DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2020.01.009

氮磷汇人驱动下的河流轮虫群落演替

陈星宇^{1,2},刘雨泽³,郭逍宇¹,熊 薇^{2*} ¹首都师范大学,北京 100048;²中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; ³北京市第十四中学,北京 100053

摘要:【目的】解析污染条件下河流生物区系的演替过程及机制,可以为生物多样性减少提供诊断,为生物多样性保护和水生生态系统的生态安全提供科学支撑。【方法】以对污染具有指示作用的轮虫类群为研究对象,选择覆盖京津冀地区的、受到人类活动干扰的北三河水系为研究区域,分别对该区域富营养化相关水质参数和轮虫群落组成进行分析,在解析污染物排放导致的河流水体水质差异和轮虫群落组成差异的基础上,阐明导致轮虫群落演替的关键污染因子。【结果】水体水质指标的分析结果表明,西部河流与东部诸河具有明显不同的环境条件,其氮、磷指标(包括总氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷及活性



开放科学标识码 (OSID 码)

磷)浓度显著增加。轮虫群落的分析结果表明,与东部诸河相比,西部河流的物种数目、生物个体数、物种丰度及香农威纳 指数均显著降低,且群落组成显著差异。群落-环境相关分析显示,总氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷、活性磷以及氨氮 是导致群落显著差异的关键环境因子。【结论】北三河水系西部河流的氮、磷含量显著高于东北部河流;在环境条件改变的 前提下,北三河水系西部河流比东部河流物种丰度、生物量均显著减少,同时群落组成也显著改变,高耐污型物种出现。 氮、磷元素的输入是导致轮虫群落演替的关键环境因子。

关键词:轮虫;水体污染;群落演替;生物多样性;富营养化

Nitrogen and phosphorus inputs affect rotifer communities in rivers

CHEN Xingyu^{1,2}, LIU Yuze³, GUO Xiaoyu¹, XIONG Wei^{2*}

¹Capital Normal University, Beijing 100048, China; ²Research Center for Eco-Environmental Sciences,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ³Beijing No.14 High School, Beijing, 100053, China

Abstract: [Aim] Analyzing succession processes and mechanisms of river biota stressed by pollution can help understand biodiversity loss, develop conservation plans, and promote safe management of aquatic ecosystems. [Method] The present study investigated causes and consequences of nutrient-related environmental variables on the variation of rotifer communities in the Beisanhe drainage in Beijing-Tianjin-Hebei region, which was typically polluted by various anthropogenic activities. Rotifer communities were chosen as analytical target taxa in rivers, because they were sensitive indicator of water pollution. After analyzing the variation of rotifer communities and related environmental conditions, we illustrated critical environmental determinants affecting rotifer communities. [Result] Water was highly polluted in west part (H group) of the Beisanhe drainage, with sampling sites having higher levels of nitrogen and phosphorus (total and dissolved) than those in east part (L group). In addition, compared to communities in L group, species richness, the number of individuals, and Shannon-Wiener index were significantly lower in H group. Community composition between H and L groups significantly differed. Moreover, analyses on community-environmental interactions showed that the variation among communities was significantly related to the total nitrogen, total phosphorus, dissolved total phosphorus, soluble reactive phosphorus and ammonia nitrogen. [Conclusion] Water quality and rotifer communities between H and L groups were significantly affected by nitrogen and phosphorus inputs in the Beisanhe drainage.

Key words: rotifers; water pollution; communities succession; biodiversity; eutrophication

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31800307)

作者简介:陈星宇,女,硕士研究生。研究方向:污染生态学。E-mail: yu1518363870@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), E-mail: weixiong@rcees.ac.cn

生物多样性急剧减少已成为全球关注的重要 生态环境问题,生物多样性决定机制已被列为科学 界面临的25大重要科学问题之一(Pennisi, 2005)。 全球河流生物多样性受威胁程度研究结果表明,中 国是河流生物多样性锐减的重灾区之一 (Vörösmarty et al., 2010),水体污染是导致生物多 样性迅速减少的五大重要因素之一(Dudgeon et al.,2006)。我国河流正面临严峻的污染问题,根据 2003—2013年的调查统计,我国淡水水体污染具有 时间长、污染范围持续扩大的特点(Cai et al., 2017)。其中,海河流域是七大流域中污染最严重 的区域。在 2005—2015 年间,该流域有大于 60% 的河段水质处于V类或劣V类水平(中华人民共和 国环境保护部,2016)。人类活动介导的氮磷输入 是河流水体水质恶化的重要原因之一,极易导致水 体富营养化发生,成为水生态系统健康和生态安全 的重要威胁(Pernet-coudrier et al., 2012; Vörösmarty et al., 2010; Wang et al., 2019; Xiong et al., 2019) o 同时,水体富营养化问题还与人口密度及气候相 关,密集的城市人口导致营养物质大量排放,干旱 半干旱气候导致的降雨量减少使富营养化问题进 一步恶化(Nyenje et al., 2010),从而导致水体缺氧、 鱼类死亡、藻类暴发等→系列生态环境问题。虽然 氮磷输入对典型类群如鱼类以及初级生产者藻类 的影响已有报道,但在污染条件下,河流生物区系 的演替规律及其机制未得到很好解答,而这一问题 的解析是诊断多样性急剧减少的关键,同时也是生 物多样性保护亟待解决的科学问题。

浮游动物是河流典型的无脊椎动物生物类群, 主要包括甲壳类的枝角类和桡足类、轮虫以及原生 动物四大类群。它们主要以水体藻类、细菌以及有 机碎屑为食,同时被鱼类等脊椎动物捕食,是河流 食物网中能量传递和物质流动的中间环节(Yoshida et al.,2003)。因此,从河流生态系统的物质、能量 流动角度来看,浮游动物具有重要的生态学意义。 其中,轮虫是在污染河流中丰度最高的浮游动物类 群,对污染响应迅速,对水体污染具有潜在的指示 作用(Ejsmont-karabin,2012)。另外,Duggan et al. (2002)通过对新西兰31个湖泊轮虫群落的研究分 析发现,轮虫群落组成受到水体透明度、总磷浓度、 湖泊平均深度以及叶绿素浓度的影响。Wang et al. (2010)和 Xiong et al.(2016)分别对我国长江流域 湖泊和海河流域河流轮虫群落开展了研究,结果一 致表明轮虫群落组成与水体总氮水平显著相关。 另外,Yang et al. (2017)对太湖及入湖支流浮游动 物的分析结果表明,轮虫丰度与氨氮显著相关,与 枝角类及桡足类相比,轮虫对氨氮耐受性更高。因 此,解析污染条件下轮虫群落的演替规律对于阐明 河流生物区系对污染的响应具有重要意义。

北三河水系地处半干旱气候地区,流经京津冀 地区,是海河流域九大水系之一,由东部的温榆 河—北运河、中部的潮白河—潮白新河以及东部的 蓟运河3条主干道河道组成,最终汇入渤海。其西 部毗邻北京市、天津市,东部处于河北市内。西部 温榆河为北京市的排污受纳河流,北京市污水处理 厂出水由清河、坝河、凉水河等汇入温榆河以及下 游北运河。已有研究表明,温榆河—北运河磷含量 为0.3~5.3 mg·L⁻¹,氮含量为3.0~49 mg·L⁻¹,而氨 氮(0.6 mg·L⁺¹)和亚硝酸盐氮(≥ 1 mg·L⁻¹)的浓 度均超过了毒性水平,且氮、磷来源为城市的污水排 放(Pernet-coudrier et al., 2012)。Yang et al. (2018) 对温榆河—北运河后生浮游动物群落与环境的相互 关系研究结果表明,温榆河段河流的氮磷浓度最高, 同时氮磷浓度的改变与浮游动物群落的地理分布 显著相关。因此,北三河西部河流,尤其是温榆河 受到了严重的氮磷污染,解析北三河不同河流的轮 虫群落组成及其决定机制,将对该区域的河流生态 退化诊断、生物多样性保护提供重要的理论支撑. 也将为京津冀地区的生态安全保障提供指导。

1 材料与方法

1.1 采样点设置及样品采集

在北三河水系的西部河流设置 11 个采样点, 主要分布于排污受纳河流温榆河,为本研究的 H 组 样点;另外,在东部诸河流中设置 15 个代表性采样 点,为本研究的 L 组样点(图 1)。这些采样点为海 河流域北三河生态调查监测站点,样点设置参见 Xiong *et al.*(2016)。

为了获得轮虫群落定量样本,本研究在每个采 样点取 30 L 水通过 20 μm 漏斗形浮游生物网过滤 收集所有浮游动物样本,并保存于 5%的福尔马林 溶液中,定容终体积为 100 mL,用于轮虫群落形态 学鉴定分析。同时,在每个样点采集 500 mL 水样, 用于水体的理化指标测定。所有样品均冷藏于 4 ℃冰箱,并尽快运回实验室进行分析。



国 1 JUニババホホ中点 Fig.1 Sampling sites in Beisanhe drainage

1.2 轮虫群落组成分析及水质指标测定

为了定量分析每个样点的轮虫群落组成,本研 究在 100 mL 保存样品中取出 2 mL 样品全部进行镜 检计数,且此过程重复 3 次,最终取平均值并换算为 每升水中的物种密度。在每次取出镜检样品之前, 摇匀样品瓶,以保证样品在瓶中均匀分布,以减少随 机取样带来的误差对结果的影响。本研究物种鉴定 采用光学显微镜完成,根据不同物种的形态特征尽 量鉴定到种水平,但是个别属的轮虫种类由于固定 保存后鉴定特征丢失,只鉴定到属水平,例如异尾轮 属、犹毛轮属和巨头轮属等。

为了研究污水排放对水体营养水平的影响,本 研究共测定了 8 个理化指标,包括现场探头测定的 水体温度(water temperature, WT),以及实验室测 定的总磷(total phosphorus, TP)、溶解性总磷(dissolved total phosphorus, DTP)、活性磷(soluble reactive phosphorus, SRP)、总氮(total nitrogen, TN)、溶 解性总氮(dissolved total nitrogen, DTN)、硝酸盐氮 (nitrate nitrogen, NO₃-N)和氨氮(ammonia nitrogen, NH₄-N)。其中,TP、SRP、TN、NO₃-N和NH₄-N采用 国标法测定;DTN和DTP采用电感耦合等离子体 发射光谱仪(ICP-OES,OPTIMA 2000,珀金埃尔默, 美国)测定。

1.3 数据分析

1.3.1 水质差异性分析 为了分析 2 组样点间水 质因子的差异,本研究采用主成分分析 (principle component analysis, PCA)的方法基于 8 个测定的 环境变量的欧式距离对 26 个样点进行排序分析, 排序结果中距离越相近的点,环境条件越相似。为 了进一步统计单个环境变量在组间的差异显著性 水平,本研究采用了非参数曼-惠特尼 U 检验对 8 个环境变量分别进行差异显著性检验分析。

1.3.2 轮虫群落差异性分析 根据群落组成分析 的结果,本研究首先统计每个样点的生物多样性, 包括总物种数目(S)、总个体数目(N)、物种丰富度 (d)、香农威纳指数(H)和均匀度(J)。采用非参数 曼-惠特尼 U 检验对 H 组和 L 组间的生物多样性 指数进行差异水平检验。另外,为了分析样点间的 组成差异,本研究首先采用非度量多维尺度分析 (non-metric multidimensional scaling, NMDS)基于物 种组成的 Bray-Curtis 不相似性对 26 个样点进行排 序分析,同时采用相似性分析(analysis of similarity, ANOSIM)对H组和L组间的群落差异性进行差异 水平检验。为了进一步深入分析导致 H 组和 L 组 样点轮虫群落组成差异的物种,本研究采用相似百 分比分析(similarity of percentage, SIMPER)对H组 和L组样点轮虫群落的代表性物种分别进行了识 别。同时,对H组和L组样点轮虫群落差异贡献率 最高的物种进行了识别。

1.3.3 轮虫群落与水质变量的相互关系分析 在 环境条件以及群落差异分析的基础上,本研究采用 基于 spearman 相关的 mantel 检验对每个环境变量 与轮虫群落组成差异的相关性进行了分析,以识别 出与轮虫群落显著相关的环境因子。另外,本研究 采用基于线性模型的冗余分析(redundancy analysis,RDA)对环境因子与群落组成进行建模分析,以 建立样点、物种以及环境变量三者之间的关系。为 了增加所构建模型的可靠性,本研究在进行 RDA 分析之前通过计算每个环境变量的膨胀因子(inflation factors)对环境因子进行筛选,剔除具有共线性 的环境变量,以建立节俭、可靠的 RDA 模型,正确 揭示样点、物种以及环境变量三者之间的关系。

2 结果与分析

2.1 环境差异性

环境变量测定结果表明,H组样点的TN、DTN、 TP、DTP和SRP的平均值要明显高于L组,曼-惠 特尼U检验结果显示,2组间的TN、DTN、TP、DTP和SRP具有极显著差异(P < 0.001,表1),而WT、 NO₃-N和NH₄-N无显著差异。PCA排序结果表明,H组样点和L组样点清晰地聚为2簇。2个分 析显示,2组样点的环境条件明显不同(图2)。从 样点在环境梯度上的分布来看,H组样点的氮(TN 和 DTN)、磷(TP、DTP 和 SRP)相关指标明显高于 L组样点。同时,PCA 排序图中 TN、DTN、TP、DTP 和 SRP 变量相互间呈锐角关系,表明这些变量间具 有极强的相关性。

表 1 H 组和 L 组各环境变量的均值±标准差 及组间差异性 U 检验分析

 Table 1
 Mean values of the environmental variables of the H and L groups. Mann-Whitney U tests were used to compared the two groups

环境变量 Environmental variables	H 组 H group	L 组 L group	P值 P value
水体温度 WT	23.59 ± 0.45	23.16±1.07	0.760
总磷 TP	2.22 ± 0.22	0.77 ± 0.09	< 0.001
总溶解性磷 DTP	1.68 ± 0.11	0.69 ± 0.09	< 0.001
活性磷 SRP	1.48 ± 0.10	0.65 ± 0.09	< 0.001
总氮 TN	16.11±1.13	7.31 ± 0.78	< 0.001
溶解性总氮 DTN	15.08 ± 0.93	6.69 ± 0.69	< 0.001
硝酸盐氮 NO ₃ -N	0.83 ± 0.10	1.65 ± 0.36	0.134
氨氮 NH ₄ -N	6.94±1.09	4.84±0.79	0.134



yariables based on Euclidean distance

2.2 群落演替规律

轮虫群落组成分析结果表明,在研究的 26 个 样点中共检测到 44 个轮虫种类。H 组样点平均总 物种数为 6.2 种,平均总生物个体数为 1008 个;L 组样点平均物种数为 10.8 种,平均生物个体数为 2904 个。另外,从图 3 可以看出,H 组样点不仅是 总物种数目(S)、总生物个体数目(N)明显低于 L 组样点,同时物种丰度(d)、香农威纳指数(H)以及 均匀度(J)均低于 L 组样点。对组间多样性指数进 行曼-惠特尼 U 检验结果显示,除均匀度指数外,H 组与L组间的总物种数目、总生物个体数目物种丰 富度、香农威纳指数的差异程度均为极显著差异水 平(P<0.001)。



communities in H and L groups

S:总物种数目;N:总生物个体数目;d:物种丰富度; H:香农威纳指数;J:均匀度。

S: Number of species; N: Number of individuals;
 d: Species richness; H: Shannon-wiener's index; J: Evenness,
 *** : P<0.001; ** : P<0.01; * : P<0.05.

相似百分比分析结果表明,H组典型物种为壶 状臂尾轮虫 Brachionus urceolaris Müller 和角突臂尾 轮虫 B. angularis Gosse, L 组典型的物种为针簇多 肢轮虫 Polyarthra trigla Ehrenberg 和萼花臂尾轮虫 B. calyciflorus Pallas (表 2)。NMDS 排序结果表明, H和L组群落在排序图中主要群落聚为2个不同 的簇,ANOSIM 的差异性程度分析显示,2 组样点在 群落组成上的差异已达到显著性水平(ANOSIM, R=0.194; P<0.01, 图 4)。因此, H 和 L 组群落在组 成上具有显著差异。物种对组间群落差异的贡献 率分析结果表明,H组群落的物种丰度减少以及物 种的有无均是组间群落差异重要原因。其中,迈氏 三肢轮虫 Filinia maio (Colditz)、蒲达臂尾轮虫 B. budapesllensis Daday 和奇异巨腕轮虫 Hexarthra mira (Hudson)丰度的减少对组间群落差异性共贡献了 17.32%;沟痕泡轮虫 Pompholyx sulcate Hudson 和叉 爪单趾轮虫 Monostyla furcate Murray 的有无对组间 群落差异性共贡献了 8.98%(表3)。

Table 2

				01
组别 Groups	代表性物种 Typical species	丰度 Abundance	平均相似性 Average similarity	贡献率 Contribution/%
H组H group	壶状臂尾轮虫 Brachionus urceolaris	210.00	10.79	24.13
	角突臂尾轮虫 Brachionus angularis	124.09	10.31	23.06
L组L group	针簇多肢轮虫 Polyarthra trigla	687.00	8.33	15.76
	萼花臂尾轮虫 Brachionus calyciflorus	149.00	8.26	15.64

表 2 基于相似百分比分析(SIMPER)的 H 组和 L 组典型代表性轮虫物种鉴定 Characteristic species found in H and L groups and their contributions to the similarity of communities in the group



图 4 基于群落 Bray-Curtis 不相似性的 非度量多维尺度分析

Fig.4 Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) analysis of rotifer communities based on Bray-Curtis dissimilarity

2.3 关键污染因子识别

Mantel 相关分析结果表明,样点间 TN(r= 0.356;P=0.001)、DTN(r=0.3454;P=0.001)、TP(r =0.316;P=0.002)、DTP(r=0.375;P=0.001)、SRP (r=0.370;P=0.001)和 NH₄-N(r=0.148;P=0.039) 的差异均与群落组成差异显著相关。

膨胀因子分析筛选出 TP、NH₄-N、WT 和 NO₃-N 的膨胀因子系数<10,为非共线性变量。基于这4 个非共线性变量,本研究成功构建了可靠的 RDA 模 型(全模型 Trace=0.277; P=0.024)。基于 RDA 模 型的样点、物种及环境变量的三序图显示(图 5),H 组与L组样点分布于不同的 TP 梯度上,H组样点 分布于较高的 TP 环境中,且物种卜氏晶囊轮虫 Asplanchna brightwellii Gosse、椎轮属 Notommata sp.和 长三肢轮虫 F. longiseta (Ehrenberg)与 TP 正相关。 而L组样点分布于低 TP 梯度,其中蒲达臂尾轮虫、 迈氏三肢轮虫以及角突轮虫 B. angularis Gosse 均与 TP 浓度呈负相关。NH₄-N 浓度的变化不是导致 H 组与L组群落组成差异的主要原因,但是 NH₄-N 浓 度的变化与L组组内群落差异相关。

3 讨论

3.1 河流水质差异

本研究结果表明,西部河流(温榆河)的 TN、TP、

DTN、DTP 以及 SRP 的浓度均显著高于东部诸河(包 括潮白河、蓟运河及其支流)。Yang et al. (2018)对温 榆河的水质监测结果也发现,温榆河具有较高的 TN、 TP 浓度,其平均值分别为 40.7、5.09 mg · L⁻¹。榆河 毗邻北京市,其水源一部分来自于上游的沙河水库, 另一部分主要由4个支流(清河、坝河、通惠河和凉水 河)汇入的来自北京市排放的废水组成(Heeb et al., 2012)。据报道,未处理的生活污水、畜禽养殖污水排 放导致温榆河土游沙河水库水质溶解性无机磷 (DIP)含量达 3.2 mg・L⁻¹, NH₄-N 含量为 33 mg・L⁻¹ (Pernet-Coudrier et al., 2012)。同时, 汇水支流的水 质研究结果表明,其TN、TP浓度范围分别是4.26~ 27.04、0.06~2.42 mg · L⁻¹。因此,大量营养物质通过 支流汇入温榆河。另外,污水氮磷排放与区域人口基 数呈正相关关系(Wang et al., 2019)。因此, 温榆河 作为北京市重要的排污河流,与北京市密集人口密度 相关。而东部诸河虽然较温榆河氮磷浓度较低,但是 其 TN、TP 平均浓度分别为 7.31、0.77 mg・L⁻¹。根据 我国地表水环境质量标准(GB 3838—2002),均超过 地表水V类水标准。Xiong et al. (2017) 对潮白河的研 究结果表明,在潮白河下游区域较密云水库上游保护 区,其TN含量增加1倍,而TP含量增加近70倍,潮 白河下游主要受到农业面源污染的影响。张婉璐等 (2012)对蓟运河的水质评价结果也表明,蓟运河水质 均为V类水水平。潮白河、蓟运河及其支流流经天 津、河北多个市,包括廊坊市、承德市,因此受到人类 活动的影响较大。

3.2 轮虫群落组成关键影响因子

本研究结果表明,系氮磷输入导致北三河水的 营养盐相关指标显著增加,轮虫群落物种数目、个 体数目、香农威纳多样性指数以及均匀度显著降 低、轮虫群落组成显著改变。Xiong et al. (2019)在 松花江流域针对浮游动物群落的研究的结果也表明, 尽管松花江流域的营养盐浓度显著低于北三河水 系,营养盐浓度的变化与轮虫群落组呈显著相关。

表 3 基于相似百分比分析(SIMPER)的组间差异重要贡献(累积贡献率>65%)的物种

Table 3 Lists of species which primarily contributed to the variation between H and L groups using the similarity of percentage analysis. A cut-off of 65% cumulating contribution were adopted to avoid listing all species

Marth c	平均丰度 Average abundance		标准差	贡献率
初州 Species	H组H group	L组L group	Standard deviation	Contribution/%
迈氏三肢轮虫 Filinia maio	34.09	157	1.03	6.07
蒲达臂尾轮虫 Brachionus budapesllensis	1.36	22	1.01	5.82
奇异巨腕轮虫 Pedalia mira	6.82	59	1.01	5.43
针簇多肢轮虫 Polyarthra trigla	21.82	687	0.88	5.43
沟痕泡轮虫 Pompholyx sulcate	0	29	1.03	5.38
长三肢轮虫 Filinia longisela	305.45	24	0.88	5.15
晶囊轮虫属 Asplanchna sp.	2.73	32	0.84	4.88
异尾轮虫属 Trichocerca sp.	135	573	0.78	4.80
曲腿龟甲轮虫 Keratella valga	2.73	71	0.85	4.76
壶状臂尾轮虫 Brachionus urceolaris	210	232	0.64	4.01
萼花臂尾轮虫 Brachionus calyciflorus	125.45	149	0.63	3.84
叉爪单趾轮虫 Monostyla furcate	0	15	0.69	3.60
裂痕龟纹轮虫 Anuraeopsis fissa	5.45	53	0.74	3.56
角突臂尾轮虫 Brachionus angularis	124.09	541	0.52	2.99





已有研究表明,水体营养程度对轮虫群落的影响主要来自于2个方面:一方面是直接作用,主要 是高浓度的氨氮或者亚硝酸盐氮对生物个体的毒 害作用,以及寡营养环境的资源缺乏对轮虫群落组 成带来影响;另一方面是间接影响,包括通过降低 水体的氧浓度、pH值等对轮虫群落带来不利影响 (王泪等,2017),以及通过影响水体藻类生长、微生 物生长、捕食者丰度来影响轮虫群落的组成及丰度 (鲁耀鹏等,2017; Duggan *et al.*,2002)。例如,轮虫 丰度与叶绿素 a 浓度正相关, 广布多肢轮虫在叶绿 素 a 高的静态水体易形成优势种(梁迪文等, 2017)。本研究中, 群落演替同时受到 SRP 等无直 接毒害作用营养盐因素以及氨氮的影响, 可以推断 在北三河轮虫群落同时受到了环境条件的直接和 间接作用的影响。RDA 分析显示, 水体营养水平变 化对群落差异解释量的估计为 27.7%, 表明除了受 到水体营养水平的影响外, 轮虫群落同时也受到其 他本研究未检测环境污染变量的影响。前人实验 室培养实验已经证明,农药β-六六六和十氯丹能导 致萼花臂尾轮虫种群胚胎发育时间显著缩短、世代 时间显著延长(查春旺,2007),环境激素双酚A、阿 特拉津、西维因和久效磷能延迟轮虫幼体发育(陆 正和,2013)。

3.3 轮虫群落对河流污染的指示作用

本研究显示了轮虫群落组成与河流水体污染 物具有密切响应关系,这一结果表明轮虫群落是河 流水质评价的潜在对象。虽然大型无脊椎动物(陈 义永等,2018;李朝等,2018)以及硅藻(陈向等, 2017)是国内外河流水质生物评价的典型对象,但 是轮虫在水质评价中的作用是这 2 种生物类群不 可替代的。首先,轮虫对水质营养盐浓度变化的迅 速响应得到全球多个地域水体的研究的验证,包括 生态环境状况良好的新西兰地区的湖泊水体(Duggan et al., 2002)、中国污染最严重的海河流域的河 流水体(Xiong et al., 2016)以及中国沿长江流域的 富营养化湖泊水体(Wang et al., 2010)等;其次,轮 虫对水质变化的指示作用是由浮游动物在食物链 中承上启下的位置决定的,作为河流浮游动物群落 的主导组成类群,其多样性的变化既可以反映自下 而上的环境响应,也可以反映自上而下的环境效应 (García-chicote et al., 2018)。更有多种轮虫种类为 营养水平的指示种,如左其亭等(2017)通过污染指 示种的组成及群落多样性指数对淮河中上游进行 了水质评价。

本研究中高污染区(H组)代表性物种为壶状 臂尾轮虫和角突臂尾轮虫,二者分别为β中污型及 β-α 中污型指示物种;低污染区(L组)代表性物种 为针簇多枝轮虫和和萼花臂尾轮虫,二者分别为寡 污到 β 中污型(o-β) 和 β-α 中污型指示种。因此, 本研究中代表性物种的组成也指示出了高污染区 比低污染区更高的营养水平。另外,基于轮虫群落 指示种的 E/O 指数(即富营养型指示种数与贫营 养型指示种数比值)以及 QB/T 指数(即臂尾轮虫 属的种数与异尾轮虫属的种数比值)已频繁应用于 湖泊、水库水质评价(鞠永富等,2016;李共国和虞 左明,2003)。而这些水质评价指标的应用以轮虫 极广生态幅度为基础,该类群从寡营养水体到腐生 水体均存在。另外,轮虫能生存于特殊极端环境如 污水处理厂的活性污泥(寇海涛等,2018)及pH≤3 的酸性水体(Deneke, 2000)。另一方面, 大型底栖

生物群落往往在河道疏浚等环境修复工程中遭到 破坏,并在短期内难以恢复,而浮游动物群落在工 程实施后可以迅速恢复(刘国锋等,2010)。因此, 在污染河流水质评价过程中应将轮虫列为生物评 价对象,尤其是针对富营养化河流。

参考文献

- 查春旺,2007. β-六六六和十氯丹对萼花臂尾轮虫实验种群 动态的影响.硕士学位论文.芜湖:安徽师范大学.
- 陈向,周伟奇,李伟峰,2017.北京河流底栖硅藻沿城乡梯 度带空间分布及其季节变化.生态学报,37(10):3586-3595.
- 陈义永,高养春,彭衡,熊薇,李世国,战爱斌,2018. 松花 江流域大型底栖动物群落结构与水质评价. 生物安全学 报,27(2):95-104._____
- 鞠永富,于洪贤,于婷,柴方营,姚允龙,张延成,费滕, 夏凌云,2016.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,36(16):5126-5132.
- 寇海涛,曹文平,马天仪,曹俊,2018. 污水处理系统中原 生动物和微型后生动物的作用研究. 工业安全与环保, 44(5):42-44.
- 李朝, 蔡吉林, 杨靖, 2018. 徐州市云龙湖大型底栖动物群 落演变及环境影响因子分析. 生物安全学报, 27(2): 105-110.
- 李共国, 虞左明, 2003.千岛湖轮虫群落结构及水质生态学 评价. 湖泊科学, 15(2): 169-176.
- 梁迪文, 王庆, 魏南, MILOSLAV D, 杨宇峰, 2017. 广州市 不同类型水体轮虫群落结构的时空变动及与理化因子间 的关系. 湖泊科学, 29(6): 1433-1443.
- 刘国锋,张志勇,刘海琴,钟继承,严少华,范成新,2010. 底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质影响. 环境科学,31(11):2645-2651.
- 鲁耀鹏,王冬梅,张秀霞,李军涛,郑佩华,冼健安,2017. 淡水螯虾生理生态学与环境毒理学研究进展.生物安全 学报,26(4):266-272.
- 陆正和,2013. 四种环境激素对萼花臂尾轮虫生活史及生 殖影响. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学.
- 王汨,杨柏贺,孟云飞,殷旭旺,徐宗学,2017.北运河水 系河流轮虫群落结构与水环境因子的关系.暨南大学学 报(自然科学与医学版),38(6):467-474.
- 张婉璐,魏占民,徐睿智,李彦,郑向群,2012.基于模糊 综合评判法的天津蓟运河水环境质量评价.内蒙古农业大 学学报(自然科学版),33(2):124-128.
- 中华人民共和国环境保护部, 2016. 2015 中国环境状况公报. (2016-06-02) [2019-07-20]. http://www.mee.gov.cn/

gkml/sthjbgw/qt/201606/t20160602_353138.htm.

- 左其亭,陈豪,张永勇,窦明,刘静,2017.淮河中上游轮 虫群落结构分析及水质评价.环境工程学报,11(1): 165-173.
- CAI J, VARIS O, YIN H, 2017. China's water resources vulnerability: a spatio-temporal analysis during 2003—2013. *Journal of Cleaner Production*, 142; 2901–2910.
- DENEKE R, 2000. Review of rotifers and crustaceans in highly acidic environments of pH values ≤ 3. Hydrobiologia, 433 (1/3): 167–172.
- DUDGEON D, ARTHINGTON A H, GESSNER M O, KAWA-BATA Z I, KNOWLER D J, LÊVÊQUE C, NAIMAN R J, PRIEUR-RICHARD A H, SOTO D, STIASSNY M L J, SULLIVAN C A, 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81(2): 163–182.
- DUGGAN I C, GREEN J D, SHIEL R J, 2002. Distribution of rotifer assemblages in North Island, New Zealand, lakes: relationships to environmental and historical factors. *Fresh*water Biology, 47(2): 195–206.
- EJSMONT-KARABIN J, 2012. The usefulness of zooplankton as lake ecosystem indicators: rotifer trophic state index. *Polish Journal of Ecology*, 60(2): 339–350.
- GARCÍA-Chicote J, ARMENGOL X, ROJO C, 2018. Zooplankton abundance: a neglected key element in the evaluation of reservoir water quality. *Limnologica*, 69: 46-54.
- HEEB F, SINGER H, PERNET-COUDRIER B, QI W, LIU H, LONGREE P, MULLER B, BERG M, 2012. Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system. *Environmental Science & Technology*, 46 (16): 8680-8688.
- NYENJE P M, FOPPEN J W, UHLENBROOK S, KULABA-KO R, MUWANGA A, 2010. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa—a review. *Sci*ence of the Total Environment, 408(3): 447–455.
- PENNISI E, 2005. What determines species diversity? Science, 309: 90.
- PEMET-COUDRIER B, QI W, LIU H, MULLER B, BERG M, 2012. Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China. *Environmental Science & Technology*, 46(10): 5294–5301.
- VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O,

DUDGEON D, PRUSEVICH A, GREEN P, GLIDDEN S, BUNN S E, SULLIVAN C A, LIERMANN C R, DAVIES P M, 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467: 555.

- WANG X, DAIGGER G, DE VRIES W, KROEZE C, YANG M, REN N Q, LIU J X, BUTLER D, 2019. Impact hotspots of reduced nutrient discharge shift across the globe with population and dietary changes. *Nature Communications*, 10: 2627.
- WANG S, XIE P, GENG H, 2010. The relative importance of physicochemical factors and crustacean zooplankton as determinants of rotifer density and species distribution in lakes adjacent to the Yangtze River, China. *Limnologica*, 40(1): 1–7.
- XIONG W, LI J, CHEN Y, SHAN B, WANG W, ZHAN A, 2016. Determinants of community structure of zooplankton in heavily polluted river ecosystems. *Scientific Reports*, 6: 22043.
- XIONG W, NI P, CHEN Y, GAO Y, LI S, ZHAN A, 2019.
 Biological consequences of environmental pollution in running water ecosystems: a case study in zooplankton. *Environmental Pollution*, 252: 1483-1490.
- XIONG W, NI P, CHEN Y, GAO Y, SHAN B, ZHAN A, 2017. Zooplankton community structure along a pollution gradient at fine geographical scales in river ecosystems: the importance of species sorting over dispersal. *Molecular Ecology*, 26(16): 4351-4360.
- YANG Y, NI P, GAO Y, XIONG W, ZHAO Y, ZHAN A, 2018. Geographical distribution of zooplankton biodiversity in highly polluted running water ecosystems: validation of fine-scale species sorting hypothesis. *Ecology and Evolution*, 8(10): 4830–4840.
- YANG J, ZHANG X, XIE Y, SONG C, SUN J, ZHANG Y, GIESY J P, YU H, 2017. Ecogenomics of zooplankton community reveals ecological threshold of ammonia nitrogen. *En*vironmental Science & Technology, 51(5): 3057–3064.
- 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. *Ecological Research*, 18(6): 639–650.

(责任编辑:郑姗姗 郭莹)