

汾河太原段轮虫多样性及群落结构的动态变化

高晋华, 刘 瑶, 李康宁, 袁 援, 李亚婧, 张 玲

(太原师范学院, 山西 晋中 030619)

摘要: 调查汾河太原段轮虫群落结构的时空变化, 探讨轮虫群落结构动态变化规律及其与环境理化因子的关系, 为汾河太原段浮游动物动态预测和多样性保护提供必要信息, 从生态系统的角度客观评价水质污染状况与水体富营养化程度。在汾河太原段设置采样点 7 个, 于 2014 年 3–12 月对轮虫和水体理化指标进行逐月调查, 共检出轮虫 98 种, 隶属 3 目 21 科 33 属。全年优势种是长肢多肢轮虫(*Polarthra dolichoptera*)和螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)。调查期间月均检出轮虫 28 种, 轮虫丰度变化范围为 153~1 440 个/L, 生物量为 0.08~0.89 mg/L; 种类数、丰度和生物量均表现为枯水季较低, 丰水季最高。群落结构相似性分析表明不同营养状态水体之间差异显著, 轮虫丰度、生物量、Shannon–Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均存在显著差异($P < 0.05$); 中等营养条件的指示种为卵形无柄轮虫(*Ascomorpha ovalis*)和单趾狭甲轮虫(*Colurella unicauda*), 指示轻度富营养的指示种为柔软龟甲轮虫(*Keratella delicata*), 中等富营养水体的指示种则为臂尾轮属的种类。冗余分析结果显示环境变量对轮虫群落结构变异的解释率为 41.3%, 水温、叶绿素 a、溶解氧、总氮等因子是影响轮虫时空分布的主要因素。轮虫群落结构特征可以指示水体的营养状态。

关键词: 物种多样性; 营养状态; 浮游动物; 冗余分析

中图分类号: Q145 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)06-0077-08

轮虫是浮游动物的重要组成部分, 因其具有高度生态耐性而在地理分布上几乎没有局限性, 就物种多样性和种群丰度而言通常为淡水生态系统中的优势类群 (El-Shabrawy & Germoush, 2014; Zhao et al, 2018)。轮虫主要以藻类、鞭毛虫、细菌及有机碎屑等为食, 同时受到甲壳动物和鱼类的捕食压力, 成为水生微食物网中的关键环节, 在能量流动和物质循环中起重要作用 (Ooms–Wilms, 1997; Miracle et al, 2007)。轮虫种类和数量变动会直接或间接影响其他水生生物的丰度和分布。营养盐、初级生产量、温度等是影响轮虫群落结构和种群季节变化的主要因素 (Ekhande et al, 2013)。实验数据证实水生态系统功能与群落多样性密切相关 (Florescu & Moldoveanu, 2017), 轮虫与其他后生动物比较具较高的种群更新率, 对环境条件和营养状态的改变响应迅速 (Auer et al, 2004; 温展民等, 2017), 轮虫结构能较好地反映水体营养状况, 已被广泛应用于水质评价和生物监测 (Ejsmont, 2014; May et al, 2014)。分析轮虫多样性是理解水生态系统功能时空变化机制的一个有效方法。

汾河是黄河的一级支流, 汾河太原段由汾河水库出水口入太原境内, 自北向南穿过太原, 全长 188 km, 是太原市主要水系, 由于地下水超采及城镇生活污水排放造成水位下降和富营养化。目前对汾河太原段研究多集中于水质理化监测和浮游藻类等方面 (冯佳等, 2011; 崔苗, 2020), 关于轮虫群落结构特征及其影响因素的研究则鲜有报道。本研究对汾河太原段轮虫多样性进行调查, 分析轮虫群落结构的时空变化, 以及影响轮虫分布的主要环境因素, 为汾河太原段浮游动物动态预测和多样性保护提供必要信息, 有助于从生态系统的角度客观评价水质污染状况与水体富营养化程度。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点设置

汾河太原段地处中纬度大陆季风气候区, 四季分明, 月径流量的丰枯程度与降水量大小相对应, 降水多集中在夏季, 从 11 月到次年 4 月径流量较小。结合各月份径流量情况, 太原段全年划分为丰水季 (6–8 月)、平水季 (5、9、10 月) 和枯水季 (3–4 月和 11–12 月)。根据汾河太原段自然地理特征、水质和季节性断流情况, 设置具有代表性 7 个采样点: 汾河水库出水口 (S1)、在沟院桥 (S2)、滩上桥 (S3)、上兰 (S4)、胜利桥 (S5)、祥云桥 (S6)、汾河二坝 (S7) (如图 1)。S1 位于汾河水库内, 为水源地保护区; S1、S2 和 S3 河

收稿日期: 2020-05-21 修回日期: 2020-09-04

基金项目: 山西省科技基础条件平台建设项目 (2013091004-0106)。

作者简介: 高晋华, 1963 年生, 女, 副教授, 研究方向为浮游动物生态。E-mail: gaojh@tynu.edu.cn

道内水生植物茂盛,人为干扰较少;S5和S6断面位于太原汾河人工蓄水区,由橡胶坝为蓄水湖面,水流平缓;S7在太原与清徐交界处,接纳上游工农业及城市生活污水,污染严重。

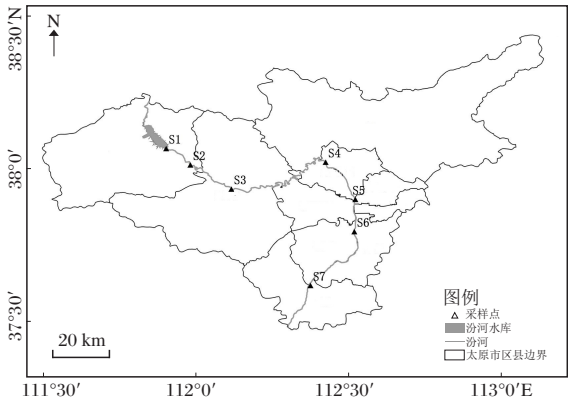


图 1 汾河太原段采样点设置

Fig.1 Location of the seven sampling sites in the Taiyuan section of Fenhe River

1.2 样品采集与处理

汾河太原段结冰期为 12 月中旬至次年 2 月下旬,调查时间为 2014 年 3–12 月,每月采样 1 次。按照浮游动物采集规范(金相灿和屠清英,1990),定性样品用孔径为 64 μm 浮游生物网于水面拖曳采集;定量样品依据采样点不同水位特征,用采水器分层采集 2 L 混合水样,加入福尔马林至终浓度为 4%,沉淀 48 h 后,虹吸管吸去上清液。现场同时采集水样用于理化指标分析。轮虫种类鉴定依据 Koste 分类系统,参考《中国淡水轮虫志》(王家辑,1961)和《中国典型地带轮虫的研究》(诸葛燕,1997)。轮虫生物量(湿重)按照体积法计算(章宗涉和黄祥飞,1991)。

1.3 理化数据测定

现场用 YSI 水质分析仪测定水体 pH、水温(WT)、溶解氧(DO),塞氏黑白盘测定透明度(SD)。根据国家水质监测标准方法,采用钼酸铵分光光度法测定总磷(TP),碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测总氮(TN),高锰酸盐指数(COD_{Mn})参照国家环境保护总局(2002)的方法测定,叶绿素 a(Chl-a)浓度测定参考乙醇免研法(杨玉珍等,2011)。

1.4 数据分析

水体富营养状态评价采用综合营养状态指数(TLI)法(金相灿和屠清英,1990),选取总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD_{Mn})、叶绿素(Chl-a)和透明度(SD)作为评价指标。

运用优势度指数 *Y* 划分优势种。

$$Y=(n_i/N)f_i$$
①

式中:*N*为各站点物种总数;*n_i*为第*i*种的个体数;*f_i*为该物种出现的频率,当 *Y*≥0.02 时,该物种为优势种。

使用 *R* 软件计算轮虫群落 Shannon–Wiener 多样性指数(*H'*)、Pielou 均匀度指数(*J'*),进行群落结构聚类分析和差异显著性分析(analysis of similarities, ANOSIM)。使用 IndVal 函数计算不同营养状态水体指示物种,指示值(IndVal)≥0.5、*P*≤0.05 为指示物种。多因素方差分析物种数、丰度、生物量等各变量的空间和时间差异,检验采用最小显著极差法(Duncan 法)。

应用 Canoco5.0 软件对轮虫组成和环境因子进行排序分析,环境因子数据进行标准化和中心化处理;轮虫丰度经 log(*x*+1)转化和中心化处理。交互正向选择(Interactive forward selection)评估环境变量对响应变量的解释贡献率。蒙特卡罗(Monte Carlo)置换检验(重复 999 次)检验响应变量矩阵和解释变量矩阵线性相关的显著性。

2 结果与分析

2.1 各样点水体营养状态

调查期间汾河太原段水温 3.6–27.2℃,8 月温度最高,12 月温度最低。水体 pH7.63–8.82,略偏碱性。SD 在各站点间差异显著(*P*≤0.05),S1 平均值达 2.37 m,S7 最低只有 0.44 m。DO 夏季较低,冬季较高;在空间水平上 S7 最低,平均值只有 5.04 mg/L,S1~S4 月均值达到 9.86 mg/L。Chl-a 浓度波动较大,样点 S5 和 S6 具有较高浓度,年平均值分别达到 25.92 mg/L 和 26.25 mg/L。各样点 TN 的变化范围为 1.91–3.15 mg/L,TP 变化范围为 0.021–0.465 mg/L。S7 全年的 TP、TN 和 COD_{Mn} 值均较其他样点高。

汾河太原段各站点 TLI 值变化如图 2,S1~S4 的 TLI 平均值在 37.18–44.70,S5、S6 的 TLI 平均值分别为 53.57 和 55.34,S7 的 TLI 值高达 65.02。站点 S1~S4 水体为中营养类型,S5~S6 水体为轻度富营养类型,S7 水体为中度富营养型。

2.2 轮虫群落结构

2.2.1 种类组成及分布 调查期间共检出轮虫 98 种,隶属 3 目 21 科 33 属,蛭态目 1 科 1 属、游泳目 14 科 26 属、真轮盘目 6 科 6 属。其中臂尾轮科种类最多,占全部种类数的 18.4%;其次为异尾轮科,比例达到 12.2%。除 S3 外,龟甲轮属、疣毛轮属和多肢轮属种类在各站点广泛分布。多数轮虫为广温性,也有

一些种群变化具一定季节性,如狭温性叶轮属轮虫只存在于春季,椎尾水轮虫(*Ephiphanes senta*)等适应于较低水温(20℃以下),而较大多肢轮虫(*Polyarthra maior*)、异尾轮属多数种类更喜好较高水温。汾河太原段优势种在各站点组成不同(表1),S5~S7轮虫分布更集中,优势种的优势度合计达到0.5以上。各站点的共有优势种是螺形龟甲轮虫和长肢多肢轮虫。

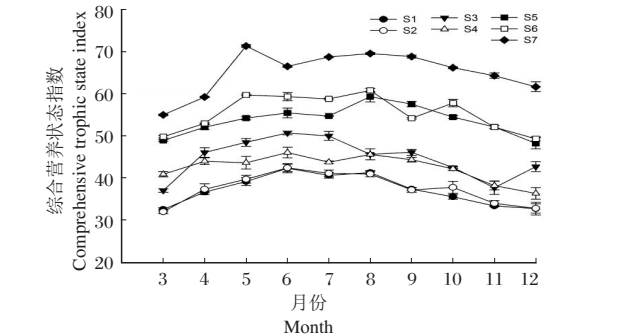


图2 综合营养状态指数变化

Fig.2 Spatiotemporal variation of the comprehensive trophic state index

表1 汾河太原段各站点优势种及优势度

优势种	优势度						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
钩状狭甲轮虫 <i>Colurella uncinata</i>	0.02	0.04	0.03				
盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>	0.02	0.03					
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>			0.02		0.02	0.04	
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>			0.03	0.03	0.08	0.15	
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>						0.05	
壶状臂尾轮虫 <i>B. urceolaris</i>						0.02	
细趾须足轮虫 <i>Euchlanis calpidia</i>		0.03					
大趾须足轮虫 <i>E. dilatata</i>	0.02	0.08	0.03				
舟形龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis navicula</i>				0.02	0.03		
裂痕龟纹轮虫 <i>A. fissa</i>					0.02		
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.09	0.09	0.04	0.08	0.13	0.03	0.04
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	0.04	0.04			0.05		
缘锯龟甲轮虫 <i>K. lenzi</i>					0.05		
柔软龟甲轮虫 <i>K. delicata</i>					0.04		
弯趾锥轮虫 <i>Notommata cyrtopus</i>			0.02				
小巨头轮虫 <i>Cephalodella exigua</i>			0.05				
凸背巨头轮虫 <i>C. gibba</i>			0.03				
卵形无柄轮虫 <i>Ascomorpha ovalis</i>	0.04						
广生多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	0.09	0.06		0.06	0.14	0.15	0.11
长肢多肢轮虫 <i>P. dolichoptera</i>	0.09	0.05	0.03	0.09	0.12	0.16	0.17
较大多肢轮虫 <i>P. maior</i>	0.07	0.03			0.04	0.04	
郝氏皱甲轮虫 <i>Ploesoma hudsoni</i>	0.02						
长足疣毛轮虫 <i>Synchaeta longipes</i>	0.02	0.03					

汾河太原段轮虫多样性指数见图3。S1~S4较高,S4最高,S5~S7较低。方差分析表明,两区间之

间差异显著($P<0.05$)。J'反映S1~S4轮虫群落结构较稳定,而S5~S7轮虫分布较不均匀,其中S6平均值最低,与优势种具有较高丰度有关。

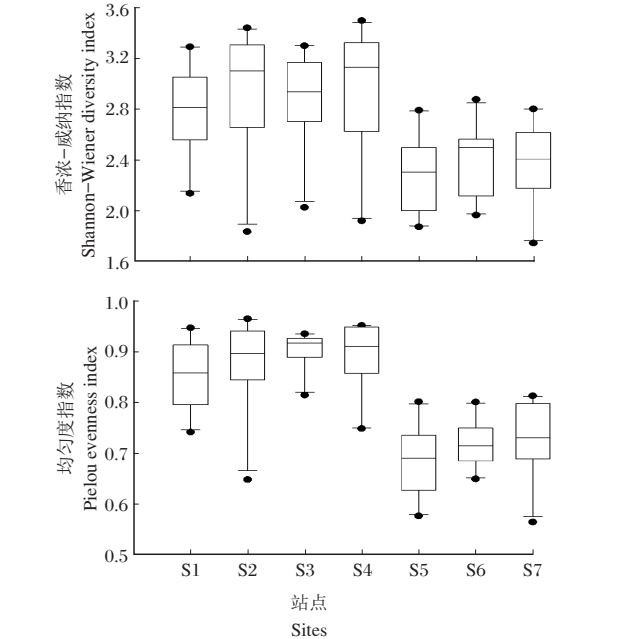


图3 轮虫Shannon-Wiener多样性指数和Pielou指数

Fig.3 Spatial variation of Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness indices among sites

2.2.2 轮虫群落结构动态变化 聚类分析(图4)显示轮虫群落6、7、8月聚为一簇,5、9、10月聚为一簇,丰水季(6-8月)、平水季(5、9、10月)和枯水季(3-4月和11-12月)轮虫组成差异明显(ANOSIM, $r=0.34,P<0.001$)。

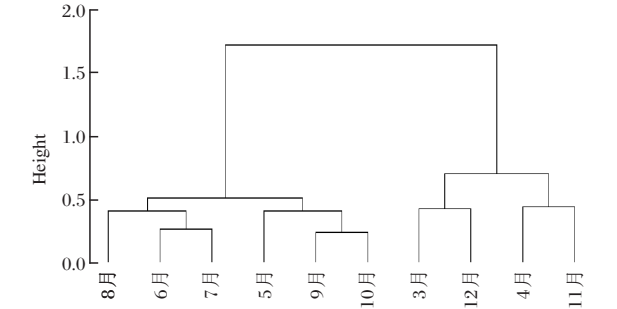


图4 轮虫群落聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of the rotifer community in different months

各站点月轮虫物种数量见图5。6-9月物种数量较多,12月最少。统计分析显示,轮虫物种数量没有空间差异,但有时差异,表现为不同季节之间差异显著($P<0.05$)。

各站点月轮虫丰度及生物量见图6。各站点轮虫丰度的变化范围为48~3 651个/L,统计分析显示S1~S4平均丰度显著低于S5~S7($P<0.05$)。轮虫年均生物量0.469 mg/L,各站点生物量的变化范围是

0.014~2.055 mg/L, S5~S7 平均生物量均显著高于 S1~S4($P<0.05$)。轮虫丰度和生物量同时具有显著的时间差异,枯水期、平水期和丰水期的数值依次增加。轮虫丰度和生物量各站点具有相似的季节变化,3月最低,随水温升高而增加,丰度的峰值多出现在丰水季,但生物量峰值出现的月份与丰度不一致,原因与轮虫组成有关。轮虫优势种表现出季节性分布特征,长肢多肢轮虫和螺形龟甲轮虫在全年各季节均具有优势。疣毛轮虫在枯水季优势度较其他季节高,平水季优势种多达9种,其中龟甲轮属4种。多样性指数和均匀度指数平水期和丰水期无差异,与枯水期差异显著。

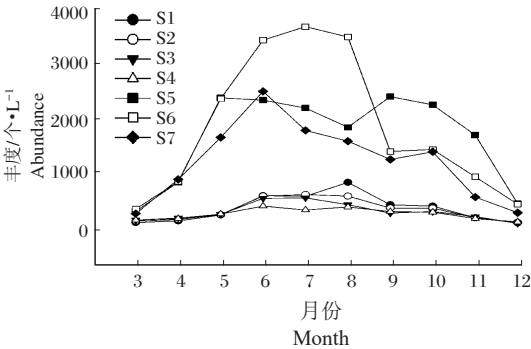


图 6 轮虫丰度和生物量变化

Fig.6 Spatial and temporal variation of rotifer abundance and biomass

2.3 轮虫群落结构与环境关系

中营养类型水体样点(S1~S4)、轻度富营养类型水体样点(S5~S6)和中度富营养型水体样点(S7)之间轮虫群落结构差异极显著(ANOSIM, $r=0.53$, $P<0.001$)。从98种轮虫中筛选出对水体营养状态有偏好的指示种13种,见表2。

表 2 不同营养状态水体指示物种

Tab.2 Indicator species of trophic state in the Taiyuan section of Fenhe River

指示物种	水体类型	指示值	P
卵形无柄轮虫 <i>Ascomorpha ovalis</i>	中营养	0.64	0.001
单趾狭甲轮虫 <i>Colurella unicauda</i>	中营养	0.50	0.001
柔软龟甲轮虫 <i>Keratella delicata</i>	轻度富营养	0.75	0.002
螺形龟甲轮虫 <i>K.cochlearis</i>	轻度富营养	0.67	0.002
缘锯龟甲轮虫 <i>K.lenzi</i>	轻度富营养	0.66	0.004
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	轻度富营养	0.63	0.005
长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>	轻度富营养	0.58	0.002
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	轻度富营养	0.57	0.003
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	中度富营养	0.65	0.002
壶状臂尾轮虫 <i>B.urceolaris</i>	中度富营养	0.62	0.002
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	中度富营养	0.54	0.030
矩形臂尾轮虫 <i>B.leydigi</i>	中度富营养	0.53	0.001
尾突臂尾轮虫 <i>B.caudatus</i>	中度富营养	0.53	0.001

轮虫丰度与环境变量的RDA分析中,经交互式正

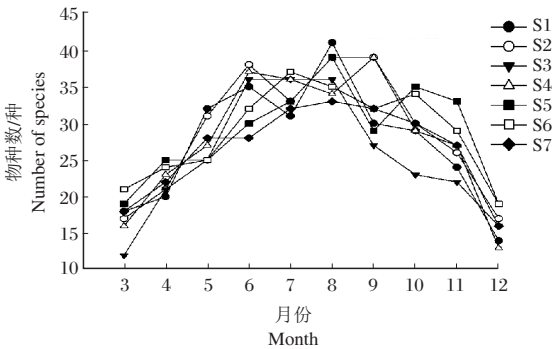
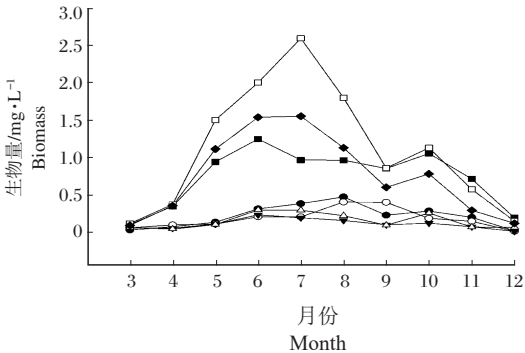


图 5 轮虫物种数变化

Fig.5 Spatiotemporal variation of rotifer species richness

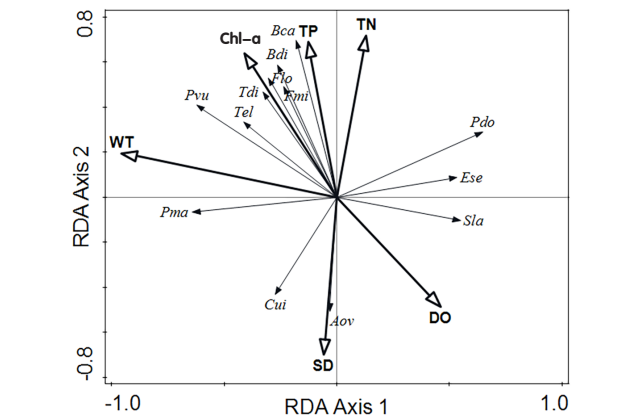


向选择,保留的解释变量为Chl-a、WT、DO、TP、TN和SD。解释变量的VIF值(膨胀系数)均小于10,回归系数稳定,单一贡献具有较好解释意义。环境变量对响应变量的解释率为41.3%。其中WT和Chl-a对约束排序的解释率最高,分别为20.5%和9.2%;SD贡献最小,为6.3%。选用Ⅱ型标尺(scaling Ⅱ)做轮虫种类和环境因子相关双序,见图7。第1轴与WT、DO相关性高,代表轮虫群落结构的季节变化;第2轴与Chl-a、TP、TN正相关,与SD负相关,即轮虫群落结构与水体营养状况有关。田奈异尾轮虫(*Trichocerca dixon-nuttalli*)、三肢轮属轮虫沿Chl-a梯度分布,萼花臂尾轮虫与第2轴相关性较高,指示其丰度随水体营养水平提高而增加;卵形无柄轮虫和单趾狭甲轮虫与SD呈强的正相关,适宜于营养水平较低水体;较大多肢轮虫的丰度则主要随水温升高而增加。在较低水温条件下,锥尾水轮虫、长肢多肢轮虫、长足疣毛轮虫种群数量增加。

3 讨论

3.1 汾河太原段轮虫群落结构特征

汾河太原段各调查样点水生环境异质性高,轮



Aov:卵形无柄轮虫;Bca: 萼花臂尾轮虫;Bdi: 裂足臂尾轮虫;Cui:单趾狭甲轮虫;Ese: 锥尾水轮虫;Flo:长三肢轮虫;Fmi:小三肢轮虫;Pvu:广布多肢轮虫;Pdo:长肢多肢轮虫;Pma: 较大多肢轮虫;Sla:长足疣毛轮虫;Tel:纵长异尾轮虫;Tdi:田奈异尾轮虫

图 7 轮虫丰度与环境变量 RDA 排序

Aov: *Ascomorpha ovalis*; Bca: *Brachionus calyciflorus*; Bdi: *Brachionus diversicornis*; Cui: *Colurella unicauda*; Ese: *Ephiphanes senta*; Flo: *Filinia longisela*; Fmi: *Filinia minuta*; Pvu: *Polyarthra vulgaris*; Pdo: *Polyarthra dolichoptera*; Pma: *Polyarthra maior*; Sla: *Synchaeta longipes*; Tel: *Trichocerca elongate*; Tdi: *Trichocerca dixon-nuttalli*

Fig.7 Redundancy analysis of rotifer abundance and environment variables

虫物种丰富, 龟甲轮属、晶囊轮属、多肢轮属和疣毛轮属的种类广泛存在于各站点。轮虫物种数、丰度、生物量均呈现明显的季节差异, 枯水期数值最低。多数样点轮虫丰度 6 月、7 月达到峰值。8 月随着水温升高, 各站点尤其富营养型的 S5~S7 站点藻类过度繁殖, 有机物呼吸作用增加和死亡藻类分解的共同作用使水域溶解氧降低(Elliott et al, 2005); 另一方面 8 月降水量增加, 高径流量稀释了轮虫丰度。轮虫生物量变化趋势与丰度不一致的原因与轮虫组成变化有关, 7 月及 10 月大型轮虫如晶囊轮虫和疣毛轮虫丰度较高。汾河太原段除了汾河水库放水和天然降雨补水外, 几乎无自然径流补给, 从各调查样点与出水口之间 Bray-Curtis 距离看, 轮虫群落结构差异较大, 各站点的轮虫种类组成和区系分布呈现多样化, 说明局部水体环境也是导致轮虫分布差异的因素。有研究认为群落结构和物种多样性主要由局部环境决定, 不同类型水域中优势物种的形成受到局部条件变化和环境梯度的时空影响(Cottenie & Mecster, 2004; Inaotombi et al, 2016)。S1 水体透明度高, 种类多为浮游和半浮游性种类, 检出有指示寡营养的种类: 卵形无柄轮虫、郝氏皱甲轮虫等(Duggan et al, 2001)。S2 和 S3 水表浅, 水流速度较快, 但水草茂盛, 轮虫全

年丰度低, 附生、着生及底栖的种类如狭甲轮属、须足轮属和腔轮属轮虫具有一定优势。S5 和 S6 为城市人工渠, 水流缓慢, 广布多肢轮虫、裂痕龟纹轮虫、三肢轮虫在群落中占优势, 轮虫总丰度和生物量均较高, 均匀度低。本研究结果与 Zhao 等(2017)研究一致, 物种扩散和水体类型等局部环境决定了不同站点轮虫的丰度、种类分布和优势种的差异。

3.2 环境因子对轮虫丰度与分布的影响

RDA 结果表明影响太原段轮虫季节变化的主要因素是温度, 多数学者认为决定轮虫季节演替的主要因素是水温(Baião et al, 2000, 王晓辉等, 2009), 温度通过影响浮游植物的生长进而影响轮虫群落可利用食物资源, 并且水温升高导致发育时间缩短, 减少世代时间(Walz, 1995; Pavón-Meza et al, 2005)。调查发现温带地区轮虫密度高峰通常发生在夏季(Bērziņš & Pejler, 1989)。汾河太原段物种数、丰度及生物量时间变化均呈现单峰模式, 高峰期均出现在夏季, 冬季显著降低。由于不同轮虫具有不同的温度适应范围, 其种群增长率在水温达到最适温度时最高, 因而出现不同轮虫的季节演替现象(Herzig, 1987)。太原段各季的 IndVal 指示种不同, 枯水季有喜好较低温度的锥尾水轮虫、唇形叶轮虫(*Notholca labis*); 丰水季较大多肢轮虫、异尾轮虫丰度增加, 平水季特征种为尖尾疣毛轮虫(*Synchaeta stylata*)和长足疣毛轮虫。

水体营养状态与轮虫分布密切相关。叶绿素 a 浓度代表浮游藻类植物含量。轮虫主要摄食单胞藻类, 较大个体或多细胞的藻类则不被利用(Ji et al, 2013)。本实验揭示与叶绿素相关性较高的轮虫主要有裂足臂尾轮虫、微型多突轮虫(*Lififerotrocha subtilis*)、裂痕龟纹轮虫、三肢轮虫等, 均具有槌型或槌枝型咀嚼器, 可非选择性地滤食水体中微小藻类, Portinho 等(2016)认为与动态水体相比, 静态水体中浮游植物生物量对于轮虫群落结构的影响更重要。本调查显示静水水体 S5~S6, 叶绿素 a 浓度显著高于其他站点, 上述轮虫优势性更强。总氮和总磷可以通过营养级联间接影响轮虫(Ji et al, 2013)。轮虫种类组成被认为能敏感指示水环境质量, 美国五大湖研究发现轮虫对营养状态响应按营养程度由高到低为: 多肢轮属、龟甲轮属、聚花轮属(Barbiero & warren, 2011)。本研究发现多肢轮属、龟甲轮属生态耐性广, 普遍分布于各站点, 其相对优势度与站点的营养状态有关, IndVal 分析其种类为轻度富营养型水体的指示种。典型食碎屑的三肢轮属、臂尾轮属种类, 被公认为富营养化水域的特征种(Wang et al, 2016;

王博涵等, 2016)。冗余分析指示随营养盐浓度升高, 萼花臂尾轮虫、广布多肢轮虫和三肢轮虫数量增加。S7 呈中度富营养化, 臂尾轮属种类多达 10 种, 优势种和指示种均为指示富营养的种类。轮虫丰度反映食物资源的可利用性, 轮虫的食物随着富营养化进程而增加(Yoshida et al, 2003), 实验观察到轮虫的密度与水体的营养状况成正比(Shao et al, 2001)。本研究结果表明, 不同营养水平站点的轮虫丰度及生物量差异显著, 中营养型的 S1~S4 轮虫丰度为 200~310 个/L, 富营养化程度较高的 S5~S7 轮虫丰度平均值为 1 000~2 100 个/L, 与 Wen(2011)建议使用评价营养状态的轮虫丰度范围吻合。物种多样性指数反映群落中物种的丰富程度和均匀程度, 研究发现湖泊处于中等营养水平时生物群落结构复杂, 物种多样性高, 水体富营养化使物种多样性降低(钱方平等, 2007)。本研究站点由中营养状态(S1~S4)到富营养状态(S5~S7), 轮虫多样性指数和均匀度指数明显下降, S5~S7 优势种总优势度达 0.5 以上。在水体热分层的湖泊中, 溶解氧是影响轮虫垂直分布的主要因素之一(Baião et al, 2000)。汾河太原段各站点水位较浅, 不存在水体分层, 但站点间溶解氧含量差异显著, 其中 S7 溶解氧年均值只有 5.04 mg/L, 其富营养化严重, 有机物分解造成氧消耗增加, 解释了严重富营养条件下, 轮虫生长受到抑制的原因, 轮虫丰度从中营养到中度富营养型水体呈现先增加后减少的趋势。

参考文献

崔苗, 2020. 汾河太原段水质污染现状分析[J]. 山西科技, 35(1): 73-75.

冯佳, 沈红梅, 谢树莲, 2011. 汾河太原段浮游藻类群落结构特征及水质分析[J]. 资源科学, 33(6): 1111-1117.

国家环保总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社.

金相灿, 屠清英, 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社.

钱方平, 席贻龙, 温新利, 等, 2007. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 15(4): 344-355.

王博涵, 李晨, 姜力文, 等, 2016. 济南地区河流轮虫群落结构的时空动态研究[J]. 水生态学杂志, 37(3): 93-101.

王家辑, 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社.

王晓辉, 望甜, 林秋奇, 等, 2009. 南亚热带富营养化抽水型水库轮虫的组成与动态[J]. 湖泊科学, 21(1): 101-109.

杨玉珍, 夏未铭, 杨瑾, 等, 2011. 水体中叶绿素 a 测定方法的研究[J]. 中国环境监测, 27(5): 24-27.

章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.

诸葛燕, 1997. 中国典型地带轮虫的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所.

Auer B, Elzer U, Arndt H, 2004. Comparison of pelagic food webs in lakes along a trophic gradient and with seasonal aspects: influence of resource and predation[J]. Journal of Plankton Research, 26(6): 697-709.

Baião C, Boavida M-J, 2000. Environmental factors determining the structure of rotifer communities in a river-shed reservoir[J]. Aquatic Ecology, 34(4): 369-377.

Barbiero R P, Warren G J, 2011. Rotifer communities in the Leurentian Great Lake, 1983-2006 and factors affecting their composition[J]. Journal of Great Lakes Research, 37: 528-540.

Bērziņš B, Pejler B, 1989. Rotifer occurrence in relation to temperature[J]. Hydrobiologia, 175(3): 223-231.

Cottenie K, Meester LD, 2004. Metacommunity structure: synergy of biotic interactions as selective agents and dispersal as fuel[J]. Ecology, 85(1): 114-119.

Duggan I C, Green J D, Shiel R J, 2001. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state[J]. Hydrobiologia, 446(1): 155-164.

Ekhande A P, Patil J V, Patil R D, 2013. Water quality monitoring—Study of seasonal variation of rotifer and their correlation with physicochemical parameters of Yashwant Lake, Toranmal (M.S.) India[J]. Archives of Applied Science Research, 5(1): 177-181.

Elliott J A, Thackeray S J, Huntingford C, et al, 2005. Combining a regional climate model with a phytoplankton community model to predict future changes in phytoplankton in lakes[J]. Freshwater Biology, 50(8): 1404-1411.

El-Shabrawy G M, Germoush M O, 2014. Seasonal changes and abundance of rotifers in a shallow Manzalah lake (Egypt) [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 14(3): 243-252.

Florescu L, Moldoveanu M, 2017. Species of diversity of planktonic in lotic ecosystems: a case of study of Danube, Sfântu Gheorghe brance[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 16(2): 275-284.

Herzig A, 1987. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for long-term investigation[J]. Hydrobiologia, 147(1): 163-180.

Inaotombi S, Gupta PK, Mahanta PC, 2016. Influence of Abiotic Factors on the Spatio-temporal Distribution of Rotifers in a Subtropical Lake of Western Himalay[J]. Water. Air. & Soil Pollution, 227: 50.

Ji G, Wang X, Wang L, 2013. Planktonic Rotifers in a Subtropical Shallow Lake: Succession, Relationship to Environ-

- mental Factors, and Use as Bioindicators[J]. The Scientific World Journal, 2013: 1–14.
- May L, Spears B M, Dudley B J, et al, 2014. The response of the rotifer community in Loch Leven, UK, to changes associated with a 60% reduction in phosphorus inputs from the catchment[J]. International Review of Hydrobiology, 99(1/2): 65–71
- Miracle M R, Alfonso M T, Vicente E, 2007. Fish and nutrient enrichment effects on rotifers in a Mediterranean shallow lake: a mesocosm experiment[J]. Hydrobiologia, 593(1): 77–94.
- Ooms–Wilms A L, 1997. Are bacteria an important food source for rotifers in eutrophic lakes? [J]. Journal of Plankton Research, 19(8): 1125 – 1141.
- Pavón–Meza E L, Sarma S S S, Nandini S, 2005. Combined effects of algal (*Chlorella vulgaris*) food level and temperature on the demography of *Brachionus havanaensis* (Rotifera): a life table study[J]. Hydrobiologia, 546(1): 353–360.
- Portinho J L, Perbiche–Neves G, Nogueira M G, 2016. Zooplankton community and tributary effects in free–flowing section downstream a large tropical reservoir[J]. International Review of Hydrobiology, 101(1/2) : 48–56.
- Shao Z J, Xie P, Yan Z G, 2001. Long–term changes of planktonic rotifers in a subtropical Chinese lake dominated by filter–feeding fishes[J]. Freshwater Biology, 46(7): 973–986.
- Walz N, 1995. Rotifer populations in plankton communities: energetic and life history strategies[J]. Experientia, 51(5): 437–453.
- Wang C, Wang L, Deng D, 2016. Temporal and spatial variations in rotifer correlations with environmental factors in Shengjin Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 23(8): 8076–8084.
- Wen X L, Xi Y L, Qian F P, et al, 2011. Comparative analysis of rotifer community structure in five subtropical shallow lakes in East China: role of physical and chemical conditions[J]. Hydrobiologia, 661(1): 303–316.
- Yoshida T, Urabe J, Elser J J, 2003. Assessment of “top–down” and “bottom–up” forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario, Canada[J]. Ecological Research, 18(6): 639–650.
- Zhao K, Song K, Pan Y D, et al, 2017. Metacommunity structure of zooplankton in river networks: Roles of environmental and spatial factors[J]. Ecological Indicators, 73: 96–104.
- Zhao K, Wang L Z, Riseng C, et al, 2018. Factors determining zooplankton assemblage difference among a man–made lake, connecting canals, and the water–origin river[J]. Ecological Indicators, 84: 488–496.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Dynamic Changes in Rotifer Diversity and Community Structure in the Taiyuan Section of Fenhe River

GAO Jin-hua, LIU Yao, LI Kang-ning, YUAN Yuan, LI Ya-jing, ZHANG Ling

(Department of Biology, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, P.R.China)

Abstract: Fenhe River is an important tributary of the Yellow River and the primary river in Taiyuan City. However, over exploitation of underground water and discharge of urban domestic sewage have resulted in a water level decline and eutrophication of Fenhe River. In this study, we investigated the community structure of rotifers in the Taiyuan section of Fenhe River, focusing on species composition, spatiotemporal distribution and biodiversity of the rotifer community. Redundancy analysis was used to explore the effects of environmental factors on changes in rotifer community structure. The aim of the study was to provide necessary information for dynamic zooplankton forecasting and diversity conservation in the Taiyuan section and to evaluate the pollution and eutrophication status from an ecosystem perspective. From March to December 2014, monthly investigations of the rotifer community and water quality was carried out at 7 sampling sites in the Taiyuan section: Site 1, Fenhe Reservoir outlet; Sites 2–4, abundant aquatic vegetation and little human disturbance; Sites 5–6, slow water flow; Site 7, heavily polluted. A total of 98 rotifer species from 33 genera, 21 families and 3 orders were identified, and two species dominated year round, *Polyarthra dolichoptera* and *Keratella chochlearis*. During the investigation, rotifer species diversity among the sampling sites was high due to the heterogeneity of the aquatic environment among sites. The monthly average species number was 28, and the ranges of rotifer abundance and biomass were 153–1 440 ind/L and 0.08–0.89 mg/L. Species richness, abundance and biomass of the rotifer community all presented clear seasonal differences, with maximum values during flood season (June–July), and minimum values in dry season (December). Analysis of similarities (ANOSIM) shows that community structure varied significantly among sampling sites and rotifer abundance, biomass, Shannon–Wiener diversity index and Pielou evenness index varied significantly with trophic level. The rotifer abundance at mesotrophic Sites 1–4 was 200–310 ind/L and 1 000–2 100 ind/L at eutrophic Sites 5–7. The Pielou evenness and Shannon–Wiener diversity indices decreased dramatically from mesotrophic Sites 1–4 to eutrophic Sites 5–7. Indicator species scores (IndVal analysis) show that *Ascomorpha ovalis* and *Colurella unicauda* are indicators of mesotrophic water, *Keratella delicata* and *K. cochlearis* are indicators of slightly eutrophic water, and *Brachionus* species indicate moderately eutrophic water. According to redundancy analysis (RDA), environmental variables explained 41.3% of the variation in community structure and water temperature, chlorophyll-a, dissolved oxygen, transparency and total nitrogen were the primary factors affecting the spatial and temporal distribution of the rotifer community. Rotifer community structure was shown to be a reliable indicator of trophic status in the Taiyuan section of Fenhe River.

Key words: species diversity; trophic status; zooplankton; redundancy analysis