DOI:10.15928/j.1674-3075.2016.01.010

无锡亲水河生态修复过程中浮游甲壳动物群落结构研究

余德琴[1], 郭匿春[1], 汤祥明[2], 过龙根[3]

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
3. 中国科学院水生生物研究所 东湖湖泊生态系统试验站, 武汉 430072)

摘要:为了研究生态修复过程中水环境因子与浮游甲壳动物群落结构之间的关系、水质改变对浮游甲壳动物群落结构的影响及其生态学意义,采用前置库技术及生物绳与湿地植物联合修复技术对无锡市亲水河进行生态修复,对2014年6-12月生态修复期间的浮游甲壳动物群落结构进行了研究。共检测出浮游甲壳动物24种,其中枝角类10属、11种,桡足类11属、13种,主要优势种类为角突网纹溞(*Creiodaphnia cornuta*)、简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)、中华窄腹剑水蚤(*Limnoithona sinensis*)、爪哇小剑水蚤(*Microcylops javanus*)和广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)。亲水河生态示范区内浮游甲壳动物的最大密度和生物量(1005.00个/L、8617.1 μg/L)均出现在8月,最小值(1.80个/L、11.4 μg/L)出现在11月和12月。生态修复后,亲水河中浮游甲壳动物生物量由前置库区的892.6 μg/L上升到生态修复区的1018.5 μg/L。Pearson相关分析发现,温度($r=0.530$, $P<0.01$)、营养盐[磷($r=0.365$, $P<0.01$)与氮磷比($r=-0.477$, $P<0.01$)]和叶绿素a($r=0.450$, $P<0.01$)含量对浮游甲壳动物总丰度有显著影响。生态修复工程实施期间,亲水河不同修复阶段的浮游甲壳动物的丰度差异较大,并且表现为生态修复区密度和生物量显著高于前置库区。相关分析发现,浮游甲壳动物密度与水体中总磷和叶绿素含量、温度以及氮磷比等显著相关,其它环境因子的影响不显著。研究表明,亲水河前置库、生物绳与湿地植物联合生态修复技术能够有效消减河流中营养物质含量,提升浮游甲壳动物的密度和生物量,值得在类似河流生态修复工程推广应用。

关键词:亲水河;生态修复;浮游甲壳动物;生物多样性;生物绳;生态工程

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)01-0070-08

随着社会进步和经济发展,对河流造成的负面影响日益严重(钟春新和张玮,2004)。近年来,关于河流水质治理的研究越来越多,其中河流生态修复工程逐渐在世界各国发展起来,并得到广泛而深入的研究(徐菲等,2014)。河流生态修复旨在通过改变河流生态系统的结构,从而恢复其各项功能。河流生态修复的主要技术方法包括前置库技术(边博等,2013)、生物绳与湿地植物联合修复(邹联沛等,2013)、缓冲区恢复(倪晋仁和刘元元,2006a)、生境修复等技术(倪晋仁和刘元元,2006b)等;其中,前置库技术是指利用河流存在从上游到下游的水质变化梯度特点,根据河流形态将河流分为一个或者若干个与主区域相连的子区域,通过延长水力停留时间,促进水中泥沙及营养盐的沉降,同时利用子区域中大型水生植物、藻类等进一步吸附、拦截营养盐,从而降低进入下一子区域水体中营养盐的含量,抑制主区域中藻类过度繁殖,减缓富营养化进程从而改善水质(赵俊杰,2005);而生物绳是一种新型的水体修复材料,微生物可附着在生物绳上形成生物膜,进而通过硝化-反硝化作用进行水体脱氮去除水体中的氮素营养盐,其结合湿地植物联合净化水质的技术在很多水生态修复工程中发挥出了显著的作用(邹联沛等,2013)。目前,国内的前置库技术、生物绳与湿地植物联合修复技术尽管发展较晚,但极受关注(陈志笃和王立志,2013)。

亲水河位于江苏省无锡市太湖新城南部、环太湖高速公路北侧,东起蠡河,西至壬子港,河流全长13.82 km,沟通了环太湖大堤北侧的大量断头浜,在改善太湖新城南部的水环境质量上发挥着重要的作

收稿日期:2015-09-28

基金项目:太湖水污染治理专项资金(第七期)技术示范类科研课题(TH2013205);南京水利科学研究院水利部水科学与水工程重点实验室开放研究基金(Yk914006);国家自然科学基金(31300395);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20133418120007);中科院南京地湖所湖泊与环境国家重点实验室开放基金(2014SKL008)。

作者简介:余德琴,1990年生,女,硕士研究生,主要从事富营养化水体中浮游甲壳动物的群落结构研究。E-mail: yudeqin0414@163.com

通信作者:郭匿春,1980年生,男,博士,副教授,主要从事淡水生态学研究。E-mail: Guonichun@ahau.edu.cn

用。亲水河作为各水域水体进入太湖前的缓冲河流,具有截污功能,因此其污染程度严重。入河水质为 IV 至劣 V 类,氮营养元素严重超标;同时,部分地段岸带冲蚀大,植被类型单一,水色发黑,有些河段水草疯长,水面垃圾较多;此外,河道内夏季蓝藻水华易暴发堆积、水生生物多样性较低,对水生态环境及周围居民的生活造成不良影响。因此,亲水河的治理已成为改善太湖水环境质量和保障流域水生态系统健康的关键环节。目前,我国关于河流生态修复的研究多从水质净化、生态河堤建设、生态景观设计和新材料应用等方面出发,较少有专门从河流中水生生物群落结构的变化及河流生态系统修复的角度进行研究(王文君和黄道明,2012)。亲水河中的浮游甲壳动物数量大、种类多,广泛分布于河流各区域,对环境变化非常敏感,是水体污染和水体自净的重要指示生物。通过研究亲水河生态修复过程中浮游甲壳动物群落结构变化,能够更加真实的反映其生态修复效果。

本研究以亲水河生态修复工程为依托,通过比较生态示范区内前置库区和生态修复区中浮游甲壳动物的密度、生物量及生物多样性,分析亲水河生态修复工程运行过程中水环境因子与浮游甲壳动物群落结构之间的关系,进而分析水环境质量改善对浮游甲壳动物群落和水生生物多样性的影响,并从浮游甲壳动物群落改变的生态学意义角度来评价河流水体生态修复的可行性和有效性。

1　材料与方法

1.1　研究地点

2014 年,中科院南京地理与湖泊研究所研究人员结合亲水河河道的水文、风向、地理条件,构建了消减亲水河面源污染物及生活污水的生态系统修复工程,包括 3 个重要部分:(1) 地表径流收集与调节区;(2) 前置库库区;(3) 生物绳及湿地植物联合生态修复区。以上 3 个部分依次连接形成一个完整的亲水河地区面源污染强化净化生态示范区。示范区面积约 2 hm^2,其中河道长约 1 109 m,最大水深为 3.8 m,最大河宽为 33 m,最大水量约为 7.76 万 m^3。

亲水河生态修复工程利用前置库技术削减从庙港到蠡河面源污水中的固体悬浮物(SS)及氮磷等营养成分。在示范区前置库末端(红周路端)、示范区河流两端(小溪港端和典基港端)分别布设了生物绳,生物绳的安装配置如表 1。而在靠近太湖贡湖湾的水质较差亲水河河段比选并配置了多种湿地植物群落,包括苦草(*Vallisneria spiralis*)、穗狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、凤眼莲(*Eichhornnia crassipes*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、莲(*Nelum bonucifera*)、菱(*Trapa bispinosa*)、芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲(*Typha orientalis*)等;同时,作为修复"水下森林"的维护者和垃圾清理工,示范工程区(面积 2 hm^2,平均水深 2 m)内按照一定比例和次序投放鲢、鳜、乌鳢、糠虾、沼虾、螺类、蚌类等水生动物,以平衡沉水植被的生产力,增加水生生物的多样性,形成良性循环的水生生态自净系统,全面恢复河流应有的水生生态系统(表 2)。

表 1　生物绳安装配置

Tab 1　Allocation information on the bio-ropes

地　点	安装密度/cm × cm	宽度/m	长度/m	单根绳长/m	生物绳总量/m
小溪港端	50 × 50	20	30	1.0	1 200
典基港端	50 × 50	25	30	1.0	1 200
红周路端	50 × 50	25	30	1.0	1 200

表 2　水生动物系统调控投放

Tab 2　Aquatic animal stocking information

编号	品种	总投放量/kg	密度	规格	投放模式	投放时间
1	鲢	266	2 g/m^3	200 g/尾	自由放养	2014 - 05
2	鳜	25	0.18 g/m^3	250 g/尾	自由放养	2014 - 06
3	三角帆蚌	200	3 g/m^2	300 g/只	3/4 挂养,1/4 投放	2014 - 06
4	环棱螺	66	1 g/m^2	2 g/颗	全区均匀播撒	2014 - 07
5	枝角类	-	500 个/L	成虫	局部区域	定期投放

1.2　采样点设置

根据亲水河的自然环境特点及示范工程的需要,共在前置库区和生态修复区内设置 8 个采样点,其中入河前置库区 3 个采样点(Q1 - Q3),亲水河河道(即生态修复区)5 个采样点(Q4 - Q8)(图 1)。

1.3　样品采集与处理

透明度(SD)采用 Secchi 盘法当场测定;水温(T)、pH、溶解氧(DO)、浊度(FTU)、电导率(Cond)、总溶解固体(TDS)、盐度(Sal)指标用 YSI6600V2 型多参数水质监测仪(美国)现场测定。实验室测定的理化指标主要包括总氮(TN)、总溶解态氮(TDN)、硝氮(NO_3^--N)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)、叶绿素 a (Chl-a)、悬浮颗粒物(SS)。测定方法参照国家环境保护局水与废水监测分析方法编委会(2002)编写的《水与废水监测分析方法》。

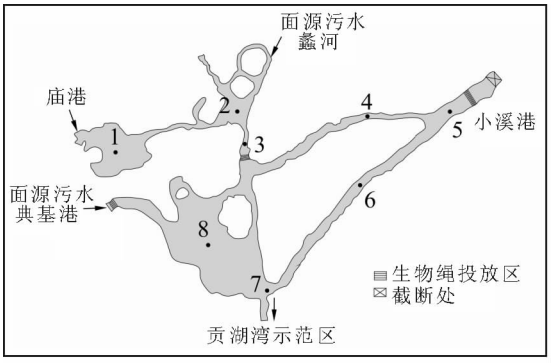


图1 亲水河生态示范区及采样点设置

Fig 1 Location of sampling sites in the ecological demonstration area of Qinshui River

浮游甲壳动物定性水样采用13号浮游生物网在水中往复做“∞”字型拖动,回旋多次,采集样品,用4%甲醛溶液固定保存。采集定量标本时,用5 L有机玻璃采水器在采样点采集混合水样,大型浮游甲壳动物(枝角类、桡足类)定量水样取水10 L,然后用25号浮游生物网进行过滤,加入4%甲醛溶液固定,存于50 mL塑料小方瓶中。每月在各采样点采集1次,带回实验室进行检测。

定性水样在实验室内通过显微镜观察鉴定其种类;定量水样用5 mL浮游生物计数板在显微镜下观察计数。

浮游甲壳动物生物量的估算参照范正年(1988)和陈雪梅(1981)等人的研究方法;枝角类和桡足类的鉴定参照相关文献(蒋燮治和堵南山,1979;中科院动物所甲壳动物研究组,1979)。

1.4 数据处理与分析

实验数据通过Microsoft Excel 2003录入,分析软件为Microsoft Excel 2003、SPSS 19.0。为了更精确地说明浮游甲壳动物与河流环境因子的关系,采用Pearson相关分析各采样点的浮游甲壳动物与环境因子的相互关系。

浮游甲壳动物物种优势度(Y) $= n_i \cdot f_i / N$,其中n_i为物种i的密度,N为所有物种的总密度,f_i为物种i的出现频率;浮游甲壳动物多样性研究方法参照吴朝等(2009)的辛普森指数(Simpson's diversity index)和香农-威纳指数(Shannon-Weiner index)。

辛普森指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2$$

式中:P_i为属于物种i的个体在全部个体中的比例;S为物种数目。D值越大,多样性越高。

香农-威纳指数(H'):

$$H = 1 - \sum_{i=1}^{r} (P_i \ln P_i)$$

式中:r代表种类数;P_i代表第i种密度占总密度中的比例。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子的变化

亲水河生态修复工程实施期间,生态示范区前置库组内TN浓度为(1.30±0.83) mg/L,而生态修复组水体TN浓度为(0.77±0.33) mg/L,生态修复组的平均值比前置库组的低40.8%,表明生态修复组的TN显著低于前置库组(t-test, $P<0.05$)。生态修复组的TP均显著低于前置库组(t-test, $P<0.05$),但生态修复区的氮磷比较前置区上升了38.23%。

从图2还可以看出,经生物绳与湿地植物联合净化后,生态修复区的浊度和叶绿素a含量均显著低于前置区(t-test, $P<0.05$):前置库的叶绿素a为36.00 μg/L,而生态修复区的叶绿素a为19.28 μg/L,下降了47.67 %;前置库的透明度为65 cm,生态修复区的透明度为101 cm,上升了55%。综合分析,生态修复显著提升了水质,主要表现为氮磷浓度下降、叶绿素a下降,透明度升高和浊度下降。

2.2 浮游甲壳动物种类组成及优势种变化

研究期间共检测到浮游甲壳动物24种,其中枝角类11种,隶属于6科、10属,占种类组成总数的45.83%;桡足类13种,隶属于4科、11属,占54.17%(表3)。根据优势度$Y \geqslant 0.02$确定为优势种的原则,优势种类主要为角突网纹溞(*C cornuta*)(0.04)、简弧象鼻溞(*B coregoni*)(0.09)、中华窄腹剑水蚤(*L sinensis*)(0.04)、爪哇小剑水蚤(*M javanus*)(0.03)和广布中剑水蚤(*M leuckarti*)(0.03)共5种。比较前置库区和生态修复区发现,经生物绳与湿地植物联合修复后的生态修复区枝角类总量有所上升(图3),如角突网纹溞(*C cornuta*)由前置库区的4%上升到生态修复区的7%,并且出现了前置库区没有的长刺溞(*D longispina*)、微型裸腹溞(*M micrura*)和锯尾隆背溞(*B Serricaudata*),但桡足类广布中剑水蚤总量由前置库区的27%下降到生态修复区的21%。

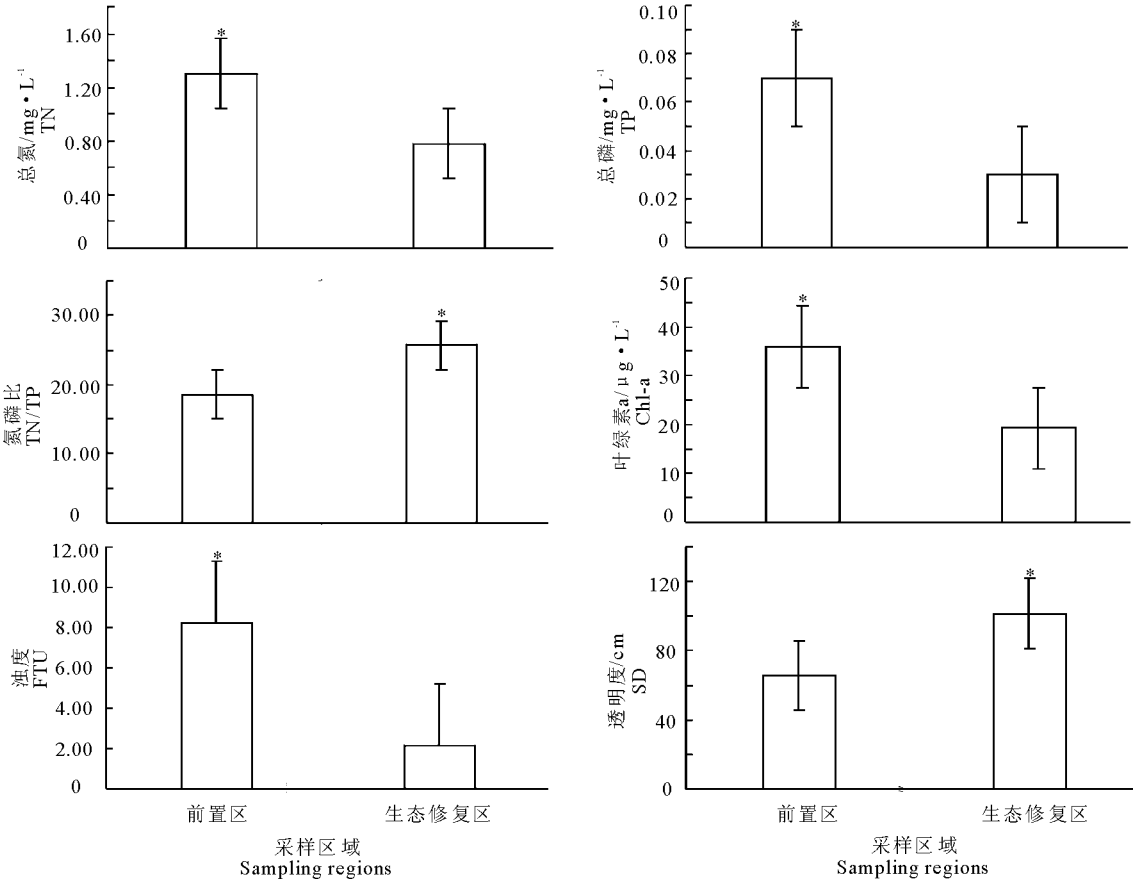


图 2　亲水河前置库区与生态修复区的理化因子比较(“*”为表示显著性差异)

Fig 2　Comparison of environmental factors between the front damming area (pre-reservoir region) and the eco-remediation region in Qinshui River(* significant difference)

表 3　亲水河浮游甲壳动物月变化及出现频率

Tab 3　Monthly variation and occurrence frequency of crustacean zooplankton species in Qinshui River

浮游甲壳动物	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	出现频率/%
枝角类 Cladocera								
短尾秀体溞 *Diaphanosoma brachyurum*			+					5
多次秀体溞 *Diaphanosoma sarsi*	+		+	+	+			25
长刺溞 *Daphnia longispina*							+	2
角突网纹溞 *Creiodaphnia cornuta*	+	+	+	+	+	+	+	55
微型裸腹溞 *Moina micrura*						+		2
简弧象鼻溞 *Bosmina coregoni*	+	+	+	+		+	+	54
锯尾隆背溞 *Bunops serricaudata*					+			2
龟状笔纹溞 *Graptoleberis testudinaria*					+	+		13
圆形盘肠溞 *Chydorus sphaericus*		+	+		+	+		9
桡足类 Copepod								
汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*		+	+	+		+	+	23
中华窄腹剑水蚤 *Limnoithona sinensis*	+	+	+	+	+	+	+	77
白色大剑水蚤 *Microcylops albidus*					+			2
短刺近剑水蚤 *Tropocyclops brevispinus*					+	+	+	34
爪哇小剑水蚤 *Microcylops javanus*	+	+	+	+	+		+	61
广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*	+	+	+	+	+	+	+	73
合　　计/种	6	7	9	7	10	9	8	

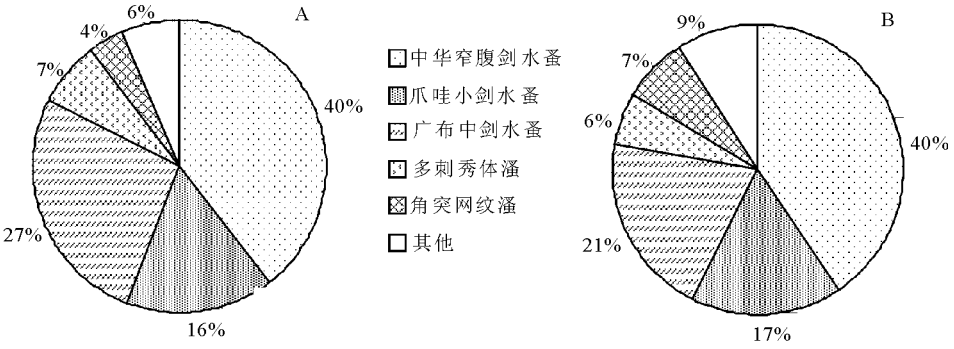


图3 亲水河生态示范区前置库区(A)和生态修复区(B)浮游甲壳动物群落结构对比

Fig 3 Comparison of crustacean zooplankton communities in the pre-reservoir region (A) and eco-remediation region (B) of the Qinshui River

2.3 浮游甲壳动物密度和生物量变化

研究期间,测得浮游甲壳动物平均密度为54.3个/L;其中枝角类密度为8.8个/L,桡足类为45.5个/L;平均生物量为971.2 μg/L;其中枝角类生物量为94.0 μg/L,桡足类为877.2 μg/L。如图4所示,经生物绳与湿地植物联合修复后,浮游甲壳动物的平均生物量由前置库区的892.6 μg/L上升到生态修复区的1 018.5 μg/L,上升了14.10 %;其中前置库区的枝角类平均生物量为85.5 μg/L,桡足类为807.1 μg/L;生态修复区枝角类平均生物量为99.2 μg/L,桡足类为919.3 μg/L。从月变化来看(图5),浮游甲壳动物月平均密度和生物量均以8月为最高,分别为1 005.0个/L和8 617.1 μg/L;其平均密度最小值出现在12月,密度为1.8个/L,生物量的最小值出现在11月,为11.4 μg/L。

2.4 浮游甲壳动物种类多样性变化

生物绳与湿地植物联合修复前后Simpson指数和Shannon-Weiner指数的相差均不明显,Simpson指数最低值出现在前置库区的Q2采样点,而最高值出现在生态修复区水生植物物种最丰富的Q7采样点(图6)。不同月份生态示范区中浮游甲壳动物的生物多样性有较大差别(图7),除7月和8月外,其余各月生态修复区的Simpson指数均高于前置库区。

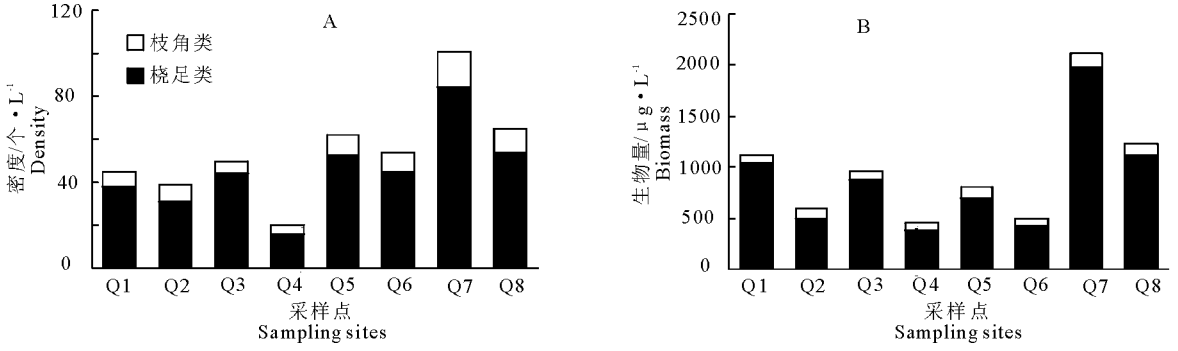


图4 不同采样点的浮游甲壳动物(枝角类和桡足类)密度(A)和生物量(B)

Fig 4 Spatial distributions of crustacean zooplankton (Cladocera and Copepod) density (A) and biomass(B)

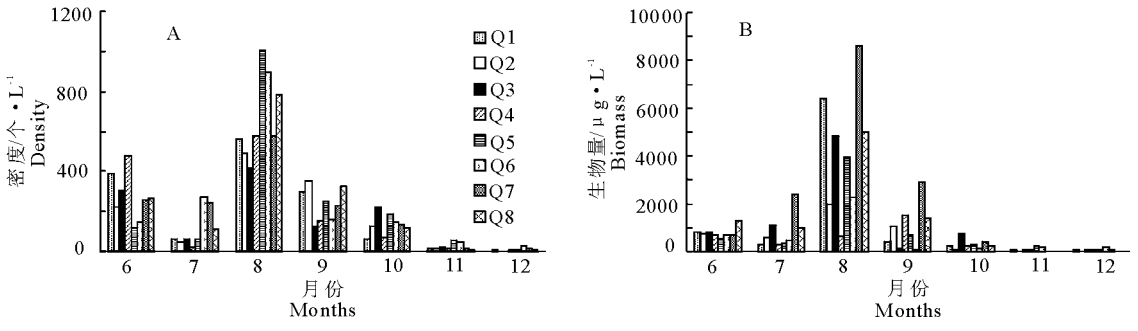


图5 不同月份浮游甲壳动物的密度(A)和生物量(B)变化

Fig 5 Temporal distribution of crustacean zooplankton density (A) and biomass (B)

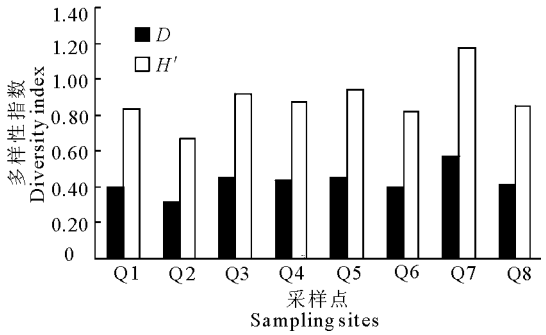


图 6　不同采样点的浮游甲壳动物生物多样性指数

Fig 6　Diversity index of the crustacean zooplankton community at each site

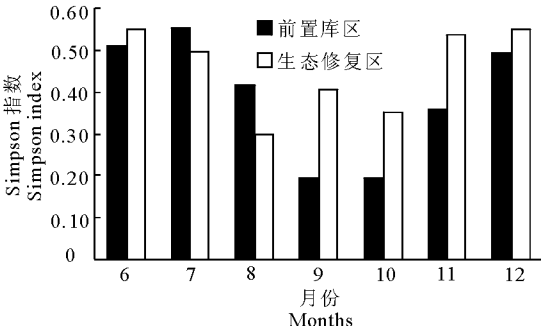


图 7　浮游甲壳动物 Simpson 指数月变化

Fig 7　Monthly variations in the Simpson diversity index of crustacean zooplankton

2.5　浮游甲壳动物群落与环境因子的关系

Pearson 相关分析发现,温度、营养盐和叶绿素 a 含量等对浮游甲壳动物总丰度有显著影响(表 4)。浮游甲壳动物总密度与总磷($r=0.365, P<0.01$)、叶绿素 a($r=0.450, P<0.01$)以及温度($r=0.530, P<0.01$)呈极显著正相关;与氮磷比($r=-0.477, P<0.01$)呈极显著的负相关;而枝角类密度与温度($r=0.266, P<0.05$)、pH($r=-0.322, P<0.05$)显著相关;桡足类丰度与总磷($r=0.372, P<0.01$)、叶绿素 a($r=0.450, P<0.01$)、温度($r=0.524, P<0.01$)以及氮磷比($r=-0.473, P<0.01$)极显著相关。

表 4　浮游甲壳动物丰度与水质因子相关分析

Tab 4　Pearson correlation coefficients of the abundance of planktonic crustaceans and water quality parameters

丰度	总氮	总磷	叶绿素	透明度	氨氮	温度	pH	氮磷比
枝角类	-0.135	0.133	0.208	0.042	-0.105	0.266*	-0.322*	-0.233
桡足类	-0.023	0.372**	0.450**	-0.092	-0.064	0.524**	-0.143	-0.473**
总计	-0.048	0.365**	0.450**	-0.075	-0.079	0.530**	0.194	-0.477**

注:* 在 0.05 水平上显著相关(双侧);** 在 0.01 水平上显著相关(双侧)。

Note: * significant correlation (0.05); ** highly significant correlation (0.01).

3　讨论

3.1　亲水河生态修复过程中水质指标的反馈

研究表明,亲水河的生态修复工程,对氮磷营养盐具有一定的消减作用。生态修复过程中,水体中的总氮、铵态氮和总磷等浓度均有不同程度的下降,其中以总氮及总磷的消减幅度较大,有效改善了入河水体中氮营养元素严重超标的情况;由于总磷消减幅度大于总氮的消减幅度,进而导致水体中氮磷比(TN/TP)值的上升。氮、磷元素是浮游植物生长的必需元素,直接决定着浮游植物密度和生物量的高低;而浮游植物是水生态系统食物链中最基础且最重要的环节之一,其种类和数量的变化直接或间接地影响其它水生生物的丰度和分布,甚至会影响整个生态系统的稳定(胡韧等,2002)。生态修复区水体总氮、总磷浓度的下降会造成浮游植物细胞中氮含量的减少,引起细胞叶绿素含量的下降,影响浮游植物光合作用的速率,进而达到抑制浮游植物生长的效果(黄宏等,2007)。综合生态修复示范区的水质监测指标研究发现,亲水河生物绳与湿地植物联合修复技术的生态修复对水环境的改善起到了积极作用。

3.2　浮游甲壳动物群落结构变化及其生态学意义

研究发现,亲水河生态修复区中浮游甲壳动物的种类数、密度及生物量都较前置库区有所上升。浮游甲壳动物种类数由前置库区的 13 种上升到生态修复区的 16 种,出现了前置库区没有的长刺溞(*D longispina*)、微型裸腹溞(*M micrura*)以及锯尾隆背溞(*B serricaudata*)。新物种长刺溞和微型裸腹溞的出现也可能就是亲水河水环境质量改善的直接回馈。浮游甲壳动物平均生物量也由前置库区的 892.57 μg/L 上升到生态修复区的 1018.45 μg/L。中小型枝角类浮游甲壳动物微型裸腹溞和角突网纹溞(*C cornuta*)在亲水河的优势地位则可能与河流中浮游生物食性动物如鲢的投放有关。Pearson 相关分析结果显示,浮游甲壳动物丰度与总磷、叶绿素含量以及温度呈显著正相关。

本研究中,多种水生植物培植、鱼类和螺蚌类软

体动物的投放在消减水体营养负荷与改善水环境质量的同时,对河流中的浮游甲壳动物的物种多样性提升也有促进作用。研究发现生态修复区的浮游甲壳动物生物多样性高于前置库区,这可能与生态修复区中大量沉水植物的培植有关。研究表明,沉水植物覆盖度较高的水体,浮游甲壳动物种类数、密度和多样性一般比无沉水植物水体高(陈光荣等,2008)。亲水河生态修复工程在改善水体浮游甲壳动物群落结构、增加浮游甲壳动物物种数量的同时,提升了浮游甲壳动物的物种多样性,能够为维持河流生态系统的稳定、实现水生生态系统的良性循环提供帮助。

3.3 河流生态修复的可行性与改进措施

综合本次研究结果,亲水河生态修复工程实施后,生态修复区水体中氮磷营养盐含量显著下降,浮游甲壳动物的种类数、密度和生物量显著上升,浮游甲壳动物生物多样性指数也明显升高。研究表明,前置库技术、生物绳与湿地植物联合生态修复技术在河流水生态系统修复上具备可行性与有效性,在生态工程实施过程中,浮游甲壳动物群落结构的改变和浮游甲壳动物生物多样性的提升,对整个亲水河水生态系统实现由"藻"型向"草"型转换的稳态转换也有积极意义。当前国内大多数河流生态修复研究和工程多偏重于河流水质的改善,而对河流生态系统结构和功能修复的研究和实践不足。

结合本研究结果,在今后的河流生态修复研究和实践中可采取以下改进措施:(1)河流生态修复是一个长期、复杂的过程,多种生态修复手段如前置库技术、生物绳和湿地植物修复技术的联合使用可发挥出更强的生态修复效果;修复手段的目标不仅仅只是水质和水文条件的改善,还可以实现河流生态系统的生态恢复、生态更新、生态控制等;(2)水生生物对河流水生态环境的变化非常敏感,通过水生生物种类、数量及生物多样性指数的改变来判断环境质量的变化,其结果更具有说服力;在河流生态修复工程中对水生生物群落结构以及生物多样性进行研究,从生态学角度判断河流生态修复方法的有效性与可行性,可以作为河流生态修复研究中的重要组成部分;(3)在河流生态修复工程中使用本地物种,不仅保护了本土物种,避免了外来生物入侵的危害,而且有助于河流原有的生物多样性恢复,强化了河流水生生态系统自身的抗干扰和自净能力,有利于水生态系统的良性循环,并达到流域经济与生态协调同步发展。

参考文献

边博, 吴海锁, 徐志荣,等, 2013. 复合型前置库系统去除面源主要污染物的研究[J]. 湖泊科学, 25(3): 352 – 358.

陈光荣, 张修峰, 钟萍, 等, 2008. 惠州西湖浮游动物及其水质的关系[J]. 湖泊科学, 20(3): 351 – 356.

陈雪梅, 1981. 淡水桡足类生物量的测算[J]. 水生生物学集刊, 7(3): 397 – 408.

范正年, 1988. 测定淡水枝角类生物量的两种方法比较[J]. 动物学杂志, 23(5): 29 – 31.

胡韧, 林秋奇, 段舜山, 等, 2002. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征[J]. 生态科学, 21(4): 310 – 315.

黄宏, 杨东方, 陈生涛,等, 2007. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要[J]. 海洋环境科学,26(3): 201 – 207.

纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等, 2006. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性[J]. 生物多样性, 14(3): 206 – 215.

蒋燮治, 堵南山, 1979. 中国动物志:淡水枝角类[M]. 北京:科学出版社.

倪晋仁, 刘元元, 2006a. 河流健康诊断与生态修复[J]. 中国水利, (13): 4 – 10.

倪晋仁, 刘元元, 2006b. 论河流生态修复[J]. 水利学报, 37(9): 1029 – 1037,1043.

王文君, 黄道明, 2012. 国内外河流生态修复研究进展[J]. 水生态学杂志, 33(4): 142 – 146.

吴朝, 张庆国, 2009. 淡水浮游生物多样性及数量分析方法研究进展[J]. 安徽农学通报, 15(12): 41 – 42.

徐菲, 王永刚, 张楠,等, 2014. 河流生态修复相关研究进展[J]. 生态环境学报, 23(3): 515 – 520.

赵俊杰, 2005. 面源污染控制的前置库生态系统的构建技术研究[D]. 南京:河海大学.

中科院动物所甲壳动物研究组, 1979. 中国动物志:淡水桡足类[M]. 北京:科学出版社.

钟春欣, 张玮, 2004. 基于河道治理的河流生态修复[J]. 水利水电科技进展, 24(3): 12 – 14,30.

邹联沛, 陈芳, 王欣泽,等, 2013. 生物绳 – 湿地植物复合人工湿地深度净化微污染水体的试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 19(5): 465 – 469.

John T, Peter G, Gary H, 2010. Complex reservoir sedimentation revealed by an unusual combination of sediment records, Kangaroo Creek Reservoir, South Australia [J]. Journal of Paleolimnology, 43: 535 – 549.

Tavernini S, Mura G, Rossetti, 2005. Factors influencing the seasonal phenology and composition of zooplankton communities in mountain temporary pools[J]. International Review of Hydrobiology, 90(4): 358 – 375.

(责任编辑 万月华)

Community Structure of Crustacean Zooplankton in the Qinshui River during Ecological Restoration

YU De-qin[1], GUO Ni-chun[1], TANG Xiang-ming[2], GUO Long-gen[3]

(1. Resources and Environment College, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, P. R. China;
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China;
3. Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, Institute of Hydrobiology,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Qinshui River, located in southern Taihu New Town of Wuxi City, provides a buffer zone for Taihu Lake. Removal of particulate matter and nutrients by the buffer is important for improving water quality and maintaining the health of Taihu Lake's aquatic ecosystem. In 2014, an ecological restoration project was implemented in the Qinshui River to reduce both non-point and domestic wastewater pollution. The ecological demonstration zone had three important components: surface runoff collection and regulation; construction of an artificial stepped-pool system with front damming; and an ecological restoration area. Eco-remediation technology combined the use bio-rope and wetland plant restoration. As part of the project, the community structure of crustacean zooplankton and water quality parameters in the stepped-pool system were compared with those in the ecological restoration area and the relationship between water quality parameters and planktonic crustacean community structure was analyzed. The goal was to evaluate the influence of water quality improvement on the planktonic crustacean community to prove the feasibility and demonstrate the effectiveness of ecological restoration, based on changes in community structure. During the ecological restoration process (June to December, 2014), planktonic crustacean samples were collected for qualitative and quantitative analysis at eight sampling sites: three sampling sites (Q1 – Q3) in the stepped-pool system and five sampling sites (Q4 – Q8) in the ecological restoration area. The water quality parameters measured at each site included SD, T, pH, DO, FTU, Cond, TDS, Sal, TN, TDN, NO_3^--N, NH_4^+-N, TP, TDP, Chl-a and SS. A total of 24 species were identified, including 11 cladoceran species from 10 genera and 13 Copepod species from 11 genera. *Creiodaphnia cornuta*, *Bosmina coregoni*, *Limnoithona sinensis*, *Microcylops javanus* and *Mesocyclops leuckarti* were the dominant species during the study period. The maximum density and biomass (1 005.00 ind/L, 8 617.1 μg/L) of crustacean zooplankton were both recorded in August, while the minimum (1.80 ind/L, 11.4 μg/L) were recorded in November and December. After ecological restoration, the biomass of crustacean zooplankton increased from 892.6 μg/L (stepped-pool area) to 1 018.5 μg/L (ecological restoration area). Pearson correlation analysis indicates that temperature ($r = 0.530$, $P < 0.01$), nutrients [TP ($r = 0.365$, $P < 0.365$), TN/TP ratio ($r = -0.477$, $P < 0.01$)] and chlorophyll a ($r = 0.450$, $P < 0.01$) significantly affect planktonic crustacean biomass and other water quality parameters have no obvious affect. The abundance of planktonic crustaceans displayed significant differences at different stages of restoration. The density and biomass of planktonic crustaceans were much higher in the restoration area than in the stepped-pools. Our research demonstrated that ecological engineering that includes pre-reservoir technology, using bio-rope and wetland plants reduces nutrients effectively and improves crustacean zooplankton community structure. This method of ecological restoration should be promoted in future river eco-remediation projects.

Key words: Qinshui River; eco-remediation; crustacean zooplankton; biodiversity; bio-rope; ecological engineering