

doi: 10.7541/2019.076

长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析

马雅雪^{1,2} 姚维林^{1,2} 袁赛波^{1,2} 刘学勤¹ 王洪铸¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为系统了解目前长江中下游干流大型底栖动物群落结构现状, 于2016年5—6月和10—12月对长江干流宜昌-安庆段进行2次调查。共记录大型底栖动物96种, 水生昆虫种类数最多, 占总数的49.0%。大部分物种(58.7%)的出现频率都较低(<1%), 且各江段种类组成差异较大。大型底栖动物密度为(213±58) ind./m², 生物量为(0.202±0.066) g/m²。大型底栖动物群落结构汛前汛后差异显著, 汛后种类数和现存量均明显下降。与建坝前资料相比, 大型底栖动物群落结构发生较大改变, 种类数增加, 现存量下降。环境分析表明影响大型底栖动物分布的主要因素是流速, 底质和水质的影响不大。大型底栖动物现存量下降与建坝后干流冲刷加剧有关, 针对底栖动物保护, 建议开展水沙调节、营造缓流生境并加强洲滩保护。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 长江干流; 流速; 冲刷

中图分类号: S932.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2019)03-0634-09

自然水流体(Natural flow regime)是河流生态系统物种繁多、物产丰富的主要驱动力, 也是维持河流生态系统健康必不可少的条件^[1, 2]。近几十年来, 由于三峡大坝建设、流域水电开发及全球气候变化等因素, 长江中下游干流水文情势发生了较大改变。在三峡水库蓄水后, 坝下游年均径流量减少6%—10%, 年均输沙量减小63%—86%, 出库泥沙明显偏细, 导致河床冲刷^[3]。水文情势的改变必然对中下游生态系统产生较大影响。河床冲刷加剧导致底质不稳定, 将对水生生物特别是大型底栖动物产生严重的不利影响^[4—6]。

大型底栖动物是河流生态系统中的重要次级生产者, 是鱼类的重要饵料来源, 在维持河流生物多样性及生态系统健康中起着重要作用^[7, 8]。长江中下游大型底栖动物种类丰富, 仅软体动物就多达167种^[9]。然而, 有关大型底栖动物的研究多集中在中下游湖泊, 对干流的报道较少。在三峡大坝建坝前, 中国科学院水生生物研究所于1987年对宜昌至南京17个江段进行了系统的调查(内部资料); 随后, Xie等^[10]对宜昌-南京段大型底栖动物进行了跟踪调查。在建坝后, 有关大型底栖动物的研究逐渐增多, 但大部分在单一江段或少数江段开展^[11—14], 仅

赵伟华^[15]于2005—2007年对枝江至江阴11个江段开展了大尺度调查。近十年来, 尚未见对中下游干流大型底栖动物的系统研究。本文对长江干流宜昌-安庆段共13个江段大型底栖动物开展了调查, 对比了汛前、汛后大型底栖动物群落结构, 并结合历史数据分析了建坝前后大型底栖动物群落结构的差异, 探讨了水文、底质及水质对大型底栖动物群落结构的影响, 以期对干流生态修复及大坝生态调度提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究调查区域为长江干流宜昌到安庆段, 全长约1000 km。该区域为亚热带季风区, 四季分明, 年平均气温16—18℃, 年平均降雨为1100 mm^[16]。区域内除了通江湖泊洞庭湖水系和鄱阳湖水系汇入外, 还有清江、汉江大型支流汇入。以汉口水文站为例, 多年年均径流量为7040亿 m³, 年输沙量为3.37×10¹¹ kg^[17]。

1.2 采样时间与样点设置

在长江干流宜昌至安庆段, 共设置13个采集区域对大型底栖动物及环境参数进行调查(图1)。野

收稿日期: 2018-05-21; 修订日期: 2018-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(51579234)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (51579234)]

作者简介: 马雅雪(1991—), 女, 山西晋中人; 硕士研究生; 主要研究底栖动物水文生态学。E-mail: yaxuema@126.com

通信作者: 刘学勤(1979—)。E-mail: xqliu@ihb.ac.cn

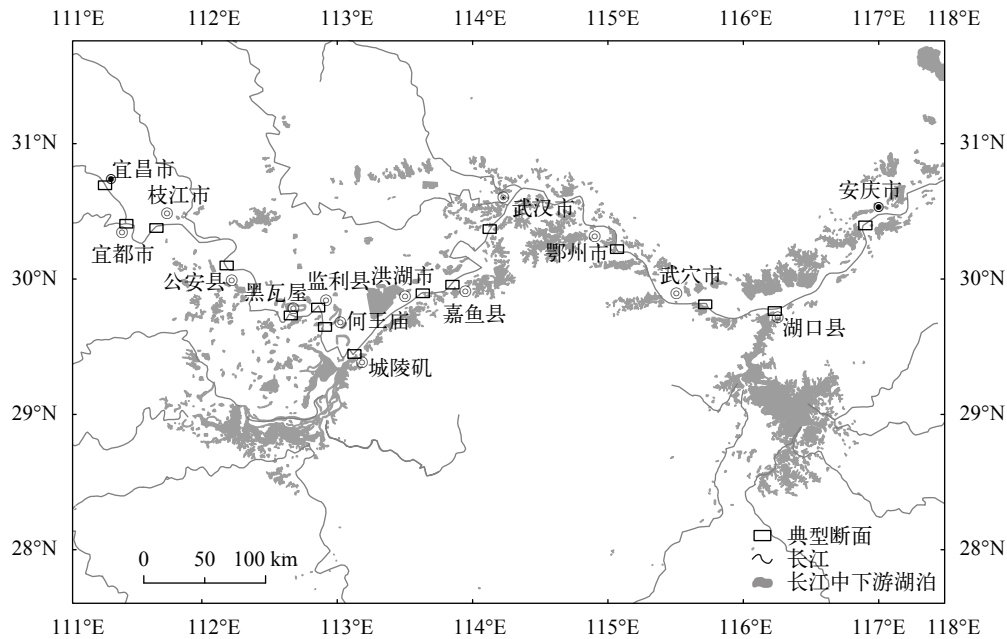


图1 长江干流大型底栖动物采集江段

Fig. 1 Sampling reaches of macrozoobenthos of the Yangtze mainstem

外调查于2016年5—6月(汛前)和10—12月(汛后)分2次进行,2017年5月对武穴和湖口段进行了补充调查。依据河道特征及实际考察条件,在每个江段设置采集样点15—18个,从沿岸带到河道中间,采集样点水深范围0.1—22.5 m,涵盖采集江段的主要生境类型。2次调查样点总数为415个,其中采集到大型底栖动物样品数231个。

1.3 调查方法

大型底栖动物的采集用加重的彼得森采泥器(1/16 m²),泥样经100目(孔径150 μm)铜筛清洗后将大型底栖动物检出,样品用10%的福尔马林固定保存。所有样品带回实验室进行鉴定、计数并称重;标本鉴定参考相关工具书[18—25];通过干湿比将大型底栖动物湿重转换为干重^[15,26]。

调查的环境参数包括水文、底质和水质参数。水文参数包括:水深、表层流速、近底流速、平均流速和剪切流速。运用走航式多普勒剖面流速仪(SonTek River Surveyor M9)对采集江段的剖面流速进行现场测定。剪切流速反映水流对底质的摩擦作用,参照Smith^[27]和Statzner等^[28]的公式进行计算。底质参数包括:底质类型、粒径、总氮、总磷和有机质含量。底质类型依据现场观察分为硬土、淤泥、沙、细砾石、粗砾石、鹅卵石和大石块。粒径用比重法测定,总氮用凯式法测定,总磷用碱熔-钼锑抗分光光度法测定,有机质包括总有机质和粗颗粒有机质(> 150 μm),总有机质用重铬酸钾法测定,粗颗粒有机质用灼烧法测定(均参

照国家生态环境部土壤环境质量标准测定方法)。水质参数包括:透明度、水温、溶解氧、电导率和pH。透明度用Secchi盘测量,其余参数用YSI-Pro Plus便携式多参数水质分析仪和Pro ODO光学溶氧仪测定。

1.4 数据处理及分析

优势种界定参照赵伟华^[15],以相对密度或生物量百分比大于5%且出现频率>1%为标准。底栖动物与环境参数的相关关系用Spearman秩相关分析,底栖动物沿主要环境参数的分布规律用分位数回归分析。统计分析用R 3.4, SPSS 22.0。

2 结果

2.1 环境参数

表1显示了调查期间长江干流的主要水文环境参数。分析表明水深、电导率和pH在汛前显著大于汛后($P < 0.05$),溶解氧汛前显著低于汛后,其他参数差异不明显。

2.2 群落结构

共记录大型底栖动物96属种,隶属于3门10纲,其中水生昆虫47属种(占总种类数的49.0%)、寡毛类20属种(20.8%)、软体动物15属种(15.6%),此外还发现甲壳纲、蛭纲、多毛纲等。大部分底栖动物的出现频率较低,58.7%的物种出现频率低于1%。宜昌江段种类数最高为39种,其次为枝江和宜都江段,分别为33种和31种;城陵矶和武穴江段最低,均为16种(图2)。

调查区域大型底栖动物密度为(213±58) ind./m²(平均值±标准误,下同)。在采集到大型底栖动物的样点中,水生昆虫占总密度的43.5%,甲壳纲(以钩虾为主)占25.6%,寡毛类占22.7%,软体动物占5.5%。从各江段来看,宜都段密度最高为773 ind./m²,其次为武汉段613 ind./m²;武穴和城陵矶段最小,分别为26和35 ind./m²。大型底栖动物生物量为(0.202±0.066) g/m²(干重,下同),其中水生昆虫占总量的36.9%,甲壳纲占24.3%,寡毛类占22.6%,软体动物占13.1%。从各江段来看,湖口段最高为0.877 g/m²,公安段最低为0.006 g/m²(图3)。整个调查区域优势种为水丝蚓属(*Limnodrilus* sp.)1种、仙女虫属(*Nais* sp.)1种、多足摇蚊属(*Polypedilum* sp.)1种、环棱螺属(*Bellamyia* sp.)1种、钩虾属(*Gammarus* sp.)1种。多足摇蚊属1种和钩虾属1种在所有江段都占优势,水丝蚓属1种和仙女虫属1种在武汉以上

江段占优势,而环棱螺属一种仅在洪湖、湖口、安庆段占优势。

大型底栖动物群落结构在汛前和汛后有较大差异。种类数在汛前明显高于汛后,与汛前相比,大部分江段汛后种类数下降10%—76%,鄂州江段汛后种类数增加60%。在密度方面,大部分江段其余江段汛后密度下降30%—90%,枝江、武穴和湖口江段汛后密度上升25%—95%。在生物量方面,枝江、洪湖、武汉、鄂州、武穴、湖口和安庆江段汛后采集到软体动物,生物量上升70%—940%,其余江段生物量下降30%—76%。

2.3 大型底栖动物现存量与环境参数的关系

大型底栖动物现存量与近底流速、平均流速和剪切流速均显著相关,但这些水文参数之间也存在显著相关性(表2)。由于近底流速直接作用于底质生境,本文选择近底流速进一步分析。大型底栖

表1 长江干流宜昌-安庆段的环境参数

Tab. 1 Environmental parameters of Yichang-Anqing reaches of the Yangtze mainstem

环境参数Environmental parameters	汛前		汛后		Wilcoxon秩和检验	
	平均值(最小值—最大值)	平均值(最小值—最大值)	W	P		
水深Water depth (m)	6.4 (0.5—22.5)	4.9 (0.1—16.7)	132	0.01		
表层流速Surface velocity (m/s)	0.433 (0—1.755)	0.348 (0—1.943)	109	0.23		
近底流速Near bottom velocity (m/s)	0.517 (0—1.597)	0.445 (0—2.002)	119	0.08		
平均流速Mean velocity (m/s)	0.561 (0—1.721)	0.512 (0—2.069)	106	0.29		
剪切流速Shear velocity (m/s)	0.02 (0—0.061)	0.019 (0—0.075)	106	0.29		
中值粒径Medium grain diameter (mm)	—	0.63 (0.01—1.1)	—	—		
总氮Total nitrogen (g/kg)	—	0.46 (0.08—2.35)	—	—		
总磷Total phosphorus (g/kg)	—	0.57 (0.28—0.91)	—	—		
总有机质Total organic matter (g/kg)	—	9.3 (0—36.4)	—	—		
粗颗粒有机质Coarse particulate organic matter (g/kg)	1.1 (0—9.4)	0.8 (0—6.4)	96	0.17		
透明度Secchi depth (cm)	70 (10—210)	54 (5—170)	101	0.42		
水温Water temperature (°C)	20.7 (15.3—25.6)	18.1 (12.8—22.7)	139	0.17		
溶解氧Dissolved oxygen (mg/L)	7.4 (5.6—9.4)	8.8 (7.6—10.5)	8	<0.01		
电导率Conductivity (s/cm)	282.9 (111.8—367.2)	248.2 (95.6—350.8)	129	0.02		
pH	7.74 (7.04—7.95)	6.69 (6.04—7.03)	169	<0.01		

注:—为未测量或未计算,粗体为达到显著水平($P<0.05$)

Note:— indicates not measured or not calculated, bold indicates significant correlations ($P<0.05$)

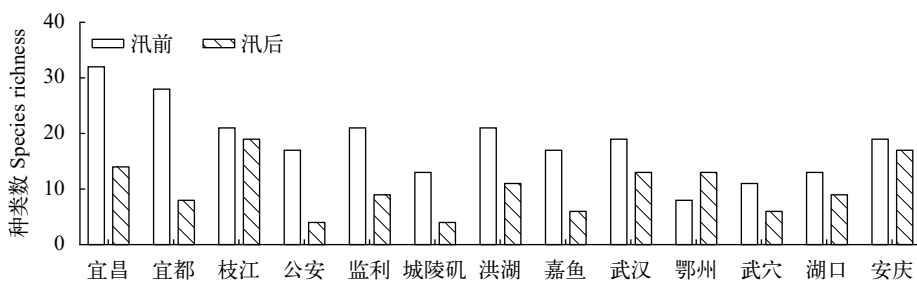


图2 长江干流各江段大型底栖动物种类数

Fig. 2 Species richness of macrozoobenthos in the Yangtze mainstem

动物总密度和总生物量沿近底流速的分布一致, 即当近底流速小于0.7 m/s左右时, 现存量与流速关系不显著; 在0.7—1.3 m/s时, 呈负相关关系; 大于1.3 m/s时, 无大型底栖动物分布(图4)。寡毛类和水生昆虫现存量沿近底流速的分布与底栖动物总量一致。Spearman相关分析显示底栖动物现存量与底质类型、中值粒径、底泥总氮、有机质和水体溶解氧、pH显著相关, 因环境参数之间的自相关性(表2), 考虑生态学意义选择底泥粗颗粒有机质和水体pH与底栖动物密度进行散点图分析, 结果显示它们之间的关系不大(图5和图6)。

3 讨论

本文对长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物进行了调查, 研究结果较为全面地反映了长江中游干流大型底栖动物的群落结构现状。本研究记录大型底栖动物96种, 表明目前长江干流仍旧维持了较高的大型底栖动物多样性。通过与三峡大坝建坝前后历史资料对比^[10, 15], 我们发现中游干流大型底栖动物种类数约是建坝前1987—1999年的2倍, 约是建坝后2005—2007年的3倍, 以水生昆虫的增幅最大。种类数的增加主要与本次调查采样努力较大有关。同时, 建坝后部分江段(如宜昌段)底质类型发生改变, 以块石为主的生境面积增加, 为水生昆虫提供了适宜的栖息场所。与种类数增加相反, 大型底栖动物现存量表现出大幅下降的趋势。与建坝前1987年相比, 大型底栖动物密度下降37%—99%, 生物量下降92%—98%; 与建坝后2005—

2007年相比, 密度下降33%—94%, 生物量下降92%—98%。在优势种方面, 与2005—2007年相比, 苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、方格短沟蠕(*Semisulcospira cancellata*)、淡水壳菜(*Limnoperna lacustris*)现存量减少, 不再占优势; 仙女虫属和环棱螺属现存量增加, 成为优势种。可见, 建坝后中下游干流大型底栖动物群落结构发生了巨大变化。

本研究发现影响干流大型底栖动物分布的主要因素是流速, 底质和水质的影响不大。在近底流速超过0.7 m/s时, 大型底栖动物现存量随流速增加而下降; 在流速超过1.3 m/s的区域, 没有发现大型底栖动物分布, 这与流速过大, 冲刷加剧有关。参考河流动力学原理, 本研究中底质中值粒径均值为0.63 mm, 对应的起流速为0.5—0.8 m/s^[29]。当近底流速超过起流速时, 底质移动加剧, 冲刷作用加强, 导致大型底栖动物现存量减小。同时, 由于目前中下游悬移质粒径偏细, 泥沙以搬运为主, 沉积过程很弱^[30], 有机质等营养物质不易积累, 对大型底栖动物的生存和建群不利。在三峡大坝建坝后, 出库泥沙偏细, 导致中下游河床冲刷加剧, 目前已发展至大通段^[3], 这是目前干流大型底栖动物现存量大幅减少的主要原因。同时, 从汛前汛后对比也可以看出冲刷对大型底栖动物现存量的影响。由于汛期的冲刷作用, 大部分江段汛后大型底栖动物现存量出现不同程度的下降, 以武汉以上江段最为明显(图3)。

以往的研究表明底质和水质对大型底栖动物群落结构有较大影响^[31—33], 但在本研究中两者的影

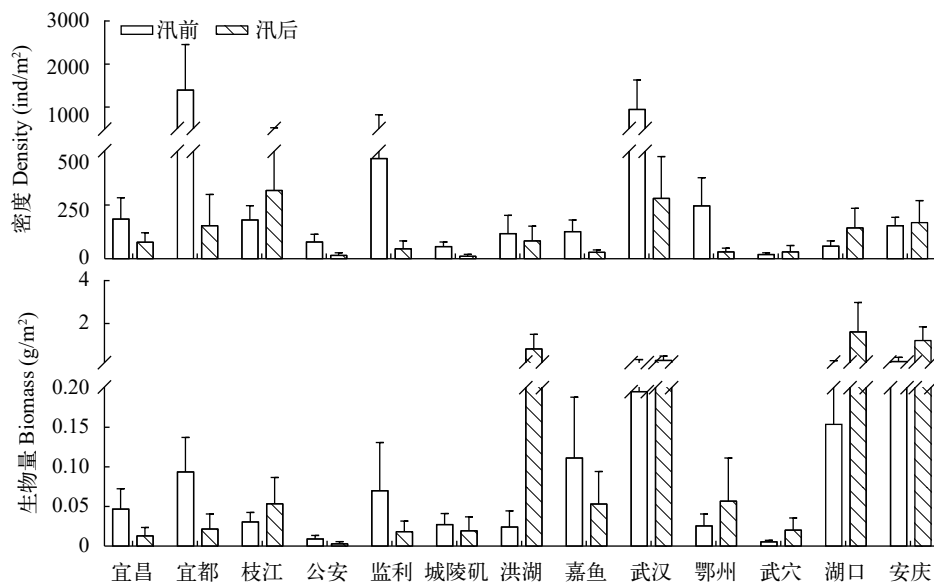


图3 长江干流各江段大型底栖动物现存量

Fig. 3 Standing crops of macrozoobenthos in the Yangtze mainstem

表 2 长江干流大型底栖动物现存量与环境参数的Spearman秩相关关系(达到显著水平以粗体显示, * $P<0.05$, ** $P<0.01$)
Tab. 2 Spearman rank correlations between standing crops of macrozoobenthos and environmental parameters (significant correlations in bold, * $P<0.05$, ** $P<0.01$)

WD	SV	NBV	MV	SHV	ST	D ₅₀	TN	TP	TOM	CPOM	SD	WT	DO	Cond	pH
SV	0.25 **														
NBV	0.42 **	0.41 **													
MV	0.47 **	0.42 **	0.88 **												
SHV	0.39 **	0.42 **	0.87 **	0.99 **											
ST	0.16 **	0.15 **	0.13 **	0.16 **	0.20 **										
D ₅₀	-0.06	0.14	0.23	0.24 *	0.25 *	0.74 **									
TN	0.13	-0.20	-0.30 *	-0.33 **	-0.34 **	-0.72 **	-0.80 **								
TP	0.00	0.09	-0.04	-0.07	-0.03	0.00	0.11								
TOM	0.16	-0.29 *	-0.43 **	-0.40 **	-0.41 **	-0.61 **	0.79 **	0.07							
CPOM	-0.15 **	-0.12 *	-0.16 **	-0.18 **	-0.34 **	-0.40 **	0.53 **	0.01	0.43 *						
SD	0.17 **	0.09	0.12 *	0.13 **	0.16 **	0.44 *	-0.20	0.22	-0.19	-0.15 *					
WT	0.02	0.08	0.01	-0.03	0.04	0.43 **	-0.35 **	0.33 **	-0.26 *	0.07	0.11 *				
DO	-0.10 *	-0.16 **	-0.06	-0.03	-0.04	-0.49 **	0.41 **	-0.29 *	0.36 **	-0.07	-0.14 *	-0.77 **			
Cond	0.07	0.18 **	0.10	0.12 *	0.13 **	0.39 **	-0.34 **	0.29 *	-0.36 **	-0.18 **	0.64 **	0.18 *	-0.35 **		
pH	0.11 *	0.14 **	0.14 **	0.10 *	0.09	-0.05	0.11	-0.08	0.12	-0.13 *	0.24 **	0.13 *	-0.50 **	0.55 **	
D _{total}	-0.08	-0.09	-0.19 **	-0.21 **	-0.22 **	-0.29 **	0.39 **	0.00	0.48 **	0.21 **	-0.02	0.05	-0.17 **	0.04	0.17 **
B _{total}	-0.09	-0.07	-0.20 **	-0.23 **	-0.28 **	-0.36 **	0.40 **	-0.03	0.50 **	0.22 **	-0.08	0.03	-0.14 **	-0.04	0.13 **
D _{oligochaeta}	-0.07	-0.16 **	-0.20 **	-0.22 **	-0.21 **	-0.23	0.35 **	-0.10	0.43 **	0.16 **	-0.02	-0.04	-0.08	0.12 *	0.11 *
B _{oligochaeta}	-0.06	-0.16 **	-0.20 **	-0.22 **	-0.23 **	-0.23 *	0.34 **	-0.09	0.43 **	0.16 **	-0.06	-0.02	-0.08	0.09	0.09
D _{insect}	-0.11 *	-0.12 *	-0.17 **	-0.19 **	-0.20 **	0.01	0.13	0.23	0.18 **	0.14 **	0.14 **	0.14 **	-0.26 **	0.19 **	0.29 **
B _{insect}	-0.10 *	-0.09	-0.14 **	-0.17 **	-0.18 **	0.01	0.13	0.18	0.17 **	0.15 **	0.15 **	0.15 **	-0.27 **	0.19 **	0.30 **

注: WD. 水深water depth, m; SV. 表层流速surface velocity, m/s; NBV. 近底流速near bottom velocity, m/s; MV. 平均流速mean velocity, m/s; SHV. 剪切流速shear velocity, m/s; ST. 底质类型 substrate type; D₅₀. 中值粒径median grain size, mm; TN. 总氮total nitrogen, g/kg; TP. 总磷total phosphorus, g/kg; TOM. 总有机质total organic matter, g/kg; CPOM. 粗颗粒有机质coarse particulate organic matter, g/kg; SD. 透明度Secchi depth, cm; WT. 水温water temperature, °C; DO. 溶解氧dissolved oxygen, mg/L; Cond. 电导率conductivity, s/cm

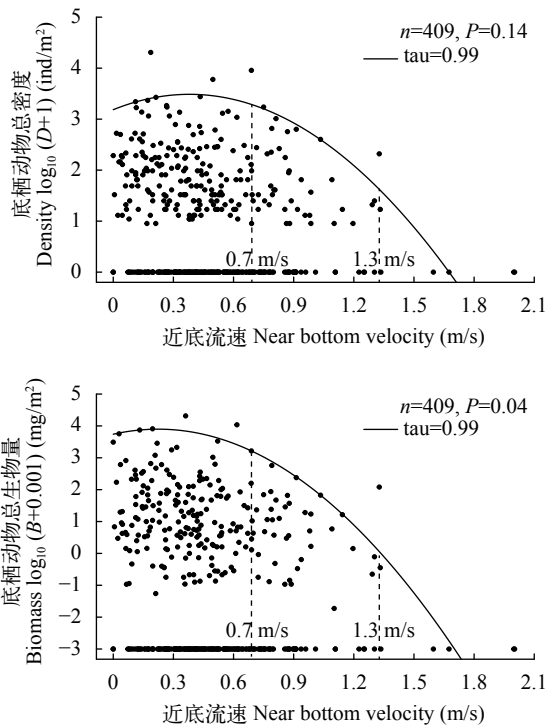


图4 大型底栖动物现存量与近底流速的关系

Fig. 4 The relationships between standing crops of macrozoobenthos and near bottom velocity

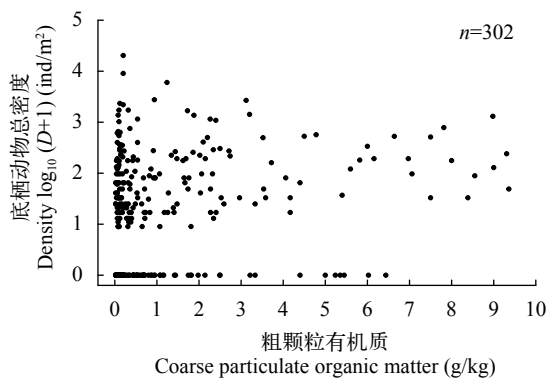


图5 大型底栖动物密度与粗颗粒有机质的关系

Fig. 5 The relationship between density of macrozoobenthos and coarse particulate organic matter of substrate

响较小。主要原因如下:一方面,流速影响过大,掩盖了不同底质和水质条件下大型底栖动物的差异;另一方面,大部分江段底质和水质条件相似、同质化程度较高。

在河流食物网中,大型底栖动物是重要的次级生产者,支撑了食物网上层的大部分物种,如鱼类、鸟类以及江豚等^[8, 34—36]。目前,长江中下游干流大型底栖动物现存量大幅下降,这可能是导致该区域鱼类资源量下降的一个重要因素^[37, 38]。恢复大型底栖动物资源量是保护长江干流生态系统的

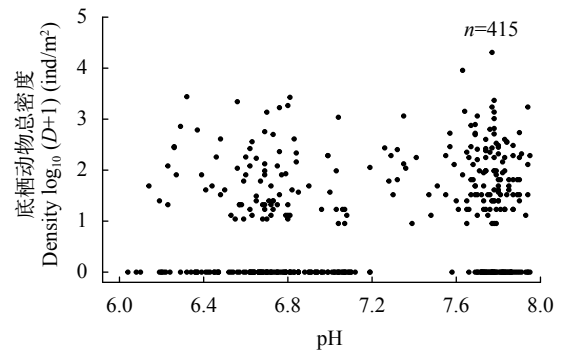


图6 大型底栖动物密度与表层水pH的关系

Fig. 6 The relationship between density of macrozoobenthos and pH of surface water

一个重要内容,我们建议:(1)开展闸坝生态调度,对干流水沙进行调节,减缓冲刷带来的负面影响;(2)在有条件的江段营造缓流生境,加强洲滩保护,保护和恢复大型底栖动物的栖息地。

致谢:

感谢冯伟松、王姝然、赵永晶、高文娟在野外采样中给予的帮助,感谢和雅静在样品鉴定中的帮助。

参考文献:

- [1] Poff N L R, Allan J D, Bain M B, *et al.* The natural flow regime [J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 769—784
- [2] Lytle D A, Poff N L R. Adaptation to natural flow regimes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(2): 94—100
- [3] The Project Team of Three Gorges Project Stage Assessment of Chinese Academy of Engineering. Three Gorges Project Stage Assessment Report (Integrated Volume) [M]. Beijing: China Water Power Press. 2010, 1—400 [中国工程院三峡工程阶段性评估项目组. 三峡工程阶段性评估报告(综合卷), 北京: 中国水利水电出版社. 2010, 1—400]
- [4] Shi Y. Study on the Impact Assessment of Flood Control of the Mid-Lower Reaches of the Yangtze River after the Application of the Three Gorges Project [M]. Wuhan: Changjiang Press. 2011, 1—167 [施勇. 三峡工程运用后对长江中下游防洪的影响评价研究. 武汉: 长江出版社. 2011, 1—167]
- [5] Thomson J R, Lake P S, Downes B J. The effect of hydrological disturbance on the impact of a benthic invertebrate predator [J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 628—642
- [6] Holt C R, Pfitzer D, Scalley C, *et al.* Macroinvertebrate community responses to annual flow variation from river regulation: an 11-year study [J]. *River Research and Applications*, 2015, 31(7): 798—807
- [7] Liang Y L, Wu T H, Xie Z C. Status of Macrozoobenthos

- and Assessment of Fisheries in Baoan Lake - Management of Grass - Type Lake Resources, Environment and Fishery Ecology [M]. Beijing: Science Press. 1995, 178—192 [梁彦龄, 吴天惠, 谢志才. 保安湖底栖动物现状及渔业评价-草型湖泊资源环境与渔业生态学管理. 北京: 科学出版社. 1995, 178—192]
- [8] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling [J]. *BioScience*, 1999, **49**(2): 119—127
- [9] Shu F Y, Wang H J, Pan B Z, *et al.* Assessment of species status of Mollusca in the min-lower Yangtze Lakes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(6): 1051—1058 [舒凤月, 王海军, 潘保柱, 等. 长江中下游湖泊贝类物种濒危状况评估. 水生生物学报, 2009, **33**(6): 1051—1058]
- [10] Xie Z C, Liang Y L, Wang J, *et al.* Preliminary studies of macroinvertebrates of the mainstream of the Changjiang (Yangtze) River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(suppl.): 148—157
- [11] Duan X H, Wang Z Y, Yu G A. Ecological assessment of the Yangtze River eco-system with benthic invertebrate as indicator species [J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2009, **18**(3): 241—247 [段学花, 王兆印, 余国安. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(3): 241—247]
- [12] Pan B Z, Wang H Z, Ban X, *et al.* An exploratory analysis of ecological water requirements of macroinvertebrates in the Wuhan branch of the Yangtze River [J]. *Quaternary International*, 2015, **380—381**: 256—261
- [13] Li S, Xiong F, Wang K, *et al.* Effect of tetrahedron permeable frames on the community structure of benthic macroinvertebrates in the middle Yangtze River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(6): 72—79 [李莎, 熊飞, 王珂, 等. 长江中游透水框架护岸工程对底栖动物群落结构的影响. 水生态学杂志, 2015, **36**(6): 72—79]
- [14] Chen X F, Xia W, Pan B Z, *et al.* Community structure characteristics of macroinvertebrate from Yichang to Wuhan in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pskiensis*, 2017, **53**(5): 973—981 [陈秀粉, 夏炜, 潘保柱, 等. 长江中游宜昌至武汉段底栖动物群落结构特征研究. 北京大学学报(自然科学版), 2017, **53**(5): 973—981]
- [15] Zhao W H. Macroecological patterns of macrozoobenthos in rivers of China and environmental flow requirements in lower reaches of the Yellow River [D]. Thesis for Doctor of Science, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2010 [赵伟华. 中国河流底栖动物宏观格局及黄河下游生态需水研究. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2010]
- [16] Editorial Committee of Encyclopedia of River and Lakes in China. Encyclopedia of River and Lakes in China - Section of Changjiang River Basin (Vol. One) [M]. Beijing: China Water Power Press. 2010. 1—510 [《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典-长江卷(上). 北京: 中国水利水电出版社. 2010. 1—510]
- [17] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Chinese River Sediment Bulletin of 2016 [M]. Beijing: China Water Power Press. 2016, 1—23 [中华人民共和国水利部. 2016年中国河流泥沙公报. 北京: 中国水利水电出版社. 2016, 1—23]
- [18] Dalian Institute of Aquaculture. Freshwater Biology-Volume 1 (Taxonomy) [M]. Beijing: China Agriculture Press. 1982, 1—346 [大连水产学院. 淡水生物学-上册(分类学部分). 北京: 农业出版社. 1982, 1—346]
- [19] He X B. Studies on faunae of aquatic Oligochaeta (Annelida) in Tibet and four large rivers of China [D]. Thesis for Doctor of Science, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2011 [何雪宝. 西藏和四条大型河流水栖寡毛类区系研究. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2011]
- [20] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality-Volume 13 [M]. Jiangsu: Hohai University Press. 1994, 1—570
- [21] Epler J H. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina [M]. A Guide to the Taxonomy of the Midges of the Southeastern United States, Including Florida. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, NC, and St. Johns River Water Management District, Palatka, FL. 2001, 1—526
- [22] Zhou C F, Su C R, Gui H. Outline of Chinese Mayflies [M]. Beijing: Science Press. 2015, 1—310 [周长发, 苏翠荣, 归鸿. 中国蜉蝣概述. 北京: 科学出版社. 2015, 1—310]
- [23] Liu Y Y. Chinese Economic Animal - Freshwater Mollusca [M]. Beijing: Science Press. 1979, 1—134 [刘月英. 中国经济动物志-淡水软体动物. 北京: 科学出版社. 1979, 1—134]
- [24] Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X. Medical Shellfish [M]. Beijing: China Ocean Press. 1993, 1—156 [刘月英, 张文珍, 王耀先. 医学贝类学. 北京: 海洋出版社. 1993, 1—156]
- [25] Song D X, Feng Z Q. Grasshopper [M]. Beijing: Science Press. 1978, 1—176 [宋大祥, 冯钟琪. 蚂蚱. 科学出版社. 1978, 1—176]
- [26] Yan Y J, Liang Y L. On the relationships body-length and body-weight and the biochemical composition of macrozoobenthos [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2002, **30**(11): 114—116 [阎云君, 梁彦龄. 大型底栖动物体长体重关系和生化组成的研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, **30**(11): 114—116]
- [27] Smith I R. Turbulence in Lakes and Rivers [M]. Amsterdam: Freshwater Biol. Assoc. 1975, 1—79
- [28] Statzner B, Gore J A, Resh V H. Hydraulic stream eco-

- logy: observed patterns and potential applications [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, 7(4): 307—360
- [29] Lu J Y. Study on incipient velocity of sediment transport in the Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1991, 8(4): 57—64 [卢金友. 长江泥沙起动流速公式探讨. 长江科学院院报, 1991, 8(4): 57—64]
- [30] Shao X J, Wang X K. Introduction to River Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2005, 1—248 [邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论. 清华大学出版社. 2005, 1—248]
- [31] Duan X H, Wang Z Y, Tian S M. Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 47(9): 1553—1556 [段学花, 王兆印, 田世民. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验. 生态学报, 2007, 47(9): 1553—1556]
- [32] Pan B Z, Wang Z Y, He X B. Studies on assemblage characteristics of macrozoobenthos in the West River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(5): 851—856 [潘保柱, 王兆印, 何雪宝. 西江大型底栖动物群落特征研究. 水生生物学报, 2011, 35(5): 851—856]
- [33] Pan B Z, Wang H Z, Wang H J. A floodplain-scale lake classification based on characteristics of macroinvertebrate assemblages and corresponding environmental properties [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2014, 49: 10—17
- [34] Dodds W K. Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications [M]. Amsterdam: Academic Press. 2002, 1—569
- [35] Ding B Q, Liu H Z. Analysis of the fish feeding guiding composition in the Yangtze River [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2011, 30(1): 31—35 [丁宝清, 刘焕章. 长江流域鱼类食性同资源集团组成特征分析. 四川动物, 2011, 30(1): 31—35]
- [36] Lu Z C, Tian J S, Wang Z H, et al. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 69—76 [鹿志创, 田甲申, 王召会, 等. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚(*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*). 食性. 生态学报, 2016, 36(1): 69—76]
- [37] Xie S, Li Z, Liu J, et al. Fisheries of the Yangtze River show immediate impacts of the Three Gorges Dam [J]. *Fisheries*, 2007, 32(7): 343—344
- [38] Zhang G, Wu L, Li H, et al. Preliminary evidence of delayed spawning and suppressed larval growth and condition of the major carps in the Yangtze River below the Three Gorges Dam [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, 93(3): 439—447

COMMUNITY STRUCTURE AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF MACROZOOBENTHOS IN YICHANG-ANQING REACHES OF THE YANGTZE MAINSTEM

MA Ya-Xue^{1,2}, YAO Wei-Lin^{1,2}, YUAN Sai-Bo^{1,2}, LIU Xue-Qin¹ and WANG Hong-Zhu¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To systematically understand the community structure of macrozoobenthos in the mid-lower Yangtze mainstem, two field investigations were conducted on 13 sections along Yichang-Anqing reaches in May-June and October-December 2016, respectively. A total of 96 taxa of macrozoobenthos were recorded with the most abundant group of aquatic insects that account for 49.0% of the total. The frequency of occurrence was relatively low (<1%) for most species (58.7%), and species composition were obviously different among reaches. The density of macrozoobenthos was (213 ± 58) ind./m², and the biomass was (0.202 ± 0.066) g/m². Community structure was different between pre-flood and post-flood periods, where obvious decreases in both species number and standing crops were found in the latter. Compared with the pre-damming data, community structure of macrozoobenthos had increased species number and decreased standing crops. Environmental analyses showed that velocity was the key factor affecting the distribution of macrozoobenthos, while substrate and water quality parameters were of little importance. The sharp decline in standing crops of macrozoobenthos was closely related to the increased scouring effects in post-damming period. These results suggest to carry out regulation of flow and sediment, to create slow-flow habitats and to strengthen protection of sand bars with regard to macrozoobenthos conservation in the Yangtze mainstem.

Key words: Macrozoobenthos; Community Structure; Yangtze mainstem; Velocity; Scouring

附录 1 长江干流大型底栖动物种类名录
Appendix 1 Species list of macrozoobenthos in the Yangtze mainstem

中文名	学名	中文名	学名
多毛类		中国淡水蛭	<i>Novaculina chinensis</i>
多鳃齿吻沙蚕	<i>Nephtus polybranchia</i>	湖球蛭	<i>Sphaerium lacustre</i>
齿吻沙蚕属一种	<i>Nephtys</i> sp.	水生昆虫	
伪才女虫属一种	<i>Pseudopolydora</i> sp.	蜉蝣目	
寡毛类		四节蜉科一种	<i>Baetidae</i> sp.
湖沼管水蚓	<i>Aulodrilus limnobius</i>	四节蜉属一种	<i>Baetis</i> sp.
皮氏管水蚓	<i>A. pigueti</i>	长胫河花蜉	<i>Potamanthus longitibius</i>
多毛管水蚓	<i>A. pluriseta</i>	红纹蜉属一种	<i>Rhoenanthus</i> sp.
盘丝蚓属一种	<i>Bothrioneurum</i> sp.	蜻蜓目	
苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	色螭科一种	<i>Calopterygidae</i> sp.
克拉伯水丝蚓	<i>Limnodrilus claparedeianus</i>	大蜓属一种	<i>Cordulegaster</i> sp.
巨毛水丝蚓	<i>L. grandisetosus</i>	丝螭属一种	<i>Indoletes</i> sp.
霍甫水丝蚓	<i>L. hoffmeisteri</i>	襁翅目	
拟钝毛水丝蚓	<i>L. paramblysetus</i>	襁翅目一种	<i>Plecoptera</i> sp.
简明水丝蚓	<i>L. simplex</i>	半翅目	
奥特开水丝蚓	<i>L. udekemianus</i>	划蝽科一种	<i>Corixidae</i> sp.
水丝蚓属一种	<i>Limnodrilus</i> sp.	鞘翅目	
贝氏仙女虫	<i>Nais bretscheri</i>	鞘翅目一种	<i>Coleoptera</i> sp.
肥满仙女虫	<i>N. inflata</i>	叶甲科一种	<i>Chrysomelidae</i> sp.
简明仙女虫	<i>N. simplex</i>	毛翅目	
仙女虫属一种	<i>Nais</i> sp.	纹石蚕属一种	<i>Hydropsyche</i> sp.
拟仙女虫属一种	<i>Paranais</i> sp.	长角石蚕属一种	<i>Leptoceris</i> sp.
厚唇嫩丝蚓	<i>Teneridrilus mastix</i>	低头石蚕属一种	<i>Neureclipsis</i> sp.
嫩丝蚓属一种	<i>Teneridrilus</i> sp.	多距石蛾科一种	<i>Polycentropodidae</i> sp.
颤蚓属一种	<i>Tubifex</i> sp.	鳞翅目	
蛭纲		水蛭亚科一种	<i>Nymphulinae</i> sp.
八目石蛭	<i>Erpobdella octoculata</i>	双翅目	
石蛭属一种	<i>Erpobdella</i> sp.	无突摇蚊属一种	<i>Ablabesmyia</i> sp.
宽身舌蛭	<i>Glossiphonia lata</i>	阿克西摇蚊属一种	<i>Axarus</i> sp.
舌蛭属一种	<i>Glossiphonia</i> sp.	摇蚊属一种	<i>Chironomus</i> sp.
软体动物		环足摇蚊属一种	<i>Cricotopus</i> sp.
环棱螺属一种	<i>Bellamya</i> sp.	隐摇蚊属一种	<i>Cryptochironomus</i> sp.
小土蜗	<i>Galba pervia</i>	二叉摇蚊属一种	<i>Dicrotendipes</i> sp.
凸旋螺	<i>Gyraulus convexiusculus</i>	骑蜉摇蚊属一种	<i>Epoicocladius</i> sp.
大脐圆扁螺	<i>Hippenutis umbilicalis</i>	真开氏摇蚊属一种	<i>Eukiefferiella</i> sp.
钉螺指名亚种	<i>Oncomelania hupensis</i>	雕翅摇蚊属一种	<i>Glyptotendipes</i> sp.
纹沼螺	<i>Parafossarulus striatulus</i>	哈摇蚊属一种	<i>Harnischia</i> sp.
椭圆萝卜螺	<i>Radix swinhoei</i>	球附器摇蚊属一种	<i>Kiefferulus</i> sp.
萝卜螺属一种	<i>Radix</i> sp.	林摇蚊属一种	<i>Lipiniella</i> sp.
方格短沟蜷	<i>Semisulcospira cancellata</i>	小摇蚊属一种	<i>Microchironomus</i> sp.
河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	肛齿摇蚊属一种	<i>Neozavrelia</i> sp.
背瘤丽蚌	<i>Lamprotula leai</i>	直突摇蚊属一种	<i>Orthocladius</i> sp.
淡水壳菜	<i>Limnoperna lacustris</i>	拟摇蚊属一种	<i>Parachironomus</i> sp.
拟枝角摇蚊属一种	<i>Paracladopelma</i> sp.	虻科一种	<i>Tabanidae</i> sp.
拟长跗摇蚊属一种	<i>Paratanytarsus</i> sp.	大蚊科一种	<i>Tipulidae</i> sp.
间摇蚊属一种	<i>Paratendipes</i> sp.	双翅目	<i>Diptera</i> spp.
多足摇蚊属一种	<i>Polypedilum</i> sp.	甲壳动物	
前突摇蚊属一种	<i>Procladius</i> sp.	鼠妇	<i>Armadillidium vulgare</i>
萨摇蚊属一种	<i>Saetheria</i> sp.	钩虾属一种	<i>Gammarus</i> sp.
长跗摇蚊属一种	<i>Tanytarsus</i> sp.	等足目	<i>Isopoda</i> spp.
长足摇蚊属一种	<i>Tanypus</i> sp.	水蜘蛛	<i>Argyroneta aquatica</i>
摇蚊科一种	<i>Chironomidae</i> sp.	线虫纲一种	<i>Nematoda</i> sp.
蝇科一种	<i>Muscidae</i> sp.	涡虫纲一种	<i>Turbellaria</i> sp.