

北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况*

郭凯¹, 赵文^{1**}, 殷守仁², 李艳颖¹, 徐立蒲², 徐锋¹, 陈立斌¹

(1: 大连水产学院生命科学与技术学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023)

(2: 北京市水产技术推广站, 北京 100012)

摘要: 于2007年1-12月对官厅水库上游(北京段)进行调查, 利用非生物环境因子对水体的营养状况进行了评价, 并通过种类组成、优势种、生物量及多样性指数等指标探讨了轮虫群落结构与水体富营养化的关系。结果表明, 官厅水库(北京段)已达到了富营养的水平, 在轮虫的种类组成中, 10个富营养化的指示种类大部分都有出现, 其中螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)为优势种; 轮虫密度均在1000 ind./L以上, 生物量在1 mg/L以上, 轮虫的密度、生物量的季节分布与水温显著正相关($P < 0.05$), 水平分布与水体的营养状况显著正相关($P < 0.05$), 垂直分布没有明显的规律性; 轮虫多样性指数较低, 但与水体营养水平显著相关($P < 0.05$)。证明轮虫群落结构与水体富营养化之间存在着密切的关系, 富营养化是导致轮虫群落结构变化的主要动因。

关键词: 富营养化; 轮虫; 群落结构; 相关性; 官厅水库

Relationship between eutrophication status of the water body and rotifer community structure in Guanting Reservoir, Beijing

GUO Kai¹, ZHAO Wen¹, YIN Shouren², LI Yanying¹, XU Lipu², XU Feng¹ & CHEN Libin¹

(1: Liaoning Provincial Key Laboratory of Hydrobiology, College of Life Science and Technology, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, P. R. China)

(2: Beijing Fisheries Technology Promotion Station, Beijing 100012, P. R. China)

Abstract: In the present study we evaluated the trophic state of Guanting Reservoir (Beijing part). The results indicated that the water in Beijing part of Guanting Reservoir had been in eutrophication. According to the data associated with species composition, dominant species, density, biomass and diversity of rotifers, the relationships between rotifer community structure and eutrophication were evaluated. The results indicated that ten key rotifer species for eutrophication appeared regularly and typically in Guanting Reservoir, and the dominant rotifer species were *Keratella cochlearis* and *Polyarthra trigla* that annual density and biomass were over 1000 ind./L and 1 mg/L, respectively. There was significant positive correlations between water temperature and seasonal distribution of density and biomass of rotifers ($P < 0.05$). A significant positive correlation was detected between level distribution of rotifers and status of eutrophication ($P < 0.05$). However, there was no obvious vertical distribution pattern of rotifer species in sample sites of Guanting Reservoir. The level of diversity in rotifer species was not high; however, a significant correlation was found between the level of diversity and status of eutrophication. Our results indicated that there was consanguineous correlation between rotifer community structure and eutrophication, and moreover the eutrophication is main reason causing the change of rotifer community structure.

Keywords: Eutrophication; rotifer; community structure; correlation; Guanting Reservoir

官厅水库是一座兼防洪、供水、发电、灌溉等多种功能的水库, 是首都北京主要供水水源之一^[1]。曾经在北京经济和社会发展中起到重要作用。但是由于人类活动, 官厅水库自1972年开始受到污染, 1997年被迫

* 辽宁省科学技术基金项目(20072140)资助。2009-07-14收稿; 2009-12-03收修改稿。郭凯, 男, 1981年生, 硕士研究生; E-mail: guokaidl@163.com。

** 通讯作者; E-mail: zhaowen@dlfu.edu.cn。

退出北京市饮用水供水. 官厅水库是北京市的两大地表水源地之一, 近年来, 北京地区连续干旱, 仅靠密云水库供水, 已不能满足北京的用水要求. 因此, 为维持北京的经济发展和稳定, 治理官厅水库恢复其水质已迫在眉睫. 目前已有很多学者对官厅水库的富营养化进行了调查研究, 但大部分只限于从水质角度对官厅水库进行评价, 对其生物学特征研究很少.

轮虫(Rotifer)是水域中浮游动物的重要组成部分. 轮虫具有较高繁殖速率, 因此能迅速抢占生态系统中空的生态位, 将初级生产量转化成次级消费者可利用的形式, 其转化效率较高; 轮虫在水域生态系统的结构组成、物质循环和能量传递过程中具有重要的作用, 掌握轮虫群落结构的动态是了解水域生态系统结构和功能的重要内容之一. 由于轮虫对环境的敏感性, 轮虫群落的生态特征可作为水质评价的依据^[2-5]. 本文对官厅水库(北京段)的三个水体中的轮虫群落与水体营养状况进行了分析, 旨在为官厅水库的富营养化评价提供基础资料和生物学依据.

1 材料与与方法

1.1 调查方法

于2007年1月到12月对官厅水库(北京段)进行调查, 每月采集样品一次(莲花湖3月开始采集). 设置采样站点均在妫水河区, 由于橡胶大坝的存在, 将妫水河区分为莲花湖、西湖和库区三个水体共8个站点, 进行同步采集. 其中8#位于莲花湖内, 5#-7#位于西湖. 1#-4#位于库区内(图1), 三个水体间存在水交换, 但交换量较小. 测定的水化指标有总氮、总磷、氨氮、COD、叶绿素a等十几项指标, 水化测定按照《化学实验》进行^[6], 轮虫的采集及密度、生物量的计算按照《湖泊富营养化调查规范进行》和《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[7-8]进行, 由于官厅水库(北京段)水体较浅, 如大库水域采样点水深平均为1.56m. 所以只采集混合样品, 西湖水域水深相对较大平均水深为2.80m, 所以在5、6两个站点进行了分层采集, 种类根据《中国淡水轮虫志》^[9]进行鉴定.

1.2 数据处理

数据统计分析采用Excel 2003和SPSS 11.5软件, 对水体的富营养化评价采用加权综合TLLc, 为了评价轮虫群落多样性, 采用了Margalef和Shannon-Wiener多样性指数, 不同水体出现的轮虫种类采用了Czekanowski相似性系数(Sc), 优势种采用优势度(Y)^[10].

(1) TLLc 加权综合营养状态指数:

$$TLLc = \sum W_j TLI(j)$$

式中, W_j 为第j项水质参数的权重值, $TLI(j)$ 为第j项水质参数营养状态指数.

(2) Margalef 多样性指数(d):

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

(3) Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum (P_i) (\log_2 P_i)$$

式中, S为种类数, P_i 为某种(属)的个体数占总个体数的比例, N为总密度.

(4) Czekanowski 相似性系数(Sc):

$$Sc = 100\% \times 2C / (A + B)$$

式中, C为两水体共有种类数, A、B分别为水体A和B的种类数.

(5) 优势度(Y):

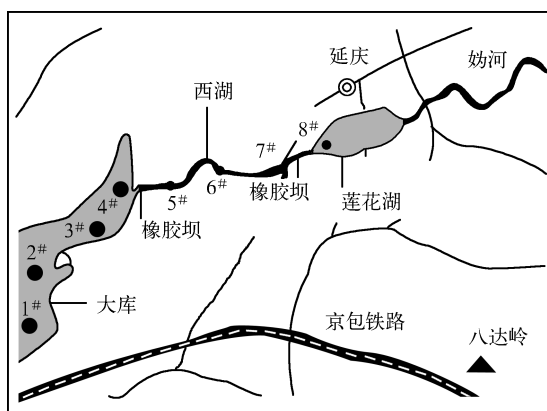


图1 官厅水库采样点地理位置

Fig. 1 The location of sampling site in Guanting Reservoir

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

式中, Y 为优势度, n_i 为第 i 种的个体数, f_i 为第 i 种出现的频率, N 为总个体数.

2 结果

2.1 水质富营养化评价

官厅水库(北京段)水体理化指标的周年监测结果和营养状况评价(表1和表2)可见,官厅水库上游妫水河区三个水体均为富营养型,西湖水域富营养化程度最高, $TLIc$ 平均达到 74.13, 其中 7[#] 达到 79.68, 莲花湖、大库分别为 65.78 和 63.08, 也都达到了富营养化状态.

表1 官厅水库主要水质指标
Tab.1 Main water quality indicators in Guanting Reservoir

项目	大库				西湖			莲花湖
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
盐度(g/L)	0.52 ± 0.04	0.47 ± 0.02	0.44 ± 0.03	0.36 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.33 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.2 ± 0.03
透明度(m)	0.50 ± 0.12	0.54 ± 0.09	0.54 ± 0.10	0.39 ± 0.04	0.45 ± 0.02	0.63 ± 0.22	0.65 ± 0.16	0.55 ± 0.05
溶氧(mg/L)	10.5 ± 0.10	11.0 ± 0.90	9.51 ± 1.05	9.45 ± 0.61	12.2 ± 1.13	16.2 ± 1.55	15.3 ± 1.47	13.8 ± 1.84
COD(mg/L)	14.0 ± 3.19	14.4 ± 3.25	13.8 ± 3.36	13.8 ± 3.34	15.0 ± 1.92	19.1 ± 4.98	15.0 ± 2.22	12.7 ± 2.36
总磷(mg/L)	0.17 ± 0.05	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.19 ± 0.03	0.20 ± 0.03	0.38 ± 0.06	0.67 ± 0.12	0.14 ± 0.04
总氮(mg/L)	1.19 ± 0.26	1.29 ± 0.23	1.28 ± 0.18	1.50 ± 0.22	2.00 ± 0.21	3.02 ± 0.43	5.75 ± 0.88	1.51 ± 0.28
叶绿素 a(μg/L)	27.3 ± 6.7	35.8 ± 10.1	32.4 ± 7.8	44.3 ± 12.2	92.2 ± 10.4	140.0 ± 27.9	240.4 ± 62.4	82.9 ± 28.2
亚硝酸盐(μg/L)	0.004 ± 0.001	0.005 ± 0.001	0.005 ± 0.001	0.01 ± 0.003	0.026 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.09 ± 0.04	0.01 ± 0.005
硝酸氮(μg/L)	151 ± 47	193 ± 69	216 ± 58	329 ± 105	401 ± 119	563 ± 145	695 ± 166	336 ± 141
氨氮(μg/L)	13.43 ± 3.68	13.08 ± 4.23	20.19 ± 5.86	21.96 ± 6.16	40.8 ± 12.2	67.9 ± 25.2	170.2 ± 64.9	36.6 ± 10.7
活性磷(μg/L)	33.1 ± 15.9	42.5 ± 17.3	34.6 ± 14.1	42.9 ± 13.0	45.9 ± 17.4	67.2 ± 18.5	238.7 ± 59.3	41.6 ± 18.4

表2 官厅水库营养状态综合评价结果
Tab.2 The results of trophic state in Guanting Reservoir

水体	站位	$TLI(TP)$	$TLI(TN)$	$TLI(Chl. a)$	$TLI(SD)$	$TLIc$	营养状态
大库	1 [#]	65.58	57.48	60.90	64.63	61.96	富营养
	2 [#]	61.23	58.84	63.86	63.13	61.96	
	3 [#]	64.60	58.71	62.78	63.13	62.32	
	4 [#]	67.39	61.40	66.18	69.45	66.06	
西湖	5 [#]	68.22	66.27	74.12	66.67	69.38	富营养
	6 [#]	78.65	73.19	78.66	60.14	73.33	
	7 [#]	87.86	84.16	84.53	59.54	79.68	
莲花湖	8 [#]	62.43	61.51	72.98	62.78	65.78	富营养

2.2 轮虫群落结构

2.2.1 种类组成 在调查期间共鉴定出轮虫 45 种, 其中大库 33 种, 西湖 41 种, 莲花湖 27 种, 其中臂尾轮虫科出现种类最多, 其次是异尾轮虫科. 从种类的季节变化来看, 三个水体都是冬季种类数最少, 春、夏两季种类最多. 从种类组成上看, 大部分属于污染种, 研究公认的 10 个富营养化轮虫指示种类基本均有出现(表3), 说明官厅水库(北京段)三个水体都达到了富营养化水平, 与利用非生物环境因子做出综合营养状态指数 $TLIc$ 的评价结果一致.

大库与西湖、莲花湖的种类相似度达到 78.38%, 76.67%. 西湖与莲花湖的相似度 70.59%, 整体上看, 三个水体出现的种类均有很大的相似度, 说明处于同一营养类型的水域中轮虫的种类相似度较高.

2.2.2 优势种 以密度优势度 10% 以上为优势种, 按全年统计, 大库轮虫优势种为螺形龟甲轮虫(*K. cochlearis*)和针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*), 它们分别占轮虫群落总密度的 33% 和 15%; 西湖轮虫优势种为螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*), 分别占轮虫群落总密度的 53%、23%、

15%；莲花湖轮虫优势种为螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫，分别占轮虫群落总量的 27% 和 25%。由此可见，在优势种方面，三个同处于富营养化状态水体有着相同的优势种类——螺形龟甲轮虫和针簇多肢轮虫。从优势种的组成及所占的数量来看，三个水体的优势种非常明显。

从优势种水平分布来看，莲花湖水体的针簇多肢轮虫密度最大，而西湖水体的螺形龟甲轮虫密度最大（图 2）。优势种的垂直分布没有明显的规律。从优势种密度的季节变化来看，三个水体中针簇多肢轮虫的密度最大值出现在秋季，而大库和西湖水体的螺形龟甲轮虫的最高密度在秋季，在莲花湖夏季达到最高值。从整体上看，夏、秋季优势种密度相对较大，而冬季相对较小（图 3）。

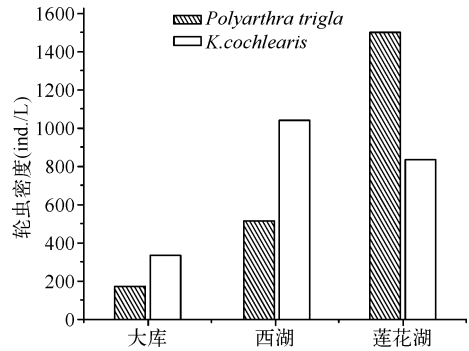


图 2 官厅水库轮虫优势种密度的水平分布
Fig. 2 The distribution of dominant species in Guanting Reservoir

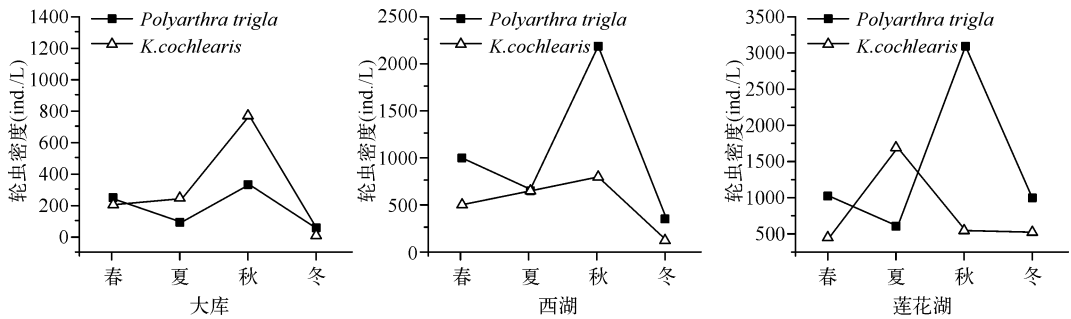


图 3 官厅水库轮虫优势种密度的季节变化

Fig. 3 Seasonal dynamic of dominant species density of rotifers in Guanting Reservoir

2.2.3 轮虫的密度、生物量 大库水体中轮虫密度的年均值为 1099 ind./L, 生物量为 1.6 mg/L; 西湖水体中密度为 3015 ind./L, 生物量为 3.26 mg/L; 莲花湖密度为 2809 ind./L, 生物量为 1.51 mg/L。从数量上看，西湖 > 莲花湖 > 大库。从轮虫密度和生物量的季节变化可以看出，都是夏、秋季最高，冬季最低（图 4）。其中轮虫密度的最高峰出现在 9 月莲花湖，生物量最高值出现在 8 月的西湖。轮虫的密度与水温呈现出极显著正相

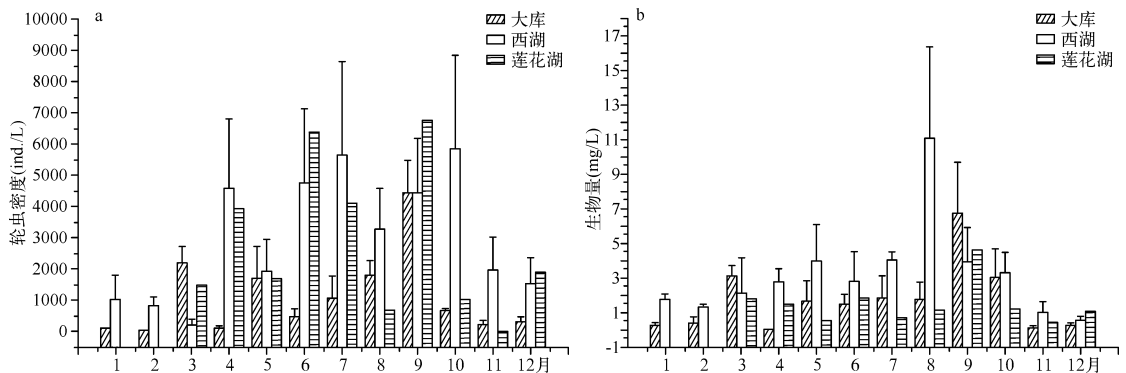


图 4 官厅水库轮虫密度(a)和生物量(b)的季节变化

Fig. 4 Seasonal dynamic of rotifer density(a) and biomass(b) in Guanting Reservoir

表3 官厅水库轮虫的种类组成*
Tab. 3 Species composition of rotifers in Guanting Reservoir

种类	污染等级	大库	西湖	莲花湖
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuiaeoopsis fissa</i>	O	+	+	
卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwellii</i>	O-β		+	
晶囊轮虫 <i>A. sp.</i>	β	+	+	+
蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	β	+	+	+
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	β-α	+	+	+
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>		+	+	+
镰形臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>	β	+		
剪形臂尾轮虫 <i>B. farficula</i>	β	+	+	+
矩形臂尾轮虫 <i>B. leydigi</i>	O-β	+		+
褶皱臂尾轮虫 <i>B. plicatilis</i>		+	+	+
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	β	+	+	+
壶状臂尾轮虫 <i>B. urceolaris</i>	β-α	+	+	
爱德里亚狭甲轮虫 <i>Colurella adriatica</i>	O	+		+
狭甲轮虫 <i>C. sp.</i>		+	+	+
钩状狭甲轮虫 <i>C. uncinata</i>	O		+	+
管形弯弓轮虫 <i>Cyrtonia tuba</i>			+	
腕状同尾轮虫 <i>Diurella dixon</i>			+	
对刺同尾轮虫 <i>D. stylata</i>		+	+	+
椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senta</i>		+	+	+
臂三肢轮虫 <i>Filinia brachiata</i>		+	+	
长三肢轮虫 <i>F. longiseta</i>		+	+	+
迈氏三肢轮虫 <i>F. maior</i>	β	+	+	+
环顶巨腕轮虫 <i>Hexarthra fennica</i>			+	
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	β-O	+	+	+
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	O-β	+	+	+
腔轮虫 <i>Lecanidae sp.</i>		+	+	
月形单趾轮虫 <i>Monostyla lunaris</i>		+	+	+
椎轮虫 <i>Notemmata sp.</i>	O	+	+	+
唇形叶轮虫 <i>Notholca labis</i>				+
方尖削叶轮虫 <i>N. acuminata</i>		+	+	+
厚实椎轮虫 <i>Notommata pachyura</i>			+	
红眼旋轮虫 <i>Philodina roseola</i>		+	+	
截头皱甲轮虫 <i>Ploesoma truncatum</i>	O	+	+	
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	β-O	+	+	+
沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>	β		+	+
扁平泡轮虫 <i>P. complanata</i>	β	+	+	
前额犀轮虫 <i>Rhinoglena frontalis</i>		+	+	
疣毛轮虫 <i>Synchaeta sp.</i>			+	
尖尾疣毛轮虫 <i>S. stylata</i>		+	+	+
二突异尾轮虫 <i>Trichocerca bicrisstata</i>			+	
纵长异尾轮虫 <i>T. elongata</i>	O	+	+	+
细异尾轮虫 <i>T. gracilis</i>	O	+		
长刺异尾轮虫 <i>T. longiseta</i>	O		+	
暗小异尾轮虫 <i>T. pusilla</i>	O	+	+	+
异尾轮虫 <i>T. sp.</i>			+	

* O 为寡污型, O-β 为寡污至 β 中污型, β-O 为 β 中污至寡污型, β 为 β 中污型, β-α 为 β-α 中污型. + 表示在该站位有出现.

关($r=0.78, P=0.007 < 0.01, n=11$); 生物量与水温呈现显著正相关($r=0.62, P=0.032 < 0.05, n=11$), 应该说温度是影响轮虫的密度和生物量季节变化的主要原因之一。

轮虫密度和生物量在水平分布上也存在着很大差异(图5)。相关分析表明, 轮虫密度与加权综合营养状态指数 $TLLc$ 显著正相关($P=0.04 < 0.05, r=0.729, n=7$); 生物量与加权综合营养状态指数 $TLLc$ 极显著正相关($P=0.001 < 0.01, r=0.935, n=7$)。轮虫密度和生物量与 NO_3-N 均显著正相关($r_{density}=0.801, P=0.017, n=7; r_{biomass}=0.870, P=0.005, n=7$) 而密度与其他水化因子相关不显著; 生物量与氮、磷均存在显著的相关性, 其中与 NO_2-N 相关性最大, 其次是 TP(表4)。此外, 轮虫密度、生物量的垂直分布没有明显的规律。

2.2.4 多样性指数 Margalef 和 Shannon-Wiener 多样性指数大库年均值为 0.92、1.85, 西湖为 1.20、2.27, 莲花湖为 1.25、2.14。从整体上看, 富营养化水体中轮虫多样性指数要比其它中营养型水体多样性指数低。在季节变动上, 夏、秋季较高, 春、冬季较低(表5)。另外, 多样性指数在各个站位的分布也存在差异(图6), 经相关分析得出各个站位 Margalef 和 Shannon-Wiener 多样性指数的年均值与加权综合营养状态指数 $TLLc$ 显著正相关($r_{Margalef}=0.774, P=0.024, n=7; r_{Shannon-Wiener}=0.825, P=0.012, n=7$)。

表4 轮虫的生物量与各个水化指标的相关性

Tab.4 Correlation between biomass of rotifers and chemical characters of water

水化指标	r	P	n
TN	0.886	0.003	7
TP	0.908	0.002	7
NH_4-N	0.862	0.006	7
NO_2-N	0.924	0.001	7
PO_4-P	0.772	0.025	7

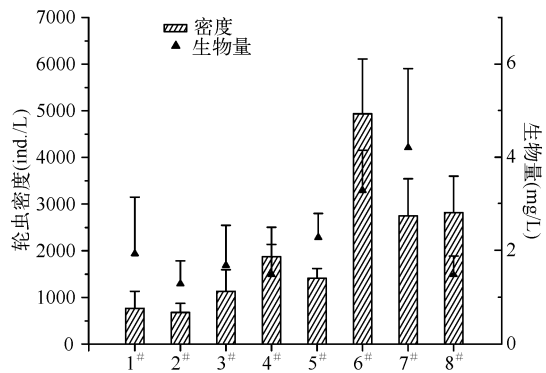


图5 官厅水库轮虫密度、生物量年均值的水平分布

Fig.5 Annual mean of density and biomass of rotifers in Guanting Reservoir

表5 官厅水库轮虫多样性指数的季节变化

Tab.5 Seasonal changing of diversity index rotifers in Guanting Reservoir

水体	多样性指数	春季	夏季	秋季	冬季
大库	d	0.79 ± 0.08	1.34 ± 0.13	0.99 ± 0.04	0.54 ± 0.04
	H'	1.74 ± 0.15	2.29 ± 0.19	1.94 ± 0.10	1.41 ± 0.03
西湖	d	1.00 ± 0.10	1.68 ± 0.06	1.21 ± 0.10	0.93 ± 0.15
	H'	1.76 ± 0.26	3.18 ± 0.08	2.08 ± 0.09	2.05 ± 0.23
莲花湖	d	1.22 ± 0.58	1.26 ± 0.15	1.12 ± 0.12	1.46 ± 0.03
	H'	1.83 ± 0.42	2.40 ± 0.46	2.20 ± 0.57	2.12 ± 0.07

3 讨论

多数学者认为影响轮虫群落动态的主要因素有食物、非生物环境因子、敌害(如枝角类的竞争、鱼类的捕食)等三个方面。Dumont, Gulati 研究发现食物是影响轮虫种群密度和物种季节演替的重要生态因子, 通常轮虫的高密度与环境中存在充足的可供其消费的食物有密切的关系^[11-12], 对于滤食性轮虫而言, 浮游植物、细菌等是其主要食物来源; 对于肉食性轮虫来说其主要的食物是浮游动物。本次调查结果表明, 除晶囊轮虫、疣毛轮虫等外, 大部分种类均为滤食性轮虫, 所以浮游植物是轮虫的主要食物之一, 同时, 浮游植物的密度大小也与水体的营养状况密切相关。有些学者认为, 轮虫个体小, 受鱼类直接影响不大^[13]。Bogdan & Gil-

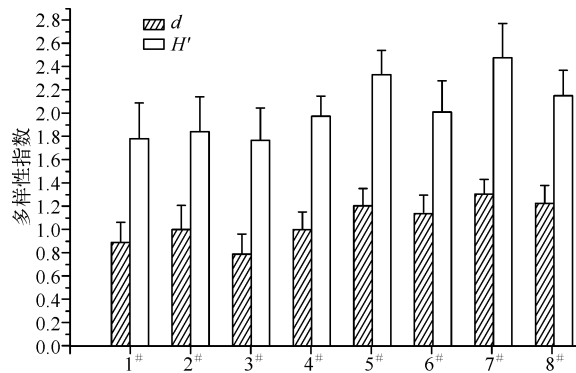


图6 官厅水库轮虫多样性指数的水平分布

Fig. 6 Annual distribution of diversity index of rotifers in Guanting Reservoir

bert 研究发现枝角类对轮虫群落有明显的抑制作用,它们都是滤食性动物,它们具有相似的食物生态位,但枝角类有明显的竞争优势^[14]. 而本调查显示,枝角类生物量较低,不会对轮虫群落产生较大影响,那么影响轮虫群落结构的生态因子主要是非生物环境因子,所以本文重点分析两者之间的关系.

轮虫发育时间快,生命周期短,能较迅速地反映环境的变化,被认为是水质和营养状况的良好指示生物^[1],一般可根据湖泊中的轮虫种类演替来推断湖泊营养型的变化. 有关轮虫的指示种,虽然不同学者有不同观点^[15-16],但对多数指示种类的看法是一致的. 一般认为,贫营养型湖泊的指示种有郝氏皱甲轮虫(*Ploesoma hudsoni*)、柱足腹尾轮虫(*Gastropus stylifer*)、腹足腹尾轮虫(*Gastropus hyptopus*)、锯齿龟甲轮虫(*Keratella errulate*)、长刺盖氏轮虫(*Kellicottia longispina*)等;中营养湖泊的种类较多,一般为过渡种;富营养型湖泊的指示种有臂尾轮虫(*Brachionus* spp.)、裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)、沟痕泡轮虫(*Pompholyx sulcata*)、扁平泡轮虫(*P. complanata*)、圆筒异尾轮虫(*Trichocerca cylindrica*)、长三支轮虫(*Filinia longiseta*)、暗小异尾轮虫(*T. pusilla*)、螺形龟甲轮虫(*K. cochlearis*)、矩形龟甲轮虫(*K. quadrata*)和真翅多肢轮虫(*P. euryptera*). 本文研究结果显示,处于同一营养类型的三个水体中出现轮虫种类的相似度很大,以上 10 种富营养化指示种类在官厅水库三个水体中大部分都有出现,并且有 1-2 种成为三个水域的优势种类(螺形龟甲轮虫、角突臂尾轮虫)表明水体达到了富营养化状态.

一般认为褶皱臂尾轮虫为半咸水种,但在本次调查中有出现,原因是官厅水库水体含盐量虽没达到咸水标准,但相对于其他淡水水库来说,含盐量较大,在 0.1-0.6g/L 之间. 按照我国湖沼学与生态学划分标准^[6],0.5g/L 以上属于寡混盐,且污染严重,就官厅水库的水源而言,一部分入库水来自河北、内蒙古、山西等盐度相对较高的地带. 赵文等对山西、河北等地区 28 个水体轮虫区系进行调查时发现,轮虫中出现频率最高、数量最大的是褶皱臂尾轮虫^[17],其本身也是一种广盐性、耐污种类,经过长时间的驯化,便能在水体中繁殖起来. 另外,我们曾经在盐度为 1-2 的花园水池发现该种的出现,赵文于养殖鳊鱼的淡水鱼池内同样发现了褶皱臂尾轮虫^[18],所以该种的出现也是正常的现象.

在优势种方面,三个同处富营养化状态水体有相同的优势种类. 这与国内许多学者的研究结果一致^[19-21],在他们调查的大部分水库浮游动物的优势种当中均有针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫. 针簇多肢轮虫是富营养化水体常见种类之一,也是广泛分布的种类,它在水中的移动速度要快于其它轮虫,这样不仅有利于捕食,而且还能逃避敌害,所以密度和生物量相对较大. 而螺形龟甲轮虫成为优势种的原因在于它对水体富营养化有良好的适应能力. Liu 等的围隔实验发现,螺形龟甲轮虫受微囊藻水华的影响较小,它几乎是随着蓝藻水华的出现而出现并大量繁殖^[22]. Gilbert & Durand 通过室内研究也发现,水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)对螺形龟甲轮虫摄食其它可食性藻类的影响很小^[23]. Gilbert 等研究发现这个小型种类对蓝藻毒素的敏感性低且具有较低的食物阈值,因而它们能够在水华暴发时维持较高密度^[24],所以利用螺形龟甲轮虫密度在三个水体的多少可以看出富营养化程度的差异. 就本文而言,优势种的水平分布中,西湖水体的螺形龟甲轮虫最多,这从一定角度说明西湖水域的富营养化程度最严重. 这与用 *TLLc* 评价的结果是一致

的。从优势种密度的垂直分布来看,没有明显规律性。而从优势种密度的季节变化来看,夏、秋两季优势种的密度最大,冬季相对较低,这一现象与大部分学者研究的结果相近^[19-20],原因应该是水温和水体营养状况综合影响引起的。

本文通过研究发现,三个水体中轮虫的密度全年的均值都在 1000ind./L 以上,最高值达 11574ind./L,这一结果与国外一些学者研究的结果相近^[25-27]。轮虫密度和生物量的水平分布与富营养化水平有显著的相关性,而垂直分布没有明显的规律性,这与邱春刚等的研究结果相近^[28],时间分布与水温呈显著相关,这与许多学者的研究结果是基本一致的^[29]。Hofmann 认为水温是影响轮虫出现的主要但并非是唯一决定性因素^[30]。章宗涉和黄祥飞^[31]对武汉东湖长期定点观察表明,轮虫密度高峰期水温一般在 20℃ 以上。这是因为,温度上升,卵的发育时间缩短,在丰富的食物供给条件下,使种群周转加快,导致种群密度迅速增加,形成轮虫密度高峰。此外,May 研究也证实了水温对轮虫群落的影响^[32]。

大部分学者认为轮虫的生长、繁殖是受诸多环境因子综合影响的^[33]。已有研究显示,除温度外,溶解氧也是影响轮虫种群的重要因素,轮虫密度、生物量与氮和磷的含量均有显著相关性。本文研究发现,轮虫的密度和生物量与溶氧都有显著的相关性,这与 Herzig 研究结果是一致的^[34]。轮虫的密度和生物量与 NO₃-N 都存在显著的相关性($r_{\text{density}} = 0.801, P = 0.017, n = 7; r_{\text{biomass}} = 0.870, P = 0.005, n = 7$),而密度与其它水化因子不相关;生物量与氮、磷均存在极显著的相关性。这一结果与耿红研究的结果相近^[16]。

一些学者认为多样性指数 H' 、 d 值能定量反映轮虫群落结构中数量、种类组成变化的信息及水体污染程度,多用来评价水环境质量,间接反映水体轮虫群落结构特点^[34],一般认为,多样性指数随富营养化的加深而降低。而章宗涉等发现一些污染严重的水域多样性指数却较高的现象^[35]。因此,有些学者认为多样性指数与水体营养类型之间关系的不稳定现象,说明多样性指数和水质的关系是复杂的,和水体类型、计数方法及鉴定种类的详细程度等诸多因素都有关系^[36]。此外,谢平认为营养水平并不是影响物种多样性的唯一因素,可能与其它生物因子和非生物因子的不同有一定关系^[37]。所以,在判定营养状态时,多样性指数可作为参考指标。本文通过对多样性指数的研究发现,轮虫多样性指数的年均值及其时间变化与其他学者对富营养化水域进行研究时得出的结果较为相近^[38-39],而处在同一水平上的各站多样性指数随着富营养化程度的加深而增大,但是总体上,富营养化水体的多样性指数比其它中营养型水体多样性指数要低,这一结果与很多学者的观点相一致^[4]。

4 参考文献

- [1] 杨大杰,姜树君. 2004 年向官厅水库集中输水的水质分析与影响评价分析与研究. 北京水利, 2005, (1): 37-39.
- [2] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, **100**: 169-201.
- [3] Aaer Maemets. Rotifers as indicators of lake types in Estonia. *Hydrobiologia*, 1983, **104**: 357-361.
- [4] 黄祥飞,胡春英,伍焯田. 武昌东湖的轮虫. 水生生物学报, 1985, **9**(2): 129-142.
- [5] Devetter M. Influence of environmental factors on the rotifer assemblages in an artificial lake. *Hydrobiologia*, 1998, **387/388**: 171-178.
- [6] 雷衍之. 化学实验. 北京: 中国农业出版社, 2004: 1-123.
- [7] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 1-299.
- [8] 张觉民,何志辉. 内陆水域自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991: 1-392.
- [9] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961: 21-283.
- [10] 董双林,赵文. 养殖水域生态学. 北京: 中国农业出版社, 2004: 1-323.
- [11] Dumont HJ. Biogeography of rotifers. *Hydrobiologia*, 1977, **104**: 19-30.
- [12] Gulati RD. Zooplankton structure in the Loosdrecht lakes in relation to trophic status and recent restoration measures. *Hydrobiologia*, 1990, **191**: 173-188.
- [13] Brooks JL, Dodson SJ. Predation body size and composition of plankton. *Science*, 1965, **150**: 28-35.
- [14] Bogdan KG, Gilbert JJ. Quantitative comparison of food niches in some freshwater zooplankton: A multi-tracer-cell approach. *Oecologia*, 1987, **72**: 331-340.
- [15] Hacerman J. Zooplankton of Lake Vortsjarv. *Limnologia*, 1998, **28**: 49-65.

- [16] 耿红. 水体富营养化和蓝藻对轮虫影响的生态毒理学研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2006: 49-50.
- [17] 赵文,何志辉. 三北地区内陆盐水的轮虫. 大连水产学院学报,1993,8(2,3): 67-77.
- [18] 赵文. 鳃鲮的生物学及养殖技术. 大连:大连海事大学出版社,2005: 93.
- [19] 赵帅营,韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析. 湖泊科学,2007,19(3): 305-314.
- [20] 姜作发,董崇智,战培荣等. 大兴凯湖浮游动物群落结构及生物多样性. 大连水产学院学报,2003,18(4): 292-295.
- [21] 马徐发,熊邦喜,王银东. 道观河水库浮游动物的群落结构与物种多样性. 华中农业大学学报,2005,24(1): 63-67.
- [22] Liu H, Xie P, Chen FZ *et al.* Enhancement of planktonic rotifers by *Microcystis aeruginosa* blooms: an enclosure experiment in a shallow eutrophic lake. *Freshwater Ecol*, 2002, 17: 239-247.
- [23] Gilbert JJ, Durand MW. Effect of *Anabaena flos-aquae* on the abilities of *Daphnia* and *Keratella* to feed and reproduce on unicellular algae. *Freshwater Biol*, 1990, 24: 577-596.
- [24] Gilbert JJ. Different effects of *Anabaena affinis* on cladocerans and rotifers: mechanisms and implications. *Ecology*, 1990, 71: 1727-1740.
- [25] Scheda SM, Cowell BC. Rotifer grazers and phytoplankton: seasonal experiments on natural communities. *Arch Hydrobiologia*, 1988, 114: 31-44.
- [26] Seaman MT, Gophen M, Cavari BZ *et al.* *Brachionus calyciflorus* Pallas as agent for removal of *E. coli* in sewage ponds. *Hydrobiologia*, 1986, 135: 55-60.
- [27] Nogrady T. Succession of planktonic rotifer populations in some lakes of the Eastern Rift Valley Kenya. *Hydrobiologia*, 1983, 98: 45-54.
- [28] 邱春刚,刘丙阳,刘旭光等. 汤河水库春季浮游生物的群落结构及空间分布. 水产科学,2007,26(4): 222-228.
- [29] Balvay G, Laurent M. Long-term quantitative evolution of rotifers during the eutrophication in Lake Geneva. *Aquat Sci*, 1990, 52(2): 162-175.
- [30] Hofmann W. The influence of abiotic environmental factors on population dynamics in planktonic rotifers. *Arch Hydrobiol Beih*, 1977, 8: 77-83.
- [31] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京:科学出版社,1991: 232-252.
- [32] May L. Rotifer occurrence in relation to water temperature in Leven Scotland. *Hydrobiologia*, 1983, 104: 311-315.
- [33] 黄祥飞. 温度对萼花臂尾轮虫卵的发育、种群增长和生产量的影响. 水生生物学报,1988,9(3): 232-240.
- [34] Herzig A. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for long-term investigations. *Hydrobiologia*, 1987, 147: 163-180.
- [35] 章宗涉,莫珠成,戎克文等. 用藻类监测和评价图们江的水污染. 水生生物学集刊,1983,8(1): 97-104.
- [36] 雷安平,施之新,魏印心. 武汉东湖浮游藻类物种多样性的研究. 水生生物学报,2003,27(2): 179-184.
- [37] 谢平,诸葛燕,戴莽等. 水体富营养化对浮游生物群落多样性的影响. 水生生物学报,1996,20(增刊): 30-38.
- [38] 熊金林. 不同营养水平湖泊浮游生物和底栖动物群落结构多样性的研究[学位论文]. 湖北:华中科技大学,2005: 48-55.
- [39] 郭沛涌,沈焕庭,刘阿成等. 长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性. 生态学报,2003,23(5): 892-900.