BI)比 2011 年均有明显降低,水质指标均优于 2011 年,而过渡区的采样点 S₃则变化不大.沿库区纵向梯度上看,静水区的采样点 S₂ BI 指数 2016 年和 2011 年均为最高,坝前采样点 S₁次之;过渡区采样点 S₃ BI 指数相对较低,水质则变化不大;支流库区采样点 S₄、S₅、S₆的 BI 值相对所在生境河段均较高.从 BI 指

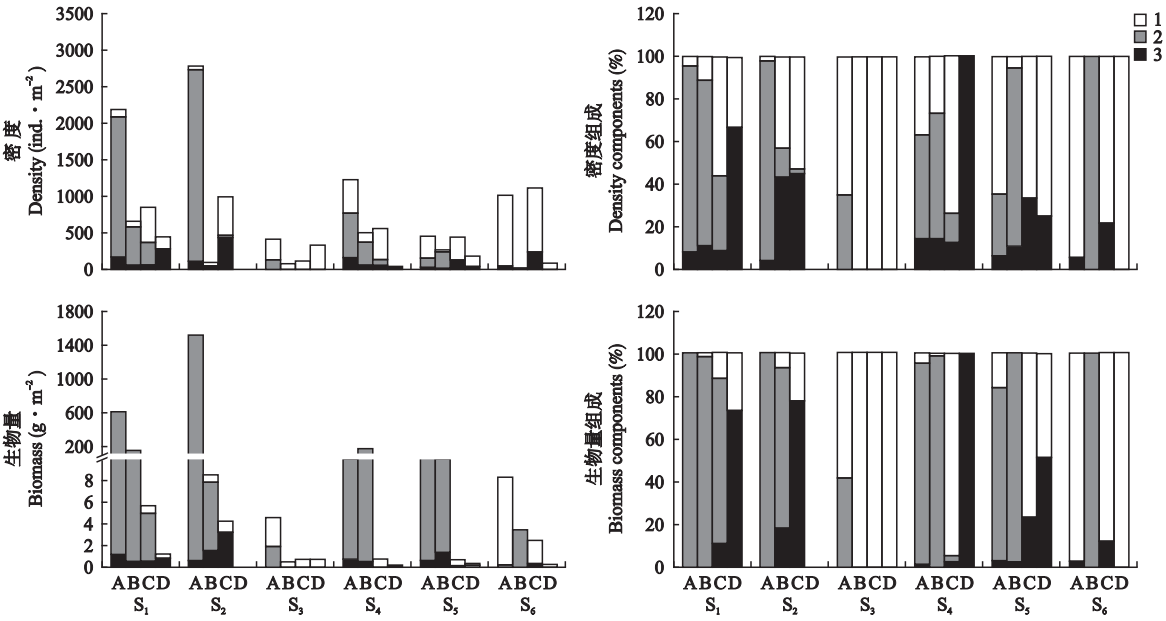


图 2 漫湾库区底栖动物密度和生物量的变化
Fig.2 Variation of benthic macroinvertebrate density and biomass in Manwan Reservoir.
A: 2016-04; B: 2016-10; C: 2011-04; D: 2011-10. 下同 The same below. 1) 昆虫纲 Insecta; 2) 软体动物门 Mol lusca; 3) 寡毛纲 Oligochaeta.

表 3 漫湾水坝库区各采样点的生物指数及水质评价
Table 3 Biotic index of sampling sites and water quality assessment in Manwan Reservoir

采样时间 Sampling time	采样点 Sampling sites					
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
2016-04	5.25(I)	5.13(I)	5.64(II)	6.15(II)	6.80(II)	6.46(II)
2016-10	5.41(I)	8.27(II)	5.00(I)	6.59(II)	5.14(I)	2.30(I)
年均 Annual average	5.33(I)	6.70(II)	5.32(I)	6.37(II)	5.97(II)	4.38(I)
2011-04	7.44(II)	8.99(IV)	5.62(II)	8.30(III)	9.58(IV)	7.76(III)
2011-10	8.87(IV)	—	4.70(I)	8.50(III)	8.40(III)	5.90(II)
年均 Annual average	8.16(III)	8.99(IV)	5.16(I)	8.40(III)	8.99(IV)	6.83(II)

— 无数据 No data available. I : 清洁 Clean; II : 轻污染 Light pollution; III : 中污染 Medium pollution; IV : 重污染 Heavy pollution.

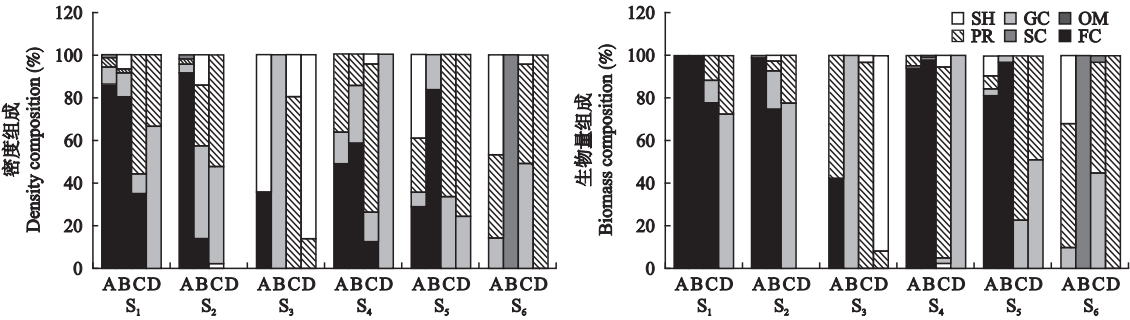


图 3 漫湾库区底栖动物功能摄食群组成
Fig.3 Functional feeding group composition of benthic macroinvertebrate in Manwan Reservoir.
FC: 滤食者 Filter-collector; PR: 掠食者 Predator; OM: 杂食者 Omnivore; SH: 撕食者 Shredder; GC: 收集者 Gatherer-collector; SC: 刮食者 Scraper.

数的年内变化来看,静水区的采样点 S₁ 和 S₂ 旱季低于雨季,雨季水质较差,而支流库区的采样点 S₄、S₅、S₆ BI 值雨季低于旱季,雨季水质较好.

2.5 漫湾库区底栖动物群落的演变

结合历史调查资料,选取漫湾库区不同生境类

型包括静水带(S₁)和过渡带(S₃)的 2 个采样点,分析澜沧江中游梯级水坝运行前后漫湾库区底栖动物群落的演变.从图 4 可以看出,在澜沧江中游自然河段时期(1996 年),采样点 S₁ 和 S₃ 底栖动物的密度和生物量相对较低,且旱季远高于雨季;漫湾水坝蓄

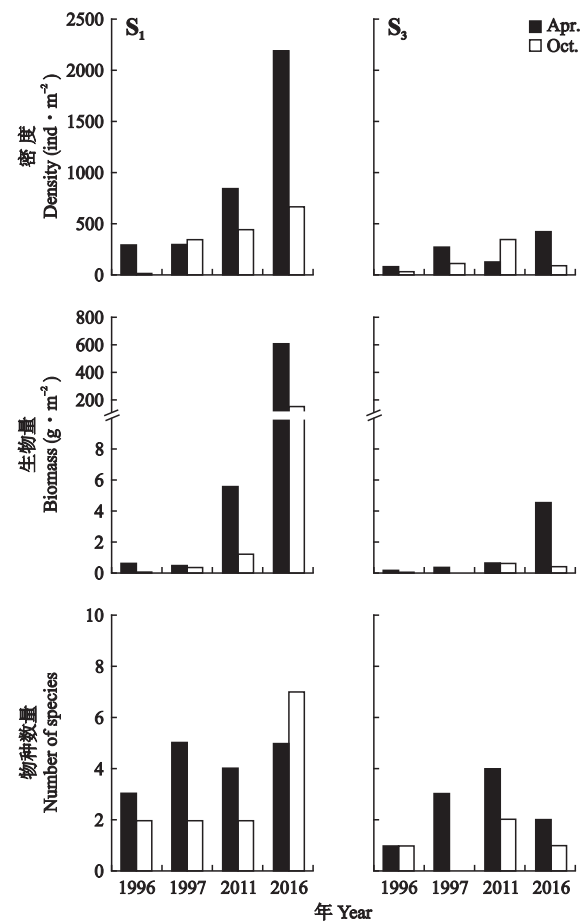


图4 澜沧江中游梯级水坝运行前后漫湾库区底栖动物群落的变化

Fig.4 Variation of the benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir before and after cascading hydropower dams' operation in the middle reach of Lancang River.

水后的1997年(单级水坝),底栖动物的密度和生物量显著上升,雨季增加显著;梯级水坝运行初期(2011年),底栖动物的密度和生物量则进一步上升;梯级水坝运行后的2016年,与2011年相比,底栖动物的密度和生物量显著上升.总体来看,与过渡带(S₃)相比,静水区(S₁)底栖动物的密度和生物量在漫湾水坝特别是梯级水坝运行后增加的趋势更为明显,同时物种数量显著上升,雨季显著增加.

3 讨 论

3.1 梯级水坝运行对漫湾库区底栖动物群落结构及生境的影响

漫湾水坝蓄水前,澜沧江在该段为自由流动,河流的流速为2~3.5 m · s⁻¹,河床以基岩、卵石和砾石为主,并且拥有多样性的急流生境,包括激流、河湾及缓流河段等^[23],底栖动物多为适应急流、富氧、贫营养的物种,如蜉蝣目、襁翅目和毛翅目的种

类^[18,32].

澜沧江漫湾单级水坝蓄水后,开发河段的水体流速变缓,泥沙及有机物沉积,水生植物、浮游生物增多,为底栖动物的定居、繁殖和生长提供了良好的条件,底栖动物群落组成由流水型向静水和缓流型演变^[15,17].1997年后漫湾库区水位由海拔891 m上升到994 m,坝前流速降低到0.1 m · s⁻¹^[23].水位的上升、水体流速的降低、泥沙的迅速沉积、水坝的调度运行完全改变了漫湾库区的水文情势和水环境状况^[33-34].漫湾水坝的蓄水分割了河流原有的生态连通性和纵向连通性,库区内的原生河道生境转变为静水区、过渡区和河流区^[5,23].底栖动物在坝前的静水区迅速繁殖,适应静水环境的寡毛纲种类和摇蚊科种类大幅度增长并在静水区占主导地位.寡毛纲种类从功能摄食群划分属于收集者,而摇蚊科种类则多数属于滤食者、收集者及掠食者.这与众多大型河道型水库如三峡库区、浙江分水江水库等的研究结果相同^[17,35],表明漫湾库区静水区具有细颗粒底泥沉积和有机质含量较高的沉积环境条件^[9].

澜沧江梯级水库蓄水后,漫湾库区底栖动物群落组成逐渐由单级水坝时期的寡毛纲和昆虫纲演变为软体动物门类占绝对优势.沿库区纵向梯度变化,底栖动物群落密度和生物量进一步上升.特别是软体动物中的河蚌,摄食功能群划分属于滤食者,其分布在库区静水区并占据绝对优势.该研究结论与红水河、乌江干流梯级、武江梯级水电运行后大型软体动物密度和生物量显著增加的趋势相同^[15,36-37].漫湾库区底栖动物群落的演变与澜沧江中游梯级开发影响下的水文情势,库区水体营养负荷、泥沙淤积、水位变化,以及上游小湾梯级水坝库容和调度运行等有关^[15].

3.2 底栖动物应用于梯级水坝库区水环境及水生态状况评价的可行性

水坝建设和运行引起底栖动物群落的组成和结构的变化不仅可以指示水库的沉积作用,而且可以用于指示水库水质的变化^[9,38].底栖动物的生物指数近年来被广泛应用于水体水质及水生态系统健康的评价研究^[31,39-40].漫湾库区基于底栖动物生物指数的水质评价结果表明,沿着库区纵向梯度总体表现为,水体流动性和交换性较好的库区过渡区和河流区水质相对较好,而水体流动及交换条件较差的静水区和库区支流区水质相对较差.受上游梯级小湾水坝运行影响,2016年库区综合水质指标明显优于2011年.

不同种类底栖动物对环境的适宜性及对污染的耐受性和敏感度有所差异^[40]。本研究中,底栖动物以耐污类群占优势,其次均为中间类群。其中寡毛纲的苏氏尾鳃蚓、水丝蚓(*Limnodrilus* sp.)和霍普水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)的出现是水体富营养化及有机污染的重要指示物种^[9,15]。但采用底栖动物的生物指数评价漫湾库区的水质和水生态系统健康还有一定的局限性,受水坝不同季节运行调度的影响,底栖动物的种类和密度在水坝库区不同生境类型的分布很不均衡,具有很大的差异性。

梯级水坝对底栖动物群落结构和分布的影响是水体流速、泥沙沉积及蓄水水位等水文过程的综合影响^[15]。特别是底栖大型软体动物的分布对水库库区水位的变化和水体流速最为敏感,其种类仅分布于库区的静水区。漫湾水坝自 1995 年运行蓄水以来,水库淤积发展迅速。据 2011 年调查,坝前采样点水深 25~30 m,仅为 1995 年的 1/3。漫湾库区的迅速淤积也为底栖动物群落的发展提供了有利的生境条件,坝前底栖动物的群落组成向静水耐污种类占优势的方向发展。2016 年漫湾库区调查,坝前采样点水深与 2011 年相比变化不大,表明随着上游小湾梯级水坝的蓄水运行,库区径流及水位变化趋于稳定,泥沙来源减少,清水入库导致库区淤积速率进一步减缓,也为底栖动物群落的进一步发展和演替提供了有利的条件。

4 小 结

本研究选取澜沧江中下游水电基地最早建设和运行的漫湾水坝库区,分别于 2011 和 2016 年开展底栖动物定点采样,结合历史调研数据,分析了 20 年来库区底栖动物群落的演变趋势,在此基础上探讨了水坝运行特别是梯级水坝运行对底栖动物的种类组成、优势种、摄食功能群及分布格局的影响。基于底栖动物耐污值的生物指数评价结果表明,库区水体的水质状况表现出沿库区河流纵向梯度的变化。漫湾库区底栖动物群落的演变与上游梯级小湾水坝的调度运行及库区水文状况和泥沙淤积情况密切相关,并随着梯级水坝的运行仍处于动态变化中。

参考文献

- [1] Poff NLR, Allan JD, Bain MB, *et al.* The natural flow regime. *Bioscience*, 1997, **47**: 769–784
- [2] He DM, Zhao WJ, Chen LH. The ecological changes in Manwan reservoir area and its causes. *Journal of Yunnan University*, 2004, **26**: 220–226
- [3] Almeida D, Merino-Aguirre R, Angeler DG. Benthic invertebrate communities in regulated Mediterranean streams and least-impacted tributaries. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**: 34–42
- [4] Sun W-S (孙伟胜), Gu Q-H (顾钱洪), Dong J (董静), *et al.* Macrobenthic community structure and bioassessment for water quality of Banqiao Reservoir in Huaihe River basin. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2015, **26**(9): 2843–2851 (in Chinese)
- [5] Petesse ML, Petrere Jr M, Spigolon RJ. Adaptation of the reservoir fish assemblage index (RFAI) for assessing the Barra Bonita reservoir (São Paulo, Brazil). *River Research and Applications*, 2007, **23**: 595–612
- [6] Terra BDF, Araújo FG. A preliminary fish assemblage index for a transitional river-reservoir system in south-eastern Brazil. *Ecological Indicators*, 2011, **11**: 874–881
- [7] Shao M-L (邵美玲), Han X-Q (韩新芹), Xie Z-C (谢志才), *et al.* Comparative on macroinvertebrate communities along a cascade of reservoirs in Xiangxi River Basin. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2007, **27**(12): 4963–4971 (in Chinese)
- [8] Li B (李 斌), Shen H-L (申恒伦), Zhang M (张敏), *et al.* Changes of macrobenthos community and their relationships with environmental factors along cascading reservoirs of Xiangxi River Basin, China. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2013, **32**(8): 2070–2076 (in Chinese)
- [9] Shao M-L (邵美玲), Xie Z-C (谢志才), Ye L (叶麟), *et al.* Monthly change of community structure of zoobenthos in Xiangxi bay after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学报)*, 2006, **30**(1): 64–69 (in Chinese)
- [10] Helson JE, Williams DD. Development of a macroinvertebrate multimetric index for the assessment of low-land streams in the neotropics. *Ecological Indicators*, 2013, **29**: 167–178
- [11] Chen QW, Yang QR, Li RN, *et al.* Spring micro-distribution of macroinvertebrate in relation to hydro-environmental factors in the Lijiang River, China. *Journal of Hydro-environment Research*, 2013, **7**: 103–112
- [12] Xiong C-H (熊春晖), Zhang R-L (张瑞雷), Ji G-H (季高华), *et al.* Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Gehu, Jiangsu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2016, **27**(3): 927–936 (in Chinese)
- [13] Grumbine RE, Xu JC. Mekong Hydropower Development. *Science*, 2011, **332**: 178–179
- [14] Thompson C. First contact in the greater mekong, new species discoveries. Hanoi, Vietnam: WWF, Great Mekong, 2008
- [15] Jian D (简 东), Huang D-M (黄道明), Chang X-L (常秀岭), *et al.* The succession of zoobenthos in the mainstream of Hongshui River after the formation of the cascade reservoirs. *Journal of Hydroecology (水生态学杂志)*, 2010, **3**(6): 12–18 (in Chinese)
- [16] Tagliaferro M, Miserendino ML, Liberoff A, *et al.* Dams in the last large free-flowing rivers of Patagonia, the Santa Cruz River, environmental features, and macroinvertebrate community. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**: 500–509
- [17] Zhang M (张 敏), Cai Q-H (蔡庆华), Qu X-D (渠晓东), *et al.* Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica*

- Sinica* (生态学报), 2017, **37**(13): 4483–4494 (in Chinese)
- [18] Wang Z-Z (王忠泽), Zhang X-M (张向明). Eco-environmental and Ecological Resources in Manwan Hydropower Station Reservoir, Yunnan. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Li X-Y (李小艳), Peng M-C (彭明春), Dong S-K (董世魁), *et al.* Ecological risk assessment of hydropower dam construction on aquatic species in middle reaches of Lancang River, Southwest China based on ESHIPPO model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 517–526 (in Chinese)
- [20] Kimmel BL, Groeger AW. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective. Lake and Reservoir Management Report EPA-440/5-84-001. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 1984: 277–281
- [21] Petesse ML, Petreire Jr M, Spigolon RJ. Adaptation of the reservoir fish assemblage index (RFAI) for assessing the Barra Bonita reservoir (São Paulo, Brazil). *River Research and Applications*, 2007, **23**: 595–612
- [22] Perbiche-Neves G, Ferreira RAR, Nogueira MG. Phytoplankton structure in two contrasting cascade reservoirs (Paranapanema River, Southeast Brazil). *Biologia*, 2011, **66**: 967–976
- [23] Li JP, Dong SK, Liu SL, *et al.* Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 316–324
- [24] Wang D-M (王德铭), Wang M-X (王明霞), Luo S-Y (罗森源). The Handbook of Aquatic Organism Monitoring. Nanjing: Southeast University Press, 1991 (in Chinese)
- [25] Zhang J-M (张觉民), He Z-H (何志辉). Manual of Investigation for Fisheries Resources in Inland Waters. Beijing: China Agriculture Press, 1991 (in Chinese)
- [26] Wang H-Z (王洪铸). Studies on Taxonomy, Distribution and Ecology of Micordrile Oligochaetes of China. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)
- [27] Liu Y-Y (刘月英), Zhang W-Z (张文珍), Wang Y-X (王跃先), *et al.* Economic Fauna of China: Freshwater Mollusca. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese)
- [28] Morse JC, Yang L-F (杨莲芳), Tian L-X (田立新). Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994 (in Chinese)
- [29] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, *et al.* Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. 2nd Ed. EPA 841-B-99-002. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999
- [30] Wu D-H (吴东浩), Wang B-X (王备新), Zhang Y (张咏), *et al.* Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2011, **34**(2): 129–134 (in Chinese)
- [31] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳). A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(12): 2768–2775 (in Chinese)
- [32] Wang C (王川), Li B (李斌), Xie S-G (谢嗣光), *et al.* The macrobenthic communities and distribution of the Lancang River. *Freshwater Fisheries* (淡水渔业), 2013, **43**(1): 37–43 (in Chinese)
- [33] Wei G-L (魏国良), Cui B-S (崔保山), Dong S-K (董世魁), *et al.* Impact of hydropower development on river ecosystem service: A case study from the Manwan Hydropower Project. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2008, **28**(2): 235–242 (in Chinese)
- [34] Zhong H-P (钟华平), Liu H (刘恒), Geng L-H (耿雷华). Cumulative effects of Lancang River basin cascade hydropower development on ecology and environment. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2007, **37**(3): 253–258 (in Chinese)
- [35] Liu Q-G (刘其根), Zha Y-T (查玉婷), Chen L-Q (陈立侨), *et al.* Macrozoobenthos community structure and its indicative significance in water quality bio-assessment of Fenshuijiang Reservoir, Zhejiang Province of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1377–1384 (in Chinese)
- [36] Luo H (罗欢), Chen S (陈蹇), Wu Q (吴琼), *et al.* Effects of cascade hydroelectric exploitation on community structure of macrobenthos in Wujiang River. *Pearl River* (人民珠江), 2016, **37**(5): 80–84 (in Chinese)
- [37] Chen H (陈浒), Li H-Q (李厚琼), Wu D (吴迪), *et al.* Effects of step hydroelectric exploits on community structure and biodiversity of macroinvertebrates in Wujiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2010, **19**(12): 1462–1470 (in Chinese)
- [38] Sun X-N (孙希宁), Wu M-M (武满满), Ma Y-F (马艳芳), *et al.* Bioassessment of ecological health based on benthic macroinvertebrate in Anli Reservoir wetland. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2009, **32**(6): 165–168 (in Chinese)
- [39] Zhang Y-P (张跃平). A Study on Tolerance Value of Benthic Macroinvertebrates and Biotic Index in Jiangsu Province. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [40] Lv G-J (吕光俊), Xiong B-X (熊邦喜), Liu M (刘敏), *et al.* The community structure of macrozoobenthos and water quality assessment on different trophic types of reservoirs. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(10): 5339–5349 (in Chinese)

作者简介 李晋鹏,男,1984年出生,博士. 主要从事流域水环境、水生态学研究. E-mail: lij_p_cool@126.com

责任编辑 肖红

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. 应用生态学报, 2017, **28**(12): 4101–4108

Li JP, Dong S-K, Peng M-C, *et al.* Effects of cascading hydropower dams operation on the structure and distribution pattern of benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(12): 4101–4108 (in Chinese)