

曾阳,苗明升,付秀娥,等.温榆河浮游动物多样性及水质改善效果评价[J].环境科学与技术 2012,35(3) 200-205.Zeng Yang, Miao Ming-sheng, Fu Xiu-e et al. Evaluation of water quality improvement in Wenyuhe River based on the analysis of diversity of macro-zooplankton [J]. Environmental Science & Technology 2012, 35(3) 200-205.

温榆河浮游动物多样性及水质改善效果评价

曾阳^{1,3}, 苗明升¹, 付秀娥^{1,3}, 陈琳琳², 张高生², 任宗明^{2*}, 王亚炜³, 魏源送³
(1.山东师范大学生命科学学院,山东 济南 250014; 2.中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003;
3.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要:为评价自 2010 年 5 月罗马东湖示范工程运行后温榆河水质变化情况,于 2010 年 5 月-2011 年 2 月间,定期采集该流域大型浮游动物,并从浮游动物种类、敏感种数量以及 Shannon-Weaver 生物多样性指数(H')等 3 个方面对温榆河流域大型浮游动物多样性进行分析。2010 年 5 月-10 月,罗马东湖大型浮游动物种类增加,敏感种数量上升,Shannon-Weaver 生物多样性指数(H')由 0.650 1 升至 2.134 2,水质由重污型改善为 β -中污型。2010 年 11 月-2011 年 2 月, H' 降低,说明季节变化对生物多样性影响较大。下游苇沟桥由于接受示范工程水域敏感种 H' 与罗马东湖具有相同变化趋势,但受到清河水体影响,实际水质较差。苇沟桥下游北关闸敏感种再次消失, H' 降低。其他位点 H' 明显较低,并受季节变化影响。结果表明,温榆河水质改善示范工程对局部水域的水质改善效果明显。要实现河流健康目标,必须控制污染源,由点到面,逐步由局部生态修复过渡到流域生态系统的恢复。

关键词: 温榆河; 浮游动物; 水质评价; 生物多样性

中图分类号: X824 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2012.03.043 文章编号: 1003-6504(2012)03-0200-06

Evaluation of Water Quality Improvement in Wenyuhe River Based on the Analysis of Diversity of Macro-zooplankton

ZENG Yang^{1,3}, MIAO Ming-sheng¹, FU Xiu-e^{1,3}, CHEN Lin-lin²,
ZHANG Gao-sheng², REN Zong-ming^{2*}, WANG Ya-wei³, WEI Yuan-song³
(1.College of Life Science, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China;
2.Yantai Coastal Zone Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Yantai264003, China;
3.Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The analysis of diversity index of macro-zooplankton in Wenyuhe River with Shannon-Weaver diversity index (H'), zooplankton species and sensitive species from May 2010 to February 2011 was carried out after the demonstration project. The amount of zooplankton in Roma East Lake where the demonstration project was running increased evidently, and the number of sensitive species rose. Shannon-Weaver diversity index (H') changed gradually from 0.650 1 (serious pollution type) in May to 2.134 2 (medium pollution of β type) in October, and it showed the rule of seasonal change. Though H' of Weigou Bridge downstream increased due to H' of Roma East Lake, which showed the same trend as Roma East Lake, the water quality was poor due to the water pollution of Qinghe River. H' of Beiguan Brake downstream of Weigou Bridge decreased evidently. The results suggested that the artificial demonstration project of Roma East Lake had positive effects on the improvement of water quality. However, some other measures must be taken to control the pollution source to realize the targets of overall improvement of water quality in Wenyuhe River.

Key words: Wenyuhe River; macro-zooplankton; water quality assessment; biodiversity

温榆河位于北京市东北部,流经昌平、海淀、顺义、朝阳和通州五区,是支撑北京市的天然生态屏障。温榆河主要来水水源为城市退水、上游来水和流域分散性污水等,以非常规水源补给为主。但近年来随着

城市的发展,大量生产和生活污水排入温榆河道,尤其是进入 21 世纪以来,温榆河流域水质恶化明显。据 2005 年检测资料,约 60 万 m^3/d 污水未经处理直接排入温榆河,致使流域内所有河道水体(包括干流和支

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2011-10-11;修回 2011-11-17

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07209-005-003)

作者简介:曾阳(1987-)男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染生态学(电子信箱)zengy128@hotmail.com,* 通讯作者(电子信箱)zmrren@yic.ac.cn.

流)水质全部为超 类水体^[1]。李莲芳^[2]研究发现温榆河表层沉积物中的重金属含量处于中度污染水平,各取样点显现出强至极强的生态风险。李莉娜^[3]于2004–2006 年对温榆河浮游生物群落进行调查,结果显示温榆河水质较差,大多数站点水体为轻度污染,个别站点为中度污染。近几年,北京市重点整治温榆河,水质有改观,但是温榆河干流水质仍以劣 类为主^[4]。

温榆河水质状况严重影响区域经济社会的协调发展。为改善温榆河水质,构建并维护其健康的河流生态系统,提升区域景观美化度和促进绿色生态走廊建设,“十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项结合温榆河水质改善的要求,在温榆河中游河段开展污染河水生态治理关键技术与示范研究,并于2010年5月实现罗马东湖水质改善示范工程的顺利运行。温榆河生态治理的首要目标是局部改善水质,使其水质功能达标,同时结合生态环境改善需求,由点到面,逐步过渡到流域生态系统的恢复,最终实现河流健康目标。

浮游动物(Zooplankton)的种类极多,作为水生生态系统中的初级消费者,是水生生态系统物质循环和能量流动的重要环节,对环境变化敏感,其群落变化能客观反应水生生态系统环境质量状况,对生态系统健康评价有重要的指示作用^[5]。为初步评价龙道河罗马东湖水质改善示范工程运行效果,本研究在2010年5月–2011年2月间,采用大型浮游动物生物多样性分析对温榆河水质改善进行评价,以分析示范工程对温榆河水质改善的作用和示范工程运行过程中存在问题,为水质改善工程在整个流域进行推广提供可行性分析。

1 材料和方法

1.1 研究区域

温榆河发源于北京市昌平区军都山麓。全长47.5 km,其间又有蔺沟河、清河、龙道河、坝河、小中河汇入。流域面积约4 300 km²。上游由东沙河、北沙河和南沙河三条支流在昌平区沙河镇汇集于沙河闸形成沙河水库,沙河闸以上称之为温榆河上游,即沙河水库流域,流域面积1 099 km²。从沙河闸以下始称温榆河,干流以鲁疃闸为界,以上为温榆河上段,长约23 km,其主要支流为蔺沟河;以下为温榆河下段,下段长约24.5 km,其主要支流为清河、坝河、小中河等。之后经朝阳、顺义两区至通州区北关拦河闸。

温榆河水质改善工程示范区域位于温榆河中段罗马东湖(图1)。水体通过引水渠进入罗马西湖,再进入罗马东湖水质改善示范工程区域,最后从龙道河流回温榆河干流。罗马东湖日常环境需水量,主要是通

过提水泵站引自罗马西湖,在罗马东湖形成水体大循环和小循环,水体小循环是指提水泵站从罗马东湖东南角提升湖水至水质改善示范工程,净化处理后在示范工程西南角再排入罗马东湖,然后向北,绕示范工程以及湖中心岛,再转向东、南循环。水体大循环是指水源从罗马西湖引水至水质改善示范工程,后经龙道河,进入温榆河,形成一个水体大循环。

1.2 样品采集与处理

为系统分析温榆河水质改善示范工程对温榆河水质改善的贡献,结合温榆河来水特点,设置8个采样点(图1),具体位置及各位点之间关系如表1所示。采样点设置以沙河水库为起始点,到通州北关闸(温榆河和北运河的分界点)为止,包括温榆河及其重要支流清河,并涵盖温榆河水质改善示范工程区域。

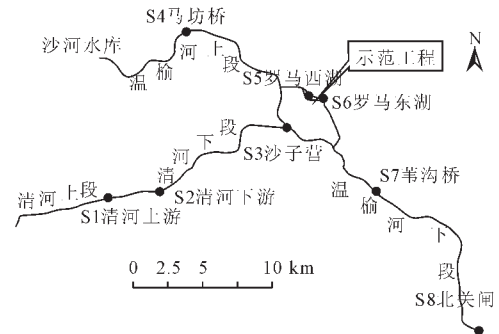


图1 温榆河采样点位置
Fig.1 Sampling sites in Wenyuhe River

表 1 采样点分布
Table 1 Distribution of sampling sites

采样点	经度	纬度	备注
清河上游 S1	116°20'25.99"E	40°1'28.98"N	清河污水处理厂排水口上游100 m左右
清河下游 S2	116°21'38.11"E	40°1'39.73"N	清河污水处理厂排水口下游500 m处
沙子营 S3	116°29'20.52"E	40°4'44.86"N	清河与温榆河汇入点,评价清河水质
马坊桥 S4	116°24'15.87"E	40°9'2.06"N	温榆河上游,评价温榆河上游水质
罗马西湖 S5	116°30'25.65"E	40°6'10.02"N	温榆河水质改善示范工程进水
罗马东湖 S6	116°31'10.43"E	40°6'4.29"N	温榆河水质改善示范工程出水
苇沟桥 S7	116°33'52.82"E	40°1'52.78"N	示范工程下游,并接纳清河来水
北关闸 S8	116°39'6.77"E	39°55'34.35"N	苇沟桥下游

采样时间 2010年5月–2011年2月,每月下旬20日–25日采集1次。位于清河的S1、S2和S3位点在2010年5月份采样中未列入计划,从2010年6月份开始采集分析。

样品处理 采用5 000 mL有机玻璃采水器采集水样,由于水深大多不超过1 m,因此只在距水面0.5 m的表层处取样。经25号浮游生物网过滤后,现场用

37%~40%的甲醛溶液固定,用量为水样体积的 4%。样品带回实验室沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL。

浮游动物种类主要依据《中国淡水生物图谱》^[5]和《浮游生物学》^[6]进行鉴定。

1.3 评价方法与标准

本研究通过浮游动物种类组成及分布、浮游动物生物数量及 Shannon-Weaver 生物多样性指数等 3 个方面分析温榆河水质变化。

水环境决定了生物种群或群落结构特征,反之,生物的个体、种群或群落的变化,可以客观反映出水体质量的变化规律^[7]。在极度污染水体中,几乎所有的浮游动物都不能生存;在较严重和中度污染水体中,耐污种类形成优势种群,随着水质改善,敏感种类出现并呈数量上升趋势;在清洁水体中,浮游动物一般显示出多种类特征。因此,敏感种(Sensitive Species, SS)和耐污种(Tolerant Species, TS)的种类及数量,是水质污染状况的重要指标^[8-9]。耐污种及敏感种种类主要根据相关文献描述确定。

浮游动物生物数量除与水温^[10]、食物、pH 等其他环境因素有关外,与水质污染程度密切相关,是分析水体水质状况的重要指标^[11]。浮游动物生物数量的测定是在实验室吸取 1 mL 样品于计数框中,在 10×10 的放大倍数下全部计数 3 次,取其平均值。然后按式(1)换算出单位体积中的个体数量:

$$N=(v \times n)/(V \times C) \quad (1)$$

式(1)中 N —1 L 水样中浮游动物的个数, ind/L; v —样品浓缩后的体积, mL; C —计数框体积, mL; V —采样体积, L; n —计数所获得的个体数(二片平均数), ind。

生物多样性指数是评价河流水质的重要指标,它取决于种类多寡、个体丰度及均匀性等 3 个因素。生物种数越多或各个种的个体数目分配越均匀,多样性指数就越大。因而能够很好的表征水体污染程度,反映污染情况。本研究采用 Shannon-Weaver 多样性指数(H')评价方法^[12-14]相关评价方程如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

式(2)中 N :总个体数; n_i :第 i 个物种个体数; S :物种数。

$H' \geq 0$, " $H'=0$ " 表示全部个体均属于一种生物, " $0 < H' < 1$ " 表示水质重污染, " $1 < H' < 2$ " 表示水质 α -中污型, " $2 < H' < 3$ " 表示水质 β -中污型, " $H' > 3$ " 表示水质清洁^[15]。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类变化

采样周期内各位点浮游动物种类分析结果如表 2 所示。

表 2 不同月份各位点浮游动物种类数
Table 2 Amounts of zooplankton species in different months

	2010-5		2010-6		2010-7		2010-8		2010-9		2010-10		2010-11		2010-12		2011-1		2011-2	
	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS	TS	SS
S1	#	#	3	0	4	0	3	0	4	0	4	1	#	#	#	#	#	#	3	1
S2	#	#	2	0	2	0	2	0	3	0	2	0	#	#	#	#	#	#	2	0
S3	#	#	5	1	3	0	5	0	5	0	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1
S4	2	1	4	1	3	0	5	0	3	0	4	0	2	0	1	1	3	2	4	2
S5	1	1	7	2	3	1	3	1	4	0	3	1	1	1	1	1	1	1	3	2
S6	1	1	2	2	4	1	4	2	4	1	3	2	2	1	1	2	1	2	3	1
S7	1	1	6	2	5	1	5	1	5	1	4	1	1	1	2	1	3	2	3	3
S8	3	1	4	1	4	1	3	0	3	0	2	0	2	0	3	0	2	1	2	0

注 # 为未采样, TS 为耐污种, SS 为敏感种。

表 2 结果表明 (1) 来自清河的 3 个位点 S1(清河上游)、S2(清河下游)、S3(沙子营), 浮游动物组成主要以耐污种为主, 包括微型裸腹溞 (*Moina micrura*)、臂尾轮虫 (*Brachionus*)、长三肢轮虫 (*Filinia longiseta*); 且浮游动物种类在不同月份间无明显变化 (2) S4(马坊桥)、S5(罗马西湖)及 S8(北关闸)位点, 以耐污种微型裸腹溞 (*M. micrura*)、蚤状溞 (*Daphnia pulex*)、长三肢轮虫 (*F. longiseta*)、剑水蚤 (*Cyclopidae*) 为主, 且不同月份的浮游动物种类组成变化不大, 耐污种数平均为 4 种, 其中 5-7 月出现 1

种敏感种长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) (3) 位于罗马东湖示范工程下游的 S6 位点在不同月份始终有敏感种出现, 数量基本保持为 1~2 种:长额象鼻溞 (*B. longirostris*) 和透明溞 (*Daphnia hyalina*)。

从表 2 比较同一批次不同位点的浮游动物种类组成可以看出 5 月份各位点的浮游动物种类数区别不明显。6 月份 S7(苇沟桥)和 S5(罗马西湖)的耐污种数量最多, 分别为 6 种和 7 种, S6(罗马东湖)和 S2(清河下游)耐污种数量最少, 为 2 种, 但罗马东湖有敏感种长额象鼻溞和透明溞, 而清河 3 个位点未发现

敏感种。7-9 月份各位点的耐污种数量变化不大, 为 3~5 种, 其中 7 月份 S5(罗马西湖)、S6(罗马东湖)、S7(苇沟桥)以及 S8(北关闸)出现敏感种长额象鼻溞。8 月份 S5(罗马西湖)和 S7(苇沟桥)出现敏感种长额象鼻溞, S6(罗马东湖)出现长额象鼻溞和透明溞 2 种敏感种, 9 月份只有 S6(罗马东湖)和 S7(苇沟桥)出现敏感种长额象鼻溞。10 月份各位点的耐污种浮游动物种数为 2~4 种, S2(清河下游)、S4(马坊桥)和 S8(北关闸)未出现敏感种, S6(罗马东湖)敏感种数仍为最多。11-12 月份各位点的浮游动物种数变化不大, 为 2~3 种, 北关闸未出现敏感种, S6(罗马东湖)敏感数仍为最多。2011 年 1 月和 2011 年 2 月份各位点的浮游动物种类发生变化, 以轮虫为主; 其中, 1 月 S4(马坊桥)和 S7(苇沟桥)浮游动物种类组成相同, 耐污种数及敏感种数都分别是 3 种和 2 种, 2 月各位点的浮游动物种数为 2~6 种, 耐污种数为 2~4 种, S2(清河下游)和 S8(北关闸)未出现敏感种。

综合各采样点浮游动物种类调查结果, 罗马东湖段(S5、S6、S7)相比其它位点耐污种浮游动物种类下降, 敏感物种出现, 水质状况较好。

2.2 生物数量变化

浮游动物生物数量是分析河流水体水质状况的另一重要指标。不同位点浮游动物的生物数量随时间变化如图 2 所示。结果表明, 各位点随时间变化明显, 6-8 月份浮游动物数量要明显高于其它月份, 尤其是 6 月份, S3(沙子营)、S4(马坊桥)和 S7(苇沟桥)3 个位点的生物数量明显比其他月份高出 1 倍以上, 而 9、10 月份数量呈现明显降低, 至冬季后, 各位点生物数量维持在较低水平。2011 年 1-2 月份, 生物数量有所回升, 且浮游动物种类发生改变, 由前期的枝角类、桡足类为主转变为以轮虫为主, 约占生物总量的 85.4%。

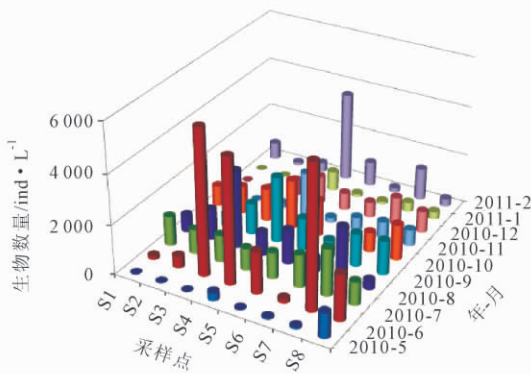


图2 不同月份各位点浮游动物生物数量
Fig.2 The biomass of zooplankton at different time and sites

同时, 同一时间各位点间也存在较大差异。由于 6 月份以后, 清河上游水闸关闭, 清河污水处理厂排水

为清河主要补给水源, 导致位点 S1(清河上游)和 S2(清河下游)的生物数量明显较低。位点 S3(沙子营), S4(马坊桥), S5(罗马西湖), S7(苇沟桥)和 S8(北关闸)生物数量较高, 主要贡献为与富营养水体密切联系的微型裸腹溞、蚤状溞等耐污种。S6 位点浮游动物数量明显较其他位点低。

2.3 生物多样性评价

温榆河不同位点和时间浮游动物 Shannon-Weaver 多样性指数处于 0.249 9~2.276 5 之间(图 3), 水质状况变化范围为 β-中污到重污染。

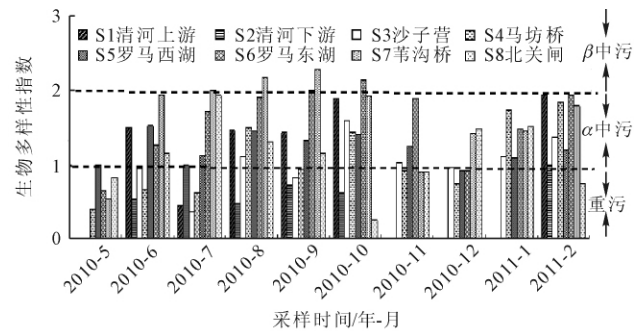


图3 不同月份各位点Shannon-Weaver生物多样性指数
Fig.3 Shannon-Weaver biodiversity index at different time and sites

H' 在不同时间和不同位点具有明显差异性, 清河内的 S1、S2 和 S3 的生物多样性指数明显偏低, 水质基本处于重污染水平, 位点 S4(马坊桥)水质也基本处于重污染水平。示范工程运行一段时间以后, 位点 S6(罗马东湖) H' 由 5 月份的 0.650 1 逐渐增至 6-9 月份的 1-2 和 10 月份的 2.134 2, 但在入冬以后, 受水温影响 H' 又出现明显下降, 但 S6 水质整体处于 α-中污型和 β-中污型, 比位点 S4(马坊桥)和示范工程入口位点 S5(罗马西湖)水质明显改善; 由于接受示范工程水域敏感种和处理后水体, 处于 S6(罗马东湖)下游的位点 S7(苇沟桥)的 H' 处于较高水平, 且变化趋势与 S6(罗马东湖)基本一致, 而位于温榆河最下游的 S8(北关闸) H' 较 S7(苇沟桥)明显降低。

3 讨论

3.1 浮游动物种类

分析采样周期内各位点浮游动物种类状况可以看出, 浮游动物群落结构特征与水质密切相关, 群落结构和种类变化不但反映水体污染程度, 还能反映水体污染趋势。生物种类会随着水体污染程度的变化, 而发生改变; 在重污染水体中, 大部分敏感生物种类消失, 取而代之的是一些耐污型种类。从表 2 的结果来看, 位点 S6(罗马东湖)区域的水质正逐渐改善, 耐污种数量下降, 敏感种出现。位点 S7(苇沟桥)汇集了来自位点 S3(沙子营)、S4(马坊桥)以及 S6(罗马东

湖)浮游动物种类,耐污种数有所上升,敏感种基本保持为长额象鼻溞,数量上也呈现累积效果。

3.2 浮游动物生物数量

不同位点不同时间生物数量变化并未直接反映水体状况。例如 2010 年 6 月份的 S3(沙子营)和 S4(马坊桥)位点生物数量达到 6 000 ind/L,远远高出 S6(罗马东湖)位点的生物数量,但是通过生物种类和 H' 反映水质状况表明, S6(罗马东湖)位点水质明显好于同期的 S3(沙子营)和 S4(马坊桥)位点。9 月以后绝大部分位点的生物数量减少。原因主要在于自 9 月以后,各位点水温都有明显降低,降幅达到 30%左右,至 10 月,水温降至 10℃左右,入冬以后,水温更是降至冰点,因此浮游动物生物数量具有明显的季节性^[16-17]。位点 S6(罗马东湖)的生物数量要明显的较同期其它位点少,原因可能在于(1)与富营养水体密切相关的耐污种数量明显下降(2)示范工程对罗马西湖入水进行净化,降低水体有机质含量,减少了浮游动物所需食物量(3)罗马东湖有幼鱼出现,对浮游动物的数量造成一定影响。因为水体浮游动物生物数量除温度、食物、光强等非生物因素影响外,还受到其它生物竞争和捕食作用的影响^[18-19]。张丹^[20]研究结果表明河流生态生物群落在受到环境胁迫时,浮游动物种类数和个体数都会减少,导致多样性指数的降低。本研究结果与张丹关于生物数量的结论存在差异,但与谢进金^[21]研究结论相符。谢进金的研究结果表明种类增多、密度降低、均匀度上升意味着水质的好转。

3.3 生物多样性指数

从图 3 显示结果来看,整体上各位点的生物多样性指数 H' 偏低,水质污染程度为 α -中污到重污染,表明温榆河整体水质较差。但是位于示范工程区域的位点 S6(罗马东湖)的 Shannon-Weaver 生物多样性指数 H' 由 5 月的 0.6501(水质为重污染)逐渐增大为 10 月的 2.134 2(水质为 β -中污型),入冬以后由于受水温的影响 H' 又出现明显下降,但位点 S6(罗马东湖)水质整体处于 α -中污型和 β -中污型。位点 S7(苇沟桥)的 Shannon-Weaver 生物多样性指数的变化趋势与位点 S6(罗马东湖)基本一致,而实际观察到的水质较差,这可能是由于位点 S7(苇沟桥)汇集了来自清河、温榆河主干的耐污种浮游动物以及示范工程区域的敏感种浮游动物。随着两岸生产生活污水的汇入,来自示范工程水域的敏感种浮游动物无法再生存,进而在下游的位点 S8(北关闸)的 Shannon-Weaver 生物多样性指数又较位点 S7(苇沟桥)低。

综上所述,除水质影响以外,浮游动物种类和数量还与其它环境因素有关。水温是影响浮游动物生长、发育和数量变化等极为重要的环境因子,是影响浮游动

物水平分布的一个重要因素^[22-23],导致浮游生物数量和种类的季节性变化。同时,捕食、竞争、食物、盐度及 pH 等都对浮游生物数量和种类产生影响^[19]。结合陈光荣^[11]研究结果,必须通过浮游动物的种类组成及数目差异(敏感种及耐污种)、个体数量变动及物量分布(物种均匀度)、多样性指数等综合指标评价水质改变。

通过对温榆河不同位点浮游动物种类、数量和生物多样性分析,温榆河的整体水质较差,各采样点的水质污染程度属于 α -中污到重污染;与温榆河水质改善示范工程直接相关的罗马东湖水域水质(β -中污)明显改善,罗马东湖浮游动物种类增多,耐污种数量减少,敏感种数量增多,同时,因为示范工程出水经过龙道河以后重新汇入温榆河干流,使苇沟桥 S7 位点的水体水质明显改善,相关浮游动物多样性变化趋势与罗马东湖一致,但汇入温榆河干流后,经过一段时间,水质又重新达到 β -中污到重污染。排除汛期以及其他因素的影响,其它各位点的水质变化不大。因此,要实现河流健康目标,必须控制污染源,由点到面,逐步由局部生态修复过渡到流域生态系统的恢复。

[参考文献]

- [1] 章丽萍. 温榆河微污染水水质改善技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2009.
Zhang Li-ping. Study on Water Quality Improving Technology of the Light Polluted Wenyu River[D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology, 2009.(in Chinese)
- [2] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 289-297.
Li Lian-fang, Zeng Xi-bo, Li Guo-xue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2): 289-297. (in Chinese)
- [3] 李莉娜, 陈卫, 高思佳, 等. 北京白河与温榆河浮游动物调查[J]. 四川动物, 2008, 27(5): 802-804.
Li Li-na, Chen Wei, Gao Si-jia, et al. Zooplankton investigation in Baihe River and Wenyuhe River of Beijing[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2008, 27(5): 802-804.(in Chinese)
- [4] 王义龙, 刘泽娟, 刘勇. 温榆河水环境和水生态建设[J]. 北京水务, 2010(2): 10-11.
Wang Yi-long, Liu Ze-juan, Liu Yong. The water environment and ecological construction of Wenyu River [J]. Beijing Water, 2010(2): 10-11.(in Chinese)
- [5] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:海洋出版社, 1995.
Han Mao-sen, Shu Yun-fang. Atlas of Freshwater Biota in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.(in Chinese)
- [6] 杨秀兰, 叶素兰. 浮游生物学[R]. 农业部中等水产教育研究会, 1999.
Yang Xiu-lan, Ye Su-lan. Planktology[R]. Secondary Fisheries Education Research Association, 1999.(in Chinese)

- [7] 郭沛涌,沈焕庭,刘阿城,等.长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性[J].生态学报,2003,23(5):892-900.
Guo Pei-yong, Shen Huan-ting, Liu A-cheng, et al. The species composition, community structure and diversity of zooplankton in Changjiang estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 892-900.(in Chinese)
- [8] Kolkwitz R, Marsson K. ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von des biologischen Gewässerbeurteilung [J]. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1909:126-152.
- [9] Finlay B J, Esteban GF. Freshwater protozoa biodiversity and ecological function[J]. Biodiversity and Conservation, 1998, 7: 1163-1186.
- [10] 李荔,陈椽,龙胜兴,等.贵州兴西湖水库夏季浮游动物调查与水质评价[J].环境科学与技术,2010,33(S2):540-543.
Li Li, Chen Chuan, Long Sheng-xing, et al. Zooplankton investigation in summer and water quality assessment in Guizhou Xingxi Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S2): 540-543.(in Chinese)
- [11] 陈光荣,钟萍,张修峰,等.惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J].湖泊科学,2008,20(3):351-356.
Chen Guang-rong, Zhong Ping, Zhang Xiu-feng, et al. Zooplankton and its relationship with water quality in Huizhou West Lake [J]. Lake Science, 2008, 20(3): 351-356.(in Chinese)
- [12] Claude E S, Weaver W. Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949:213-216.
- [13] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10: 370-383.
- [14] 国家环保局.水生生物监测手册[K].南京:东南大学出版社,1993.
State Environmental Protection Bureau. Handbook of Hydrobiology Monitoring [K]. Nanjing: Southeast University Press, 1993.(in Chinese)
- [15] 刘超,禹娜,陈立侨.上海市西南城郊河道春季的浮游生物组成及水质评价[J].复旦学报:自然科学版,2007,46(6):913-919.
Liu Chao, Yu Na, Chen Li-qiao. Zooplankton communities and bio-assessment of five rivers in the outskirts of southwest Shanghai [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2007, 46(6): 913-919.(in Chinese)
- [16] 陈受忠.武昌东湖桡足类数量的周年资料[J].水生生物学集刊,1965,5(2):202-219.
Chen Shou-zhong. Anniversary material about the number of copepods in Wuchang East Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1965, 5(2): 202-219.(in Chinese)
- [17] Xie P, Chen X. Experimental and field studies of *Mesocyclops notius* (Copepoda: Cyclopoida) from a subtropical Chinese lake, Lake Donghu [J]. Journal of Plankton Research, 2001, 33(6): 585-596.
- [18] Arcifa M S, Northcote T G, Froehlich O. Fish-zooplankton interactions and their effects on water quality of a tropical Brazilian reservoir [J]. Hydrobiologia, 1986, 139: 49-58.
- [19] 杨宇峰,黄祥飞.浮游动物生态学研究进展[J].湖泊科学,2000,12(1):81-88.
Yang Yu-feng, Huang Xiang-fei. Advances in ecological studies on zooplankton [J]. Journal of Lake Science, 2000, 12(1): 81-88.(in Chinese)
- [20] 张丹,丁爱中,林学钰,等.河流水质监测和评价的生物学方法[J].北京师范大学学报:自然科学版,2009,45(2):200-204.
Zhang Dan, Ding Ai-zhong, Lin Xue-yu, et al. Monitoring and assessment of water quality in rivers with biological methods [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(2): 200-204.(in Chinese)
- [21] 谢进金,许友勤,陈寅山,等.晋江流域水质污染与浮游动物四季群落结构的关系[J].动物学杂志,2005,40(5):8-13.
Xie Jin-jin, Xu You-qin, Chen Yin-shan, et al. The relationship of community structure of zooplankton and the water pollution of Jinjiang River valley [J]. Chinese Journal of Zoology, 2005, 40(5): 8-13(in Chinese).
- [22] Dumont H J. Biogeography of rotifers [J]. Hydrobiologia, 1983, 104: 19-30.
- [23] Dussart B H, Fernando C H, Matsumura-Tundisi T, et al. A review of systematics, distribution and ecology of tropical freshwater zooplankton [J]. Hydrobiologia, 1984, 113: 77-91.

(上接第192页)

- Wang Yun, Cui Peng, Li Hai-feng. Research progress on road landscape ecology [J]. World Sci Tech R & D, 2006, 28(2): 90-95.(in Chinese)
- [19] 朱会义,贾绍凤.降雨信息空间插值的不确定分析[J].地理科学进展,2004,23(2):34-42.
Zhu Hui-yi, Jia Shao-feng. Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data [J]. Progress in Geography, 2004, 23(2): 34-42.(in Chinese)
- [20] 朱求安,张万昌,余钧辉.基于GIS的空间插值方法研究[J].江西师范大学学报:自然科学版,2003,28(2):183-188.
Zhu Qiu-an, Zhang Wan-chang, Yu Jun-hui. Spatial interpolations in GIS [J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science, 2003, 28(2): 183-188.(in Chinese)
- [21] Bell S. Elements of Visual Design in the Landscape [M]. Spon Press, 1996.
- [22] 刘宇辉.武汉三镇山水及历史建筑特色景观审美结构研究[J].城市规划学刊,2009(7):106-110.
Liu Yu-hui. Characteristic landscape aesthetic structure of water-hill & historic building in Wuhan City [J]. Urban Planning Forum, 2009(7): 106-110.(in Chinese)