

水文脉冲影响下南四湖浮游植物和大型底栖动物群落的不同变化特征^{*}

李 庆¹⁾ 王国强^{1)†} 谢 刚²⁾ 彭岩波²⁾

(1)北京师范大学水科学研究院,城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,100875,北京;

2)山东省环境规划研究院,250101,山东济南)

摘要 水文脉冲影响着湖泊水生态系统,人工调水工程引起的水文脉冲使这种影响更加复杂.本研究分别调研了南四湖在非调水期和调水期内的浮游植物和大型底栖动物以及相应的水质和底泥中的重金属,分析了调水引起的水文脉冲影响下浮游植物和大型底栖动物群落的变化特征.结果显示:在一个脉冲周期内,调水期的浮游植物总密度减小,群落中蓝藻门占比下降,而绿藻门和硅藻门占比增加,优势种更替剧烈,这些变化更多的是由脉冲式调水引起的水质改变和季节变化引起的温度差异共同导致的.南四湖中大型底栖动物群落主要包括软体动物、水生昆虫类和水生寡毛类,且由软体动物主导.一个脉冲周期内的大型底栖动物群落结构稳定,优势种更替较弱,物种多样性指数变化较小.对比南水北调工程实施之前的结果,南四湖中浮游植物群落年内变化更明显,且物种多样性整体下降.大型底栖动物群落随着水质的优化和底泥中重金属分布的改变,逐渐由小体型的水生昆虫主导变为由大体型的软体动物主导.这些结果表明调水引起的水文脉冲对浮游植物的影响在短期和长期均有明显体现,对大型底栖动物更多的体现在长期累积性影响.

关键词 水文脉冲;南水北调;浮游植物;大型底栖动物;南四湖

中图分类号 S718.52;Q958.8

DOI: 10.12202/j0476-0301.2020178

0 引言

水文水质变化对湖泊中水生态系统有着明显影响,人工调水工程往往会打破原有水文格局,改变湖泊水文条件,影响湖泊水质,这种剧烈的改变影响了水生生物的栖息环境,进而控制着湖泊中水生生物的群落结构和分布^[1].水文脉冲是以脉冲形式表现的一种水文类型.在一个周期内,水量或流速在时间尺度上有幅度和宽度变化,具有重复性,表现为脉冲的形式^[2-4].通常情况下,自然降雨的时空不均匀引起的水文脉冲多表现为季节性脉冲和洪水脉冲^[5-6].调水工程在调水期调入大量外源水,而在非调水期结束,这种间断且重复的调水方式形成了新的水文脉冲,进而影响着湖泊水生态系统.南水北调工程是解决我国北方缺水问题,改善生态环境状况的重要措施.在南水北调东线工程影响下,沿线湖泊在调水期接受外源水的补充,在非调水期结束调水.非调水期和调水期的转换,使受水水体的水位、水量、水体停留时间等波动都较大^[7],水质也发生相应改变.南四湖具有维护区域生态平衡等重要功能,是南水北调东线工程上重要的输水通道和调蓄湖泊,调水引起的水文脉冲使南四湖水生态系统更加复杂.

浮游生物生命周期短,繁殖速度快,能够快速反映外界环境的变化,因此浮游植物更适用于在数据长度不足的情况下研究水生态的变化^[8-10].而底栖生物主要生活在湖泊沉积环境中,具有体型较大,迁移速度慢,生命周期长的特点,其群落的破坏和重建需要相对较长的时间,对外界干扰的响应不是很及时,更能反映环境变化对水生态系统的长期影响,因此用大型底栖动物的群落特征评价湖泊环境长期变化具有优越性.南四湖中关于水生生物的许多研究,也多以浮游植物或者浮游动物为研究对象,探讨了群落结构的变化,并进行了环境驱动因子的识别^[11-13],也分析了调水工程对浮游生物和底栖动物的影响.有研究认为运行初期,不同季节浮游植物群落结构比较稳定,无明显变化^[11,14],浮游植物丰度的季节性变化也很小^[15].而底栖动物在调水后

^{*} 国家科技重大专项资助项目(2017ZX07302004)

[†] 通信作者:王国强(1978—),男,教授,博士.研究方向:水文学研究. e-mail: wangqg@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-26

一段时间内呈下降趋势,这与水中氮磷和有机物的分布有关^[16]。但是很少有研究从水文脉冲的角度出发,分析调水工程对南四湖水生生物的影响。本研究将一个调水周期看作一个脉冲周期,基于非调水期和调水期的野外调研数据和室内分析结果,分别分析了南四湖中浮游植物和大型底栖动物的群落结构、优势种、物种多样性的变化,同时根据水质和底泥中重金属指标的变化,分析了生物群落分布和环境因子之间的相关性,从短期影响和长期累积性影响的角度,探讨了基于调水的水文脉冲对水生生物群落的影响,以期对水利工程建设对水生态系统的影响提供理论支撑。

1 研究区概况

南四湖位于山东省西南部,是我国北方最大的淡水湖泊,由4个湖泊相连而成,自北向南依次为南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖,并由二级坝分为上级湖和下级湖^[17](图1)。南四湖多年平均水深只有1.44 m,属于典型的浅水湖泊。上下级湖常年存在水位差。南四湖流域冬季寒冷少雨,夏季高温多雨,降雨年内分配极不均匀,其中汛期降水占全年的70%以上^[18],降水形成径流是湖泊主要的入流,沿湖土地利用类型主要以耕地为主。

南水北调东线工程是调取长江水,途经山东,经南四湖等多个调蓄湖泊后,流入胶东地区和天津。2013年11月,南水北调东线一期工程正式通水。南四湖作为输水通道和调蓄湖泊,参与调水6 a。调水期间,外源水自韩庄闸进入南四湖下级湖形成调水入流,经过二级坝泵站进入上级湖,再由上级湖北端进入梁济运河。非调水期间以及南水北调工程实施以前,南四湖的入湖流量主要来自于自然降水汇成的径流,无调水

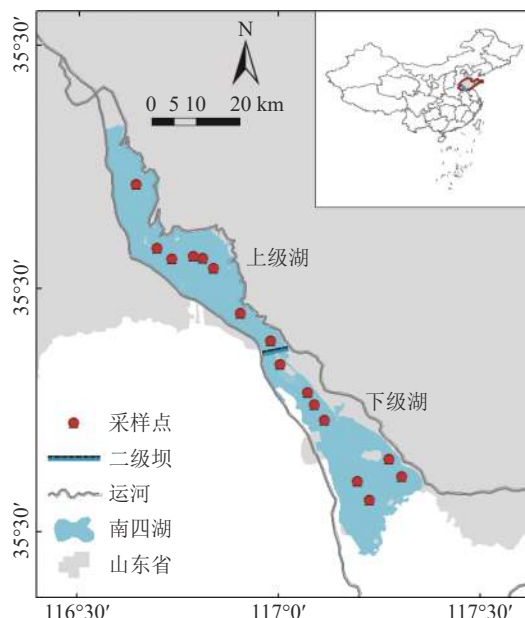


图1 研究区概况及采样点分布

入流。2018—2019年南四湖调水时期为2018年11月—2019年5月。

2 数据与方法

2.1 样品采集与检测 分别于非调水期(2018年7月)和调水期(2019年3月)在南四湖的16个采样点处进行水质、底泥以及水生态的采集,形成一个调水周期的调研。水质检测指标包括:总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和化学需氧量(COD)的质量浓度;底泥中检测指标包括镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铁(Fe)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)等元素的质量分数。在采集水样和底泥样品的同时也采集了浮游植物和大型底栖动物。在实验室内进行各指标的检测,并进行浮游植物和大型底栖动物的鉴定和分类。

2.2 数据处理与分析 物种优势度计算式为

$$Y_i = \frac{n_i}{N} \times f_i, \quad (1)$$

式中: n_i 为第 i 种物种的密度; N 为物种总密度; f_i 为第 i 种物种的出现频率; Y_i 为第 i 种物种的优势度值,选取 $Y_i > 0.02$ 作为优势种。

物种多样性以 Shannon-Wiener 指数来表征,计算式为

$$H_j = - \sum_i \frac{n_{ij}}{N_j} \times \log_2 \frac{n_{ij}}{N_j}, \quad (2)$$

式中 n_{ij} 为第 j 个点位上第 i 种物种的密度, N_j 为第 j 个点位上的物种总密度, H_j 为第 j 个点位的 Shannon-

Wiener 指数值.

冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 被用来进行物种分布和环境因子之间相关性的分析, 其中去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 的最长轴均 <3 .

3 结果

3.1 浮游植物和大型底栖动物组成及群落结构

3.1.1 群落结构分析 本研究在南四湖中一共鉴定出浮游植物共 8 门 79 属, 分别包括蓝藻门、甲藻门、裸藻门、金藻门、硅藻门、隐藻门、黄藻门和绿藻门. 其中蓝藻门、硅藻门和绿藻门是优势门 (图 2), 其占比在非调水期内分别为上级湖中的 53%、12%、19% 和下级湖中的 50%、10%、17%, 在调水期间内分别为上级湖中的 9%、41%、25% 和下级湖中的 20%、23% 和 34%. 在时间上, 不论是在上级湖和下级湖中, 非调水期和调水期浮游植物群落的总密度和结构变化均较大. 相比于非调水期, 调水期内的浮游植物总密度下降幅度更大, 同时蓝藻门的占比呈下降趋势, 而硅藻门和绿藻门的占比均表现出上升的趋势. 在空间上, 南四湖上级湖和下级湖之间的浮游植物总密度十分相近, 其群落结构虽然变化较小, 但仍有不同. 调水期间的上下级湖浮游植物群落结构的变化明显大于非调水期间, 尤其是蓝藻门、硅藻门和绿藻门等优势门. 调水期间, 下级湖中蓝藻门和绿藻门占比大于上级湖同期结果, 硅藻门的占比则小于上级湖的同期结果, 同时, 硅藻门、绿藻门、金藻门在上级湖中占据优势, 绿藻门、硅藻门、蓝藻门在下级湖中占据优势.

同时鉴定出 28 种大型底栖动物, 分别属于软体动物、水生寡毛类和水生昆虫类, 其中软体动物占据了绝对优势, 其占比在非调水期和调水期间内分别为上级湖中总密度的 86%、86% 和下级湖中的 95%、93%, 其次分别是水生昆虫和水生寡毛类 (图 3). 在时间上, 调水期间的大型底栖动物总密度呈下降趋势, 群落结构的变化较小, 其中软体动物的占比变化并不明显, 水生昆虫的占比上升, 而水生寡毛类则小幅度趋势. 在空间上,

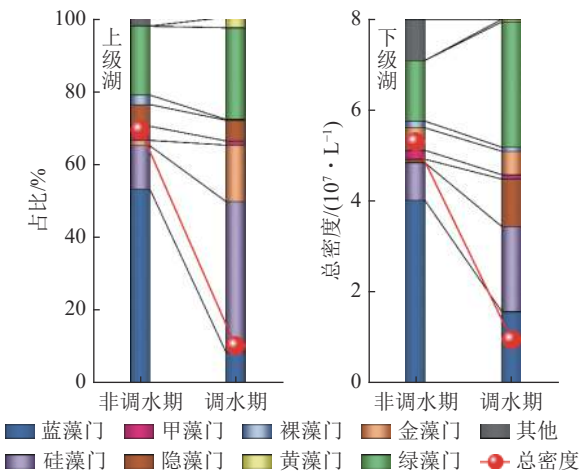


图 2 南四湖上下级湖中浮游植物群落结构

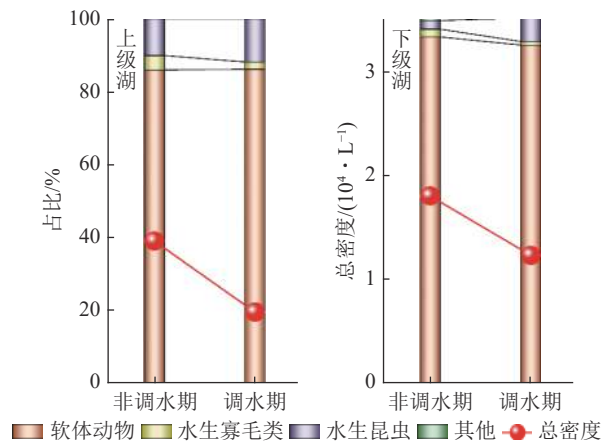


图 3 南四湖上下级湖中大型底栖动物群落结构

下级湖中大型底栖动物的总密度大于同期上级湖中的总密度, 同时软体动物的占比均大于上级湖中的同期结果, 相应的, 水生昆虫类和水生寡毛类的占比则小于上级湖中的同期结果.

3.1.2 优势种分析 研究期间, 上下级湖中的浮游植物在不同时期内共有 3 种重复的优势种, 其中包括微囊藻属、菱形藻属和隐藻属 (表 1). 从空间上看: 非调水期内, 上下级湖中分别鉴定出浮游植物优势种 13 和 12 种, 有 11 种重复优势种, 其中席藻属有最高的优势度值; 调水期间, 上下级湖中分别鉴定出优势种 13 和 8 种, 有 5 种重复优势种, 其中菱形藻属和锥囊藻属的优势度值较高. 从时间上看: 上级湖在非调水期和调水期均筛选出 13 种优势种, 其中有 5 个重复优势种; 下级湖在不同时期分别筛选出 12 和 8 种优势种, 其中仅有 4 种是重复优势种. 整体上看, 浮游植物的优势种在不同空间和时间上的变化都较大.

研究期间内, 上下级湖的不同时期内的优势种有时间和空间上的差异性. 整体上, 赤豆螺、梨形环棱螺和中国田园螺在不同时期的上下级湖中均有出现, 且赤豆螺保持了绝对的优势地位. 从空间上看: 非调水期间, 上下级湖中的大型底栖动物中分别筛选出 6 种优势种, 其中 5 种优势种是相互重复的; 调水期间, 上下级湖

中分别筛选出优势种 6 和 8 种, 其中 4 种是重复的. 从时间上看, 上级湖的优势种在非调水期和调水期内有 4 种是重复的, 下级湖的优势种中有 5 种是重复的. 整体上, 大型底栖动物的优势种在时间和空间上具有明显的稳定性, 优势种更替较弱(表 2).

表 1 不同时期内浮游植物的优势种及其优势度

非调水期				调水期			
上级湖	优势度	下级湖	优势度	上级湖	优势度	下级湖	优势度
微囊藻属	0.07	微囊藻属	0.04	微囊藻属	0.02	微囊藻属	0.07
菱形藻属	0.04	菱形藻属	0.03	菱形藻属	0.15	菱形藻属	0.16
隐藻属	0.06	隐藻属	0.06	隐藻属	0.06	隐藻属	0.04
席藻属	0.23	席藻属	0.23	直链藻属	0.05	直链藻属	0.03
蓝纤维藻属	0.02	蓝纤维藻属	0.04	锥囊藻属	0.15	锥囊藻属	0.13
色球藻属	0.06	色球藻属	0.03	小环藻属	0.04	小球藻属	0.16
平裂藻属	0.04	平裂藻属	0.03	根管藻属	0.03	绿球藻属	0.04
颤藻属	0.04	颤藻属	0.05	针杆藻属	0.04	颤藻属	0.05
螺旋藻属	0.07	螺旋藻属	0.07	脆杆藻属	0.03		
小环藻属	0.03	小环藻属	0.02	舟形藻属	0.03		
薄甲藻属	0.03	薄甲藻属	0.02	席藻属	0.03		
栅藻属	0.05	小球藻属	0.05	衣藻属	0.03		
四孢藻属	0.02			小球藻属	0.15		

表 2 不同时期内大型底栖动物的优势种及其优势度

非调水期				调水期			
上级湖	优势度	下级湖	优势度	上级湖	优势度	下级湖	优势度
赤豆螺	0.27	赤豆螺	0.28	赤豆螺	0.37	赤豆螺	0.20
梨形环棱螺	0.04	梨形环棱螺	0.06	梨形环棱螺	0.03	梨形环棱螺	0.07
中国田园螺	0.14	中国田园螺	0.04	中国田园螺	0.09	中国田园螺	0.04
卵萝卜螺	0.10	卵萝卜螺	0.15	红裸须摇蚊	0.04	红裸须摇蚊	0.03
大脐圆扁螺	0.07	大脐圆扁螺	0.08	直缘萝卜螺	0.06	卵萝卜螺	0.03
羽摇蚊	0.08	中华圆田螺	0.03	羽摇蚊	0.04	大脐圆扁螺	0.02
						纹沼螺	0.10
						狭萝卜螺	0.03

3.1.3 物种多样性分析 在非调水期内, 南四湖上下级湖中浮游植物的平均 Shannon 指数分别为 4.21 和 4.17, 大型底栖动物的平均 Shannon 指数分别为 2.32 和 2.10; 在调水期内, 上下级湖中浮游植物的平均 Shannon 指数分别为 3.47 和 3.00, 大型底栖动物的平均 Shannon 指数分别为 2.26 和 2.36. 整体上, 南四湖中浮游植物的多样性指数大于大型底栖动物. 浮游植物的多样性指数在时间上变化较大, 而在空间上变化有限, 而大型底栖动物的多样性在时间上和空间上均表现出明显的稳定性(图 4).

3.2 水质指标和底泥中重金属的分布 研究期间, 南四湖的水质和底泥中的指标在非调水期和调水期均表现出明显不同. 相较于非调水期间, 调水期间的上下级湖中的 4 个水质指标中 TN、TP 变化较小, NH₄-N 略微减小, COD 指标则明显增大, 而底泥中的各重金属指标均小于非调水期的结果. 上级湖和下级湖中各指标的对比结果显示, 上级湖中的 COD 指标在调水期间明显大于下级湖, 但是在非调水期间并没有明显差距. 同时, 上级湖中包括 Cr 在内的 5 个重金属指标在调水期间明显小于下级湖中的结果, 而上级湖中的 Zn 在非调水期间明显大于下级湖的同期结果(图 5).

3.3 生物群落分布与环境因子之间的相关性 水生生态系统中的水质和沉积物环境共同影响水生物群落, 不

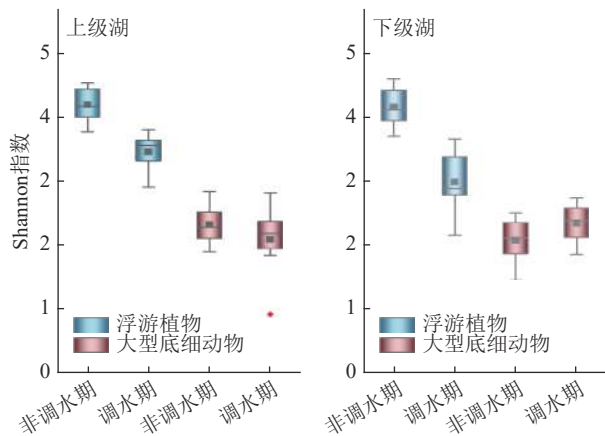


图 4 浮游植物和大型底栖动物的 Shannon 指数分布

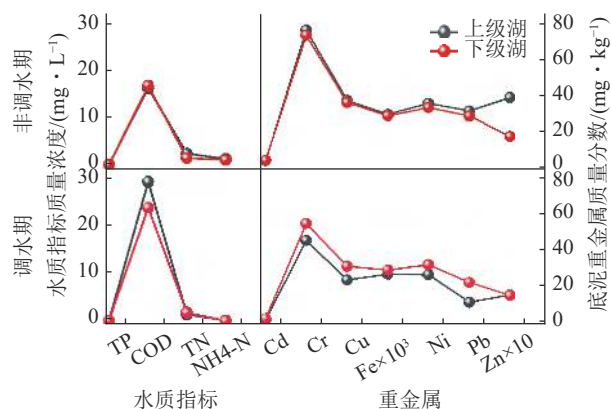


图 5 南四湖上下级湖中水质和底泥重金属指标分布

同影响因素对水生物分布的影响作用大小不一.为了更好地理解环境对生物的影响,对主要影响因子的识别是有必要的.对于浮游植物群落,上级湖中主要影响浮游植物群落分布的因子是水中的 TN,下级湖中的主要影响因子是 $\text{NH}_4\text{-N}$.对于大型底栖动物,其主要接触环境既包括水又包括直接接触的底泥,上级湖中大型底栖动物群落的主要影响因子为底泥中的 Zn,下级湖中大型底栖动物群落的主要影响因子是水中 COD(图 6).

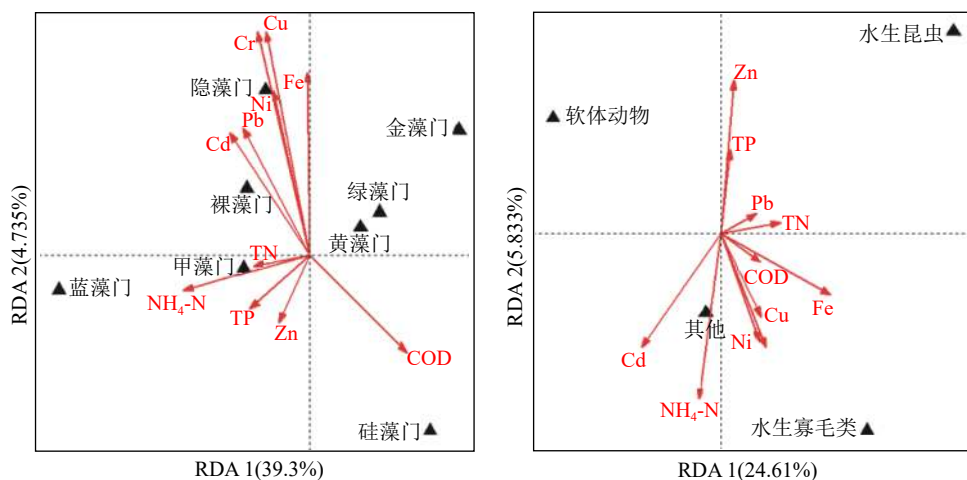


图 6 南四湖浮游植物和大型底栖动物群落与环境因子的冗余分析

4 讨论

4.1 水文脉冲影响下浮游植物群落的变化特征 南四湖在非调水期间未接受调水入流,在调水期间接受调水入流,形成脉冲式调水,在这种影响下浮游植物群落发生了不同程度的变化.在一个调水周期内,整体上,浮游植物群落结构在非调水期和调水期有明显差异,其中以优势种蓝藻门减少,绿藻门和硅藻门增多最为明显.根据 RDA 结果(图 6)可知, COD 与绿藻门和硅藻门分布呈正相关,而与蓝藻门分布呈负相关,南四湖在调水期间 COD 指标的明显增大可能是浮游植物群落中蓝藻门占比减少,而绿藻门和硅藻门占比明显增大的原因之一.温度的升高有利于蓝藻的主导地位^[19],因此除了水质之外,季节变化引起的温度变化也是影响蓝藻剧烈变动的主要原因.相比于非调水期,温度在调水期间的降低也会影响浮游植物的物种多样性.物种多样性结果(图 4)显示,调水期间上下级湖中浮游植物的物种多样性明显下降,温度的下降缩小了具有不同生态位要求的物种的生态位,导致物种数量减少,从而使多样性指数降低^[20].根据优势种的时空分布结果(表 1),非调水期和调水期的优势种重复率较低,说明了浮游植物群落在一个调水周期内的优势种更替剧烈,这也有可能是调水与季节变化共同对浮游植物群落的影响.同时,非调水期间,上级湖中优势种的重复率很高,但是在调水期间,上下级湖中优势种的重复率却偏低,季节变化对水生物的影响是同步的,但是上下级湖中浮游植物优势种的变化却相差较大,这说明了调水引起的水文脉冲对浮游植物群落有着无法忽视的影响.

与调水前的研究结果进行对比, 相同时期的南四湖的 Shannon 指数整体呈下降趋势^[9], 其群落结构也发生了一些变化. 调水工程实施以前, 不同季节的浮游植物群落虽然有一些变化, 但是基本均由蓝藻门、硅藻门和绿藻门主导^[15], 而调水工程实施之后, 调水期所处季节中浮游植物的主导门类发生变化, 其中变化最明显是裸藻门占比的迅速减少. 裸藻门的分布与水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 密切正相关, 而与调水工程实施前相比, 本次研究期间的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 大幅度减少, 这可能是造成裸藻门占比减少的原因之一. 因此, 水文脉冲对浮游植物群落的影响, 不仅体现在短期内优势种的剧烈更替及总密度的变化, 还体现在长期影响下优势门类的变化.

4.2 水文脉冲影响下大型底栖动物群落的变化特征 水文脉冲不仅影响着湖泊中浮游植物, 还对大型底栖动物产生了影响. 相比于非调水期间, 调水期间的软体动物的占比变化较小, 水生昆虫类占比增大, 而水生寡毛类略微减小, 但是整体变化较小. 同时, 大型底栖动物的优势种在非调水期和调水期的重复种较多, 说明大型底栖动物的优势种在短期水文脉冲的影响下具有明显的稳定性. 除此之外, 不同时期的 Shannon 指数结果显示大型底栖动物的物种多样性变化较小. 这些结果均表明, 在短期水文脉冲的影响下大型底栖动物群落具有明显的稳定性, 这可能是由于大型底栖动物的主要生活环境是底泥, 而调水入流对底泥环境的影响具有迟滞作用. 根据 RDA 结果(图 6), COD 和 Zn 对大型底栖动物群落分布具有重要影响, 而这 2 个指标在不同时期发生明显变化, 但是大型底栖动物群落并没有随着这 2 个环境指标的改变而出现剧烈变化, 这可能是由于大型底栖动物的生命周期较长, 2 次调研时间间隔不足以体现环境因子的改变对大型底栖动物群落的影响. 已有研究也表明, 短期内不同季节中底栖动物群落变化不大^[21], 因此在短期水文脉冲的影响下, 大型底栖动物群落较稳定.

南四湖已经参与调水 6 a, 长期以来, 由调水引起的水文脉冲对大型底栖动物群落造成了累积性影响. 前期调研显示, 南水北调实施之前, 南四湖的大型底栖动物群落是由水生昆虫类主导^[22], 即使后来逐渐变为软体动物主导^[23], 其在群落中的占比优势较小. 这与本研究中软体动物占据绝对主导地位的现状大有不同, 这可能是水质的变化造成的. 随着南水北调的实施, 入湖污染物的控制, 南四湖水质逐渐优化, 相比与南水北调实施之前, 现阶段的水质得到有效控制^[24], 水质的改变影响了大型底栖动物群落. 同时, 随着水质的优化, 大型底栖动物逐渐由小体型的水生昆虫和水生寡毛类主导变为由大体型的软体动物主导(图 3 和 5), 这一结果也与其他研究结论相一致^[25-26]. 调水实施后大型底栖动物群落的改变也与重金属的空间分布变化有一定关系. 一个脉冲周期内, 非调水期间底泥中重金属指标的变化并不明显, 在调水期间, 上级湖中几乎所有重金属指标均小于下级湖, 这一结果也与其他研究结果一致^[27], 却与调水工程实施之前的重金属分布有所不同. 调水工程正式实施之前, 南四湖中基本呈现上级湖比下级湖重金属污染严重的空间特征^[28]. 这种转变是由于调水期外源水带来了外源的重金属, 影响了南四湖中重金属的分布^[27], 进而影响着大型底栖动物群落的结构和分布. 因此, 调水引起的水文脉冲对大型底栖动物群落具有长期累积性影响.

5 结论

水文脉冲影响着湖泊水生态系统, 南水北调东线工程将调水期和非调水期明显分开, 形成了基于调水的水文脉冲, 使南四湖的水生态系统更加复杂. 在这种影响下, 浮游植物群落和大型底栖动物群落呈现出不同的变化特征. 短期水文脉冲影响下, 南四湖中浮游植物群落包括蓝藻门、甲藻门、裸藻门、金藻门、硅藻门、隐藻门、黄藻门和绿藻门, 且由蓝藻门、绿藻门和硅藻门主导, 相比于非调水期, 调水期的浮游植物总密度减小, 群落中优势门占比变化明显, 优势种更替剧烈, 这些变化更多的是由水文脉冲引起的水质改变以及季节变化引起的温度变化共同导致. 大型底栖动物群落主要包括软体动物、水生昆虫类和水生寡毛类, 且由软体动物主导, 从非调水期到调水期, 大型底栖动物群落结构变化并不明显, 其优势种更替较弱, 物种多样性指数也较稳定. 长期水文脉冲影响下, 南四湖中浮游植物群落的年内变化更明显, 且物种多样性整体下降. 随着水质的优化和底泥中重金属分布的改变, 南四湖中大型底栖动物群落逐渐由小体型的水生昆虫主导变为由大体型的软体动物主导. 所以水文脉冲对南四湖中浮游植物群落的影响在短期和长期均有明显体现, 大型底栖动物群落的变化更多地体现了水文脉冲对南四湖中水生态系统的长期累积性的影响.

6 参考文献

- [1] GALIR BALKIĆ A, TERNJEJ I, ŠPOLJAR M. Hydrology driven changes in the rotifer trophic structure and implications for food

- web interactions [J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(1): 1917
- [2] TUTTLE C L, ZHANG L, MITSCH W J. Aquatic metabolism as an indicator of the ecological effects of hydrologic pulsing in flow-through wetlands [J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(6): 795
- [3] SONG K, LEE S H, MITSCH W J, et al. Different responses of denitrification rates and denitrifying bacterial communities to hydrologic pulsing in created wetlands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1721
- [4] YE C, CHENG X, ZHANG K, et al. Hydrologic pulsing affects denitrification rates and denitrifier communities in a revegetated riparian ecotone [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 137
- [5] ARIAS M E, COCHRANE T A, NORTON D, et al. The flood pulse as the underlying driver of vegetation in the largest wetland and fishery of the Mekong Basin [J]. *Ambio*, 2013, 42(7): 864
- [6] WINEMILLER K, MONTAÑA C, ROELKE D, et al. Pulsing hydrology determines top-down control of basal resources in a tropical river-floodplain ecosystem [J]. *Ecological Monographs*, 2014, 84: 621
- [7] 郭玉雪, 张劲松, 郑在洲. 调东线工程江苏段多目标优化调度研究 [J]. *水利水电快报*, 2018, 39(12): 3
- [8] LIU Q, PEI H, HU W, et al. Assessment of trophic status for nansi lake using trophic state index and Phytoplankton Community [C] // in 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBEIEEE Xplore, 2010, 2010: 1
- [9] TIAN C, LU X, PEI H, et al. Phytoplankton variation and its relationship with the environmental factors in Nansi Lake, China [J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(1): 295
- [10] LUO Z, LI S, HOU K, et al. Spatial and seasonal bacterioplankton community dynamics in the main channel of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Research in Microbiology*, 2019, 170(1): 24
- [11] TIAN W, ZHANG H Y, ZHAO L. The relationship between phytoplankton evenness and copepod abundance in Lake Nansihu, China. *Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(9): 855
- [12] 陈磊, 高东泉, 舒凤月, 等. 浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *动物学杂志*, 2016, 51(1): 113
- [13] TIAN W, ZHANG H, ZHANG J, et al. Biodiversity effects on resource use efficiency and community turnover of plankton in Lake Nansihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12): 11279
- [14] 冷春梅, 董贯仓, 王亚楠, 等. 南水北调运行初期东平湖浮游植物群落特征分析 [J]. *水产学杂志*, 2019, 32(1): 22
- [15] TIAN W, ZHANG H, ZHAO L, et al. Responses of a phytoplankton community to seasonal and environmental changes in Lake Nansihu, China [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(10): 1877
- [16] 孟姣. 南四湖和东平湖浮游生物和底栖动物群落不同时间尺度的变化 [D]. 济南: 山东大学, 2017,
- [17] 武周虎, 慕金波, 谢刚, 等. 南四湖及入出湖河流水环境质量变化趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(9): 1167
- [18] 田莉娟, 薛丽芳, 杨慧, 等. 近60年来南四湖流域降水变化特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 201
- [19] GRAY E, ELLIOTT J A, MACKAY E B, et al. Modelling lake cyanobacterial blooms Disentangling the climate - driven impacts of changing mixed depth and water temperature [J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(12): 2141
- [20] YANG Y, STENGER K C, PADISÁK J, et al. Effects of winter severity on spring phytoplankton development in a temperate lake (Lake Erken, Sweden) [J]. *Hydrobiologia*, 2016, 780(1): 47
- [21] 易雨君, 杨雨风, 张尚弘, 等. 浅水湖泊底栖动物栖息地模拟 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(05): 90-96.
- [22] 舒凤月, 张承德, 张超, 等. 南四湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 184
- [23] 翟晓萌. 南四湖大型底栖动物研究及水质评价 [D]. 济南: 山东师范大学, 2013
- [24] 徐好, 桑国庆, 杨丽原, 等. 近十年来南四湖水水质时空变化特征研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2019(2): 47
- [25] CAI Y, GONG Z, QIN B. Benthic macroinvertebrate community structure in Lake Taihu, China: Effects of trophic status, wind-induced disturbance and habitat complexity [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38(1): 39
- [26] LI Q, WANG G, WANG H, et al. Macrozoobenthos variations in shallow connected lakes under the influence of intense hydrologic pulse changes [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124755
- [27] ZHUANG W, YING S C, FRIE A L, et al. Distribution, pollution status, and source apportionment of trace metals in lake sediments under the influence of the South-to-North Water Transfer Project, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 108
- [28] 刘良, 张祖陆. 南四湖表层沉积物重金属的空间分布、来源及污染评价 [J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(6): 7

Characteristics of phytoplankton and macrozoobenthos communities in Nansihu Lake under the influence of hydrologic pulse

LI Qing¹⁾ WANG Guoqiang^{1)†} XIE Gang²⁾ PENG Yanbo²⁾

(1) Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China; 2) Shandong Academy of Environmental Planning, 250101, Ji'nan, Shandong, China)

Abstract The hydrologic pulse affects lake water ecosystem, complicated further by hydrologic pulse due to the South to North Water Transfer Project (SNWTP). Phytoplankton and macrozoobenthos in Nansihu Lake (NSH) during non-diversion period and diversion period were investigated. Water quality and heavy metals in the sediment, characteristics of phytoplankton and macrozoobenthos communities under influence of hydrologic pulse by SNWTP were analyzed. During a whole pulse period, total phytoplankton density was found to have decreased, proportion of *Cyanophyta* decreased, proportion of *Chlorophyta* and *Bacillaroiphyta* increased, with dominant species having changed dramatically. Macrozoobenthos community in NSH mainly included *Mollusca*, aquatic insects and aquatic oligochaetes, dominated by *Mollusca*. The community structure of macrozoobenthos was stable, dominant species turnover was weak, diversity index did not change. Compared with before implementation of SNWTP, phytoplankton community in NSH changed more significantly during a year, diversity index decreased. With water quality getting better and heavy metal distribution in sediment changing, macrozoobenthos gradually changed from that dominated by small-size aquatic insects to that dominated by large-size *Mollusca*. These indicate that effects of hydrologic pulse caused by SNWTP on phytoplankton are obvious in both short and long term and more obvious in the long-term cumulative effects on macrozoobenthos.

Keywords hydrologic pulse; the South to North Water Transfer Project; phytoplankton; macrozoobenthos; Nansihu Lake