

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.009

南水北调天津干线浮游生物群落时空变化特征

吴梓清¹, 杨钰峰¹, 李木子¹, 刘信勇², 屈亮², 朱琳¹,
冯剑丰¹

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国南水北调集团中线有限公司
天津分公司, 天津 300393)

摘要: 为了分析水体中浮游生物群落的时空变化特征,对2018年11月—2019年12月南水北调天津干线箱涵输水的浮游生物群落进行调查。在天津干线沿线设置了5个监测点,共鉴定到浮游植物4门38属。其中绿藻17属,占总属类数的44.7%,而硅藻对浮游植物密度的贡献最大。曲壳藻(*Achnanthes*)与桥弯藻(*Cymbella*)为全年出现次数最多的浮游植物优势属;浮游动物中桡足类1属1种、枝角类5属7种、轮虫11属13种,优势种为汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)。另外,基于浮游生物群落结构、丰度、多样性综合指数等对天津干线总体水质进行了评价,判断出其总体营养状态处于贫-中营养型,污染程度属于寡污-中污型。同时分析了水体中浮游生物群落的时空变化特征,并对造成变化的原因进行了讨论。

关键词: 南水北调天津干线; 浮游生物; 时空变化; 箱涵输水; 优势种

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0056-09

Spatial and Temporal Variation of Plankton Community in the Tianjin Section of Central Route of the South-to-North Water Diversion Project

WU Zi-qing¹, YANG Yu-feng¹, LI Mu-zi¹, LIU Xin-yong², QU Liang², ZHU Lin¹,
FENG Jian-feng¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Branch, China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Tianjin 300393, China)

Abstract: This paper set up five monitoring points along the Tianjin trunk line to investigate the plankton communities in the box culvert of South-to-North Water Diversion Project from November 2018 to December 2019, so as to analyze the temporal and spatial variation of plankton community in the water body. A total of 4 phyla and 38 genera of phytoplankton were identified. Among them, 17 genera of *Chlorophyta* accounted for 44.7% of the total genera, and *Bacillariophyta* contributed the most to phytoplankton density. *Achnanthes* and *Cymbella* were the dominant genera of phytoplankton with the highest annual occurrence. Among the zooplankton, there were 1 genus and 1 species of *Copepoda*, 5 genera and 7 species of *Cladocera*, and 11 genera and 13 species of rotifers. The dominant species was *Sinocalanus dorrii*. In addition, the overall water quality of Tianjin trunk line was evaluated based on the phytoplankton community, abundance and diversity index. The overall nutritional status of Tianjin trunk

通信作者: 冯剑丰 E-mail: fengjf@nankai.edu.cn

line was poor to medium trophic type, and the degree of pollution belonged to the type of oligopollution-moderate pollution. The spatial and temporal variation characteristics of the plankton community in the water body were analyzed, and the causes of the variation were discussed.

Key words: trunk line of South-to-North Water Diversion Project in Tianjin; plankton; spatial and temporal variation; box culvert water conveyance; dominant species

南水北调中线天津干线工程起点位于河北省徐水县西黑山村,终点位于天津市外环河西,总体走向由西向东,全长为155 km^[1]。该工程采用全箱涵无压接有压全自流输水方案^[2]。自2014年12月起开始向天津市输水,累计输水量为40×10⁸ m³,已经成为天津市不可或缺的重要水源。全封闭式箱涵输水可以确保水质不受外部环境的污染,但封闭箱涵造成的水气交换隔绝、黑暗环境、保温作用等因素可能导致水体生态系统发生变化,从而影响水体自净能力,进而导致水质变化^[3]。天津干线沿线设有保水堰,长距离黑暗条件下的突然曝光、曝气可能导致浮游植物大量增殖,使水体存在水华暴发的潜在风险。而水体中的浮游生物种类与数量能在一定程度上反映水质,是水质分析的重要指标。

目前南水北调中线工程水质研究多基于对水源地的浮游生物进行分析^[4-6],或者对其他干线的沿程浮游生物进行分析。南水北调中线工程天津干线由于其罕见的长距离箱涵输水而有重要的研究意义,但是目前对于天津干线水质研究报道较少。笔者对南水北调天津干线的浮游生物时空变化进行了分析,从浮游生物群落组成、生物量变化、多样性综合指数变化等方面揭示了天津干线的水质情况,旨在为南水北调天津干线水环境保护提供依据,同时对类似的箱涵输水工程也具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点设置

共设置5个采样点,其均匀分布于南水北调天津干线各个流段(见图1),且均位于输水渠的曝气保水堰处,包括西黑山监测点、白沟监测点、霸州监测点、王庆坨监测点和外环河监测点(记作S1~S5)。

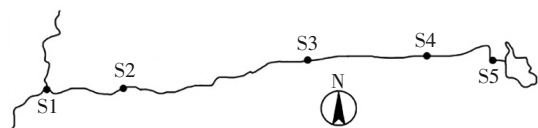


图1 采样点分布示意

Fig.1 Schematic diagram of sampling points distribution

1.2 数据采集与处理

采集各监测断面的浮游生物样本,采样深度为水面下0.5 m。其中浮游植物定量样品采集保水堰表层水500 mL,采集后用鲁哥试剂进行固定。在实验室静置沉淀。观察时弃去上清液,浓缩至100 mL进行显微镜镜检,对浮游植物进行物种鉴定和计数。浮游动物样本的采集方法为:在采样现场将30 L水样过滤网浓缩至20~80 mL,用甲醛溶液固定后放至实验室保存。后续直接进行显微镜镜检,对浮游动物的物种进行鉴定和计数。

1.3 浮游生物指标

采用Shannon指数(H')、Margalef指数(D)和Pielou指数(J)对物种多样性进行分析^[7]。浮游生物多样性综合指数分为4级来描述水体污染程度^[8],见表1。采用优势度(Y)判断优势物种,当 $Y>0.02$ 时表示该物种为优势种。根据水生态学评价方法判断水体富营养化程度:当浮游动物丰度<1 000 ind/L时为贫营养;丰度为1 000~3 000 ind/L时为中营养;丰度>3 000 ind/L时为富营养^[9]。

表1 浮游生物多样性综合指数分级标准

Tab.1 Rating standard of plankton diversity index

项目	重污染	α -中污染	β -中污染	寡污染
Shannon指数(H')	0~1	1~2	2~3	>3
Magalef指数(D)	0~1	1~2	2~3	>3
Pielou指数(J)	0~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	>0.5

2 结果与分析

2.1 浮游生物总体群落特征

2.1.1 浮游植物的群落特征

5个采样点采集的浮游植物样品中,共鉴定到浮游植物4门38属。其中,绿藻门(*Chlorophyta*)属类数最多,共17属,占总属类数的44.7%;其次是硅藻门(*Bacillariophyta*),观察到浮游植物15属,占总属类数的39.5%;蓝藻门(*Cyanophyta*)5属,占13.2%;裸藻门(*Euglenophyta*)1属,占2.6%。对各采样点的属类数进行统计,平均属类数为26属,其

中霸州监测站(S3)的属类数最多,为29属;而西黑山监测站(S1)的属类数最少,为23属。总体而言,各监测站点的浮游植物属类数分布相对较均匀。经过观察统计发现,硅藻门8属[针杆藻(*Synedra*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、曲壳藻(*Achnanthes*)、舟形藻(*Navicula*)、小环藻(*Cyclotella*)、桥弯藻(*Cymbella*)、羽纹藻(*Pinnularia*)、直链藻(*Melosira*)]、绿藻门5属[鼓藻(*Cosmarium*)、栅藻(*Scenedesmus*)、卵囊藻(*Oocystis*)、盘星藻(*Pediastrum*)、空球藻(*Eudorina*)]、蓝藻门2属[鱼腥藻(*Anabaena*)、色球藻(*Chroococcus*)]为5个监测站点的共有属类。另外,霸州监测点的特有属为卵形藻(*Cocconeis*)与月牙藻(*Selenastrum bibrainum*),王庆坨监测点(S4)的特有属为裸甲藻(*Gymnodinium aerucinosum* Stein),外环河监测点(S5)的特有属为小球藻(*Chlorella*)。

2.1.2 浮游动物的群落特征

浮游动物主要包括桡足类(*Copepoda*)、枝角类(*Cladocera*)、轮虫(rotifer)。其中桡足类主要为汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*),观察到枝角类5属7种,轮虫11属13种。除此之外,还包括少量原生动物门生物,其中累枝虫(*Epistylis*)在夏季高温水体中较常见。同时,水体中还观察到线虫、平扁螺、摇蚊幼虫等生物。

对样本进行统计发现,5个监测点的共有浮游动物(仅讨论桡足类、枝角类与轮虫)种类有汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)、无节幼虫(nauplius)、透明蚤(*Daphnia hyalina*)、僧帽蚤(*Daphnia cucullata*)与卜氏晶囊轮虫(*Asplanchna brightwelli*)。西黑山监测点的特有浮游动物为鼠异尾轮虫(*Trichocerca ruttus*);白沟监测点的特有浮游动物为小巨头轮虫(*Cephalodella exigna*)与狭甲轮虫(*Colurella uncinata*);霸州监测点的特有浮游动物为蚤状蚤(*Daphnia pulex*)与螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*);王庆坨监测点的特有浮游动物为梨形单趾轮虫(*Monostyla pyriformis*)与无柄轮虫(*Ascomorpha*);外环河监测点未发现特有浮游动物。

2.2 浮游生物时间变化趋势

2.2.1 浮游植物时间变化趋势

2019年浮游植物群落组成和密度的季节变化如图2所示。可知,8月份水体中浮游植物密度最大,5个监测点平均值达到 1.16×10^3 cells/mL;1月份各站点水样中未观察到浮游植物存在。浮游植物

密度最大的的季节为夏季,夏季6月、7月、8月的浮游植物密度均在 0.5×10^3 cells/mL以上。然后依次为秋季、春季、冬季。浮游植物的全年密度变化与水体温度的变化呈现出明显的正相关趋势,且夏季绿藻在水体中的比例大幅增加。

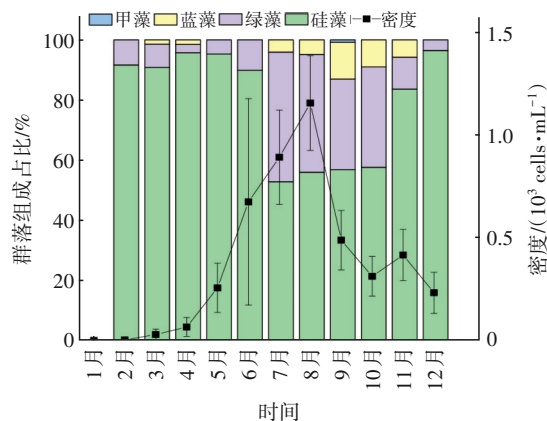


图2 浮游植物群落组成和密度的季节变化

Fig.2 Seasonal change of community composition and density of phytoplankton

浮游植物多样性综合指数的变化情况如图3所示。

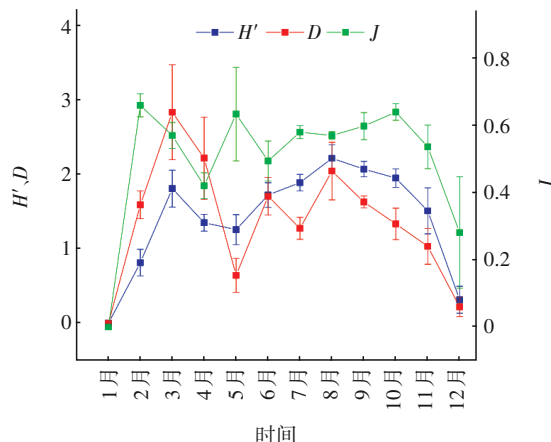


图3 浮游植物多样性综合指数的变化

Fig.3 Change of diversity index of phytoplankton

H' 最大值出现在8月,为2.22;最小值出现在12月,为0.32。总体上夏秋季 H' 较大、冬季较小。 D 的最大值出现在3月,为2.84;春季普遍高于其他季节,冬季最小。除1月水样中未观测到浮游植物以及12月物种均匀度较低外,浮游植物的 J 指数全年各月份分布较均匀,均在0.50左右。

不同月份间的浮游植物优势属不同,综合5个监测点,取平均优势度最大的两个优势属:3月、4月、5月、6月、9月、10月各监测点中优势度最大的2

个优势属均为曲壳藻(*Achnanthes*)、桥弯藻(*Cymbella*);7月为桥弯藻(*Cymbella*)、球团藻(*Volvox globator*);8月为栅藻(*Scenedesmus*)、桥弯藻(*Cymbella*);11月为针(脆)杆藻(*Synedra/Fragilaria*)、舟形藻(*Navicula*);12月的针(脆)杆藻(*Synedra/Fragilaria*)在各藻种中

占绝对优势。分析可知,全年水体中优势藻类基本为硅藻,只有在夏季出现少量绿藻为优势藻类。各月份的藻类替代率较低。全年最常见的优势属为桥弯藻(*Cymbella*)与曲壳藻(*Achnanthes*)。表2仅展示部分月份数据。

表2 各监测点浮游植物优势属的季节变化

Tab.2 Seasonal variation of dominant genera of phytoplankton in each monitoring point

项 目	S1		S2		S3		S4		S5	
	优势属	Y	优势属	Y	优势属	Y	优势属	Y	优势属	Y
2019年3月	针(脆)杆藻	0.33	曲壳藻	0.28	针(脆)杆藻	0.31	针(脆)杆藻	0.22	曲壳藻	0.42
	曲壳藻	0.14	针(脆)杆藻	0.24	曲壳藻	0.16	桥弯藻	0.15	桥弯藻	0.18
2019年4月	曲壳藻	0.52	曲壳藻	0.46	曲壳藻	0.40	桥弯藻	0.54	曲壳藻	0.41
	桥弯藻	0.33	桥弯藻	0.38	桥弯藻	0.39	曲壳藻	0.22	桥弯藻	0.38
2019年5月	曲壳藻	0.67	针(脆)杆藻	0.23	曲壳藻	0.27	桥弯藻	0.27	桥弯藻	0.40
	栅藻	0.07	桥弯藻	0.23	针(脆)杆藻	0.20	曲壳藻	0.22	曲壳藻	0.20
2019年6月	桥弯藻	0.37	桥弯藻	0.34	小环藻	0.45	桥弯藻	0.29	桥弯藻	0.40
	曲壳藻	0.22	曲壳藻	0.22	桥弯藻	0.19	曲壳藻	0.21	针(脆)杆藻	0.19
2019年7月	球团藻	0.31	桥弯藻	0.33	桥弯藻	0.33	球团藻	0.30	球团藻	0.27
	小环藻	0.16	栅藻	0.22	球团藻	0.25	栅藻	0.13	桥弯藻	0.17
2019年8月	栅藻	0.36	桥弯藻	0.27	桥弯藻	0.21	栅藻	0.17	栅藻	0.22
	小环藻	0.14	栅藻	0.13	小环藻	0.18	舟形藻	0.15	舟形藻	0.20
2019年9月	桥弯藻	0.24	桥弯藻	0.37	桥弯藻	0.34	舟形藻	0.20	曲壳藻	0.19
	曲壳藻	0.12	曲壳藻	0.15	曲壳藻	0.14			球团藻	0.07
2019年10月	桥弯藻	0.25	曲壳藻	0.25	曲壳藻	0.15	桥弯藻	0.27	曲壳藻	0.21
					色球藻	0.04	栅藻	0.18	栅藻	0.17
2019年11月	针(脆)杆藻	0.33	针(脆)杆藻	0.46	针(脆)杆藻	0.67	针(脆)杆藻	0.35	针(脆)杆藻	0.41
	舟形藻	0.14	小环藻	0.23			舟形藻	0.23	曲壳藻	0.20
2019年12月	针(脆)杆藻	0.88	针(脆)杆藻	0.93	针(脆)杆藻	1.00	针(脆)杆藻	0.80	针(脆)杆藻	0.88

2.2.2 浮游动物时间变化趋势

图4为浮游动物群落组成和丰度的季节变化。

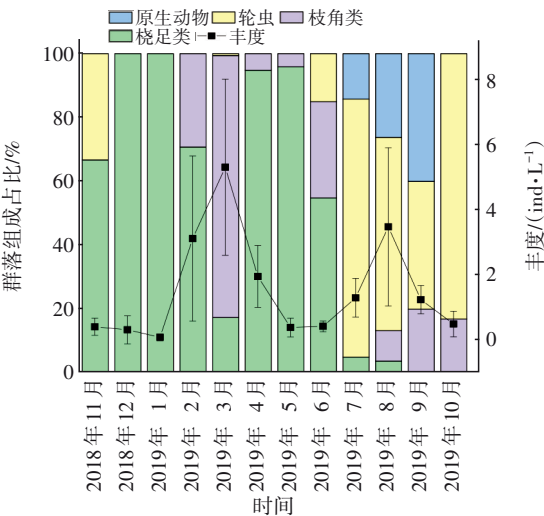


图4 浮游动物群落组成和丰度的季节变化

Fig.4 Seasonal change of community composition and abundance of zooplankton

由图4可知,南水北调天津干线水体中浮游动物数量较少,浮游动物丰度基本小于5 ind/L。通过对5个监测点的浮游动物水样进行分析发现,2月—4月,桡足类和枝角类数量呈爆发式增长;6月—10月,轮虫成为水体中的主要浮游动物。分析各监测点的浮游动物丰度发现,全年丰度出现两个高峰,第一个高峰是2月和3月,此时水温刚刚回暖;第二个高峰是8月份,此时水体温度达到全年最高,并且浮游植物大量繁殖生长。

浮游动物多样性综合指数的变化如图5所示。可知,全年浮游动物多样性指数 H' 在8月达到最高,其值为1.47;1月水样中未观测到浮游动物,因此多样性指数为0。其中2月浮游动物多样性指数相较于1月突增,甚至高于气候更为温暖的3月—7月。物种丰富度指数 D 的范围为-5.89~11.69,全年范围内波动极大,因此后续不进行评价参考。物种均匀度指数 J 的范围为0.086~0.67,最大值出现在9

月,1月份水体中未观察到浮游动物,最小值出现在12月。

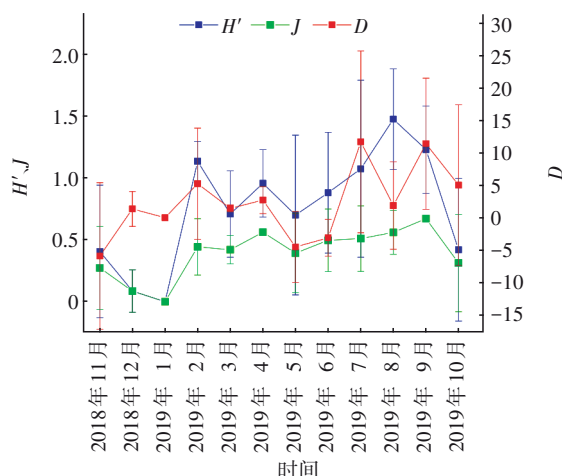


图5 浮游动物多样性综合指数的变化

Fig.5 Change of diversity index of zooplankton

全年各月各监测点出现次数最多的优势种为桡足类的汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*),冬、春季常见的优势种大部分属于桡足类与枝角类,夏、秋季常见优势种则通常为轮虫类与其他。

2.3 浮游生物空间变化趋势

2.3.1 浮游植物空间变化趋势

对各监测点全年浮游植物密度求平均值,结果如图6所示。

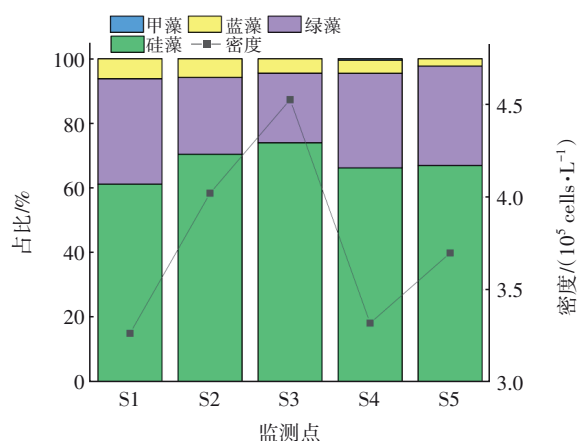


图6 浮游植物群落组成与空间动态

Fig.6 Community composition and spatial dynamics of phytoplankton

由图6可知,针对全年水样中各监测点的浮游植物密度进行分析,个体数量最多的监测点为霸州监测点(S3),其全年平均密度为 4.53×10^5 cells/L,个体数量最少的监测点为西黑山监测点(S1),其全年

平均密度为 3.27×10^5 cells/L。

春、夏、秋季浮游植物多样性指数空间动态如图7所示。

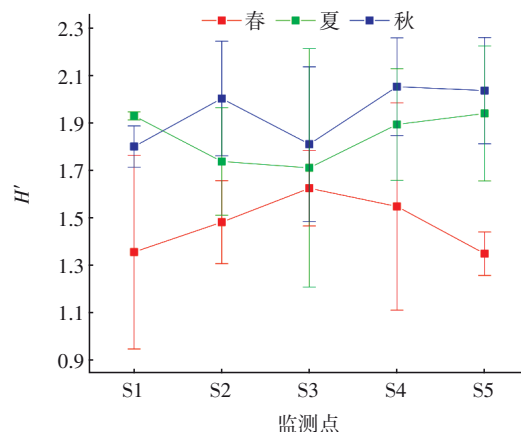


图7 春、夏、秋季浮游植物多样性指数空间动态

Fig.7 Spatial dynamics of phytoplankton diversity index in spring, summer and autumn

由图7可知,春季浮游植物平均物种多样性指数 H' 最大的监测点为霸州监测点(S3),多样性指数为1.63;数值最小的监测点为外环河监测点(S5),多样性指数为1.35。夏季浮游植物平均物种多样性指数 H' 最大的监测点为王庆坨监测点(S4),多样性指数为2.06;数值最小的监测点为西黑山监测点(S1),多样性指数为1.80。秋季浮游植物平均物种多样性指数 H' 最大的监测点为外环河监测点(S5),多样性指数为1.94;数值最小的监测点为霸州监测点(S3),多样性指数为1.71。冬季多个监测点、多个月份未观察到浮游植物,因此不予讨论。

分析发现,5个监测点的优势种差别并不大,西黑山、白沟、霸州、王庆坨监测点全年出现频率最高的藻类排序依次为桥弯藻(*Cymbella*)、曲壳藻(*Achnanthes*)、针(脆)杆藻(*Synedra/Fragilaria*);同时,外环河监测点全年出现频率最高的藻类排序依次为曲壳藻(*Achnanthes*)、桥弯藻(*Cymbella*)、针(脆)杆藻(*Synedra/Fragilaria*)。

2.3.2 浮游动物空间变化趋势

分析全年水样中各监测点的浮游动物丰度,结果如图8所示。可知,个体数量最大的监测点为白沟监测点(S2),其全年平均丰度为2.20 ind/L;其次为霸州监测点(S3),其全年平均丰度为2.18 ind/L;个体数量最少的监测站点为西黑山监测点(S1),其全年平均丰度为0.93 ind/L。

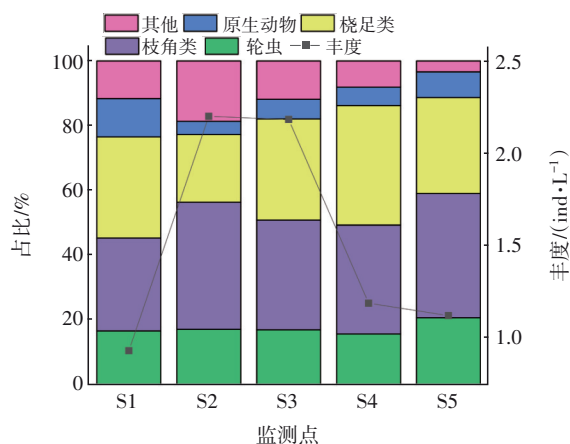


图8 浮游动物群落组成与空间动态

Fig.8 Community composition and spatial dynamics of zooplankton

春、夏、秋季浮游动物多样性指数空间动态如图9所示。

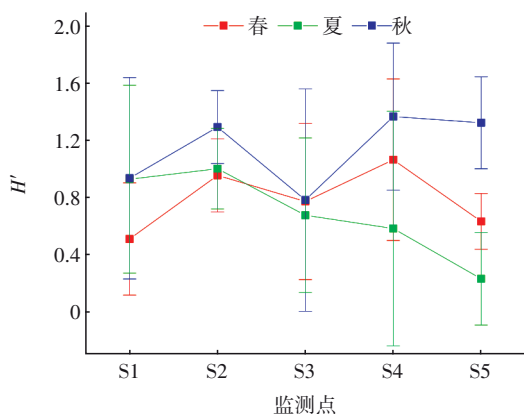


图9 春、夏、秋季浮游动物多样性指数空间动态

Fig.9 Spatial dynamics of zooplankton diversity index in spring, summer and autumn

在春季,王庆坨监测点(S4)的浮游动物平均物种多样性指数 H' 最大,为1.07;数值最小的为西黑山监测点(S1),多样性指数为0.51。在夏季,王庆坨监测点(S4)的浮游动物平均物种多样性指数 H' 仍最大,为1.37;数值最小的为霸州监测点(S3),多样性指数为0.78。在秋季,白沟监测点(S2)的浮游动物平均物种多样性指数 H' 最大,为1.00;数值最小的为外环河监测点(S5),多样性指数为0.23。冬季多个监测点、多个月份未观察到浮游动物,因此不予讨论。

西黑山、霸州、王庆坨监测点全年出现频率最高的优势种均为汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*),白沟监测点为线虫(*Caenorhabditis elegans*),外环河

监测点为无节幼虫(nauplius),可见各监测点浮游动物优势种变化明显。水样中浮游动物个体数较少可能影响分析结果。

3 讨论

3.1 浮游生物群落构成

本研究共鉴定到浮游植物4门38属。其中,绿藻门属类数最大,观察到17属,占总属类数的44.7%;其次是硅藻门,观察到浮游植物15属,占总属类数的39.5%。群落构成与国内某些淡水水体相似^[10],同时种类与数量均小于邻近自然水体^[11]。浮游植物种类远小于施建伟等^[4]报道的丹江口水库及中线干渠南阳段调水后监测到的9门94属,与李玉英等^[12]报道的8门67属也有很大差距,但相较于丹江口水库调水前的6门21属而言,浮游植物属类增多。这可能是因为丹江口水库在调水后沿线汇入其他水体,因此浮游植物种类增加。

观察到的浮游动物中桡足类1属1种、枝角类5属7种、轮虫11属13种,优势种为汤匙华哲水蚤。各监测点浮游动物个体数量全年平均丰度为0.93~2.20 ind/L。浮游动物种类数与陈志芳等^[13]报道的南水北调东线水源区浮游动物种类数量相差不大,但生物量远小于其报道的平均值37.88 ind/L。并且浮游动物种类的数量远低于气候条件相近的自然流动水体和水库,尤其是原生动物种类^[14-15]。

相较于水源区,天津干线水体中浮游生物明显存在着物种丰度不变或增加,但密度下降的情况。这与天津干线属于长距离箱涵输水,长期黑暗环境和水体中营养物质不断被消耗有着一定关系。同时天津干线流量的变化也有一定影响,流量增大可能会对水体中浮游生物密度产生一定的稀释作用。

3.2 水质评价

浮游生物群落结构、丰度、多样性指数等均能在一定程度上反映水体的水质状况。由于浮游动物对水体环境的变化较敏感,可表征水体污染程度。本研究观测到的浮游动物丰度均远小于1000 ind/L,据此判断南水北调天津干线箱涵输水段处于贫营养状态。从浮游植物群落结构看,中营养型水体中硅藻占主体。观察到的以硅藻为主的浮游植物组成是水体营养水平较低的一种特征,可判断出天津干线水体处于贫-中营养状态。浮游植物多样性指数 H' 介于0.24~2.34之间,各季度平均值的排

序为夏季(1.94)>秋季(1.85)>春季(1.47)>冬季(0.38),全年平均值为1.41。最高值出现在夏季的白沟监测点。按照谭香等^[6]报道的水质评价标准,南水北调天津干线水质为 α -中污染。与贾海燕等^[5]报道的丹江口水库(南水北调中线水源地)的浮游植物多样性指数为0.22~2.22相接近。丰富度指数 D 介于0.18~3.46之间,各季度平均值的排序为春季(1.90)>夏季(1.69)>秋季(1.33)>冬季(0.60),全年平均值为1.38。最高值出现在春季的王庆坨监测点。根据浮游植物群落评价标准,南水北调天津干线水质类型为 α -中污染。均匀度指数 J 介于0.24~0.91之间,各季度平均值的排序为秋季(0.59)>夏季(0.55)>春季(0.54)>冬季(0.31),全年平均值为0.50。以均匀度指数 J 评价可知,除冬季外,南水北调天津干线均为寡污染水体,冬季为 α -中污染水体。最高值出现在春季的西黑山监测点。依据多样性综合指数评价可知,南水北调天津干线水体属于寡污-中污型。

3.3 浮游生物时空变化特征

南水北调天津干线浮游生物丰度的季节变化显著,浮游植物主要由硅藻、绿藻、蓝藻组成。相较于硅藻、绿藻而言,蓝藻数量较少。夏季浮游植物密度明显高于其他季节;浮游动物在春、夏两季丰度较大,且以春季丰度最大,枝角类动物为春季丰度做出了显著贡献。首先是因为夏季光照、温度等条件适宜浮游植物繁殖,充足的食物来源也为浮游动物的繁殖提供了条件^[16]。但同时夏季较高的水温可能抑制了大型蚤的出现,因为25℃以上的高温影响了许多大型蚤的摄食效率^[17],这导致为春季丰度做出显著贡献的枝角类丰度下降。夏季,水体中的优势种大部分属于绿藻门,但在其他季节,优势种均属于硅藻门。这与其他研究^[18]报道的绿藻较适合在温度较高的水体中生长而硅藻多为冷水性物种相符。冬、春季,浮游动物常见的优势种大多属于桡足类与枝角类;夏、秋季常见优势种通常为轮虫类,且观测到的轮虫种类数量最多,这与国内某些淡水水体相符^[19]。轮虫类的汤匙华哲水蚤成为较常见的优势种,这可能是因为轮虫独特的孤雌生殖方式,其个体小且发育时间短,较易于适应水体理化环境的变化^[20],且水体中的蓝藻可能会限制枝角类与桡足类的生长。

天津干线沿线浮游生物丰度也存在不同。5个

监测点的水样中,西黑山监测点浮游动、植物的丰度均最小,这可能与西黑山监测点处于天津干线的最上游,未受到天津干线沿线的干扰有关。此外,天津干线全长155 km,总体呈西高东低的趋势,沿线高差变化较大,工程前1.5 km为山前丘陵区,以东为广阔的河北平原。前20 km落差占总落差的75%^[21],前段流速较大。通常认为流速逐渐变小对藻类生长有利,流速过大时,水流的冲刷作用使藻类的生长和繁殖环境受到破坏。这与天津干线沿线浮游植物密度变化情况相符。浮游植物密度最大的为霸州监测点,浮游动物丰度最大的为白沟监测点,均属于水流较平缓段。天津干线起点与终点监测点的浮游生物丰度和多样性较小,而中间段的浮游生物丰度与多样性较大。这可能是因为中间段箱涵的保温作用致使水温变化较小。而各监测点的浮游植物优势种几乎没有变化,浮游动物优势种多为汤匙华哲水蚤,其统计结果由于受到水样生物量少的影 响,可能存在较大误差。

4 结论

① 南水北调天津干线浮游生物数量远少于水源地和邻近地区的自然水体。但浮游动物的物种丰度与水源地相差不大,浮游植物的物种丰度甚至高于水源区。本研究共鉴定到浮游植物4门38属,其中绿藻17属,占总属类数的44.7%,但以全年丰度来看以硅藻占优势。曲壳藻(*Achnanthes*)与桥弯藻(*Cymbella*)为全年出现次数最多的浮游植物优势属。同时,浮游动物中桡足类1属1种,枝角类5属7种,轮虫11属13种,优势种为汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)。

② 基于浮游生物群落结构、丰度、多样性综合指数等评价标准,南水北调天津干线水体总体营养状态为贫-中营养型,污染程度为寡污-中污型。

③ 夏季浮游植物密度明显高于其他季节。浮游动物春、夏两季丰度较大,且以春季丰度最大,枝角类动物为春季丰度做出了显著贡献。天津干线起点与终点监测点的浮游生物丰度与多样性较小,而中间段的较大。

参考文献:

- [1] 吴换营,宁金钢,王云静.南水北调中线一期工程天津干线输水方案论证[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):154-156,177.

- WU Huanying, NING Jingang, WANG Yunjing. Demonstration of water delivery scheme in Tianjin section of the first phase of the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2):154-156,177(in Chinese).
- [2] 孙文举,李樛,付长旺. 南水北调天津干线地下箱涵工程安全监测成果分析[J]. 中国水利, 2019(20): 20-22,26.
- SUN Wenju, LI Liang, FU Changwang. Safety monitoring technology of underground box culvert engineering of Tianjin trunk line of South-to-North Water Diversion Project and application of results [J]. China Water Resources, 2019(20):20-22,26(in Chinese).
- [3] 雒江菡,贾瑞宝,于瑞洪,等. 输水管道生物膜的生长过程及其对水质的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9):39-44.
- LUO Jianghan, JIA Ruibao, YU Ruihong, *et al.* Development of biofilm and its effect on water quality in raw water distribution pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(9):39-44(in Chinese).
- [4] 施建伟,朱静亚,黄进,等. 南水北调中线工程水源头区浮游生物群落研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016,44(6):114-119.
- SHI Jianwei, ZHU Jingya, HUANG Jin, *et al.* Study on plankton community in the water source area of the mid-line project of South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2016,44(6):114-119(in Chinese).
- [5] 贾海燕,徐建锋,雷俊山. 丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 52-58.
- JIA Haiyan, XU Jianfeng, LEI Junshan. Relationship of community structure of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir bay [J]. Yangtze River, 2019,50(5):52-58(in Chinese).
- [6] 谭香,夏小玲,程晓莉,等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 2011,32(10):2875-2882.
- TAN Xiang, XIA Xiaoling, CHENG Xiaoli, *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2011,32(10):2875-2882(in Chinese).
- [7] 陆娇,张琦,刘应迪. 湘江长沙综合枢纽浮游动物群落结构及水质分析[J]. 湖北农业科学, 2019,58(13): 24-29.
- LU Jiao, ZHANG Qi, LIU Yingdi. Community dynamic structure of zooplankton and water quality in the comprehensive hub of Xiangjiang River, Changsha [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019,58(13): 24-29(in Chinese).
- [8] 王聪. 小清河浮游生物研究及水质评价[D]. 济南:山东师范大学, 2017.
- WANG Cong. Research on the Plankton and Assessment of Water Quality of Xiaoqing River[D]. Jinan:Shandong Normal University, 2017(in Chinese).
- [9] 林海,王源,李冰. 北京市奶水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态学报, 2019,39(20):7583-7591.
- LIN Hai, WANG Yuan, LI Bing. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20): 7583-7591(in Chinese).
- [10] 董芳,周贤君,张辉,等. 贵阳市小车河浮游生物群落结构与水环境因子的关系[J]. 基因组学与应用生物学, 2021,40(Z1):2127-2135.
- DONG Fang, ZHOU Xianjun, ZHANG Hui, *et al.* Plankton community structure and its relation to the environmental factors of Xiaoche River in Guiyang City [J]. Genomics and Applied Biology, 2021, 40(Z1): 2127-2135(in Chinese).
- [11] 王汨,杨柏贺,马思琦,等. 北运河水系浮游植物功能群与水环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2020, 33(2):70-76.
- WANG Mi, YANG Bohe, MA Siqi, *et al.* Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in North Canal in Beijing [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020, 33(2): 70-76(in Chinese).
- [12] 李玉英,高宛莉,李家峰,等. 南水北调中线水源区富营养化研究[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(5): 41-47.
- LI Yuying, GAO Wanli, LI Jiafeng, *et al.* Study on eutrophication in water resource area of the mid-line project of south to north water division [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(5): 41-47(in Chinese).
- [13] 陈志芳,马德高,殷惠,等. 南水北调东线水源区浮游动物群落调查与多样性评价[J]. 环境科学与技术, 2015,38(5):207-211.
- CHEN Zhifang, MA Degao, YIN Hui, *et al.* Investigation of zooplankton community and diversity

- assessment in water source area of the east line project of transferring water from south to north[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(5): 207-211 (in Chinese).
- [14] 董雅欠, 赵文, 季世琛, 等. 北京潮白河水系浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 424-431.
DONG Yaqian, ZHAO Wen, JI Shichen, *et al.* Community structure of zooplankton and water quality evaluation in Chaobai River system in Beijing [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 424-431 (in Chinese).
- [15] 庞雨佳, 赵文, 魏杰, 等. 桓仁水库和碧流河水库浮游生物群落结构及水环境特征的比较研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 407-416.
PANG Yujia, ZHAO Wen, WEI Jie, *et al.* Comparison of plankton community structure and water environment characteristics between Huanren Reservoir and Biliuhe Reservoir [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 407-416 (in Chinese).
- [16] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 灞河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 173-184.
CHEN Hong, LIU Qing, PAN Jianxiong, *et al.* Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 173-184 (in Chinese).
- [17] 杨佳. 太湖浮游动物群落结构时空变化特征及其影响因素研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.
YANG Jia. Study on the Characteristics of Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Lake Taihu [D]. Nanchong: China West Normal University, 2020 (in Chinese).
- [18] 张军燕, 张建军, 沈红保, 等. 泾河宁夏段夏季浮游生物群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 72-77.
ZHANG Junyan, ZHANG Jianjun, SHEN Hongbao, *et al.* Community structure of plankton of the Jing River in Ningxia in summer [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(6): 72-77 (in Chinese).
- [19] 于洁, 姜智飞, 李彤, 等. 海河流域下游天津段浮游生物调查研究[J]. 河北渔业, 2016(5): 22-33.
YU Jie, JIANG Zhifei, LI Tong, *et al.* Research on plankton in Tianjin section of downstream of Haihe River [J]. *Hebei Fisheries*, 2016(5): 22-33 (in Chinese).
- [20] 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 等. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1271-1282.
FU Xianting, YANG Wei, ZHAO Yanwei, *et al.* Community structure of zooplankton and its relationship with water environment factors in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(6): 1271-1282 (in Chinese).
- [21] 薛宏磊, 陈岱. 压力式水位计在长距离暗渠输水工程中的应用[J]. 水电站机电技术, 2019, 42(4): 25-26.
XUE Honglei, CHEN Dai. Application of pressure type water level gauge in long-distance conduit transfer project [J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2019, 42(4): 25-26 (in Chinese).

作者简介: 吴梓清(1999-), 女, 福建南平人, 本科, 主要研究方向为南水北调天津干线输水水质变化规律。

E-mail: 691578191@qq.com

收稿日期: 2021-02-14

修回日期: 2021-06-01

(编辑: 任莹莹)

珍惜资源, 保护环境, 建设美丽中国