

DOI: 10.5846/stxb201809021874

林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Lin H, Wang Y, Li B. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价

林 海^{1,2}, 王 源¹, 李 冰^{1,2,*}

1 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083

2 工业典型污染物资源化处理北京市重点实验室, 北京 100083

摘要: 由于浮游动物对水体环境变化敏感, 可表征水体污染程度, 因此在 2017 年对妫水河浮游动物群落结构进行调查, 分析了浮游动物群落结构时空变化特征及其与环境因子的关系, 并利用生物学评价方法对水质进行评价。结果表明: 妫水河浮游动物有 4 门 22 属 88 种, 其中原生动物种类最多, 为 42 种, 主要以轮虫和原生动物为主, 浮游动物平均细胞密度和生物量分别为 5041.58 个/L 和 2.88 mg/L。浮游动物群落结构与环境因子的 CCA 分析显示, 水温、pH、DO 和氨氮是影响妫水河浮游动物群落结构变化的重要因素, 其中裂痕龟纹轮虫、冠饰异尾轮虫和螺形龟甲轮虫等对水体中氮磷的相关性极为显著, 具有富营养化指示作用, 可作为监测水质的指示生物。妫水河浮游动物多样性指数 H、均匀度指数 J 和丰富度指数 D 全年平均值分别为 0.43、0.31 和 0.41, 整体评价结果显示, 妫水河水体处于中到富营养型水平, 尤其是下段城区段污染严重, 表明妫水河水体生态功能遭到破坏, 水质还需进一步改善和治理。本研究结果可为妫水河水质评价、水环境监测及水污染治理提供基础数据资料和理论依据。

关键词: 妫水河; 浮游动物; 群落结构; CCA 分析; 水质评价

Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing

LIN Hai^{1,2}, WANG Yuan¹, LI Bing^{1,2,*}

1 School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2 Beijing Key Laboratory of Resource-Oriented Treatment of industrial Pollutants, Beijing 100083, China

Abstract: Zooplankton are sensitive to changes in the water environment and can characterize the degree of water pollution. The zooplankton community structure in the Guishui River was investigated in 2017, the temporal and spatial variations in zooplankton community structure and their relationship with environmental factors were analyzed, and water quality was evaluated using biological evaluation methods. The results showed that there were 4 phyla, 22 genera, and 88 species of zooplankton in the Guishui River, dominated mostly by rotifers and protozoa (42 species), the average cell density and biomass of zooplankton being 5041.58 ind/L and 2.88 mg/L, respectively. CCA analysis between the zooplankton community structure and environmental factors showed that water temperature, pH, DO, and NH₃-N were important factors affecting changes in zooplankton community structure in the Guishui River, and the relation of *Anuraeopsis fissa*, *Trichocerca lophoessa*, and *Keratella cochlearis* to nitrogen and phosphorus is extremely significant in the water body. These species can be used as eutrophication indicators for monitoring water quality. The annual values of the zooplankton diversity index (H), evenness index (J), and richness index (D) of the Guishui River were 0.43, 0.31, and 0.41, respectively. The overall evaluation results showed that the Guishui river was at the level of medium to high eutrophication, especially in the urban

基金项目: 十三五国家水体污染与控制重大专项课题(2017ZX07101-004-002)

收稿日期: 2018-09-02; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: libing@ustb.edu.cn

areas which were highly polluted, indicating that the ecological function of the Guishui river was impaired, and that the water quality needed further improvement and treatment. The results of this study can provide a theoretical basis for water quality assessment, water environment monitoring, and water pollution control of the Guishui River.

Key Words: Guishui River; zooplankton; community structure; CCA analysis; water quality evaluation

妫水河是官厅水库三大入库河系之一,包括 1 条干流和 9 条支流,为典型的山溪性小流域河流。目前妫水河流域水污染问题突出,垃圾和面源污染问题严重。其次,妫水河流域平均降水量偏低,水资源短缺现象严重。

浮游动物在物质转化、能量流动等生态过程中起着重要作用,其种类组成和多样性特征能反映出水体健康程度和状态^[1],因此浮游动物可作为反映水环境变化的指示生物^[2-3]。针对妫水河目前存在水环境质量较差的问题,本文通过对妫水河浮游动物进行调查研究,研究不同时期浮游动物群落结构的变化和多样性指数的时空差异,分析浮游动物群落与水质指标之间的相关关系,并开展水质生态学评价,以期为妫水河水生态环境监测及治理提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况和采样点设置

妫水河发源于延庆城区东北 13 km 处,横贯延庆盆地,在下屯乡大路村北入官厅水库后入永定河,河长 18.5 公里,为官厅水库的三大入库河系之一,属大陆性季风气候。地理坐标为 115°49'21"—116°16'16.75"E, 40°24'52.18"—40°33'25.91"N。目前,有水汇入的支流主要有古城河、三里河和蔡家河。

根据国家环境保护标准中《水质采样方案设计技术规定》(HJ495—2009),并结合妫水河水系及特点共在流域内设置 10 个采样断面(图 1),其中 S1 位于沈家营镇香村营附近,S2 位于妫水河与上游支流汇流处,S3 是妫水河支流古城河采样断面,S4 是妫水河与古城河交汇后的采样断面,S5 位于北老君堂村附近,S6 位于春芳园,S7 位于东大桥水文站,S8 位于妫水河世园会段,S9 位于妫水河支流三里河采样断面,S10 为谷家营国控断面。于 2017 年丰水期(6—7 月)和枯水期(10—11 月)采集样品,每月采集 1 次,每次采样时间安排在连续晴天、水位较稳定的日子。

1.2 水体理化因子的测定

水体理化因子采用现场测定和实验室分析的方法,其中,温度、pH、溶解氧 3 个指标采用 WTW Multi 350i 手提式多参数水质分析仪进行现场测定,透明度用塞氏圆盘现场测定。在各样点采集 2 个平行水样(各 1 L),置于保温箱中低温保存(4℃),于 48h 内带回实验室进行样品的水质指标测定。TP 的测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89),TN 的测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法(GB 11894-89),NH₃-N 的测定采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009),COD 的测定采用重铬酸钾法(GB 11914-89),测定方法参照文献^[4]。

1.3 浮游动物的采集及检测方法

(1) 定性标本

采用 25 号浮游生物网采集(网孔 0.064mm),于水面以下作“∞”状拖动浮游动物网数次,将浓缩于网头的水样收集于 50ml 的标本瓶,用 4% 甲醛溶液现场固定,以待镜检鉴定。浮游动物种类鉴定参照文献^[5-6]。

(2) 定量标本

用 5L 采水器于分别于水面以下 0.5m 处和 1.5m 处采集水样,混合均匀后置于 1L 塑料采样瓶中,加入鲁哥氏液现场固定,各样点均重复 3 次。实验室静置 24h 后,浓缩至 200mL,再次静置 24h,浓缩至 50mL 保存。定量计数前将沉淀样品充分摇匀,然后吸取 1mL 样品注入 1mL 计数框内,在 10×10 倍的光镜下全片计数。每个标本重复计数 3—5 次,取其平均值。



图 1 采样点位示意图

Fig.1 Sampling sites in Guishui River

S1: 采样点位 1 Site1; S2: 采样点位 2 Site2; S3: 采样点位 3 Site3; S4: 采样点位 4 Site4; S5: 采样点位 5 Site5; S6: 采样点位 6 Site6; S7: 采样点位 7 Site7; S8: 采样点位 8 Site8; S9: 采样点位 9 Site9; S10: 采样点位 10 Site10

1.4 数据处理

根据浮游动物优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(D)对妫水河浮游动物群落结构特征进行分析评价^[7-9],其计算公式如下。

$$Y = (N_i/N) \times f_i$$

$$H = - \sum_{i=1}^s (N_i/N \times \log_2(N_i/N))$$

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

$$D = (S - 1) / \ln(N)$$

式中, N_i 为第*i*种的个体数; N 为所有种类的总个体数; f_i 为各采样点第*i*种的出现频率; H 为生物多样性指数; J 为均匀度指数; S 为物种总数; D 为丰富度指数。

根据水生态学评价方法,当浮游动物丰度<1000 个/L 时水体为贫营养,丰度>3000 个/L 时为富营养,1000—3000 个/L 为中营养^[10]。运用 Canoco5.0 软件进行分析浮游动物群落及其与环境因子之间的相关性。

2 结果

2.1 浮游动物的种类组成与优势种

本次调研共鉴定出浮游动物 4 门 22 属 88 种,原生动物种类最多,共 42 种,其中 28 种为中等营养水体以上的指示种;轮虫种类次之,共 25 种,其中有 8 种富营养水体指示种;枝角类种类最少。浮游动物种类在两个时期均以原生动物和轮虫为主,两门种类之和占总种类的 70% 以上。由图 2 和图 3 可以看出,原生动物种类在两个时期所占比例均最大,分别为 38.3% 和 64.9%,轮虫种类所占比例次之,在两个时期分别为 34.9% 和 16.6%,枝角类和桡足类在两个时期所占比例较小,浮游动物种类组成在两个时期均为原生动物>轮虫>桡足类>枝角类。由于轮虫和原生动物相较于枝角类和桡足类等大型浮游动物,其繁殖发育速度快、能快速适应

河流环境的变化,因此种类数量较多,本研究与国内很多河流浮游动物群落结构组成相似^[11-12]。

由表 1 可以看出,妣水河浮游动物的优势种有 8 种,分别为钟虫、侠盗虫、梨形四膜虫、螺形龟甲轮虫、单环栉毛虫、针簇多枝轮虫、裂痕龟纹轮虫、冠饰异尾轮虫,受不同时期温度和水质的影响,不同时期优势种组成有所差异,其中丰水期优势种主要是针簇多枝轮虫、裂痕龟纹轮虫、冠饰异尾轮虫、钟虫和梨形四膜虫,枯水期优势种主要是钟虫、侠盗虫、梨形四膜虫、螺形龟甲轮虫和单环栉毛虫。

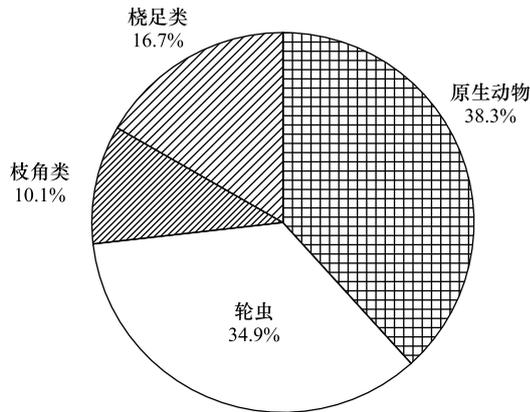


图 2 Distribution of zooplankton species during the wet period

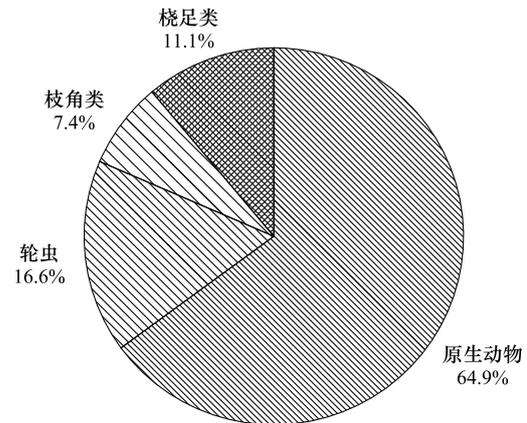


图 3 Distribution of zooplankton species during the dry period

Fig.3 Distribution of zooplankton species during the dry period

表 1 妣水河浮游动物优势种和优势度

Table 1 Dominant species and dominance of zooplankton in the Guishui River

优势种 Dominant species	优势度 Dominance			
	6 月 June	7 月 July	10 月 October	11 月 November
针簇多枝轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.24	0.07		
钟虫 <i>Vorticella</i>	0.18	0.15	0.14	0.08
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	0.06	0.02		
冠饰异尾轮虫 <i>Trichocerca lophoessa</i>	0.05	0.06		
梨形四膜虫 <i>Tetrahymena priformis</i>	0.04			0.05
侠盗虫 <i>Strobilidium</i>			0.38	0.03
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>				0.05
单环栉毛虫 <i>Didinium balbianii</i>				0.03

2.2 浮游动物的密度及生物量

表 2 列出了妣水河丰水期和枯水期浮游动物的密度和生物量,由表 2 可以看出,在调查期间,妣水河浮游动物总的平均密度为 5041.58 个/L,其中原生动物、轮虫、枝角类、桡足类的平均密度分别为 2070、2965、1.54 和 5.04 个/L,丰水期(6 月和 7 月)浮游动物密度高于枯水期(10 月和 11 月),尤其是 6 月份,浮游动物密度高达 12439.63 个/L。妣水河浮游动物生物量平均为 2.88mg/L,浮游动物生物量也以轮虫和原生动物为主。

由图 4 可以看出,浮游动物密度最大值出现在 S8 点位(妣水河世园段),为 18451.25 个/L,说明该点位水体污染严重,最小值出现在 S4 点位(妣水河与古城河交汇处),S2、S4 点位浮游动物平均细胞密度最小。

由图 5 可以看出,S8 点位的生物量最大(14.07mg/L),S3 点位的生物量最小,为 0.17mg/L。浮游动物不同门类当中,轮虫的贡献最大(91.4%),桡足类贡献最小(1.8%)。其中,原生动物平均生物量为 0.11mg/L,S6 最高为 0.21mg/L,轮虫平均生物量为 2.64mg/L,S8 最高为 13.90 mg/L,枝角类平均生物量为 0.08mg/L,S10 最高为 0.64mg/L,桡足类平均生物量为 0.06mg/L,S10 最高为 0.43mg/L。综上可知,妣水河浮游动物以轮虫和原生动物为主体,浮游动物各类群丰度和生物量均表现为市区段最大,其他点位较小。

表 2 妫水河丰水期和枯水期浮游动物的密度和生物量

Table 2 Density and biomass of zooplankton in the wet period and dry period of the Guishui River

月份 Month	6 月 June	7 月 July	10 月 October	11 月 November	平均 Average
原生动物 <i>Protozoon</i>	密度/(个/L) 3450.00	1005.00	2625.00	1200.00	2070.00
原生动物 <i>Protozoon</i>	生物量/(mg/L) 0.18	0.05	0.13	0.06	0.11
轮虫 <i>Rotifera</i>	密度/(个/L) 8970.00	1885.00	135.00	870.00	2965.00
轮虫 <i>Rotifera</i>	生物量/(mg/L) 9.79	0.35	0.03	0.39	2.64
枝角类 <i>Cladocera</i>	密度/(个/L) 1.12	0.01	0.03	5.00	1.54
枝角类 <i>Cladocera</i>	生物量/(mg/L) 0.06	0	0.01	0.25	0.08
桡足类 <i>Copepoda</i>	密度/(个/L) 18.51	0.51	0.14	1.00	5.04
桡足类 <i>Copepoda</i>	生物量/(mg/L) 0.17	0.02	0.01	0.02	0.06
浮游动物 <i>Zooplankton</i>	密度/(个/L) 12439.63	2890.52	2760.17	2076.00	5041.58
浮游动物 <i>Zooplankton</i>	生物量/(mg/L) 10.19	0.42	0.17	0.72	2.88

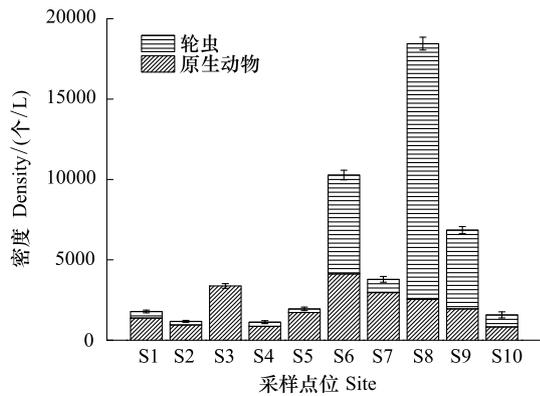


图 4 妫水河不同采样点位浮游动物数量

Fig. 4 Number of zooplankton at different sampling points in Guishui River

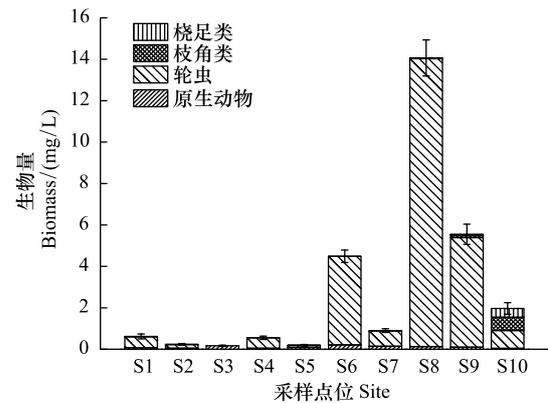


图 5 妫水河不同采样点位浮游动物生物量

Fig. 5 Zooplankton biomass at different sampling points in Guishui River

2.3 浮游动物群落与环境因子的关系

妫水河不同月份水体理化指标如表 3 所示。采用 CCA 分析探究妫水河浮游动物群落及优势种(代码见表 4)与环境因子(水体理化指标)的关系,从而可识别对环境因子敏感的浮游动物物种。浮游动物与环境因子的相关性关系如图 6 所示。

CCA 分析显示,前两个排序轴的特征值分别为 0.39 和 0.08,第一排序轴物种与环境因子的相关系数为 0.953,第二排序轴与环境因子的相关系数为 0.871。温度与第一环境因子排序轴负相关性最大,其次是总磷和总氮;溶解氧与第一环境因子正相关性最大,其次是 pH;叶绿素 a 与第一轴的相关性大于第二轴,浮游动物总密度和 pH 的正相关性最大。大部分优势种分布在第一、二象限,与氨氮和 pH 呈正相关,其中,裂痕龟纹轮虫和冠饰异尾轮虫与氨氮的相关性极显著,针簇多枝轮虫、螺形龟甲轮虫和单环栉毛虫数量与总磷、总氮、温度呈正相关,与 pH 负相关,钟虫、裂痕龟纹轮虫和梨形四膜虫数量与 pH、氨氮正相关,与总磷、总氮、温度和 COD 呈负相关。

由 CCA 分析结果可以分析出,水温、pH、DO 和氨氮对浮游动物组成和优势种影响较大,是决定妫水河浮游动物群落结构变化的主要环境因子。

2.4 浮游动物多样性时空差异

浮游动物的多样性指数可以在一定程度上反映出水环境的状况,也可作为环境质量评价的依据之一。在

水体污染程度较重的河流中,生物多样性下降,浮游动物群落结构趋于简单,多样性指数低^[13]。由表5可以看出,妣水河浮游动物 Shannon-weaver 多样性指数 H、Pielou 均匀度指数 J 和 Margelaf 丰富度指数 D 全年平均值分别为 0.43、0.31 和 0.41,6 月和 11 月的多样性指数 H 和均匀度指数 J 显著高于 7 月,10 月份最低;丰富度指数 D 在 6 月最低,其余 3 个月份相近。不同断面之间,多样性指数 H 和均匀度指数 J 均以 S10(谷家营国控断面)最高,S8(妣水河世园段)最低。

表3 妣水河不同时期水体理化指标均值(平均值±标准差)

Table 3 Mean value of physical and chemical indicators of water bodies in different periods of Guishui River (mean±SD)

指标 Index	单位 Unit	6月 June	7月 July	10月 October	11月 November
温度 Temperature	℃	23.25±1.54	20.60±1.41	19.03±2.47	15.98±2.64
pH		7.58±0.21	7.50±0.33	7.41±0.18	7.28±0.44
SD	cm	37.40±1.36	41.56±2.07	32.71±1.58	44.83±0.59
DO	mg/L	7.41±0.25	8.38±0.19	10.03±0.21	12.89±1.05
COD	mg/L	31.5±0.67	20.92±1.05	29.74±0.79	24.33±1.35
TN	mg/L	1.51±0.14	1.34±0.45	0.91±0.03	1.31±0.48
TP	mg/L	0.29±0.02	0.24±0.04	0.22±0.01	0.16±0.07
NH ₃ -N	mg/L	1.09±0.09	0.86±0.05	0.50±0.02	0.75±0.08
NO ₃ -N	mg/L	0.29±0.02	0.36±0.03	0.31±0.04	0.42±0.04
chl.a	μg/L	21.78±1.97	18.89±2.43	15.23±1.51	18.50±2.97
电导率 Conductivity	μs/cm	500.60±12.81	800.60±17.95	618.60±15.87	723.8±23.41

pH: 氢离子浓度 Potential of hydrogen; DO: 溶解氧含量 Dissolved oxygen; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; TN: 总氮浓度 Total nitrogen; TP: 总磷浓度 Total phosphorus; NH₃-N: 氨氮浓度 Ammonia nitrogen; NO₃-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; Chl.a: 叶绿素 a Chlorophyll a

表4 CCA 分析中浮游动物优势种代码

Table 4 Codes of zooplankton Species for CCA

编号 Number	种类 Species	编号 Number	种类 Species
S1	针簇多枝轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	S5	梨形四膜虫 <i>Tetrahymena priiformis</i>
S2	钟虫 <i>Vorticella</i>	S6	侠盗虫 <i>Strobilidium</i>
S3	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	S7	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>
S4	冠饰异尾轮虫 <i>Trichocerca lophoessa</i>	S8	单环带毛虫 <i>Didinium balbianii</i>

S1: 物种 1 species1; S2: 物种 2 species2; S3: 物种 3 species3; S4: 物种 4 species4; S5: 物种 5 species5; S6: 物种 6 species6; S7: 物种 7 species1; S8: 物种 8 species8

由生物多样性指数评价结果可知, Shannon-weaver 多样性指数 H 和 Margelaf 丰富度指数 D 均显示妣水河水质为重污染状态, Pielou 均匀度指数 J 显示水质为中度污染状态。

表5 浮游动物多样性指数时空差异(平均值±标准差)

Table 5 Spatiotemporal differences in zooplankton diversity index (Mean±SD)

指数 Index	月份 Month				点位 Site			
	6月 June	7月 July	10月 October	11月 November	S6	S8	S9	S10
H	0.55±0.17	0.40±0.16	0.28±0.11	0.51±0.20	0.48±0.06	0.31±0.11	0.40±0.02	0.57±0.05
J	0.39±0.15	0.28±0.11	0.20±0.08	0.37±0.14	0.35±0.15	0.22±0.07	0.29±0.05	0.41±0.04
D	0.34±0.02	0.44±0.07	0.41±0.06	0.43±0.01	0.33±0.02	0.34±0.04	0.39±0.08	0.31±0.04

H: 多样性指数 Shannon-weaver index; J: 均匀度指数 Pielou evenness index; D: 丰富度指数 Margalef's richness index

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构时空变化特征

由以上研究结果可知, 妣水河浮游动物主要为轮虫和原生动物, 原生动物种类最多, 共 42 种, 轮虫种类次

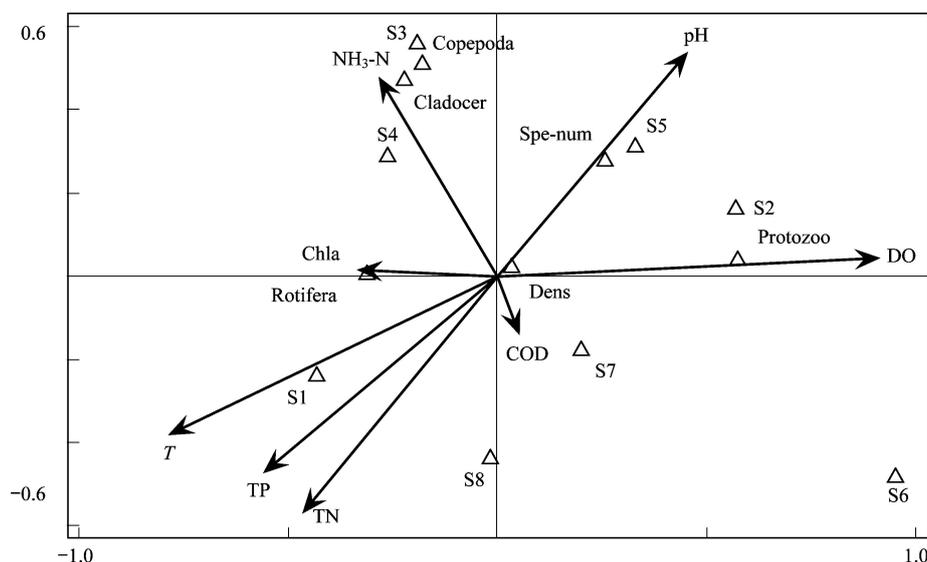


图 6 妫水河浮游动物群落与环境因子 CCA 分析

Fig.6 Canonical correspondence analysis of species-environmental relationships in Guishui River system

pH: 氢离子浓度 Potential of hydrogen; DO: 溶解氧含量 Dissolved oxygen; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; TN: 总氮浓度 Total nitrogen; TP: 总磷浓度 Total phosphorus; NH₃-N: 氨氮浓度 Ammonia nitrogen; NO₃-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; Chl. a: 叶绿素 a Chlorophyll a; ; Dens: 密度 Density; Spe-num: 种类 Number of zooplankton species; Protozoo: 原生动物 Protozoon; Cladocer: 枝角类 Cladocera; Rotifera: 轮虫; Copepoda: 桡足类; S1: 物种 1 (针簇多枝轮虫) *Polyarthra trigla*; S2: 物种 2 (钟虫) *Vorticella*; S3: 物种 3 (裂痕龟纹轮虫) *Anuraeopsis fissa*; S4: 物种 4 (冠饰异尾轮虫) *Trichocerca lophoessa*; S5: 物种 5 (梨形四膜虫) *Tetrahymena priformis*; S6: 物种 6 (狭盗虫) *Strobilidium*; S7: 物种 7 (螺形龟甲轮虫) *Keratella cochlearis*; S8: 物种 8 (单环栉毛虫) *Didinium balbianii*

之,共 25 种,且数量和生物量均以轮虫为主,原因是妫水河水体营养水平较高,有利于轮虫快速生长繁殖,使轮虫中的富营养种类和数量大量增加。与北方河流相比,本研究与滦河、永定河、沙颍河、嫩江浮游动物的群落结构组成相似^[12,14-15],均以轮虫为主,枝角类和桡足类较少。由于轮虫具有独特的孤雌生殖方式,发育快、生命周期短,能在短期内达到很高的丰度,并且很快适应河流中理化环境的变化,因此在河流生态环境中浮游动物通常以轮虫为主^[16]。不同的是嫩江以龟甲轮虫居多,永定河和滦河以臂尾轮虫居多,妫水河以针簇多枝轮虫、裂痕龟纹轮虫、冠饰异尾轮虫、螺形龟甲轮虫为主,其中针簇多枝轮虫、裂痕龟纹轮虫和螺形龟甲轮虫主要出现在富营养水体,冠饰异尾轮虫出现在贫营养水体^[17-18]。与同属北温带的北运河相比,北运河浮游动物也以轮虫为主,但妫水河中枝角类数量所占比例(不足 1%)远小于北运河(24.3%)^[19]。

从不同时期来看,丰水期和枯水期浮游动物均以原生动物为主(图 2、图 3),但两个时期的密度和种类数差异较大,丰水期浮游动物密度(7665 个/L)均高于枯水期(2418 个/L),主要原因是由于丰水期水温较高、氮磷含量较高。朱艺峰等^[20]的研究也表明季节和时期变化是决定象山港国华电厂附近海域浮游动物群落结构的主要因素,这主要由于不同时期的水温对浮游动物的生长繁殖、群落组成和数量变化等影响极为显著,低温下浮游动物的卵发育缓慢,水温升高发育和繁殖速度加快^[21-22],姜会超等^[23]的研究表明水温是影响莱州湾金城海域浮游动物群落结构最主要的环境因子,水温与浮游动物种类数的相关系数达到 0.87 (P<0.01)。妫水河地处北温带季风气候区,夏季炎热多雨、冬季寒冷漫长,年平均气温为 8℃,对于浮游动物来说,丰水期水温相对较高,食物来源充足,繁殖较快,种类和数量迅速增多。丰水期群落结构以轮虫为主,其平均密度为 5427.5 个/L,占比 70.8%,枯水期以原生动物为主,其平均密度为 1912.5 个/L,占比 69.1%,有研究表明轮虫喜欢富营养环境,水体营养状态的提升有利于轮虫密度的提高^[24],妫水河丰水期氮磷含量较高,因此浮游动物以轮虫为主。优势种方面,丰水期浮游动物优势种以钟虫、裂痕龟纹轮虫、针簇多枝轮虫等富营养型种为主,枯水期优势种为钟虫、梨形四膜虫、螺形龟甲轮虫、单环栉毛虫、狭盗虫,说明枯水期水体污染程度有所

减轻。

由于妫水河河水流速较小、水体透明度高、泥沙含量低,因此在一定程度上有利于浮游动物的生长和繁殖^[25],妫水河浮游动物的平均密度高达 5041.58 个/L。从点位上来看,S6(春芳园)、S8(妫水河世园会段)、S9(三里河)的浮游动物密度较大,结合水体理化指标,S6、S8、S9 点位水体 pH 值较高,有利于浮游动物的生长。相关研究表明,浮游动物种类与丰度的大小与水体酸碱度密切相关,碱性环境有利于浮游植物的光合作用,促使浮游植物大量繁殖,因此碱性环境中浮游植物的生产力较高,为浮游动物生长提供了充足的饵料,促使其丰度增加^[26],周彦锋等^[7]对怀洪新河的研究也得出类似的结论。其次,S6、S8、S9 采样点位于市区,生产和生活活动造成水体污染严重、水体富营养化,因此,氮、磷等营养盐能通过渗透和离子调节机制促进浮游动物的生长^[27],导致螺形龟甲轮虫等富营养种的密度大量增加,林青等^[28]的研究也表明滴水湖超过一半的优势种与 TN 和 TP 呈正相关。

3.2 水质评价

按照浮游动物的丰度指标和优势种状况对妫水河富营养化程度进行评价结果表明,丰水期 S1、S2、S4、S5、S10 采样点为中营养状态,S3、S6、S7、S8、S9 采样点为富营养状态。枯水期 S2、S3、S4 采样点为贫营养状态,S1、S5 采样点为中营养状态,其余采样点为富营养状态。参照多样性指数评价标准^[13,29],Shannon-Weaver 指数和 Margalef 指数显示妫水河 10 个点位的水质在丰水期和枯水期均为重污染状态,Pielou 均匀度指数显示 S8(妫水河世园会段)、S9(三里河)为重污染状态,其余点位为中污染状态。通过实地调研分析,造成污染的主要原因如下:S5、S6 站点周边有大面积农田,化肥、农药和生活污水在下雨时随水流大量进入河道,造成水体污染,S7 站点周边存在生活垃圾及畜牧养殖等污染源,S8、S9 站点位于市区,生活污水、城市面源污染一定程度地破坏水体的生态功能。而妫水河其他点位的人为影响较少,故水体状况相对较好。

浮游动物优势种种类越多且优势度越小,则群落结构越复杂、稳定^[30],鞠永富等通过对西泉眼水库浮游动物的调研,发现优势种均为中污染类型的指示种,表明该水库水体处于中污染水平^[31],妫水河采样点中优势种种类数较少,群落稳定性较差,而且耐污性种类针簇多肢轮虫、钟虫等较多,优势度也较高,反映出妫水河水体污染状况较严重。CCA 分析表明,针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫的数量与总磷、总氮浓度呈正相关,裂痕龟纹轮虫和冠饰异尾轮虫数量与氨氮浓度呈正相关,均可作为反映妫水河水体污染程度的指示性生物。刘爱萍等^[32]对大亚湾海域浮游动物的研究表明,夜光虫是各个点位的优势种,夜光虫的大量繁殖使浮游动物总密度升高,夜光虫也是海洋发生赤潮的生物因素之一,因此其密度的多少可作为指示水质污染程度的一种依据。刘爱芬等^[33]通过建设人工湿地,使氮磷含量降低,同时有效地去除了大型浮游动物(去除率为 70%),对小型浮游动物也达到了一定的去除率。因此通过采取措施控制氮磷等营养盐的含量,可以适量减轻妫水河污染严重的状况,并可通过浮游动物的指示物种快速识别出水质的改善程度。

4 结论

(1) 丰水期和枯水期共鉴定出浮游动物 88 种,以轮虫和原生动物为主。

(2) 受水环境因子和气候变化影响,妫水河丰水期浮游动物种类和密度多于枯水期,下游城区段点位的浮游动物生物量和密度明显高于其他点位。

(3) 妫水河浮游动物群落结构和环境因子的 CCA 分析表明,水温、pH、DO 和氨氮是显著影响妫水河浮游动物群落结构的环境因子。裂痕龟纹轮虫、冠饰异尾轮虫等对水体中氮磷的相关性极为显著,可参考作为妫水河水环境的指示性物种。

(4) 基于生物多样性对妫水河水质进行水质生态学评价,结果表明 2017 年妫水河水质为中到重污染状态,亟需开展水环境治理工作。

致谢:感谢罗明科、李阳、蔡怡清在野外采样中的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Park K S, Shin H W. Studies on phyto-and-zooplankton composition and its relation to fish productivity in a west coast fish pond ecosystem. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 28(S2): 415-422.
- [2] Tavernini S, Mura G, Rossetti G. Factors influencing the seasonal phenology and composition of zooplankton communities in mountain temporary pools. *International Review of Hydrobiology*, 2005, 90(4): 358-375.
- [3] Echaniz S A, Vignatti A M, De Paggi S J, Paggi J C, Pilati A. Zooplankton seasonal abundance of south American Saline shallow lakes. *International Review of Hydrobiology*, 2006, 91(1): 86-100.
- [4] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [5] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [7] 周彦锋, 宋江腾, 刘凯, 尤洋. 怀洪新河浮游动物群落特征与水环境因子的关系研究. *环境保护科学*, 2017, 43(5): 92-98.
- [8] Soballe D M, Kimmel B L. A large - scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments. *Ecology*, 1987, 68(6): 1943-1954.
- [9] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [10] 王凤娟, 胡子全, 汤洁, 刘连生, 赵海泉. 用浮游动物评价巢湖湖区的水质和营养类型. *生态科学*, 2006, 25(6): 550-553.
- [11] 黄春霞, 邹丽敏, 赵慧慧. 上海市青浦区河道浮游动物群落特征调查. *安徽农业科学*, 2018, 46(19): 76-78.
- [12] 刘盼盼, 王龙, 王培, 王琦, 张霞, 周巧红, 吴振斌. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价. *水生生物学报*, 2018, 42(2): 373-381.
- [13] Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3/4): 580-592.
- [14] 黎洁, 单保庆, 宋芬, 周洁, 王卫民. 永定河和滦河水系浮游动物多样性调查与分析. *华中农业大学学报*, 2011, 30(6): 768-774.
- [15] 张昊, 于洪贤, 马成学, 霍堂斌. 嫩江下游春、秋两季浮游动物数量特征与群落结构分析. *东北林业大学学报*, 2013, 41(5): 131-135.
- [16] 周淑婵. 香溪河水系浮游动物生态学研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.
- [17] 许宝红, 肖调义, 金红春, 张婷, 李德亮, 陈开健, 杨昌珍, 刘寅初. 利用浮游动物评价不同类型养殖水体营养状况. *淡水渔业*, 2011, 41(1): 10-15.
- [18] 刘樵. 阳澄湖小型浮游动物群落结构特征与富营养化的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [19] 李学军, 鲍战猛, 高彩凤, 毛战坡. 北运河浮游动物调查及水质评价. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1559-1564.
- [20] 朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军. 象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征. *环境科学*, 2013, 34(4): 1498-1509.
- [21] 白海锋, 李丽娟, 项珍龙, 王博涵, 殷旭旺, 徐宗学, 沈红保, 问思恩. 泾河水系浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2015, 30(3): 291-297.
- [22] Gori A, Reynaud S, Orejas C, Ferrier-Pagès C. The influence of flow velocity and temperature on zooplankton capture rates by the cold-water coral *Dendrophyllia cornigera*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, 466: 92-97.
- [23] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 刘宁, 何健龙, 程玲, 王月霞. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系. *生态学报*, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [24] 张世羊, 周巧红, 成水平, 吴振斌. 复合养殖系统中浮游动物种类丰度及其影响因素. *中国环境科学*, 2009, 29(7): 745-750.
- [25] 白海锋, 赵乃锡, 殷旭旺, 鲁媛媛, 武玮, 徐宗学. 渭河流域浮游动物的群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 260-266.
- [26] 王晓明, 宋晓梅. 淮南市高塘湖浮游动物与水环境因子的相关性研究. *北京教育学院学报: 自然科学版*, 2007, 2(5): 19-23.
- [27] Yilmazi N, Okuş E, Yüksek A. Evidences for influence of a heterotrophic dinoflagellate (*Noctiluca scintillans*) on zooplankton community structure in a highly stratified basin. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(2/3): 475-485.
- [28] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [29] Dumont H J, Negrea S V. Introduction to the class Branchiopoda//Dumont H J, Negrea S V, eds. *Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World*. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, 2002.
- [30] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 932-940.
- [31] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 柴方营, 姚允龙, 张延成, 费滕, 夏凌云. 西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价. *生态学报*, 2016, 36(16): 5126-5132.
- [32] 刘爱萍, 任秀文, 姜国强, 李开明, 陈中颖. 大亚湾海域水生态环境质量评价与分析. *中国环境科学*, 2013, 33(S1): 66-73.
- [33] 刘爱芬, 吴晓辉, 贺锋, 成水平, 吴振斌. 人工湿地组合工艺对水体中浮游动物群落结构的影响. *环境科学*, 2007, 28(2): 309-314.