DOI:10.15928/j.1674-3075.2015.06.001

长江中游透水框架护岸工程对底栖动物群落结构的影响

李 莎[1],熊 飞[1],王 珂[2],段辛斌[2],刘绍平[2],陈大庆[2]

(1. 江汉大学生命科学学院,武汉 430056; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所,武汉 430223)

摘要:2014年3月对长江中游干流水陆洲、三八滩、金城洲和牯牛沙等江段四面六边透水框架护岸工程区大型底栖动物群落进行了调查,对比分析了工程区和对照区底栖动物群落结构和多样性差异,以了解航道整治透水框架工程实施对河流底栖动物群落的影响,为河流生态水利工程建设及生态修复提供依据。在每个调查站点工程区内设置3个采样点,工程区外设置3个对照点,对照点在工程区上游或下游设置,选取水流条件不受工程区影响的区域,且保证对照点水深、岸边植被等条件与工程区样点相近。在透水框架工程区及对照区共采集底栖动物22种,隶属于3门6纲8科;摇蚊幼虫种类最多(占50.0%),其次是寡毛类(27.2%)和软体动物(13.6%)。水陆洲、三八滩、金城洲和牯牛沙等江段透水框架工程区底栖动物密度分别为1450、175、125和160 ind/m^2,生物量分别为4.19、0.10、0.48和0.17 g/m^2;对照区底栖动物密度分别为140、20、35和33 ind/m^2,生物量分别为2.30、0.01、0.02和0.07 g/m^2。底栖动物多样性指数d_M、H'和J的变化范围工程区分别为0.21~1.37、0.41~1.62和0.38~0.87,对照区分别为0.14~0.40、0.28~0.96和0.41~0.68。透水框架工程区底栖动物种类丰度、密度、生物量和多样性指数表现出高于对照区的趋势,表明透水框架工程区群落结构较复杂并提高了底栖动物的多样性,可能与透水框架群能降低河水流速、减小河水对底质的冲击有关。

关键词:长江中游;四面六边透水框架;护岸工程;底栖动物;生物多样性

中图分类号:X835,TV861 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2015)06-0025-08

长江中游河流形态多变,水流冲刷严重,常常导致河势不稳定,河床演变剧烈,影响航运(葛华等,2009;王业祥等,2012)。在航道整治工程中,为确保航道稳定,常需对洲滩、岸坡等进行守护。传统的护滩、护岸工程主要采用鱼骨坝、抛石、软体排、现浇混凝土等结构以减少水流冲刷,防止泥沙流失,达到护滩护岸的目的(胡小卫等,2011;马爱兴等,2011)。尽管这些工程具有较好的护滩护岸效果,但很少考虑对河流生物的保护。近年来,生态型护滩、护岸技术越来越受关注(李冬和潘美元,2013;梁开明等,2014)。四面六边透水框架在长江航道整治工程中开始广泛应用,透水框架群具有减速、导流、消能作用,从而达到保护堤岸、稳定坡脚、减小冲刷坑深度、淤临造滩、控导河势等目的(徐国宾等,1994;徐国宾和张耀哲,2006;汪奇峰,2013)。透水框架群与传统的抛石、现浇混凝土护坡等生硬结构不同,在框体间留有空隙,能够允许水流通过,降低流速,促成泥沙淤积,在透水框架群体内形成一个相对稳定的生境条件,可供一些生物如植物、鱼类和底栖动物等栖息和躲避(高兴福等,2010;杨芳丽等,2012)。对四面六边透水框架的研究,主要集中在水力特性和减速促淤效果等方面(王南海等,1999;周根娣等,2005;刘倩颖等,2009;李晶等,2014),关于透水框架群建成后的生态效应,还缺乏监测和评估。对这些水利工程的生态监测和评价,可为工程技术优化和河流生物多样管理提供依据。

底栖动物生活在水体-沉积物界面这一特殊生境中,可综合反映来自不同生态单元的胁迫效应,是最常用的指示生物(王备新等,2005;Bonada et al,2006;吴东浩等,2011)。在美国和欧洲等发达国家,底栖动物已广泛应用于溪流及河流生物监测与评价(Barbour et al,1999)。一般认为,在航道护滩护底工程实施的过程中,会对水生生物产生一定的负面影响,工程实施后,部分生物多样性会逐渐恢复(陈会东和金辉虎,2010;杨芳丽等,2012)。长江中游透水框架护滩护底工程实施后,工程区底栖动物群落结构和多样性如何,是河流研究和管理者都很关心的问题。本研究对长江中游已建的透水框架工程区大型底栖动物群落进行了调查,通过工程区与非工

收稿日期:2015-05-08

基金项目:长江航道局荆江航道指挥部科研项目;武汉市市属高校教研课题(2014007);国家级大学生创新训练计划项目(201411072008);江汉大学学生学术科技项目(2014zd81)。

作者简介:李莎,1992年生,女,本科在读。

通信作者:熊飞,副教授,硕士研究生导师,主要从事水生生态学研究。E-mail: xf9603@163.com

程区的比较,以了解透水框架工程实施对河流底栖动物群落结构和多样性的影响,为河流生态水利工程建设及生态修复提供依据。

1　材料与方法

1.1　样点设置

2014 年 3 月枯水期对长江中游航道整治工程所建的四面六边透水框架群护岸工程区底栖动物进行调查,共设置 4 个调查站点(图 1)。S1 位于枝江市董市镇水陆洲,工程区建成于 2009 年,主要是对水陆洲边滩进行守护;S2 位于荆州沙市区三八滩,工程区建成于 2009 年,主要是对三八滩边滩进行守护;S3 位于荆州沙市区金城洲,工程区建成于 2011 年,主要是对金城洲边滩进行守护;S4 位于黄石市西塞山下游牯牛沙,一期工程区建成于 2010 年,主要是对长江右岸牯牛沙边滩进行守护。在每个调查站点工程区内设置 3 个采样点,工程区外设置 3 个对照点,共 12 个工程区采样点、12 个对照采样点。对照点在工程区上游或下游设置,选取水流条件不受工程区影响的区域,且保证对照点水深、岸边植被等条件与工程区样点相近。

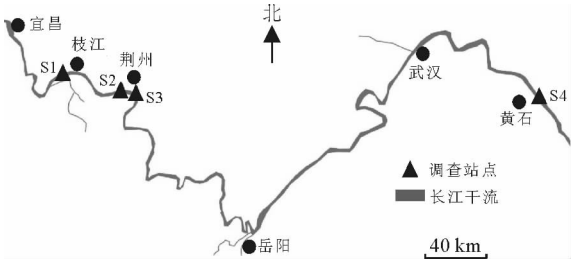

图 1　调查站点分布

Fig. 1　Location of sampling stations

1.2　环境因子测定

根据长江水文网公布的水位数据,调查期间 S1 上游宜昌江段水位 39.39 ~ 39.46 m,S2、S3 所处的荆州江段水位 30.87 ~ 30.96 m,S4 上游武汉江段水位 14.82 ~ 14.95 m。采样点水温(WT)、pH、氧化还原电位(ORP)和电导率(Cond.)等理化参数由 SX751 型多参数水质仪测量,流速由 LS300-A 便携式流速仪测量。

1.3　底栖动物样品采集与鉴定

底栖动物采集使用彼得生采泥器(面积 1/20 m^2),每个样点采集 2 ~ 3 夹沉积物样混合后置于 40 目筛网中筛洗,筛洗后将样品中的底栖动物分拣出,用 10% 福尔马林溶液固定保存。借助解剖镜和显微镜对物种进行分类鉴定,大部分物种鉴定到种和属,少部分鉴定到科。物种鉴定参考相关文献(Morse et al,1994;王俊才等,2011)。鉴定分类后,对各类底栖动物进行计数和称量。用滤纸将底栖动物体表保存液轻轻吸干,用分析天平进行称量,精确到 0.0001 g。

1.4　数据分析

将各样点底栖动物数量和重量换算成密度(ind/m^2)和生物量(g/m^2)。采用 Margalef 指数(d_M)(Margalef,1957)、Shannon-Wiener 指数(H')(Shannon,1948)和 Pielou's 均匀度指数(J)(Pielou,1975)对群落多样性进行分析。Margalef 指数反映了群落的物种丰富程度,Pielou's 均匀度指数反映了群落中物种间个体均匀分布的程度,Shannon-Wiener 指数综合了物种丰富性和均匀性两方面的影响,反映了群落结构的复杂程度。计算公式如下:

$$d_M = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

$$H' = -\sum (n_i/N)\ln(n_i/N) \quad (2)$$

$$J = H'/\ln S \quad (3)$$

式中:S 为样方中物种数目,N 为样方中底栖动物总密度,n_i 为物种 i 的密度。

为了比较不同江段透水框架工程区建设后底栖动物多样性的发展变化,计算各江段工程区与对照区生物多样性指数比值(R):

$$R = \text{工程区多样性指数}/\text{对照区多样性指数} \quad (4)$$

R 值大表示工程区底栖动物多样性发展较好。分析各江段 R 值与工程建成时间的 Pearson 相关关系,在 RStudio(0.98.1091)软件上完成。

2　结果

2.1　研究区域环境因子

研究区域样点的平均水温变化范围为 12.5 ~ 21.9℃,平均 pH 变化范围为 8.7 ~ 9.6,平均氧化还原电位变化范围为 193 ~ 236 mV,平均电导率变化范围为 339 ~ 385 μS/cm,平均流速变化范围为 0.19 ~ 0.43 m/s。工程区流速明显小于对照区,而其他水体理化指标差异不大(表 1)。S4 和 S3 部分样点底质为细沙 + 泥,其余样点底质以细沙为主。样点水深 0.3 ~ 1.0 m。

2.2　底栖动物种类组成

从各样点采集的样本中共鉴定出大型底栖动物 22 种,隶属于 3 门 6 纲 8 科(表 2)。其中,摇蚊幼虫 11 种,占种类数的 50.0%;寡毛类 6 种,占 27.2%;软体动物 3 种,占 13.6%。S1 采集的底栖动物种类

最多,共16种,S2、S3、S4采集的底栖动物种类分别为7、7和8种。透水框架工程区与对照区相比,S1站工程区采集13种,对照区采集11种;在S2、S3、S4工程区均采集7种,相应的对照区分别采集2、2和6种,表明工程区底栖动物物种丰度大于对照区。

表1 调查站点水体理化指标

Tab.1 Physicochemical parameters at each sampling station

站点		WT/℃	pH	ORP/mV	Cond./μS·cm^{-1}	流速/m·s^{-1}
S1	工程区	14.6±3.1	9.6±0.1	204±13	385±24	0.26±0.04
	对照区	13.4±0.9	9.6±1.0	227±26	363±6	0.43±0.02
S2	工程区	12.5±0.0	8.7±0.0	201±2	339±0	0.31±0.05
	对照区	13.7±1.6	8.9±0.0	202±21	343±10	0.43±0.02
S3	工程区	14.6±2.1	9.0±0.0	222±1	362±7	0.25±0.03
	对照区	14.4±2.1	8.9±0.0	236±0	359±6	0.36±0.02
S4	工程区	21.9±3.3	9.0±0.5	193±18	372±37	0.19±0.04
	对照区	21.8±3.9	9.0±0.4	204±11	374±35	0.33±0.02

表2 调查站点大型底栖动物种类名录

Tab.2 Benthic macroinvertebrate taxa list at each sampling station

种类	S1		S2		S3		S4	
	工程区	对照	工程区	对照区	工程区	对照区	工程区	对照区
环节动物门 Annelida								
寡毛纲 Oligochaeta								
颤蚓科 Tubificidae								
霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*	+	+						
苏式尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi*	+						+	+
正颤蚓 *Tubifex tubifex*	+	+	+					
颤蚓属1种 *Tubifex* sp.	+	+						
仙女虫科 Naididae								
参差仙女虫 *Nais variabilis*	+	+						
费氏拟仙女虫 *Paranais frici*								+
蛭纲 Hirudinea								
蛭纲1种 *Hirudinea* sp.					+			
昆虫纲 Insecta								
摇蚊科 Chironomidae								
直突摇蚊属1种 *Orthocladius* sp.			+		+	+	+	
长跗摇蚊属1种 *Tanytarsus* sp.	+	+						
水摇蚊属1种 *Hydrobaenus* sp.		+						
隐摇蚊属1种 *Cryptochironomus* sp.	+	+	+	+			+	+
多足摇蚊属1种 *Polypedilum* sp.	+		+		+		+	+
雕翅摇蚊属1种 *Glyptotendipes* sp.							+	+
瑟摇蚊属1种 *Sergentia* sp.							+	
小摇蚊属1种 *Microchironomus* sp.	+							
内摇蚊属1种 *Endochironomus* sp.	+	+						
羽摇蚊属1种 *Chironomus plumosus*		+						
摇蚊族1种 *Chironomini* sp.	+		+	+	+	+		
软体动物门 Mollusca								
腹足纲 Gastropoda								
椎实螺科 Lymnaeidae								
椭圆萝卜螺 *Radix swinhoei*		+			+			
瓣鳃纲 Lamellibranchia								
蚬科 Corbicukidae								
河蚬 *Corbicula fluminea*	+	+	+		+			
贻贝科 Mytilidae								
淡水壳菜 *Limnoperna lacustris*	+							
节肢动物门 Arthropoda								
软甲纲 Malacostraca 钩虾科1种 *Gammarus* sp.			+		+		+	+

注:“+”表示采集到该物种

Note: “+” means the species occurred at the sampling station.

2.3　底栖动物密度和生物量

S1 ~ S4 透水框架工程区底栖动物密度分别为 1 450、175、125 和 160 ind/m^2,相应的对照区底栖动物密度分别为 140、20、35 和 33 ind/m^2;工程区底栖动物生物量分别为 4.19、0.10、0.48 和 0.17 g/m^2,相应的对照区生物量分别为 2.30、0.01、0.02 和 0.07 g/m^2,透水框架工程区底栖动物密度和生物量大于对照区(图 2)。

工程区和对照区底栖动物密度和生物量构成情况见图 3。S1 工程区密度和生物量以寡毛类占优势,而对照区寡毛类相对较少。S2 对照区仅有摇蚊幼虫,而工程区除摇蚊幼虫外,还有一定数量的寡毛类、软体动物和其他种类。S3 工程区的软体动物相对丰富。S4 工程区摇蚊幼虫比例相对较高,寡毛类的比例与对照区相似,但其绝对密度和生物量高于对照区,工程区寡毛类密度为 23 ind/m^2、生物量为 0.09 g/m^2,而对照区分别为 7 ind/m^2 和 0.03 g/m^2。总体上,工程区寡毛类密度、生物量的比例或绝对值高于对照区。

2.4　生物多样性指数

透水框架工程区和对照区底栖动物多样性指数见表 3。底栖动物 d_M、H' 和 J 平均值在工程区的变化范围分别为 0.21 ~ 1.37、0.41 ~ 1.62 和0.38 ~ 0.87,在对照区的变化范围分别为 0.14 ~ 0.40、0.28 ~ 0.96 和 0.41 ~ 0.68。除 S3 工程区 J 略小于对照区外,工程区其他多样性指数均高于对照区,表明透水框架工程区底栖动物群落多样性相对较高,群落结构较复杂。尽管工程建成年份与各江段工程区与对照区生物多样性指数比值(R)相关关系不显著($P > 0.05$,Pearson 相关系数分别为:$r_d = -0.91$、$r_H = -0.59$、$r_J = -0.84$、),但总体上,工程建成时间较早的 S1、S2 工程区和对照区底栖动物多样性比值高于 S3 和 S4,表明工程建成时间较早对透水框架群区底栖动物多样性的提高程度较大。

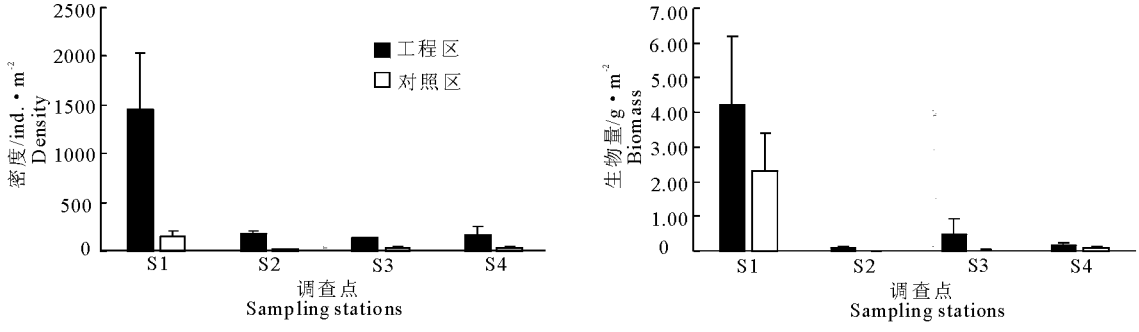

图 2　透水框架工程区和对照区底栖动物密度和生物量

Fig. 2　Density and biomass of benthic macroinvertebrates in project and control areas for each station

3　讨论

3.1　底栖动物群落结构特征

河流底栖动物的群落结构与河流环境因子特别是水流和底质等环境条件是相适应的(Leunda et al,2009;张海萍等,2014;任海庆,2015;Wilkins et al,2015)。不同的流速和底质条件,底栖动物的种类组成和多样性不同,如在河流源头,河流底质为岩块和砾石,流速湍急,适合蜉蝣目、毛翅目和襀翅目等种类的生存,而在河流中下游,流速变缓,底质粒径变小,适合寡毛类、腹足纲和摇蚊幼虫等种类的生存(汪兴中等,2009;王强等,2011;李良等,2013)。段学花等(2009)在长江中游干流石首、嘉鱼、牌洲湾和黄冈等江段的调查结果表明,底栖动物主要为寡毛纲和摇蚊科种类,部分样点出现软体动物。本研究结果与之相近,在长江中游水陆洲、三八滩、金城洲和牯牛沙等河段采集的大型底栖动物中摇蚊幼虫最多,约占底栖动物种类数的一半,其次是寡毛类和软体动物,其他种类较少。与上游相比,长江中游底栖动物的群落组成与该江段沙质底质和相对较缓流速等生境条件是相适应的。本研究在水陆洲、三八滩、金城洲和牯牛沙等对照区采集的底栖动物密度分别为 140、20、35 和 33 ind/m^2,大部分江段底栖动物密度与段学花等(2009)对长江中游干流底栖动物密度的调查结果(6 ~ 53 ind/m^2)相近。

3.2　透水框架护岸工程对底栖动物群落的影响

本研究显示,透水框架工程区底栖动物多样性高于非工程区,这可能与透水框架群能降低河水流速、减小河水对底质的冲击有关。大型河流中沙质河床不稳定,易受水流冲击,底栖动物难以生存(段

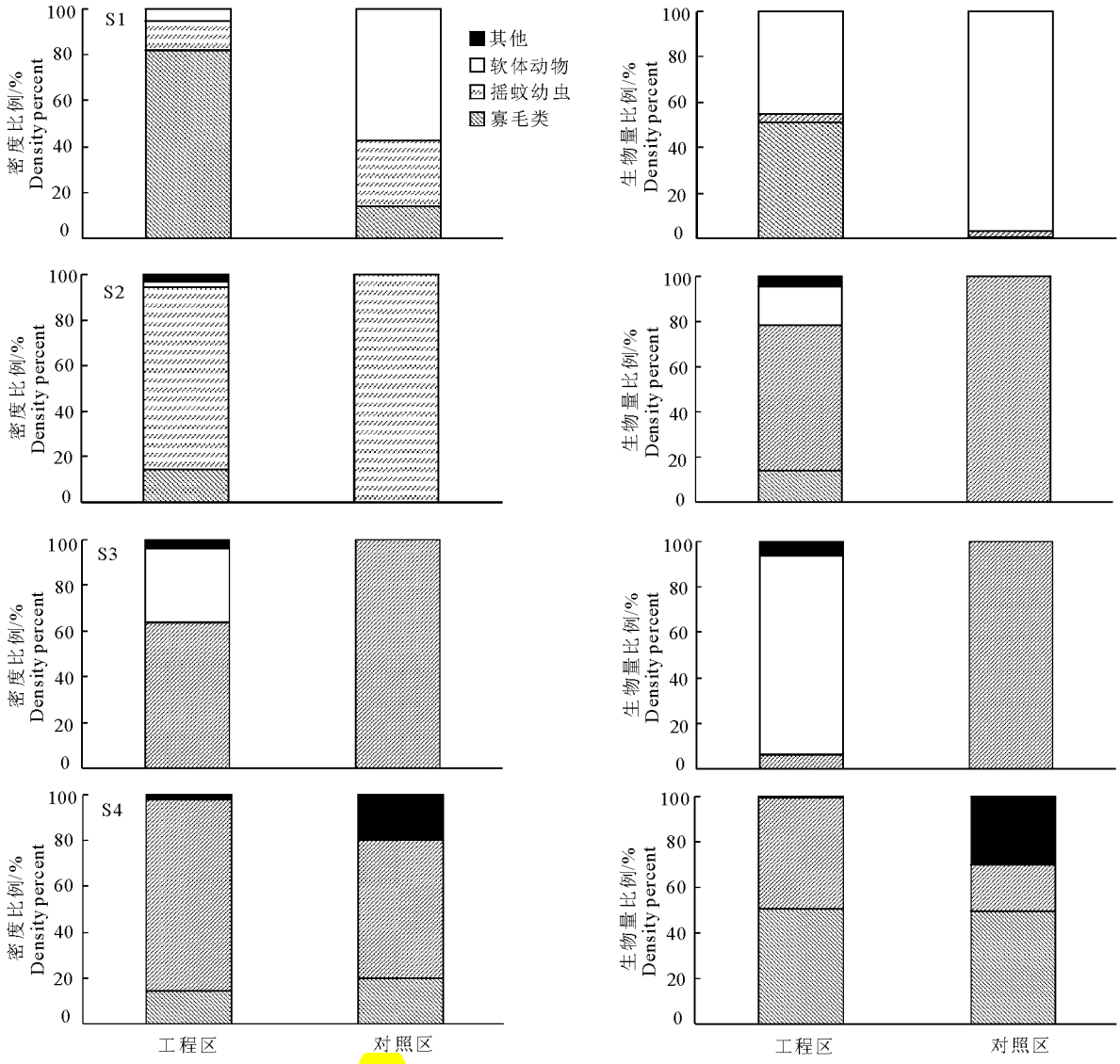

图3 透水框架工程区与对照区底栖动物构成

Fig. 3 Density and biomass composition of benthic macroinvertebrates in project and control areas for each station

表3 透水框架工程区和对照区底栖动物多样性指数

Tab. 3 Benthic macroinvertebrate diversity indices in project and control areas for each station

多样性指数		S1	S2	S3	S4
d_M	工程区	1.37 ±0.47	0.79 ±0.23	0.21 ±0.21	0.62 ±0.04
	对照区	0.40 ±0.24	0.17 ±0.17	0.14 ±0.14	0.28 ±0.17
	R_d	3.43	4.71	1.54	2.25
H'	工程区	1.62 ±0.20	1.28 ±0.19	0.41 ±0.41	1.15 ±0.06
	对照区	0.96 ±0.23	0.35 ±0.25	0.28 ±0.28	0.58 ±0.32
	R_H	1.69	3.68	1.47	1.98
J	工程区	0.87 ±0.04	0.80 ±0.02	0.38 ±0.19	0.85 ±0.07
	对照区	0.68 ±0.14	0.50 ±0.25	0.41 ±0.20	0.64 ±0.03
	R_J	1.28	1.60	0.92	1.33

学花等,2007)。李娣等(2015)对长江下游江苏段干流底栖动物调查表明,水流较急的江段,河流底质不稳定,底栖动物多样性低。王宗兴等(2007)研究表明,底栖动物中的一些种类,如寡毛类中的霍甫水丝蚓等倾向栖息于静水水体,随着水体流速的增加,其分布呈下降趋势。本研究中对照区采样点受河水冲刷严重,特别是受季节性洪水影响较大,不利于底栖动物的栖息。而透水框架护岸工程的实施,能有效改变水体的流态,降低流速、减小冲击力、促进有机质沉积等(郑英等,2012;汪奇峰,2013;李晶等,

2014)。王南海等(1999)的研究表明,透水框架群减速率可达 30% ~70% 。本调查显示,各江段透水框架区内的水体流速明显低于对照区。在透水框架群内,底质受水流冲击减少,形成了一个相对稳定的生境,从而有利于底栖动物的生存,提高底栖动物多样性。如在金城洲透水框架工程区,发现有菹草等沉水植物的出现,随着局部条件的改善,为喜沉水植物的软体动物(腹足类)发展提供了条件(李宽意等,2007)。本研究显示,该工程区的软体动物相对丰富。此外,透水框架柱体为淡水壳菜提供了附着介质,有利于淡水壳菜的生存和发展。本研究表明,大部分透水框架工程区寡毛类密度和生物量比例或绝对值大于对照区,表明工程区更有利于寡毛类栖息。这可能是透水框架群能促进有机质沉积,从而促进了霍甫水丝蚓、苏式尾鳃蚓和正颤蚓等寡毛类中喜静水和有机质种类的发展(龚志军等,2001;王丑明等,2011)。

有些航道整治工程如丁坝和鱼骨坝等的建设,将导致坝前水流冲刷严重,底质不稳定,不利于底栖动物的生存(潘保柱等,2011)。而本研究显示,在透水框架群区,底栖动物多样性相对较高,工程建成时间较早的透水框架工程区对底栖动物多样性的提高程度较大。水陆洲和三八滩工程区建成于 2009 年(李晓兵,2011),而牯牛沙一期和金城洲工程区分别建成于 2010 和 2011 年(蔡大富等,2011),水陆洲和三八滩工程区淤积时间长,底质条件更为稳定,底栖动物多样性的提高程度要好于牯牛沙和金城洲工程区。

航道整治工程对底栖动物群落的影响,需要长期的监测才能得出更客观的结论。本研究通过枯水季节的采样分析了透水框架工程对底栖动物群落结构的影响,为进一步研究和客观评价航道整治工程对水生生物的影响积累了资料。今后应对不同类型航道整治工程区和不同水位条件下底栖动物群落进行长期监测,分析其动态变化规律,为航道整治工程生态影响评价及河流管理提供依据。

参考文献

蔡大富, 邹祝, 闫军, 等. 2011. 长江中游牯牛沙水道航道整治一期工程效果分析[J]. 水运工程, 36(3): 97 – 102.

陈会东, 金辉虎. 2010. 航道整治工程对河流生态环境的影响分析[J]. 现代农业科技, 39(7): 281 – 282.

段学花, 王兆印, 程东升. 2007. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性[J]. 生态学报, 27(4): 1664 – 1672.

段学花, 王兆印, 余国安. 2009. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价[J]. 长江流域资源与环境, 18(3): 241 – 247.

高兴福, 王伟. 2010. 关于四面六边体护岸技术的几点浅见[J]. 水利规划与设计, 8(5): 97 – 99.

葛华, 孙昭华, 朱玲玲, 等. 2009. 三峡水库蓄水后枝江 – 江口浅滩河段演变趋势[J]. 武汉大学学报:工学版, 42(4): 470 – 473, 477.

龚志军, 谢平. 2001. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. 水生生物学报, 25(3): 210 – 216.

胡小卫, 王平义, 喻涛, 等. 2011. 鱼骨坝水流结构研究[J], 水运工程, 36(11): 115 – 119.

李宽意, 文明章, 杨宏伟, 等. 2007. "螺 – 草"的互利关系[J]. 生态学报, 27(12): 5427 – 5432.

李晓兵. 2011. 四面六边透水框架施工工艺与应用效果分析[J]. 中国水运, 11(7): 254 – 255.

李冬, 潘美元. 2013. 生态护坡技术在长江航道工程中的应用[J]. 中国水运, 13(7): 162 – 164.

李晶, 喻涛, 王平义. 2014. 四面六边透水框架构筑心滩防护工程清水冲刷试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, (4): 50 – 54,65.

李良, 杨扬, 乔永民, 等. 2013. 东江干流及其源头支流大型底栖动物群落结构特征与环境指示评价[J]. 生态科学, 32(3): 313 – 317.

李娣, 牛志春, 王霞, 等. 2015. 长江江苏段底栖动物群落结构与多样性分析[J]. 应用与环境生物学报, 21(1): 96 – 100.

梁开明, 章家恩, 赵本良, 等. 2014. 河流生态护岸研究进展综述[J]. 热带地理, 34(1): 116 – 122, 129.

刘倩颖, 王平义, 喻涛, 等. 2009. 四面六边透水框架群的护滩效果研究[J]. 水运工程, 34(12): 44 – 48.

马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 2011. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, (2): 32 – 38.

潘保柱, 王兆印, 何雪宝. 2011. 西江大型底栖动物群落特征研究[J]. 水生生物学报, 35(5): 851 – 856.

任海庆, 袁兴中, 刘红, 等. 2015. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J]. 生态学报, 35(10): 1 – 12.

王备新, 杨莲芳, 刘正文. 2006. 生物完整性指数与水生态系统健康评价[J]. 生态学杂志, 25(6): 707 – 710.

王业祥, 李义天, 朱玲玲. 2012. 长江中游嘉鱼 – 燕子窝河段演变机理及发展趋势研究[J]. 泥沙研究, (1): 1 – 6.

王宗兴. 2007. 中山水栖寡毛类区系调查及底栖动物对湖泊环境定量指示初探[D]. 武汉: 中国科学院水生物生物

研究.

王丑明，谢志才，宋立荣，等. 2011. 滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析[J]. 动物学研究，32(2)：212－221.

王俊才，王新华. 2011. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京：中国言实出版社.

王南海，张文捷，王玢. 1999. 新型护岸技术－四面六边透水框架群在长江护岸工程中的应用[J]. 长江科学院院报，16(2)：11－16.

王强，袁兴中，刘红. 2011. 西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性－以重庆鱼肚河为例[J]. 水生生物学报，35(5)：887－892.

汪奇峰. 2013. 四面六边形混凝土透水框架带在长江航道整治工程护滩中的运用[J]. 中国水运，13(7)：165－166.

汪兴中，蔡庆华，李凤清，等. 2009. 南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态[J]. 应用与环境生物学报，15(6)：803－807.

吴东浩，王备新，张咏，等. 2011. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报，34(2)：129－34.

徐国宾，张耀哲，徐秋宁，等. 1994. 多沙河流河道整治新型工程措施试验研究[J]. 西北水资源与水工程，5(3)：1－8.

徐国宾，张耀哲. 2006. 混凝土四面六边透水框架群技术在河道整治、护岸及抢险中的应用[J]. 天津大学学报，39(12)：1465－1469.

杨芳丽，耿嘉良，付中敏，等. 2012. 长江中游航道整治中生态技术应用探讨[J]. 人民长江，43(24)：68－71.

张海萍，武大勇，王赵明，等. 2014. 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响[J]. 生态学报，(5)：1253－1263.

郑英，吴伶，赵德玉，等. 2012. 四面六边透水框架护滩结构效果水槽试验研究[J]. 水运工程，37(11)：127－132.

周根娣，顾正华，高柱，等. 2005. 四面六边透水框架尾流场水力特性[J]. 长江科学院院报，22(3)：9－12.

Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish: 2nd editon [M]. Washington DC: U S Environmental Protection Agency, Office of Water.

Bonada N, Prat N, Resh V H, et al. 2006. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches [J]. Annual Review Entomology, 51: 495－523.

Hindák F. 1992. Several interesting planktic cyanophytes [J]. Algological Studies, 66: 1－15.

Leunda P M, Oscoz J, Miranda R, et al. 2009. Longitudinal and seasonal variation of the benthic macroinvertebrate community and biotic indices in an undisturbed Pyrenean river [J]. Ecological Indicators, 2009, 9(1): 52－63.

Margalef D R. 1957. Information theory in ecology [J]. General Systems, 3: 36－37.

Morse J C, Yang L F, Tian L X. 1994. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality [M]. Nanjing: Hohai University Press.

Pielou E C. 1975. Ecological Diversity [M]. New York: Wiley Inter Science.

Shannon C E. 1948. The mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 27(3): 379－423.

Wilkins P M, Cao Y, Heske E J, et al. 2015. Influence of a forest preserve on aquatic macroinvertebrates, habitat quality, and water quality in an urban stream [J]. Urban Ecosystems. 10.1007/s11252－015－0464－6, 18(3): 989－1006.

（责任编辑　张俊友）

Effect of Tetrahedron Permeable Frames on the Community Structure of Benthic Macroinvertebrates in the Middle Yangtze River

LI Sha[1], XIONG Fei[1], WANG Ke[2], DUAN Xin-bin[2], LIU Shao-ping[2], CHEN Da-qing[2]

(1. School of Life Sciences, Jianghan University, Wuhan 430056, P. R. China;
2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, P. R. China)

Abstract: The tetrahedron permeable frame is an effective technology for bank-protection and has been widely used in the navigation channel of the middle reach of the Yangtze River. Currently, the information about the effect of tetrahedron permeable frames on zoobenthos community structure and biodiversity of zoobenthos is insufficient. Because this is a matter of concern to river managers, we compared the community structure and diversity of benthic macroinvertebrates in project areas with those in control areas. The comparison was carried out in March 2014 and based on surveys from four stations in the middle Yangtze River, Shuiluzhou, Sanbatan, Jinchengzhou and Guniusha. Results provide information for ecological engineering and restoration projects in large rivers. Six sampling sites were located at each station, three in the project area and three in the control area. Control sites were located, upstream or downstream of the project area, where flow condition was not influenced by the project and water depth and shoreline vegetation were similar to those in the project area. Physicochemical parameters were measured at sampling stations: water temperature, pH, oxidation/reduction potential, conductivity and flow velocity. A total of 22 zoobenthos species (3 phyla, 6 classes and 8 families) were collected during the investigation. Chironomid larvae displayed the highest species richness, accounting for 50% of the total species, followed by aquatic oligochaete (27.2%) and mollusks (13.6%). At the Shuiluzhou, Sanbatan, Jinchengzhou and Guniusha project stations, benthic macroinvertebrate densities were, respectively, 1 450, 175, 125 and 160 ind/m^2 and biomasses were 4.19, 0.10, 0.48 and 0.17 g/m^2. Control station densities were 140, 20, 35, and 33 ind/m^2 and biomasses were 2.30, 0.01, 0.02 and 0.07 g/m^2. The range of average Margalef richness index(d_M), shannon-wiener diversity index(H'), Pielou's evenness index(J) of the benthic macroinvertebrate community in the project areas were, respectively, 0.21 – 1.37, 0.41 – 1.62 and 0.38 – 0.87, while those in control areas were 0.14 – 0.40, 0.28 – 0.96 and 0.41 – 0.68. In the project areas, species richness, density, biomass and diversity indices were higher than in control areas. These results indicate that tetrahedron permeable frames promote diversity and complexity within the benthic macroinvertebrate community structure, likely due to lowered flow velocity and reduced scouring.

Key words: middle reach of the Yangtze River; tetrahedron permeable frame; bank-protection; benthic macroinvertebrates; biodiversity