

牧野湖轮虫群落结构及水质生态学评价

蔺庆伟, 靳 萍, 杨 程, 徐婷婷, 杨佩昀, 高 伟, 靳同霞, 马剑敏*

(河南师范大学 生命科学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 于 2011 年 7 月至 2013 年 5 月对新乡市牧野湖 4 个采样点(S1:入湖河道东截止闸处, S2:湖南湾静水区, S3:湖心, S4:下游水轮车处)的轮虫群落结构及水质进行了分析。结果表明, 在新乡市牧野湖 4 个采样点共发现轮虫 43 种, 隶属于 7 科 14 属。优势种为针簇多肢轮虫、萼花臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、尾突臂尾轮虫、长三肢轮虫、曲腿龟甲轮虫、蒲达臂尾轮虫。轮虫月均丰度为 13~8 901 ind/L, 总丰度季节性变化为夏季>春季>秋季>冬季, 各季节间差异达极显著水平, 空间分布表现为 S2>S3>S4>S1。从轮虫角度运用生态学方法及加权综合营养状态指数法对牧野湖水质进行评价, 寡污至 β -中污、 β -中污至寡污及 β -中污型轮虫共 24 种, 占总种数的 55.8%, 生物指数(Q)介于 1.5~2.5, 营养状态指数(TLI_C)均大于 50, 牧野湖及其河道整体处于富营养水平。

关键词: 轮虫; 群落结构; 水质评价; 富营养化; 牧野湖; 新乡市

中图分类号: Q958.116 X173 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2014)06-0059-07

Study on Rotifers Community Structure and Ecological Evaluation of Water Quality in Muye Lake

LIN Qing-wei, JIN Ping, YANG Cheng, XU Ting-ting, YANG Pei-yun,
GAO Wei, JIN Tong-xia, MA Jian-min*

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Community structure and water quality were investigated at four different sample sites(S1: east regulating lock in river channel entering lake, S2: static water area in south bay, S3: center of Muye lake, S4: hydraulic car area) from July 2011 to May 2013 in Muye lake of Xinxiang city. The results showed that 43 rotifer species were found, belonging to 14 genera, 7 families. The dominant species were *Polyarthra trigla*, *Brachionus calyciflorus*, *Brachionus angularis*, *Brachionus urceus*, *Brachionus caudatus*, *Filinia longiseta*, *Keratella valga* and *Brachionus budapestiensis*. The monthly average abundance of rotifers ranged from 13 ind/L to 8 901 ind/L, and seasonal abundance order was summer> spring> autumn> winter. The seasonal differences of abundance were significant. Spatial abundance order was S2>S3>S4>S1. The water quality of Muye lake was evaluated through ecological methods and weighted comprehensive nutrition state index method according to the rotifers. There were 24 os- β -ms, β -ms-os and β -ms rotifer species, which accounted for 55.8% of the total species, biology indexes(Q) ranged from 1.5 to 2.5, TLI_C values were all above 50. The water quality of Muye lake and inflow river was in eutrophic level on the whole.

Key words: rotifer; community structure; water quality assessment; eutrophication; Muye lake; Xinxiang city

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 新乡市重点科技攻关计划项目(ZG11002)

作者简介: 蔺庆伟(1988-), 男, 河南安阳人, 在读硕士研究生, 研究方向: 生态污染与修复。E-mail: heshidaalin@163.com

* 通讯作者: 马剑敏(1964-), 男, 河南偃师人, 教授, 博士, 主要从事生态污染与修复及环境生物学研究。

E-mail: mjm6495@sina.com

轮虫是浮游动物群落中的重要组成部分,是水生生态系统中微食物网的重要环节,它们对水体生态系统结构、功能和生物转化起着重要作用^[1]。轮虫个体较小,发育时间短、周转快,生产量高,对环境变化反应灵敏,可作为良好的环境指示生物,能及时反映水质的变化情况和水体的营养状况,国内外对轮虫在生物监测中的指示作用已经进行了研究^[2-4]。

牧野湖是 2009 年由贯穿新乡市的卫河河道经人工拓宽而形成的人工湖,在休闲娱乐、景观、灌溉、防洪和排污等方面起着重要作用^[5]。上游及河道两岸存在多个排污口,在自然及人为因素共同影响下牧野湖长期处于富营养化状态且有向重度富营养化发展的趋势。鉴于此,对牧野湖轮虫群落的变化及其影响因素进行调查,从轮虫的角度反映牧野湖的水生态状况,从而为牧野湖生态系统管理提供科学依据,同时也可今后的研究提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 样点布置和采样时间

根据牧野湖(35°31'N、113°91'E)入湖河道、主湖区及二期湖区的地形和水质状况设置 4 个采样点,分别为:入湖河道东截止闸处(S1)、湖南湾静水区(S2)、湖中心(S3)、下游二期湖区水轮车处(S4),如图 1。其中,S1 位于繁华市区,为邻近湖区上游河道,两侧居民密度很高;S2 位于主湖区南岸水湾静水区,周边为公园绿地;S3 位于主湖区中心,水较深,岸边两侧分别为公园绿地和沙滩;S4 位于主湖区下游一水轮车附近,其上游及下游有排污口。于 2011 年 7 月至 2013 年 5 月,逐月对牧野湖水体进行采样调查,时间固定为每月的 15 日上午 8:00—11:00。

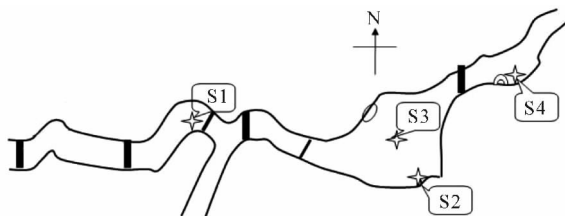


图 1 牧野湖各采样点分布

1.2 样品采集与分析

1.2.1 轮虫样品 参照文献^[6]进行采集,使用采水器采集各样点水表层 10 L 水样,用 25 号(64 μm)浮游生物网过滤浓缩至 50 mL,作为定性样品用于种类鉴定;由于牧野湖水体较浅,每个采样点于水表层下采集 1 L 水样,现场用 15 mL 鲁哥氏液固定,带回实验室静置沉淀 48 h,浓缩至 30 mL,用于镜检计数。轮虫生物量按体积法测定^[6],种类鉴定按

Koste 的分类系统进行^[7]。

1.2.2 水质指标 现场测定各采样点水表层温度、pH 值、透明度;用 5 L 采水器采集浅层混合水样带回实验室,参照湖泊富营养化调查规范^[8]测定其他理化指标,包括总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)、化学需氧量(COD)含量。湖泊富营养化分级标准参照文献^[8],具体见表 1。

表 1 湖泊富营养化分级标准

水质指标					评分值	营养程度
Chl-a/ (μg/L)	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	COD/ (mg/L)	透明度/ cm		
0.5	0.001	0.020	0.15	1 000	10	贫营养
1.0	0.004	0.050	0.4	500	20	
2.0	0.010	0.100	1.0	300	30	
4.0	0.025	0.300	2.0	150	40	中营养
10.0	0.050	0.500	4.0	100	50	
26.0	0.100	1.000	8.0	50	60	
64.0	0.200	2.000	10.0	40	70	富营养
160.0	0.600	6.000	25.0	30	80	
400.0	0.900	9.000	40.0	20	90	
1 000.0	1.300	16.000	60.0	12	100	

1.3 水质污染评价方法

1.3.1 指示生物法 根据轮虫污染指示种的种类及数量确定水体污染程度^[9],个体数量(丰度): $N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$;优势度: $Y = (n_i / N) \times f_i$,式中, Y 为优势度, n_i 为第 i 种的个体数, N 为总个体数, f_i 为第 i 种出现的频率, $Y > 0.02$ 的种视为优势种。

1.3.2 生物指数法 用生物指数(Q) [$Q = B(\text{臂尾轮虫属的种数}) / T(\text{异尾轮虫属的种数})$]来反映水质污染程度。规定: $Q < 1.0$ 为寡营养型, $1.0 \sim 2.0$ 为中营养型; $Q > 2.0$ 为富营养型^[2,10]。

1.3.3 TLIC 加权综合营养状态指数法 根据 TLIC 加权综合营养状态指数评价水质: $TLIC = \sum W_j TLI(j)$ ^[8],式中, W_j 为第 j 项水质指标的权重值, $TLI(j)$ 为第 j 项水质参数营养状态指数。营养状态指数的分级规定: $TLIC \leq 30$ 为贫营养, $30 < TLIC \leq 50$ 为中营养, $TLIC > 50$ 为富营养。

2 结果与分析

2.1 牧野湖轮虫的群落结构特征

2.1.1 轮虫的种类组成及优势种 由表 2 可以看出,调查期间共采获轮虫 43 种,隶属 7 科 14 属,其中臂尾轮虫科出现最多(19 种),占总种数的 44.19%,主要为臂尾轮属(11 种);其次为鼠轮虫科,主要为异尾轮属(7 种),占总种数的 16.28%。从样点分布来看,S2 样点出现种数最多,包括调查到的所有臂尾轮虫、大多数异尾轮虫,绝大多数龟甲轮属、三肢轮属、多肢轮属;从季节变化来看,冬季出现种数最少,夏季出现种数最多,主要为萼花臂尾轮

虫、角突臂尾轮虫、尾突臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫、针簇多肢轮虫等。

表 2 牧野湖轮虫种类组成及其分布

轮虫种类	污染等级	分布样点	季节	轮虫种类	污染等级	分布样点	季节
臂尾轮科(Brachionidae)				长刺异尾轮虫(<i>T. longiseta</i>)	o	1、2、3、4	春、夏、秋
臂尾轮属(<i>Brachionus</i>)				刺盖异尾轮虫(<i>T. capucina</i>)	o	1	夏
萼花臂尾轮虫(<i>B. calyciflorus</i>)	β - α	1、2、3、4	春、夏、秋、冬	晶囊轮科(Asplanchnidae)			
壶状臂尾轮虫(<i>B. urceus</i>)	β - α	1、2、3、4	春、夏、秋、冬	晶囊轮属(<i>Asplanchna</i>)			
尾突臂尾轮虫(<i>B. caudatus</i>)	β	1、2、3、4	春、夏、秋	前节晶囊轮虫(<i>A. priodonta</i>)	o	1、2、3、4	春、夏、秋
角突臂尾轮虫(<i>B. angularis</i>)	β	1、2、3、4	春、夏、秋	卜氏晶囊轮虫(<i>A. brightwellii</i>)	β	1、2、3、4	春、夏、秋
裂足臂尾轮虫(<i>B. diversicornis</i>)	β	1、2、3、4	夏、秋	囊足轮属(<i>Asplanchnopus</i>)			
方形臂尾轮虫(<i>B. quadridntatus</i>)	β	1、2、3、4	夏	多突囊足轮虫(<i>A. multiceps</i>)	o	1、2、3、4	春、夏
矩形臂尾轮虫(<i>B. leydigii</i>)	β	2	春、夏	哈林轮属(<i>Harringia</i>)			
蒲达臂尾轮虫(<i>B. budapestiensis</i>)	β	1、2、3、4	夏、秋、冬	真足哈林轮虫(<i>H. eupoda</i>)	β	2	夏
剪形臂尾轮虫(<i>B. forficula</i>)	β	1、2、3、4	夏	镜轮科(Testudinellidae)			
圆型臂尾轮虫(<i>B. rotundi formis</i>)	β	1、2、4	夏、冬	三肢轮属(<i>Filinia</i>)			
镰状臂尾轮虫(<i>B. falcatus</i>)	β	2、3、4	夏	长三肢轮虫(<i>F. longiseta</i>)	α - β	1、2、3、4	春、夏、秋、冬
龟甲轮属(<i>Keratella</i>)				小三肢轮虫(<i>F. minuta</i>)		1、3	夏
螺旋形龟甲轮虫(<i>K. cochlearis</i>)	β -o	1、2、3、4	夏、秋、冬	角三肢轮虫(<i>F. cornuta</i>)	o	1、2、3、4	春、夏、秋
曲腿龟甲轮虫(<i>K. valga</i>)	α - β	1、2、3、4	春、夏、秋	臂三肢轮虫(<i>F. brachiata</i>)	o	1、2	春、秋
龟形龟甲轮虫(<i>K. testudo</i>)	o	1	夏	较大三肢轮虫(<i>F. major</i>)	β	1	秋
矩形龟甲轮虫(<i>K. quadrata</i>)	α - β	1、2、3、4	春、冬	疣毛轮科(Synchaetidae)			
缘板龟甲轮虫(<i>K. ticinensis</i>)	α - β	2、3、4	夏、秋	多肢轮属(<i>Polyarthra</i>)			
平甲轮属(<i>Platyias</i>)				针簇多肢轮虫(<i>P. trigla</i>)	β -o	1、2、3、4	春、夏、秋、冬
四角平甲轮虫(<i>P. quadricornis</i>)	β	2、3	夏	长肢多肢轮虫(<i>P. dolichoptera</i>)	α - β	3、4	夏、秋
水轮属(<i>Ephyra</i>)				广布多肢轮虫(<i>P. vulgaris</i>)	β	2	夏
椎尾水轮虫(<i>E. senta</i>)	α	1、2、3、4	夏、秋、冬	小多肢轮虫(<i>P. minor</i>)	α -x	1、2、3、4	夏、秋、冬
叶轮属(<i>Notholca</i>)				腔轮科(Lecanidae)			
唇形叶轮虫(<i>N. labis</i>)	o	1、2、3、4	春、夏	腔轮属(Lecane)			
鼠轮虫科(Trichocercidae)				月形腔轮虫(<i>L. luna</i>)	α - β	3、4	夏、秋
异尾轮属(<i>Trichocerca</i>)				凹顶腔轮虫(<i>L. papuana</i>)	o	1	夏
罗氏异尾轮虫(<i>T. rousseleti</i>)	o	1、3	夏	单趾轮亚属(<i>Monostyla</i>)	β	1、2、3、4	春、夏、秋
暗小异尾轮虫(<i>T. pusilla</i>)	o	1、2	夏、秋	椎轮科(Notommatidae)			
田奈异尾轮虫(<i>T. dizon-nuttalli</i>)	o	1、2、3、4	夏、秋	巨头轮属(<i>Cephalodella</i>)			
韦氏异尾轮虫(<i>T. weberi</i>)	o	1、2、3、4	夏、秋、冬	突背巨头轮虫(<i>C. gibba</i>)	β	1、2	夏、秋

注: α 为 α -中污型,o为寡污型, β 为 β -中污型, α -x为寡污至清洁型, α - β 为寡污至 β -中污型, β -o为 β -中污至寡污型, β - α 为 β -中污型。

根据优势度公式计算,整个调查期间优势种有 8 种,为针簇多肢轮虫、萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、尾突臂尾轮虫、长三肢轮虫、曲腿龟甲轮虫和蒲达臂尾轮虫,详见表 3。

表 3 牧野湖轮虫优势种及优势度

轮虫优势种	优势度
针簇多肢轮虫(<i>Polyarthra trigla</i>)	0.236 7
萼花臂尾轮虫(<i>Brachionus calyciflorus</i>)	0.159 9
角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i>)	0.113 9
壶状臂尾轮虫(<i>Brachionus urceus</i>)	0.061 8
尾突臂尾轮虫(<i>Brachionus caudatus</i>)	0.032 8
长三肢轮虫(<i>Filinia longiseta</i>)	0.031 8
曲腿龟甲轮虫(<i>Keratella valga</i>)	0.026 8
蒲达臂尾轮虫(<i>Brachionus budapestiensis</i>)	0.024 8

2.1.2 轮虫丰度时空变化

2.1.2.1 各样点轮虫种数时空变化 经近 2 a 调查,牧野湖各样点轮虫群落种数随时间变化呈现一定的变化规律,即夏季>秋季>春季>冬季,如图 2 所示。最大种数(18 种)出现在 2012 年 8 月 S2 样点,最小种数(1 种)出现在 2011 年 12 月 S1、S2、S3 样点以及 2013 年 4 月 S1 样点,有的种仅在单个季

节出现。2013 年 2 月各样点轮虫种数出现一个小波峰,与 2012 年 2 月相比增多,这可能与当时气候因子及引水有关。

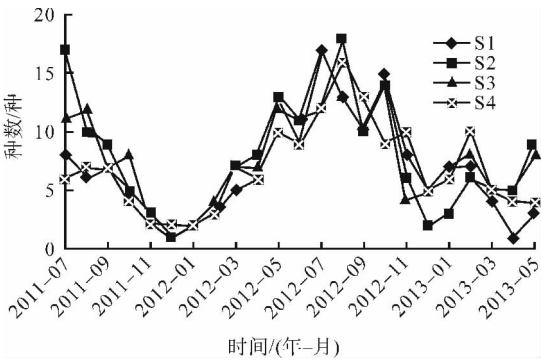


图 2 不同季节牧野湖各样点轮虫种数

如图 3 所示,S1 与 S2 样点轮虫种数相差不大,S3 与 S4 种数接近,这与各样点所在地环境因子相似程度有很大关系。差异性分析显示,各样点出现的轮虫种类有个别差异,如矩形臂尾轮虫、真足哈林轮虫、广布多肢轮虫仅在 S2 样点出现,龟形龟甲轮虫、刺盖异尾轮虫和凹顶腔轮虫仅在 S1 入湖河道处出现。

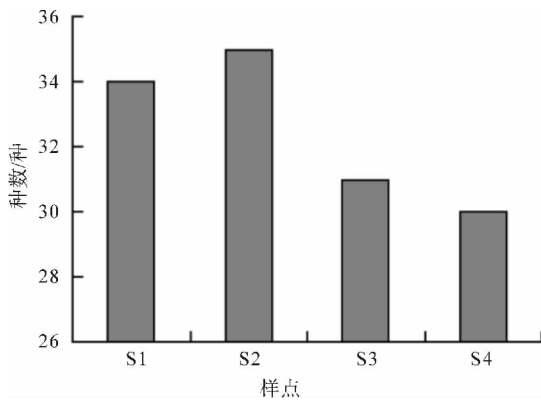


图 3 牧野湖各样点轮虫种数

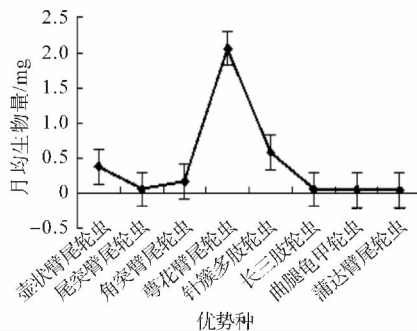
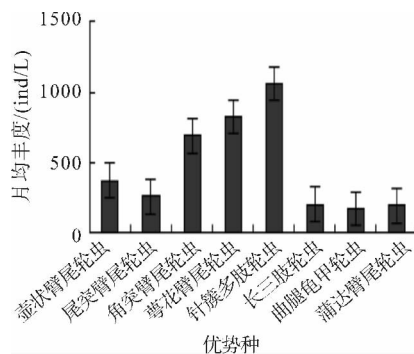


图 4 牧野湖轮虫优势种月均丰度及生物量

2.1.2.3 不同季节各样点轮虫丰度变化 由图 5 可以看出,夏季轮虫丰度一直较高,冬季最低,S2、S3 样点春季轮虫丰度异常高,尤其是 S2 样点,超过了夏季丰度,秋季轮虫丰度各样点相差不大。总体上,各样点轮虫丰度表现为夏季>春季>秋季>冬季。方差分析显示,同一样点不同季节轮虫丰度存在极显著差异($P<0.01$)。

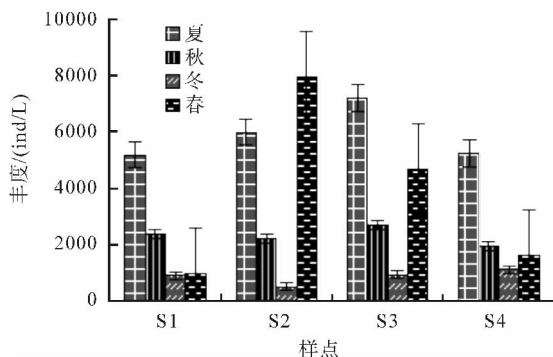


图 5 不同季节牧野湖各样点轮虫丰度

轮虫丰度在不同样点也存在差异,S2、S3 样点轮虫丰度明显高于 S1、S4 样点,最大值出现在 S2 样点,为 33 340 ind/L;最小值出现在 S1 样点,为 18 968 ind/L。S1、S2、S3、S4 样点轮虫丰度占总丰度的比例分别为 18.39%、32.32%、30.07%、19.22%,轮虫丰度的空间分布表现为 $S2>S3$

2.1.2.2 优势种轮虫丰度和生物量 经调查,各样点轮虫月均丰度介于 13~8 901 ind/L,最大值出现在 2013 年 5 月 S2 样点,最小值出现在 2011 年 12 月 S1、S2、S3 样点。轮虫优势种针簇多肢轮虫、萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、尾突臂尾轮虫、长三肢轮虫、曲腿龟甲轮虫、蒲达臂尾轮虫月均丰度分别为 1 062、825、691、375、261、205、173、197 ind/L;月均生物量介于 0.045 2~2.062 3 mg,其中萼花臂尾轮虫月均生物量最大,其次为针簇多肢轮虫,为 0.584 3 mg,蒲达臂尾轮虫最小,详见图 4。

(31 027 ind/L) $>$ S4(19 834 ind/L) $>$ S1,即湖区轮虫丰度大于入湖河道。

2.1.3 轮虫的污染指示种 轮虫繁殖快,发育周期短,能较迅速地反应环境的变化,被认为是水质和营养状况的良好指示生物^[2]。一般认为,富营养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(*Pompholyx complanata*)、圆筒异尾轮虫(*Trichocerca cylindrica*)、长三肢轮虫(*Filinia longiseta*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、矩形龟甲轮虫(*Keratella quadrata*)和真翅多肢轮虫(*Polyarthra eurypetra*)^[1]。本研究结果显示,牧野湖 4 个采样点均出现的污染指示种有多种臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫、椎尾水轮虫、卜氏晶囊轮虫、长三肢轮虫、角三肢轮虫;一年四季都出现的富营养指示种为萼花臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、针簇多肢轮虫和长三肢轮虫(表 2)。

2.2 牧野湖水水质理化指标分析

牧野湖所处区域为温带-亚热带季风气候,四季分明,不同季节温度差异明显^[5]。夏季水温最高(28℃),冬季温度最低(1.2℃),春季温度回升,为水生生物提供有利条件。牧野湖水温介于 1.2~28℃(表 4)。

表 4 不同季节牧野湖各采样点水质指标

季节	样点	水温/℃	透明度/cm	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	Chl-a/(μg/L)
春	S1	14.90	116.7/120.0	28.6/40.0	3.78/2.76	0.09/0.43	49.17/8.19
	S2	14.93	160.0/110.0	28.2/32.0	4.32/6.72	0.18/0.78	54.03/132.40
	S3	15.03	162.7/95.0	26.2/29.3	4.38/6.83	0.16/0.73	69.01/136.96
	S4	14.93	139.0/120.0	37.5/36.0	4.65/8.39	0.15/0.92	58.23/102.38
夏	S1	25.65	51.7/	71.6/	7.43/	0.35/	113.50/
	S2	25.25	63.3/	57.8/	8.21/	0.32/	121.93/
	S3	25.80	68.3/	50.1/	8.07/	0.33/	116.90/
	S4	25.90	63.3/	70.0/	9.30/	0.31/	115.86/
秋	S1	15.00	98.3/46.7	49.0/64.0	10.43/2.98	0.29/0.11	63.13/95.10
	S2	15.17	80.0/56.7	36.1/69.3	9.60/2.34	0.26/0.12	72.33/39.13
	S3	15.03	90.0/69.3	36.7/50.7	9.48/2.31	0.20/0.12	75.37/26.85
	S4	15.00	91.6/60.0	33.5/41.3	9.25/4.10	0.30/0.87	65.00/12.29
冬	S1	3.57	118.3/120.0	26.6/38.7	7.79/2.94	0.23/0.44	6.50/32.31
	S2	3.27	155.0/	20.2/54.7	7.47/4.32	0.20/0.50	6.50/58.24
	S3	3.30	136.7/	17.8/44.0	7.43/4.26	0.21/0.53	7.80/63.25
	S4	3.60	116.7/	16.1/54.7	7.53/5.27	0.24/0.62	7.73/25.48

注:表中分数线上分子代表 2011 年 7 月至 2012 年 6 月各样点水质指标,分母代表 2012 年 9 月至 2013 年 5 月各样点水质指标。

由表 4 可知,牧野湖季度平均透明度介于 46.7~162.7 cm,总体处于中营养水平。从季节变化来看,各样点透明度整体呈现一定的变化规律,即春季>冬季>秋季>夏季;从样点空间分布来看,S1 与 S4 透明度较接近,S2 与 S3 透明度相差不大,整体而言,S1、S4 透明度小于 S2、S3,这与 S1、S4 所处地理环境和人为扰动及生活污染严重有极大关系。

从表 4 可以看出,牧野湖季度平均 COD 含量介于 16.1~71.6 mg/L,总体处于富营养水平。从季节变化来看,各样点 COD 含量 2011—2012 年呈现一定规律即夏季>秋季>春季>冬季;2012—2013 年规律并不非常明显,整体呈现秋季大于春、冬季;且 COD 含量随年份呈递增趋势,表明其有恶化的趋势。从空间分布来看,各样点 COD 含量无明显规律。

从表 4 可以看出,牧野湖季度平均 TN 含量介于 2.31~10.43 mg/L,总体处于富营养水平,各样点 TN 含量 2011—2012 年呈现一定规律即秋季>夏季>冬季>春季,2012 年冬季、2013 年春季平均 TN 含量相对下降;空间分布特点用 SPSS 17.0 进行距离相似性分析,各样点 TN 含量呈极大相似性,相似值达 0.887 以上。

从表 4 可以看出,牧野湖季度平均 TP 含量介于 0.09~0.92 mg/L,总体处于富营养水平。从季节变化来看,2011—2012 年表现为夏、秋季大于冬、春季,2012 年秋季 TP 含量比 2011 年同期有所降低,而 2012 年冬季和 2013 年春季均比往年同期增加。

从表 4 可以看出,牧野湖季度平均 Chl-a 含量

介于 6.50~136.96 μg/L,总体处于中—富营养水平,且呈现出明显的季节性变化,2011—2012 年表现为夏季>秋季>春季>冬季,而 2012—2013 年表现为春季>冬季>秋季。除 2013 年春季 S1 样点 Chl-a 含量相对极低外,同一季节,不同样点 Chl-a 含量相差不大。牧野湖春、夏、秋季处于富营养水平,2011 年冬季处于中营养水平,到 2012 年冬季达到富营养水平。

2.3 牧野湖水质污染的生物学评价

2.3.1 指示生物法 轮虫繁殖快,发育周期短,对环境变化反映灵敏,能较好地反映水质变化和营养状况^[2]。

由表 2 可知,牧野湖采集的 43 种轮虫中寡污至 β-中污、β-中污至寡污及 β-中污型共 24 种,占总种数的 55.8%;β-α 中污及 α-中污型共 3 种,清洁型及重污型均未发现。8 种优势种中有 6 种属于寡污至 β-中污、β-中污至寡污及 β-中污型,2 种是 β-α 中污型。从季节变化来看,夏、秋季出现污染种数较多,冬、春季较少。综上可以看出,牧野湖处于寡污至 β-中污型—β-中污型水体阶段。

2.3.2 生物指数法 轮虫对环境变化有较强的敏感性,其群落的生态特征可作为水质评价的依据^[2,11]。Sladeczek 等^[2]指出,臂尾轮虫属常与富营养型水体联系在一起,而异尾轮虫几乎都生活在寡营养型水体之中。

从图 6 可以看出,在空间分布上,牧野湖 Q 值介于 1.5~2.5,除 S1 入湖河道处 Q 值为 1.5 外,其

余 3 个样点 Q 值均大于 2.0, 表明牧野湖入湖河道为中营养水体, 而湖心区为富营养水体。从季节变化来看, 春、夏 Q 值分别为 1.5、1.6, 而秋、冬季分别

达到 1.2、1.4, 这可能与秋、冬季温度低, 一些异尾轮虫休眠卵还未孵化导致其种数少有极大关系。综上所述, 牧野湖整体处于中富营养状态。

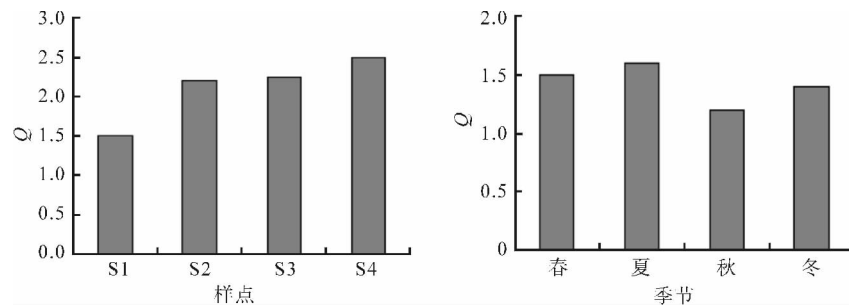


图 6 牧野湖各样点及各季节 Q 值

2.3.3 TLIC 加权综合营养状态指数法 运用相关加权营养状态指数法选取 Chl-a、TP、TN 含量及透明度 4 个参数对各样点营养状态进行评价。将 TLI (Chl-a) 对营养状态的重要性作为 1, 依据各参数与 Chl-a 含量的相关系数及其对水质营养状态贡献的相对重要性^[8], 确定 Chl-a、TP、TN、透明度的营养状态指数相关权重值分别为 0.340、0.294、0.223、0.144。由表 5 可知, 牧野湖各样点的 $TLIC$ 值相近, 且均大于 50, S4 样点最大。由此可判断, 牧野湖整体处于富营养状态, S4 样点污染较为严重。

表 5 牧野湖营养状态综合评价结果

样点	TLI (Chl-a)	TLI (TP)	TLI (TN)	TLI (透明度)	$TLIC$	营养 状态
S1	68.03	80.23	83.22	-37.07	59.92	富营养
S2	71.02	76.65	85.27	-37.83	60.23	富营养
S3	71.27	76.21	85.19	-37.81	60.17	富营养
S4	68.58	82.68	87.32	-36.62	61.80	富营养

3 结论与讨论

3.1 牧野湖轮虫群落的时空分布特点与环境因子的关系

调查期间, 牧野湖轮虫群落动态最大特征体现为明显的时间周期性, 其种数夏季最多, 其次为秋季, 冬季最少。此特点与国内多数湖泊、水库水体轮虫群落动态变化情况极其相似^[1,10-11]。牧野湖地域四季分明, 温度变化明显, 是造成轮虫周期性的重要原因之一。相关分析表明, 牧野湖轮虫丰度与水温极显著相关 ($P < 0.01$)。水温对轮虫的丰度和密度影响较大, 适宜的水温可以促进轮虫生长、繁殖及其休眠卵孵化, 从而使种数和生物量增加。一般在 20℃ 以上轮虫达到最大丰度^[4,12], 黄祥飞等^[12]研究武汉东湖的轮虫发现, 有些种类在 29℃ 达到最大值。王家楫^[13]研究发现, 同一水体, 一年四季都

能发现角突臂尾轮虫的存在, 但是其个体数量在春季和秋季达到高峰, 萼花臂尾轮虫四季也都出现, 但其繁殖力在春季和夏季达到高峰。

透明度是影响轮虫密度的重要因子, 随透明度的增加, 轮虫密度增大^[7], 但本研究经单因子相关分析发现, 轮虫丰度与水体透明度成一定负相关。牧野湖及入湖河道在冬季和初春由于浮游藻类、水绵及水生植物的凋亡沉底, 使得透明度较高, 但此时温度较低且处于枯水期, 轮虫食物源受限, 所以轮虫在透明度较高的冬、春季数量不是很多。进入夏季, 随着温度升高浮游植物生长逐渐旺盛, 污水排放量增加, 致使水体透明度降低, 而轮虫由于条件适宜生长繁殖迅速, 种类和生物量都增加。王丽卿等^[14]的研究表明, 轮虫现存量与透明度在特定时间段呈一定负相关, 与本研究牧野湖轮虫丰度与透明度呈负相关结果基本一致。COD 含量也与轮虫丰度有显著相关性^[15], 有研究^[16]表明, 富营养化湖泊中, 轮虫总丰度与 COD_{Mn} 显著正相关。牧野湖 2 a 调查期间牧野湖季度平均 COD 含量介于 16.1 ~ 71.6 mg/L, 有机物含量相对较高。而牧野湖轮虫优势种主要为中污型指示种, 对有机污染有中等的耐受性, 因此 COD 含量会对轮虫群落发展产生影响。Chl-a 含量是衡量水体浮游植物生物量的一个综合指标, 经相关分析表明, Chl-a 含量影响轮虫群落的季节变化。

许多研究表明, 影响轮虫种群密度和季节演替的重要生态因子还有溶解氧 (DO)^[17]、食物^[18-19]、鱼类的选择性捕食、浮游植物生物量、枝角类生物量^[20]等。食物浓度对轮虫种群增长率、有性生殖、休眠卵形成有重要影响^[21]。新乡夏、秋季节雨水较多, 从卫河上游而来的大量有机碎屑和营养盐为浮游藻类、细菌和原生动物的生长繁殖提供了有利条件, 而这些生物和营养又为轮虫的生长发育提供了充足的食物, 因此, 夏、秋季轮虫种类、丰度较大。

Bogdan 等^[22]研究发现,枝角类经常和轮虫竞争相同的食物资源,具有相似的食物生态位,但是大型枝角类往往具有明显的竞争优势,能够通过争夺食物资源等方式抑制轮虫种群的增长。

有学者认为,多数轮虫可能都有周期性或区域性的变异^[13],致使一些种类在体形大小、被甲的某些结构以及种群密度、丰度方面有明显区别。S3 湖心区水流较小,几乎处于静水区,且水体结构比较简单,而入湖河道 S1 处水流较快,S2 处靠近岸边,水体结构较多元化,S1、S2 处轮虫种数较 S3 处多,但是 S2、S3 处轮虫丰度较 S1 处大。

3.2 牧野湖轮虫与水质营养状况的关系

轮虫因其特别的敏感性和形体特征而具有很好的指示作用。本研究根据轮虫群落的时空变化特征,运用生态学的多种方法分析牧野湖各样点水质,所得结果与理化监测结果一致,这与以往多数学者^[1,10,23]结合轮虫群落特征对水质的研究相符合,说明轮虫作为指示生物监测水质是可行的。水质理化指标分析结果显示,牧野湖整体处于富营养状态,同一季节不同样点污染程度相近,污染程度夏、秋季大于春、冬季。调查到的轮虫污染指示种多为臂尾轮属、龟甲轮属、多肢轮属。如角突臂尾轮虫、蒲达臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫适宜居住在有机质比较丰富的池塘、湖湾等水体,是 β -中污型水质的典型指示种。从浅沼泽到深水湖、养鱼塘都能发现螺形龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫,它们适宜生活在 β -中污至寡污型的水体中。有学者^[13]调查,萼花臂尾轮虫和针簇多肢轮虫是最常见的种类,分布很广,任何水体都有分布,尤其是营养丰富的水体,且一旦出现,个体数很多;长三肢轮虫分布也很广,对酸碱度的耐性很强。

以单一参数为基础评价水质,虽然简单明了,但可能因技术误差或湖泊季节变化等因素难以真实反映湖泊营养状态^[8]。用相关加权营养状态指数法评价水质,可以综合考虑几个参数,在同一营养状态下,指数越高,其营养程度越重。本研究结果发现,牧野湖各样点 $TLIc$ 值均在 50 以上,且相差不大,得知牧野湖水体呈富营养状态,而水轮车 S4 处较严重。有学者^[24-26]认为,评价一个水体的污染程度,仅从生态学角度并不完美,应将生态学指标与理化指标结合起来综合评价,方可获得更为真实的评价结果。

参考文献:

- [1] 郭凯,赵文.北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况[J].湖泊科学,2012,22(2):256-264.
- [2] Sladeczek V. Rotifers as indicators of water quality[J].

- Hydrobiologia,1983,100:169-201.
- [3] Cado S, Miletic A, Djurkovic A. Zooplankton of the Potpec reservoir and the saprobiological analysis of water quality [J]. Desalination, 2007, 213: 24-28.
- [4] May L. Rotifer occurrence in relation to water temperature in Loch Leven, Scotland [J]. Hydrobiologia, 1983, 104: 311-315.
- [5] 靳萍,代克岩,杨程,等.牧野湖浮游动物群落结构及其与环境因子的相关性研究[J].水生生态学杂志,2013,34(2):53-61.
- [6] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991.
- [7] 卢亚芳,黄永春,周立红.杏林湾水库环境因子对浮游轮虫密度的影响[J].上海水产大学学报,2002,11(3):225-229.
- [8] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [9] 蒋志学,邓士谨.环境生物学[M].北京:中国环境科学出版社,1989:128-144.
- [10] 宗志祥,许崇任.洋河水库轮虫群落用于水质评价的研究[J].环境科学学报,1993,13(1):101-106.
- [11] 熊金林,梅兴国.湖北四湖湖泊营养类型与轮虫群落的关系[J].动物学杂志,2003,38(6):8-14.
- [12] 黄祥飞,胡春英,伍焯田.武汉东湖的轮虫[J].水生生物学报,1985,9(2):129-143.
- [13] 王家楫.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1961.
- [14] 王丽卿,郑小燕.淀山湖轮虫现状及水质生态分析[C]//张显良,刘晴.渔业现代化与可持续发展:中国工程院第77场工程科技论坛.北京:海洋出版社,2009:350-359.
- [15] 邱小琼,赵红雪,孙晓雪.鸣翠湖轮虫群落特征及其与水环境因子的关系[J].宁夏大学学报:自然科学版,2012,33(1):62-68.
- [16] 陈光荣,雷泽湘,谭镇,等.环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响[J].水生生态学杂志,2010,3(4):28-32.
- [17] Hofmann W. The influence of abiotic environmental factors on population dynamics in planktonic rotifers [J]. Arch Hydrobiol Beih Ergebn Limnol, 1977, 8: 77-83.
- [18] Dumont H J. Biogeography of rotifers [J]. Hydrobiologia, 1977, 104(1): 19-30.
- [19] Gulati R D. Zooplankton structure in the Loosdrecht lakes in relation to trophic status and recent restoration measures [J]. Hydrobiologia, 1990, 191(1): 173-188.
- [20] 杨丽丽,周小玉,刘其根,等.新疆布伦托海轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2011,23(5):806-812.
- [21] 董丽丽,杨景伟,岑梓龙,等.斜生栅藻密度对新安江萼花臂尾轮虫种群动态的影响[J].生态学杂志,2012,31(1):124-130.
- [22] Bogdan K G, Gilbert J J. Quantitative comparison of food niches in some freshwater zooplankton: A multi-tracer-cell approach [J]. Oecologia, 1987, 72: 331-340.
- [23] 林育真,李玉仙,郭沛涌,等.东平湖轮虫群落与水质评价[J].山东师大学报:自然科学版,1998,13(1):63-67.
- [24] 李共国,虞左明.千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价[J].湖泊科学,2003,15(2):169-176.
- [25] 温新利,席貽龙,张雷,等.芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质的生态学评价[J].水生生物学报,2006,30(2):152-158.
- [26] 侯磊,王庆,杨宇峰.珠江广州河段轮虫群落结构特征与水质生态学评价[J].暨南大学学报:自然科学版,2011,32(3):311-318.