

滏阳河(邯郸段)浮游植物群落时空变化特征及其 与环境因子关系

李众¹,李学军¹,王亮²,李步东²

(1.河南师范大学 水产学院,河南 新乡 453007;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:为了解滏阳河(邯郸段)浮游植物群落时空变化特征及其与水环境因子的关系,对其干流 14 个样点的浮游植物和水环境特征进行综合分析.结果表明该区域浮游植物种类均以绿藻门为主,其次为硅藻门和蓝藻门,优势种均有束丝藻.平均多样性指数为 2.44,属于 β -中污染;群落结构总体上受光照、温度、硝酸盐和水动力条件的限制.与浮游植物群落相关性最高的水环境因子分别为 COD_{Mn} , NO_2^- 和 TOC.

关键词:浮游植物;时空变化;冗余分析(RDA);滏阳河

中图分类号:Q948

文献标志码:A

滏阳河为海河流域子牙河系南部支流,源起东太行邯郸市峰峰矿区黑龙洞泉群,在沧州的献县与滹沱河(子牙河北部支流)汇流后称作子牙河,再往东流入渤海,河流全长 413 km,流域面积 21 747 km^2 [1].滏阳河(邯郸段)干流指由峰峰矿区的和村至鸡泽县的东于口村河段.此段有 4 条较大支流汇入,河道沿岸主要污染源为生活污水、工业废水以及农田退水.部分河段水质常年为劣 V 类,夏季蓝、绿藻生长过盛,水污染问题严重.目前对于滏阳河(邯郸段)研究主要集中在水质变化及其评价[2],而对于浮游植物群落结构时空变化特征及其与水环境因子关系的研究较少.本研究从多个角度对滏阳河(邯郸段)的生态环境进行分析,以期为后续滏阳河(邯郸段)乃至整个河段综合治理提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

在滏阳河(邯郸段)干流适合位置布设 14 个样点,从上游至下游依次为 1#~14#(图 1),坐标见附表 I.采样时间分别为:2015 年 6 月(夏季)和 10 月(秋季),2016 年 2 月(冬季)和 4 月(春季).用 25 号浮游生物网采集定性样品.取样 50 mL,鲁戈氏液固定.用采水器在水面下 0.5 m 处取 1 L 水样,转入采样瓶中,加入 10 mL 鲁戈氏液后固定,静置 2 d,除去上清液部分,浓缩至 50 mL.为减少实验误差,定量样品在计数前需将样品充分摇匀.

1.2 水环境因子的测定

便携式多参数测量仪(YSI-EXO,USA)测量水温(WT),酸碱度(pH),电导率(EC),溶解氧(DO);另外用采水器取 1 L 表层水样,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存,对水体中总氮(TN),硝态氮(NO_3^- -N),亚硝酸盐(NO_2^-),总磷(TP),高锰酸盐指数(COD_{Mn}),五日生化需氧量(BOD_5),总有机碳(TOC)和叶绿素 *a* 等进行测定[3].

1.3 数据处理

采用 Excel 2010,SPSS 20 和 Origin 2017 软件对原始数据进行整理与分析并制作图表.将浮游植物数据

收稿日期:2021-01-20;修回日期:2022-02-26.

基金项目:国家自然科学基金(31700405);河南省科技攻关项目(202102310272;202102310028).

作者简介:李众(1992-),男,河南周口人,河南师范大学硕士研究生,研究方向为水环境与水生态,E-mail:15560232591@163.com.

通信作者:李学军,E-mail:xjli@htu.cn.

和主要水环境因子数据通过 Canoco 5 软件进行去趋势对应分析(DCA),各排序轴梯度最大值均小于 3,采用 RDA 分析^[4],并通过 Monte Carlo 置换检验,最终筛选出和浮游植物群落特征具有显著性相关的水环境因子.多样性分析参考文献^[5],优势度指数参考文献^[6].

2 结 果

2.1 浮游植物群落在时间上的变化特征

滏阳河(邯郸段)鉴定的浮游植物种类为:春季 6 门 96 种、夏季 6 门 119 种、秋季 6 门 102 种、冬季 6 门 99 种,其中夏季浮游植物种类数最多,春季浮游植物种数最少(表 1).4 个季度浮游植物的种类数差异并不显著($P > 0.05$).绿藻门种类数在 4 个季度中始终占有绝对优势(附图 1),硅藻门种类数次之,甲藻门种类数在 4 个季度中占比始终最低.绿藻门种类数由春至冬呈现先上升再下降趋势,夏季最多;硅藻门种类数由春至冬也呈现先上升再下降趋势,秋季最多;蓝藻门和裸藻门种类数变化不大,夏季略微上升;隐藻门和甲藻门种类数没有变化.此外,在采样调查中发现,优势物种随着季节的变化而变化(表 2),但是束丝藻在 4 个季节中均有存在,数量上随季节的改变而改变.

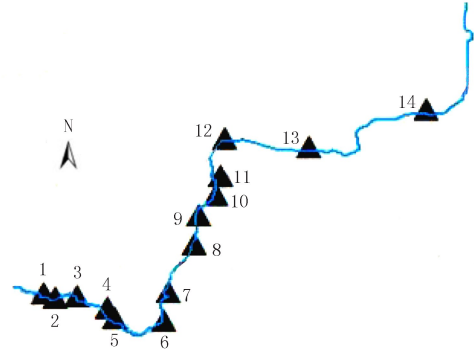


图1 采样点位置示意图

Fig.1 Sampling sites

表 1 滏阳河(邯郸段)浮游植物组成

Tab. 1 Phytoplankton composition in Fuyang River(Handan section)

类别	春季	夏季	秋季	冬季	类别	春季	夏季	秋季	冬季
硅藻门	27	29	32	30	甲藻门	3	3	3	3
绿藻门	49	64	51	48	裸藻门	4	8	4	5
蓝藻门	9	11	8	9	总数	96	119	102	99
隐藻门	4	4	4	4					

表 2 滏阳河(邯郸段)浮游植物优势种和生物量

Tab. 2 Dominant species and biomass of phytoplankton in Fuyang River(Handan section)

优势种	生物量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	优势种	生物量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	优势种	生物量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	优势种	生物量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
2015 年 6 月		2015 年 10 月		2016 年 2 月		2016 年 4 月	
小环藻	8.39	小环藻	1.72	尖菱形藻	4.27	小球藻	5.24
冠盘藻	4.07	颤藻	2.75	颤藻	8.27	颤藻	8.56
水绵	5.45	束丝藻	11.30	束丝藻	8.01	刚毛藻	5.37
刚毛藻	18.90	鱼腥藻	1.65			束丝藻	7.59
束丝藻	6.75	沃尔多甲藻	1.28				

2.2 浮游植物群落在空间上的变化特征

春季浮游植物密度范围为 $0.04 \times 10^7 \sim 3.15 \times 10^7$ cells/L,其中最低值出现在 3# 点位,最高值出现在 14# 点位;浮游植物生物量范围为 $0.11 \sim 32.64$ mg/L,其中最低值出现在 13# 点位,最高值出现在 1# 点位;夏季浮游植物密度范围为 $0.03 \sim 29.69 \times 10^7$ cells/L,其中最低值出现在 2# 点位,最高值出现在 10# 点位;浮游植物生物量范围为 $0.29 \sim 589.05$ mg/L,其中最低值出现在 2# 点位,最高值出现在 10# 点位(以刚毛

藻、小环藻和束丝藻为主);秋季浮游植物密度范围为 $0.03 \times 10^7 \sim 7.75 \times 10^7$ cells/L,其中最低值出现在1#点位,最高值出现在6#点位;浮游植物生物量范围为 $0.31 \sim 77.41$ mg/L,其中最低值出现在13#点位,最高值出现在6#点位;冬季浮游植物密度范围为 $0.04 \times 10^7 \sim 3.00 \times 10^7$ cells/L,其中最低值出现在8#点位,最高值出现在1#点位;浮游植物生物量范围为 $0.79 \sim 38.44$ mg/L,其中13#样点生物量最少,生物量最多的为14#样点。

滏阳河(邯郸段)浮游植物多样性指数平均值为2.44,最低值为0.87,出现在6#点位的秋季;最高值为4.49,出现在1#点位的夏季。在四季中,浮游植物多样性指数的平均数最大的为11#采样点,其值为3.25;8#采样点浮游植物多样性指数4个季节平均数最小,其值为2.06,其次为10#采样点。

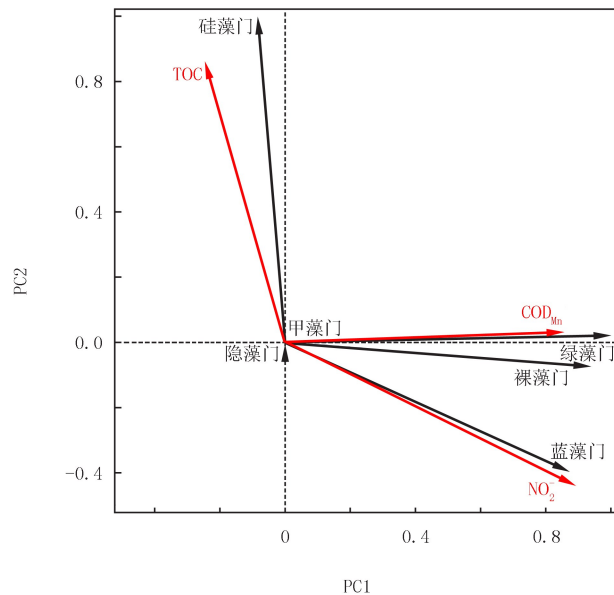
2.3 浮游植物群落结构与环境因子间的关系

通过 Monte Carlo 置换检验最终筛选出与浮游植物群落特征具有显著性相关性的主要水环境因子为 COD_{Mn} , NO_2^- 和 TOC。浮游植物群落与主要水环境因子的 RDA 分析结果见图2,第一轴和第二轴的特征值分别为0.919 8和0.070 5,共解释了共解释了物种信息的99.03%,由RDA排序可以看出,硅藻门与TOC,蓝藻门与 NO_2^- 和绿藻门与 COD_{Mn} 之间的夹角为锐角,并且根据箭长度及投影可以推断它们之间分别具有相关性。此外,由表1可知甲藻门和隐藻门四季的种数没有变化,结合排序图可以判断这两个门与TOC, COD_{Mn} 和 NO_2^- 没有相关性。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构季节变化的影响因素

滏阳河(邯郸段)调查浮游植物种类数在夏季最多,且绿藻门在4个季度浮游植物组成中均占比最高。分析形成此状况的原因可能有以下3个方面:1)浮游植物细胞分裂快慢由光照强度决定。夏季光照强度通常比其他季节强,浮游植物的光合作用得到增强,细胞分裂速度加快,单位时间内有更多新细胞形成。夏季光照时间相对比其他季节长,这也相应增加了浮游植物的积累。因此,光照强度和长度有利于浮游植物的生长和繁殖。2)夏季水温明显高于其他季节,而绿藻适宜生长的温度范围为 $25 \sim 35$ °C,为耐高温藻类。因此,绿藻种类数在夏季高于其他季节。3)各种营养盐是浮游植物的生长和繁殖



注:甲藻门和隐藻门箭长度为0,共线。

图2 滏阳河(邯郸段)浮游植物群落与主要水环境因子的RDA排序

Fig.2 RDA ordination of phytoplankton community and main water environment factors in Fuyang River (Handan section)

的物质基础,不同的营养盐组成会形成不同的浮游植物群落结构。滏阳河(邯郸段)属于亚热带季风气候,夏季降雨量通常较其他季节多,本研究河道沿岸主要为农田分布,农田施用的肥料会随雨水冲刷至河道内,水体中的营养盐成份增多。因此,为浮游植物的快速增殖提供了充足的物质基础(主要为氮、磷元素)。结合水质数据显示夏季各调查点位硝酸盐的平均浓度明显高于春、秋和冬季,而其他营养盐平均浓度与另外3个季节调查数据没有明显差别。因此,滏阳河(邯郸段)浮游植物的群落特征在时间上变化上主要由硝酸盐浓度决

定,与已有研究类似^[7].此外,束丝藻在4个季节优势种中均有存在,分析原因可能为:束丝藻属于蓝藻门,淡水水体常见水华蓝藻重要种类^[8],具有形成水华的生理潜能,正是这种特性使得束丝藻在本次调查中均为优势种.

3.2 浮游植物群落结构在空间上变化的影响因素

滏阳河(邯郸段)浮游植物群落结构在空间上总体呈现为密度、生物量和多样性指数上游高、中游低和下游较高,中间有部分较大程度波动.其中10#点位,单样本 t 检验结果显示浮游植物密度和生物量极显著大于其他点位($P < 0.01$).但其多样性指数反而最低,表明该位置浮游植物种类少,污染严重;水质数据显示总氮超标严重,已达到地表水劣V类.分析原因10#点位为邯郸市中心城区,主要为生活污水排入导致;中间部分的波动可能原因为城镇(乡村)生活污水排入,也有可能为农业面源污染.

3.3 浮游植物群落结构对环境因子的影响

由滏阳河(邯郸段)浮游植物群落与主要水环境因子的RDA排序可以看出浮游植物群落结构对 COD_{Mn} 、 NO_2^- 和TOC均有显著的影响.浮游植物是水体中TOC的主要来源^[9-10],硅藻与TOC相关性最大,因为硅藻是单细胞的光合真核生物,具有很强的固碳能力,这就解释了硅藻分布多的区域TOC含量高;此外,TOC的含量反映了水体有机物污染程度;当夏季水华发生时,藻类的光合作用增强,水体中 CO_2 浓度下降,pH升高和水体中溶解氧减少,这些条件有利于硝化反应和反硝化反应产生的 NO_2^- 的聚积^[11],这也相应增大了 COD_{Mn} 测量值.这与李少艾等^[12]在研究中发现水库中TOC与 COD_{Mn} 相关性良好结果类似.形成水华现象的优势种类为绿藻和蓝藻,因此,绿藻和蓝藻分布多的区域 COD_{Mn} 测量值高和 NO_2^- 质量浓度大.由RDA排序图推断出浮游植物的群落结构对特定的环境因子有着不同程度的影响.

水工建筑物(闸坝等)可以调控水流,防治水涝灾害,有效地利用水资源,同时也影响了水生态系统中浮游植物的生物量.浮游植物的生长需要一定的水动力环境条件.缓流水体适合浮游植物的生长和繁殖.由于滏阳河(邯郸段)沿岸近年来的不断发展,对水的需求越来越大,水资源超额使用,致使河道生态流量得不到保证.再加上枯水年份,降水量减少,河水流量就会更少.水流速低,水动力相应过小,河道内水体长时间处在不流动的状态,为浮游植物的快速生长和繁殖提供了有利的条件.水动力小,水体交换能力弱,各种营养物质会不断地累积,特别是在夏季持续高温的情况下,蓝绿藻会大量生长,形成藻华现象.后续应该对保证河流的生态流量及增强水动力等进行更全面更深入的探讨与研究.

附录

附图、附表见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.05.020).

参 考 文 献

- [1] 王超,单保庆,赵钰.滏阳河水系沉积物硝化速率分布及溶解氧的限制效应[J].环境科学学报,2015,35(6):1735-1740.
WANG C, SHAN B Q, ZHAO Y. Spatial distribution of nitrification rate and the restriction effect of oxygen in the Fuyang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1735-1740.
- [2] ZHAO J T, WU E W, ZHANG B W, et al. Pollution characteristics and ecological risks associated with heavy metals in the Fuyang River system in North China[J]. Environmental Pollution, 2021, 281: 116994.
- [3] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4] WOLLENBERG A L. Redundancy analysis an alternative for canonical correlation analysis[J]. Psychometrika, 1977, 42(2): 207-219.
- [5] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [6] NOMAN M A, SUN J, GANG Q, et al. Factors regulating the phytoplankton and tintinnid microzooplankton communities in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2019, 181: 14-24.
- [7] 许志,陈小华,沈根祥,等.上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析[J].环境科学,2020,41(8):3621-3628.
XU Z, CHEN X H, SHEN G X, et al. Spatial and temporal variation of phytoplankton community structure and its influencing factors in Shanghai River channels[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3621-3628.
- [8] 李仁辉,程耀,耿若真,等.蓝藻拟柱胞藻(*Cylindrospermopsis*)和尖头藻(*Raphidiopsis*)的分与合[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):39-46.
LI R H, CHENG Y, GENG R Z, et al. Taxonomic separation and combination of cyanobacterial genera *Cylindrospermopsis* and

- Raphidiopsis*[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(3):39-46.
- [9] 吴瑞,胡正义,孙艺齐,等.室内模拟水分管理对土壤溶液磷质量浓度影响研究[J].灌溉排水学报,2021,40(8):73-80.
WU R,HU Z Y,SUN Y Q,et al.The effects of soil water content on distribution of mobile phosphorus concentration in soil[J].Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(8):73-80.
- [10] KENDALL C,SILVA S R,KELLY V J.Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J].Hydrological Processes,2001,15(7):1301-1346.
- [11] 朱广伟.太湖富营养化现状及原因分析[J].湖泊科学,2008,20(1):21-26.
ZHU G W.Eutrophic status and causing factors for a large,shallow and subtropical Lake Taihu,China[J].Journal of Lake Sciences,2008,20(1):21-26.
- [12] 李少艾,刘德全,周密,等.深圳市饮用水源中 COD_{Mn}与 TOC 的相关性研究[J].中国环境监测,2005,21(6):30-33.
LI S A,LIU D Q,ZHOU M,et al.Study on the pertinence between COD_{Mn} and TOC in the drinking source of Shenzhen[J].Environmental Monitoring in China,2005,21(6):30-33.

Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with water environmental factors in Fuyang River(Handan section)

Li Zhong¹, Li Xuejun¹, Wang Liang², Li Budong²

(1. College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to study the spatial and temporal variations of phytoplankton community and its relationship with water environment factors in Fuyang River(Hantan section), the phytoplankton and water environmental factors at 14 sites of Fuyang River(Handan section) were investigated. The results showed that the main species of phytoplankton in the four seasons are Chlorophyta, followed by Bacillariophyta and Cyanophyta. Aphanizomenon was the dominant species. The average diversity index is 2.44, belonging to β -medium pollution, and the community structures are generally limited by illumination, nitrate, temperature and hydrodynamics conditions. COD_{Mn}, NO₂⁻ and TOC were the main water environmental factors that had the greatest correlation with phytoplankton community during the four seasons.

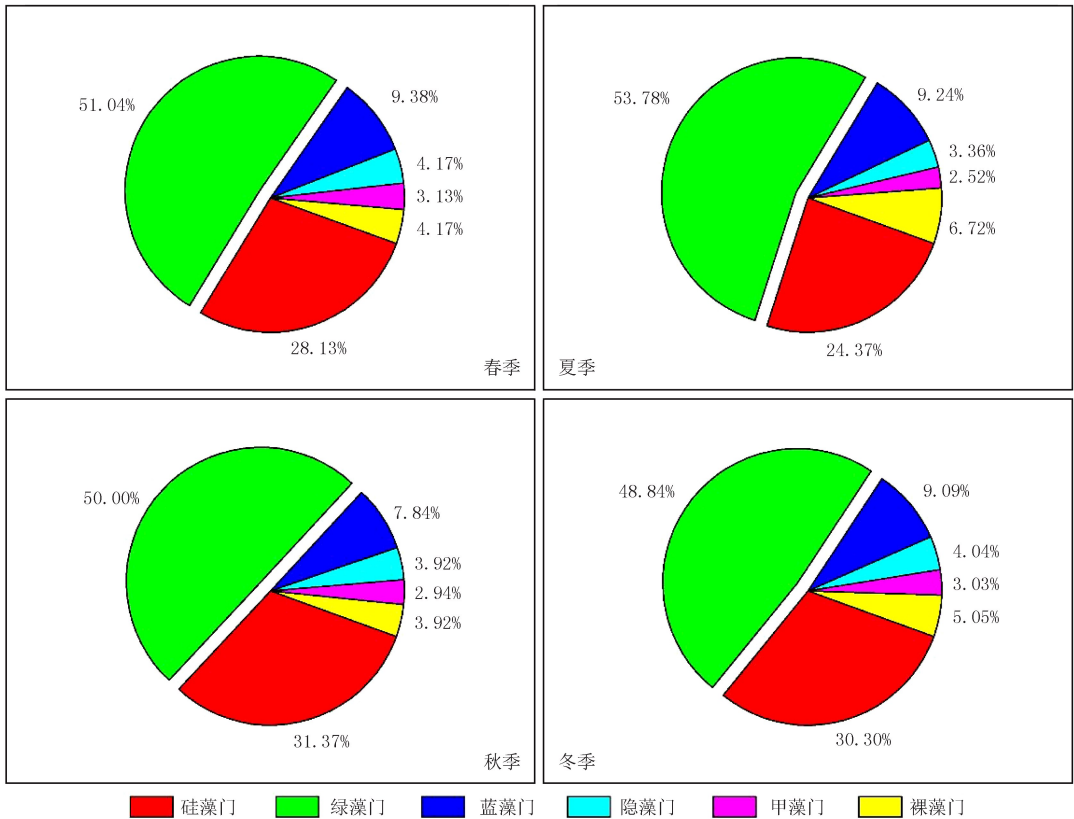
Keywords: phytoplankton; spatial-temporal variation; redundancy analysis(RDA); Fuyang River

[责任编辑 刘洋 杨浦]

附表 I 采样点位置坐标

Attached Tab. I Location coordinates of sampling points

编号	经度	纬度	编号	经度	纬度	编号	经度	纬度
1	114.210 3	36.422 3	6	114.423 8	36.375 4	11	114.522 7	36.632 0
2	114.229 6	36.415 6	7	114.430 0	36.426 7	12	114.532 2	36.699 3
3	114.268 9	36.418 7	8	114.477 5	36.510 0	13	114.6810	36.684 1
4	114.322 0	36.397 3	9	114.486 1	36.562 5	14	114.7413	36.682 5
5	114.336 9	36.380 3	10	114.515 1	36.599 8			



附图 I 滏阳河(邯郸段)浮游植物组成比例

Attached Fig. I Phytoplankton composition ratio in Fuyang River (Handan section)