

DOI: 10.5846/stxb201711282130

陈红, 刘清, 潘建雄, 王松, 王在照. 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. 生态学报, 2019, 39(1): - .

Chen H, Liu Q, Pan J X, Wang S, Wang Z Z. Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

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

陈 红¹, 刘 清^{2,3}, 潘建雄¹, 王 松¹, 王在照^{1,*}

1 西北农林科技大学动物科技学院, 杨凌 712100

2 西安市水产工作站, 西安 710054

3 西安市渔政监督管理站, 西安 710054

摘要: 为了解灞河城市段浮游生物群落结构及其与环境因子之间的关系, 于 2016 年 9 月至 2017 年 7 月每 2 个月进行一次采样分析。调查期间共鉴定出浮游植物 7 门 63 属, 其中绿藻门种类数最多 (34.9%), 其次为硅藻门 (30.2%); 浮游动物 4 类 45 种, 以轮虫 (48.9%) 和原生动物 (24.4%) 为主。浮游植物和浮游动物的丰度分别为 0.73×10^4 — 98.5×10^4 个/L 和 20—1084 个/L, 在时空分布上均呈现下游高于上游的趋势, 峰值均出现在夏季。根据水体透明度、溶解氧、总磷、总氮、高锰酸盐指数和重金属等理化指标, 浮游生物丰度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数对灞河城市段水质状况进行综合评价, 结果显示, 所研究流域总体为中污状态, 上游景观河道内的水生植物对水体具有一定的修复能力。典范对应分析表明, 水温、总氮、pH、溶解氧和汞是浮游植物群落分布的主要影响因子; 影响浮游动物群落分布的主要因子为水温、总氮、总磷、叶绿素 a 和汞。

关键词: 浮游生物; 群落结构; 时空分布; 生物多样性; 典范对应分析

Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River

CHEN Hong¹, LIU Qing^{2,3}, PAN Jianxiong¹, WANG Song¹, WANG Zaizhao^{1,*}

1 School of animal science and technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Xian Fisheries Station, Xi'an 710054, China

3 Xian Fishery Supervision Station, Xi'an 710054, China

Abstract: To evaluate the relationship between plankton community composition and environmental factors in a city section of the Ba River, the samples were collected and analyzed every two months from September 2016 to July 2017. In the study, 7 phyla and 63 genera of phytoplankton were identified, with the most abundant species of Chlorophyta (34.9%), followed by Bacillariophyta (30.2%). A total of 45 zooplankton species from 4 classes were identified, dominated by Rotifera (48.9%) and Protozoa (24.4%). The abundances of phytoplankton and zooplankton were 0.73×10^4 to 98.5×10^4 ind/L and 20 to 1084 ind/L, respectively. The spatial and temporal distribution of abundances of both phytoplankton and zooplankton showed a decreasing trends from the downstream to the upstream, with the peaks in summer. The water quality was comprehensively evaluated using plankton abundance, Shannon diversity index, Margalef abundance index, and physicochemical indexes including transparency, dissolved oxygen, total phosphorus, total nitrogen, permanganate index, and heavy metal content. The results showed that the city section of the Ba River was moderately polluted and that the

基金项目: 西安市渔政专项经费项目 (201510)

收稿日期: 2017-11-28; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zzwang@nwsuaf.edu.cn

aquatic plants in the river bed of the upstream landscape river have the ability to remove the pollutants. Canonical correspondence analysis indicated that water temperature, total nitrogen, pH, dissolved oxygen, and mercury are the key factors in phytoplankton community distribution, and that water temperature, total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll-a, and mercury are the key factors in zooplankton community distribution.

Key Words: plankton; community structure; spatial and temporal distribution; biodiversity; canonical correspondence analysis

浮游生物作为水域生态系统中的重要组成部分,对能量流动和物质循环以及维持水域生态系统的稳定具有重要作用^[1]。浮游生物对水体环境中各种因素的变化相当敏感,环境条件的改变会影响其种类及数量的变化,从而对环境变化起到指示作用^[2]。因此,浮游生物的种类组成和群落结构常作为水质评价的重要指标。灞河,是黄河支流渭河的支流,位于陕西省境内。它发源于蓝田县灞源乡,全长 109 km,流域面积 2581 km²。近年来,由于西安工业化和城市化进程的发展,大量未经严格处理的工业废水和生活污水排入灞河,导致其水生态系统遭到破坏。到目前为止,有关灞河浮游生物群落结构及水质评价的研究较少,绝大多数发表时间较早且仅涉及环境因子方面^[3-6]。因此,本研究于 2016 年 9 月至 2017 年 7 月对灞河城市段不同采样点浮游生物的群落结构、时空差异进行了深入调查,并运用典范对应分析(CCA)进一步探讨了其群落结构与环境因子的关系,旨在全面了解灞河的水质状况以及景观河道对水体的净化能力,为城市河流生态系统的保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设和采样时间

自 2004 年 9 月,西安市以灞河城市段为核心水体规划和建设了浐灞生态区,其中建成了全硬质护岸的河道堤防 50 公里,橡胶坝 4 座,亲水景观平台 18 座,形成水面 11.3 km²,建成并开放了雁鸣湖、广运潭等大型水生态公园,是西北地区首批国家级水生态保护与修复试点区和国家湿地公园所在地。根据灞河城市流域的环境特征,从上游到下游有代表性的设置 8 个采样点,依次为灞河湿地公园(S1)、世博园上游(S2)、世博园下游(S3)、欧亚桥(S4)、浐灞交汇处(S5)、污水处理厂出水口(S6)、秦汉大桥(S7)、最下游大坝(S8);8 个采样点被橡胶坝拦截为四个水体,其中 S1 与 S2 之间有 2 个橡胶坝,在 2 个坝之间的景观河流的河床上种植有树木及大型水生植物,S3 与 S4 及 S5 与 S6 之间分别有 1 个橡胶坝,S8 下游有一个橡胶坝(图 1)。本研究于 2016 年 9 月至 2017 年 7 月,每 2 个月进行一次采样分析。

1.2 调查方法

1.2.1 浮游生物的采集和处理

浮游植物定性样品的采集使用 25 号浮游生物网,在水面下 0.5 m 左右呈“∞”状缓慢拖行数分钟,采集后加入 4%的甲醛溶液进行现场固定;定量样品使用 1 L 的有机玻璃采水器采集,采集后现场加入 15 mL 的鲁哥试液固定,实验室静置 48 h 后浓缩至 30 mL 进行样品鉴定^[7-8]。

采用 13 号浮游生物网在水面表层进行浮游动物定性样品的采集,并用 4%的甲醛溶液固定;定量样品经 5 L 的采水器采集后用 13 号浮游生物网过滤,并用 4%的甲醛溶液现场固定,带回实验室沉淀浓缩后进行样品鉴定^[9-10]。

1.2.2 理化指标的测定

采用多参数水质分析仪(Multi 3430, WTW)现场测定 pH、水温(WT)、溶解氧(DO)和电导率(EC),用塞氏盘测定水体透明度(SD);采集的水样运回实验室后参考国家标准方法^[11]进行叶绿素 a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)和化学需氧量(COD_{Mn})的测定;重金属元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICAP Qc, ThermoFisher)

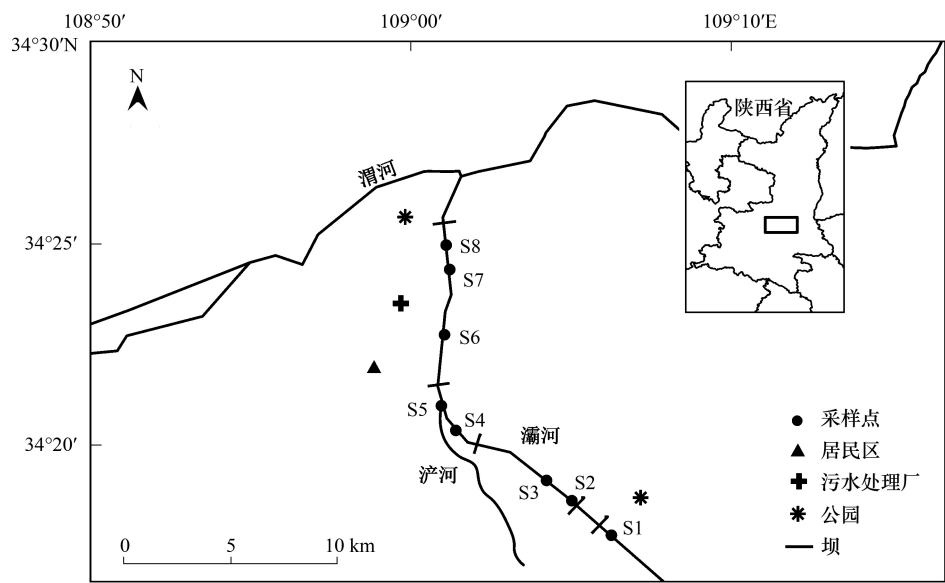


图 1 灞河城市段采样点的分布
Fig.1 Sampling sites in Xi'an city section of Ba river
“S”表示采样点,Site

进行测定。

1.3 数据处理

1.3.1 物种多样性指数

采用 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 物种丰富度指数对物种多样性进行分析,计算公式为:

Shannon-Wiener 多样性指数(H): $H = - \sum P_i \times \log_2 P_i$

Margalef 丰富度指数(D): $D = (S - 1) / \log_2 N$

式中, $P_i = N_i / N$, N_i 表示第 i 种的个体数, N 表示样品的总个体数; S 表示样品的种类总数,具体评价标准见表 1^[12-14]。

表 1 多样性指数评价标准
Table 1 Assessment standard of diversity indexes

多样性指数 Diversity index	评价标准 Evaluation standard			
香农-维纳指数 Shannon-Wiener index	0—1 重污染	1—2 α -中污染	2—3 β -中污染	>3 轻污或无污染
丰富度指数 Margalef index	0—1 重污染	1—2 α -中污染	2—3 β -中污染	>3 轻污或无污染

1.3.2 优势种

优势度表示浮游生物群落内各生物种类处于何种优势或劣势状态的群落测定度,根据物种的出现频率和个体数量来确定。

$Y = (n_i / N) \times f_i$

式中, f_i 表示第 i 种在各采样点的出现频率, n_i 表示第 i 种的个体数, N 表示样品中总个体;当 $Y > 0.02$ 时,定为优势种^[15]。

1.3.3 典范对应分析(CCA)

CCA 能够将物种数据和环境因子用回归分析方法相结合,更加直观的反映了物种和环境因子间的关系^[16-17]。本文采用 Canoco for Windows 4. 5 软件对浮游生物和环境因子进行 CCA 分析,将优势种作为排序物种^[18],分析前将物种数据和环境数据进行对数转换^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子的时空分析

灞河城市段水体理化因子的时空分布见表 2 和表 3。在时间分布上,灞河城市段全年水温为 6.01—29.03℃,SD 为 0.32—0.73 m,Chl-a 含量为 14.84—41.33 mg/L。根据国家《地表水环境质量标准》^[11],对水体理化因子进行评价可知,全年 DO、As 和 Pb 含量均属于 I 类水;Cd 含量除 2016 年 9 月属于 II 类水外,其他采样时间点均属于 I 类水;Hg 含量全年变化范围较大,符合 II—III 类水质标准,且从 2016 年 9 月至 2017 年 7 月逐渐升高;而 COD_{Mn} 和 TP 含量变化符合 III—V 类水质标准;TN 含量全年均超标严重,属于劣 V 类水。从空

表 2 水体理化因子的时间分布

Table 2 The time distribution of chemical and physical factors

环境因子 Environmental variables	单位 Unit	2016.09	2016.11	2017.01	2017.03	2017.05	2017.07
WT 水温	℃	24.93±0.18	12.98±0.59	6.01±0.62	11.11±0.52	24.09±0.49	29.03±0.59
pH	—	8.35±0.52	8.02±0.17	8.09±0.36	8.10±0.42	8.51±0.38	8.85±0.48
SD 透明度	m	0.55±0.25	0.32±0.10	0.68±0.12	0.54±0.10	0.73±0.19	0.44±0.24
S 电导率	s/m	0.059±0.019	0.045±0.016	0.077±0.021	0.058±0.017	0.051±0.018	0.052±0.013
DO 溶解氧	mg/L	8.94±3.03	8.85±1.20	10.10±4.04	9.58±2.87	10.25±1.87	12.08±3.33
COD _{Mn} 高锰酸盐指数	mg/L	8.07±2.79	4.47±0.95	6.2±1.99	6.83±3.31	6.74±1.55	8.03±3.72
TN 总氮	mg/L	5.74±1.11	11.23±1.70	8.10±1.38	8.33±3.10	15.15±4.15	17.33±2.48
TP 总磷	mg/L	0.17±0.13	0.14±0.08	0.25±0.18	0.25±0.30	0.13±0.11	0.24±0.18
Chl-a 叶绿素 a	mg/L	41.33±22.00	16.71±5.69	14.84±7.53	17.68±4.29	25.56±9.71	39.50±19.32
As 砷	μg/L	6.42±4.75	3.82±2.69	14.72±14.22	9.72±10.93	5.57±4.19	5.67±3.48
Pb 铅	μg/L	5.48±2.52	3.67±0.77	1.76±0.69	3.07±0.98	2.57±1.11	0.91±0.41
Hg 汞	μg/L	0.05±0.03	0.07±0.02	0.15±0.02	0.28±0.09	0.41±0.22	1.38±0.25
Cd 镉	μg/L	2.36±1.99	0.16±0.03	0.06±0.02	0.14±0.11	0.07±0.03	0.10±0.05

WT: 水温, Water temperature; SD: 透明度, Transparency; S: 电导率, Conductivity; DO: 溶解氧, Dissolved oxygen; COD_{Mn}: 高锰酸盐指数, Permanganate index; TN: 总氮, Total nitrogen; TP: 总磷, Total phosphorus; Chl-a: 叶绿素 a, Chlorophyll a; As: 砷, Arsenic; Pb: 铅, Lead; Hg: 汞, Mercury; Cd: 镉, Cadmium

表 3 水体理化因子的空间分布

Table 3 The spatial distribution of chemical and physical factors

环境因子 Environmental variables	单位 Unit	S1 采样点 1 Sampling sites 1	S2 采样点 2 Sampling sites 2	S3 采样点 3 Sampling sites 3	S4 采样点 4 Sampling sites 4	S5 采样点 5 Sampling sites 5	S6 采样点 6 Sampling sites 6	S7 采样点 7 Sampling sites 7	S8 采样点 8 Sampling sites 8
WT 水温	℃	17.82±9.37	17.68±9.67	18.10±9.49	17.80±9.09	18.10±8.77	18.43±9.20	18.17±8.86	18.08±9.17
pH	—	8.51±0.27	8.49±0.25	8.63±0.31	8.52±0.42	8.55±0.64	7.85±0.17	7.95±0.42	8.06±0.54
SD 透明度	m	0.45±0.17	0.54±0.15	0.81±0.27	0.65±0.24	0.42±0.14	0.37±0.27	0.53±0.13	0.58±0.17
S 电导率	s/m	0.043±0.006	0.041±0.007	0.038±0.009	0.049±0.017	0.071±0.018	0.076±0.014	0.069±0.014	0.068±0.017
DO 溶解氧	mg/L	11.60±1.55	10.32±1.72	10.83±1.73	12.30±3.36	11.93±1.71	4.28±0.08	4.28±0.08	4.28±0.08
COD _{Mn} 高锰酸盐指数	mg/L	4.28±0.08	4.77±1.75	4.24±1.00	6.87±1.92	8.52±2.07	10.16±3.51	7.42±1.57	7.53±2.00
TN 总氮	mg/L	8.58±4.14	9.31±3.78	8.98±3.91	9.30±3.87	11.84±5.45	14.10±5.51	13.10±5.28	12.63±5.11
TP 总磷	mg/L	0.09±0.09	0.06±0.03	0.04±0.03	0.09±0.08	0.28±0.08	0.41±0.21	0.31±0.16	0.28±0.16
Chl-a 叶绿素 a	mg/L	17.79±5.74	23.35±12.03	17.49±5.83	34.94±20.27	32.68±21.51	33.35±29.43	23.02±10.81	24.83±11.31
As 砷	μg/L	1.81±0.79	1.79±0.65	1.69±0.68	4.26±3.56	7.75±7.24	17.66±12.22	13.16±7.06	13.10±7.93
Pb 铅	μg/L	2.88±1.62	2.49±1.28	2.18±1.14	3.23±2.50	3.97±3.01	2.65±1.75	2.89±1.82	3.00±2.07
Hg 汞	μg/L	0.44±0.53	0.37±0.42	0.33±0.42	0.36±0.52	0.45±0.71	0.40±0.58	0.36±0.44	0.40±0.50
Cd 镉	μg/L	0.46±0.77	0.19±0.24	0.28±0.33	0.50±1.04	1.24±2.84	0.40±0.71	0.38±0.72	0.40±0.75

间分布来看,各采样点的温度和 pH 无显著差别;Chl-a 含量最高的前三位分别是欧亚桥(S4)、污水处理厂出水口(S6)和浐灞河交汇处(S5);浐灞河交汇处(S5)重金属浓度最高,污水处理厂出水口(S6)各营养盐浓度最大,且 DO 和 SD 最低;上游 4 个采样点(S1、S2、S3、S4)和下游 4 个采样点(S5、S6、S7、S8)相比,营养盐浓度与重金属含量相对较低,DO、SD 相对较高。

2.2 浮游生物群落结构特征

灞河城市段 8 个采样点全年共鉴定出浮游植物 7 门 63 属。其中,绿藻门属数最多,为 22 属,占总数的 34.9%;其次为硅藻门 19 属,占总数的 30.2%;蓝藻门 10 属,占总数的 15.9%;甲藻门 4 属,占总数的 6.3%;金藻门和裸藻门均为 3 属,均分别占总数的 4.8%;隐藻门最少,仅有 2 属,占总数的 3.2%。浮游植物全年各采样点丰度变化范围为 0.73×10^4 — 98.50×10^4 个/L,其中 2016 年 9 月污水处理厂出水口(S6)细胞密度最高,2017 年 1 月世博园下游(S3)最低。由图 2 可以看出,浮游植物群落结构具有明显的时间分布差异,夏秋两季主要以蓝藻门和绿藻门为主,冬春硅藻门占绝对优势,隐藻门、绿藻门和裸藻门所占比例相差不大;由图 3、图 4 可知,夏秋两季浮游植物丰度明显偏高,各采样点全年浮游植物丰度表现为 $S6 > S5 > S4 > S7 > S8 > S2 > S1 > S3$,其中 S5 和 S6 的细胞密度明显高于其他采样点。浮游植物优势属的分布季节差异显著,小球藻属、颤藻属在 2016 年 7 月和 9 月具有绝对优势,在 2017 年 1 月和 3 月以硅藻门优势属为主。针杆藻属、直链藻属、小环藻属、菱形藻属、隐藻属和囊裸藻属的时间分布比较广泛,全年均为优势属。

共鉴定出浮游动物 4 类 45 种,其中轮虫 22 种,占种类总数的 48.9%,原生动物 11 种,占 24.4%,枝角类 7 种,占 15.6%,桡足类 5 种,占 11.1%。调查期间,浮游动物密度变化范围为 20—1084 个/L,其中最高值出现在 2017 年 7 月的秦汉大桥(S7)。由图 3 可知,全年浮游动物组成除 2016 年 11 月以原生动物占优势外,其余均以轮虫类为主;枝角类和桡足类密度比例分别在 2017 年 7 月和 2016 年 9 月达到最高,为 24.1%和 25.3%;由图 4、图 5 可以看出浮游动物丰度的时空变化趋势与浮游植物基本吻合。浮游动物优势种全年均为轮虫类占优势,其中臂尾轮虫最多,占轮虫类种类数的 50%;其次为原生动物和枝角类,桡足类最少,仅有 1 种。

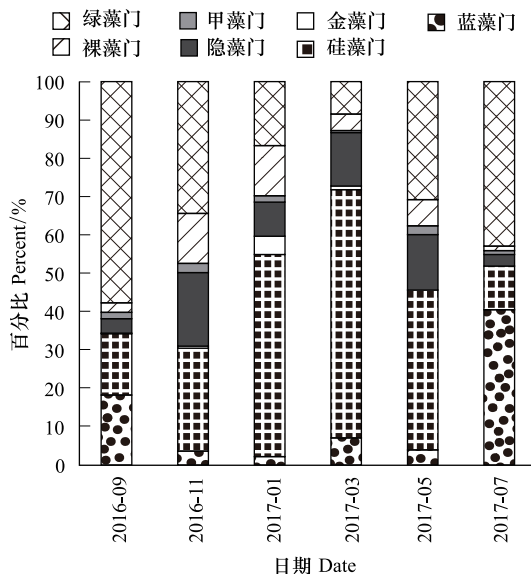


图 2 浮游植物丰度百分比的时间分布

Fig.2 The time distribution of the percentage of phytoplankton abundance

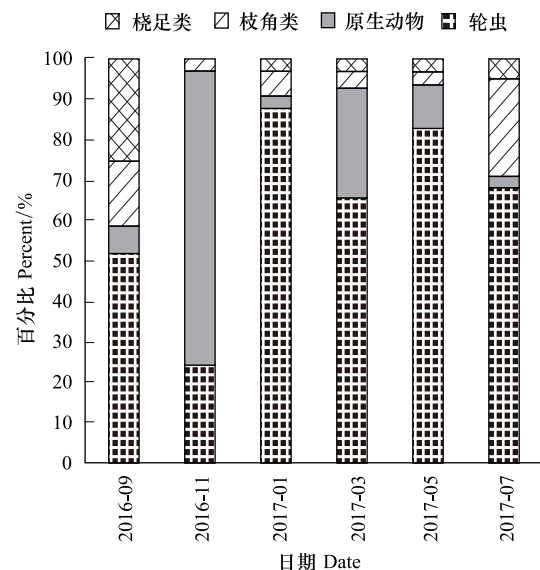


图 3 浮游动物丰度百分比的时间分布

Fig.3 The time distribution of the percentage of zooplankton abundance

2.3 浮游生物多样性分析

浮游植物多样性的时空分布见表 4,其中 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 2.14—4.10,平均值为 3.16,污染等级为轻污或无污染(表 1),其中 2016 年 11 月的 S2 污染程度最轻,2016 年 9 月的 S6 污染最重;

Margalef 物种丰富度指数范围为 1.04—1.86, 平均值为 1.39, 污染等级为 α -中污染, 其中 2016 年 9 月的 S7 污染程度最轻, 2017 年 1 月的 S8 污染最重。各采样点 Shannon-Wiener 多样性指数大小排序为 $S2>S1>S4>S3>S8>S7>S5>S6$, Margalef 物种丰富度指数大小排序为 $S4>S2>S1>S3=S7>S5>S8>S6$; 不同采样时间 Shannon-Wiener 多样性指数大小排序为 2016 年 11 月>2017 年 1 月>2017 年 3 月>2017 年 5 月>2017 年 7 月>2016 年 9 月, Margalef 物种丰富度指数大小排序为 2016 年 9 月>2016 年 11 月>2017 年 7 月>2017 年 3 月>2017 年 5 月>2017 年 1 月。

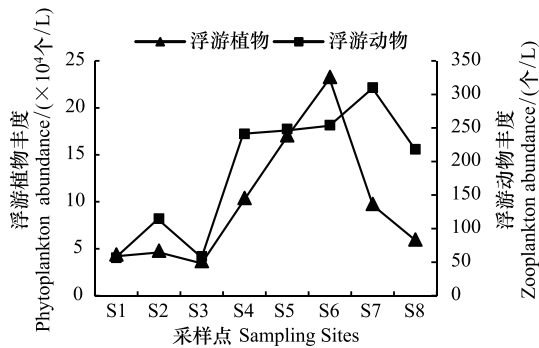


图 4 浮游生物丰度的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of plankton abundance

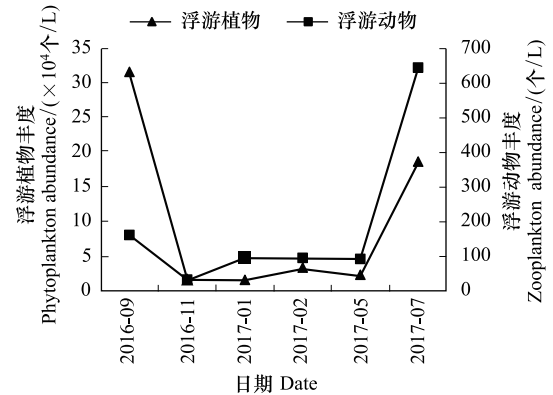


图 5 浮游生物丰度的时间分布

Fig.5 The time distribution of plankton abundance

浮游动物多样性的时空分布见表 5, 其中浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数在 1.08—3.25 之间, 平均值为 2.50, 污染等级为 β -中污染, 其中 2016 年 9 月的 S1 污染程度最轻, 2017 年 3 月的 S8 污染最重; Margalef 物种丰富度指数范围为 0.70—1.73, 平均值为 1.23, 污染等级为 α -中污染, 其中 2016 年 9 月的 S3 污染程度最轻, 2016 年 11 月的 S5 污染最重。各采样点 Shannon-Wiener 多样性指数大小排序为 $S5>S1>S3>S4>S2>S7>S8>S6$, Margalef 物种丰富度指数大小排序为 $S7>S5>S3>S1>S4>S2=S6>S8$; 不同采样时间 Shannon-Wiener 多样性指数大小排序为 2017 年 7 月>2017 年 5 月>2016 年 9 月>2017 年 1 月>2017 年 3 月>2016 年 11 月, Margalef 物种丰富度指数大小排序为 2017 年 7 月>2016 年 9 月>2017 年 1 月=2017 年 5 月>2017 年 3 月>2016 年 11 月。

表 4 浮游植物生物多样性的时空分布

Table 4 Spatial and temporal distribution of diversity of phytoplankton

采样点 Sample site	2016.09		2016.11		2017.01		2017.03		2017.05		2017.07		平均 Average	
	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
S1	3.25	1.52	3.82	1.59	3.31	1.15	3.59	1.40	3.35	1.36	3.10	1.57	3.40	1.43
S2	3.42	1.70	4.10	1.78	3.42	1.19	3.60	1.37	3.36	1.24	3.38	1.42	3.55	1.45
S3	2.67	1.56	3.90	1.71	3.58	1.09	3.30	1.43	3.45	1.36	3.22	1.25	3.35	1.40
S4	3.67	1.86	3.90	1.66	3.16	1.39	3.33	1.31	3.02	1.37	3.18	1.37	3.38	1.49
S5	2.35	1.57	3.30	1.53	2.98	1.14	3.43	1.25	2.88	1.26	2.87	1.58	2.97	1.39
S6	2.14	1.26	2.83	1.12	2.93	0.98	2.55	1.42	2.86	1.10	2.39	1.43	2.62	1.22
S7	2.83	1.86	3.37	1.67	3.28	1.20	2.68	1.12	2.92	1.17	2.80	1.38	2.98	1.40
S8	2.65	1.63	3.44	1.43	2.95	1.04	3.00	1.55	3.13	1.32	2.97	1.26	3.02	1.37
平均 Average	2.87	1.62	3.58	1.56	3.20	1.15	3.19	1.36	3.12	1.27	2.99	1.41		

表 5 浮游动物生物多样性的时空分布														
Table 5 Spatial and temporal distribution of diversity of zooplankton														
采样点 Sample site	2016.09		2016.11		2017.01		2017.03		2017.05		2017.07		平均 Average	
	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
S1	3.25	1.67	2.29	0.87	2.40	0.97	2.35	1.16	2.63	1.20	2.85	1.64	2.63	1.25
S2	2.42	1.39	2.46	0.90	2.52	1.23	2.12	0.93	2.76	1.33	3.01	1.53	2.55	1.22
S3	2.99	1.73	2.24	0.93	2.17	1.05	2.06	0.98	2.70	1.24	3.23	1.62	2.57	1.26
S4	2.56	1.20	2.05	0.93	2.38	0.98	3.14	1.53	2.30	1.15	2.96	1.60	2.56	1.23
S5	2.87	1.46	2.03	0.70	2.95	1.48	2.29	1.08	2.74	1.33	3.05	1.61	2.66	1.28
S6	2.19	1.39	1.73	0.75	2.22	1.27	2.20	1.02	2.77	1.38	2.35	1.50	2.24	1.22
S7	2.50	1.65	2.00	0.71	3.05	1.51	1.91	1.02	2.99	1.35	2.33	1.49	2.46	1.29
S8	2.65	1.61	2.14	0.76	3.10	1.43	1.08	0.71	2.61	0.94	2.62	1.28	2.37	1.12
平均 Average	2.68	1.51	2.12	0.82	2.60	1.24	2.14	1.05	2.69	1.24	2.80	1.53		

2.4 浮游生物与环境因子的 CCA 分析

对灞河城市段浮游生物优势种和环境因子进行 CCA 排序分析,用于 CCA 分析中的浮游生物物种及代码见表 6。表 7 为浮游生物 CCA 分析的统计信息,其中浮游植物前两个排序轴的特征值分别为 0.616、0.316,物种环境相关系数分别为 0.967、0.981,共解释了 77.7%的物种-环境变异累积比;浮游动物前两个排序轴的特征值分别为 0.495、0.354,物种环境相关系数分别为 0.941、0.924,共解释了 68.7%的物种-环境变异累积比。浮游植物和浮游动物排序轴中前两轴的物种环境相关系数均较高,表明灞河城市段浮游生物物种组成与环境因子之间关系紧密。

表 6 浮游生物在 CCA 排序图中的物种及编号				
Table 6 Species and their codes of plankton for CCA				
浮游生物 Plankton	编号 Code	物种 Species	编号 Code	物种 Species
浮游植物 Phytoplankton	sp1	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	sp19	隐藻属 <i>Cryptomonas</i>
	sp2	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	sp20	黄群藻属 <i>Synura</i>
	sp3	鞘丝藻属 <i>Lyngbya</i>	sp21	裸甲藻属 <i>Gymnodinium</i>
	sp4	束丝藻属 <i>Aphanizomenon</i>	sp22	薄甲藻属 <i>Glenodinium</i>
	sp5	伪鱼腥藻属 <i>Pseudanabaena</i>	sp23	裸藻属 <i>Euglena</i>
	sp6	节旋藻属 <i>Arthrospira</i>	sp24	囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i>
	sp7	针杆藻属 <i>Synedra</i>	sp25	扁裸藻属 <i>Phacus</i>
	sp8	直链藻属 <i>Melosira</i>	sp26	四角藻属 <i>Tetrastrum</i>
	sp9	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	sp27	鼓藻属 <i>Cosmarium</i>
	sp10	异极藻属 <i>Gomphonema</i>	sp28	栅藻属 <i>Scenedesmus</i>
	sp11	小环藻属 <i>Cyclotella</i>	sp29	盘星藻属 <i>Pediastrum</i>
	sp12	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	sp30	空球藻属 <i>Eudorina</i>
	sp13	舟形藻属 <i>Navicula</i>	sp31	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>
	sp14	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	sp32	小球藻属 <i>Chlorella</i>
	sp15	波缘藻属 <i>Cymatopleura</i>	sp33	月牙藻属 <i>Selenastrum</i>
	sp16	双壁藻属 <i>Diploneis</i>	sp34	新月藻属 <i>Closterium</i>
	sp17	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	sp35	惠氏藻属 <i>Westella</i>
	sp18	蓝隐藻属 <i>Chroomonas</i>		
浮游动物	sp1	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	sp16	蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>
	sp2	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	sp17	中华拟铃壳虫 <i>Tintinnopsis sinensis</i>

续表

浮游生物 Plankton	编号 Code	物种 Species	编号 Code	物种 Species
Zooplankton	sp3	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	sp18	瓶砂壳虫 <i>Diffugia urceolata</i>
	sp4	尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>	sp19	乳头砂壳虫 <i>Diffugia mammillaris</i>
	sp5	晶囊轮属 <i>Asplanchna</i>	sp20	江苏拟铃壳虫 <i>Tintinnopsis kiangsuensis</i>
	sp6	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	sp21	钟虫属 <i>Vorticella</i>
	sp7	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	sp22	瓶累枝虫 <i>Epistylis urceolata</i>
	sp8	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	sp23	湖沼砂壳虫 <i>Diffugia limnetica</i>
	sp9	迈氏三肢轮虫 <i>Filinia maior</i>	sp24	弯凸表壳虫 <i>Arcella gibbosa</i>
	sp10	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	sp25	筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>
	sp11	镰状臂尾轮虫 <i>Brachionus falcatus</i>	sp26	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>
	sp12	矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>	sp27	鸚鵡溞 <i>Daphnia psittacea</i>
	sp13	截头皱甲轮虫 <i>Ploesoma truncatum</i>	sp28	多刺裸腹溞 <i>Monia macrocopa</i>
	sp14	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	sp29	长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>
	sp15	纤巧异尾轮虫 <i>Trichocerca tenuior</i>	sp30	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>

注:CCA;典范对应分析,Canonical correspondence analysis

表 7 浮游生物群落 CCA 分析的统计信息

Table 7 Summary statistics for the axes of CCA performed on plankton

统计信息 Statistical information 轴 Axes	浮游植物 Phytoplankton		浮游动物 Zoonplankton	
	1	2	1	2
特征值 Eigenvalues	0.616	0.316	0.495	0.354
物种环境相关性 Species-environment correlations	0.967	0.981	0.941	0.924
物种-环境变异累计百分比 Cumulative percentage variance of species- environment relation	30.9	46.8	25.3	43.4

由表 8 可知,CCA 中物种排序 (SPEC AX1、SPEC AX2) 前两个轴之间的相关系数浮游植物和浮游动物分别为-0.013、0.003,环境排序 (ENVI AX1、ENVI AX2) 中相关系数均为 0,表明 CCA 排序图能够较好的反映物种与环境间的关系,排序结果真实可靠^[21-22]。根据浮游植物与环境因子的相关性分析,灞河城市段浮游植物群落变化主要受 TN、COD_{Mn}、WT、pH、DO、SD、Hg、Pb 等因子的影响。其中,COD_{Mn}、WT 均与轴一呈负相关,相关系数分别为-0.607、-0.797,SD 与轴一呈正相关,相关系数为 0.574; TN、pH、DO、Hg 与轴二呈正相关,相关系数分别为 0.726、0.708、0.705、0.850,Pb 与轴二呈负相关,相关系数为-0.609。根据浮游动物与环境因子的相关性分析,对灞河城市段浮游动物群落变化影响较大的环境因子为 Chla、TN、TP、COD_{Mn}、WT、pH、S、Hg。其中,Chla、COD_{Mn}、WT、pH、Hg 与轴一均呈负相关,相关系数分别为-0.658、-0.529、-0.860、-0.516、-0.634; TN、TP、S 与轴二呈负相关,相关系数分别为-0.622、-0.579、-0.501。

图 6 和图 7 为浮游生物与环境因子的 CCA 排序图,物种在排序图中的位置是所处环境因素综合反映的结果^[23]。由图 6 可知,浮游植物的大部分物种均分布在第二排序轴的右侧,与 SD 呈正相关,与 WT、COD_{Mn} 等呈负相关;颤藻属、微囊藻属、节旋藻属等与 WT、Hg、TN、pH、DO 具有正相关性;伪鱼腥藻属、菱形藻属等与 COD_{Mn} 以及重金属 Pb 均呈正相关,与 SD、DO 呈负相关。图 7 中,轮虫类在排序图中的分布比较分散,其不同种类对环境因子的适应性存在明显差异;部分轮虫类以及大部分原生动物与 SD、As 呈正相关,与 WT、Chla 等呈负相关;裂足臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、乳头砂壳虫、筒弧象鼻溞与重金属 Cd 和 Pb 正相关性较高;纤巧异尾轮虫、多刺裸腹溞、广布中剑水蚤与 WT、Chla 等呈正相关,与 As 呈负相关;角突臂尾轮虫、蒲达臂尾轮虫等与 COD_{Mn}、TN、TP、S 以及 Hg 呈正相关,与 SD 呈负相关。

表 8 前 2 个排序轴和环境因子间的相关系数

环境因子 Environmental variables	浮游植物 Phytoplankton				浮游动物 Zoonplankton			
	排序轴 Axes				排序轴 Axes			
	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
SPEC AX1	1				1			
SPEC AX2	-0.013	1			0.003	1		
ENVI AX1	0.967	0	1		0.941	0	1	
ENVI AX2	0	0.981	0	1	0	0.924	0	1
Chl-a					-0.658	-0.026	-0.699	-0.028
TN	-0.123	0.726	-0.127	0.740	-0.461	-0.622	-0.490	-0.674
TP	-0.353	-0.040	-0.365	-0.041	-0.044	-0.579	-0.047	-0.627
COD _{Mn}	-0.607	-0.183	-0.628	-0.186	-0.529	-0.379	-0.563	-0.411
WT	-0.797	0.385	-0.824	0.392	-0.860	0.050	-0.914	0.054
pH	-0.074	0.708	-0.076	0.722	-0.516	-0.002	-0.548	-0.003
DO	-0.020	0.705	-0.020	0.719	-0.418	-0.040	-0.444	-0.044
SD	0.574	0.173	0.594	0.176	0.404	0.368	0.429	0.399
S	-0.372	-0.496	-0.385	-0.506	0.110	-0.501	0.117	-0.542
As	-0.093	-0.429	-0.096	-0.437	0.338	-0.406	0.359	-0.439
Cd	-0.285	-0.286	-0.295	-0.292	-0.150	0.477	-0.159	0.516
Hg	-0.166	0.850	-0.172	0.866	-0.634	-0.498	-0.674	-0.539
Pb	-0.219	-0.609	-0.226	-0.620	0.182	0.445	0.194	0.481

SPEC AX1:物种轴 1, Species axis 1; SPEC AX2:物种轴 2, Species axis 2; ENVI AX1:环境轴 1, Environment axis 1; ENVI AX2:环境轴 2, Environment axis 2

3 讨论

3.1 浮游生物群落的时空分布特征

调查期间,灞河城市段浮游植物种类组成主要以硅藻、绿藻、蓝藻为主,其中夏秋两季绿藻和蓝藻占绝对优势,冬春两季硅藻和隐藻占比大幅提升,这与类似研究结果一致,在这些研究中蓝藻和绿藻适宜在温暖的水体中生长,而硅藻和隐藻多为冷水性物种^[24-25]。浮游动物种类组成全年主要以轮虫为主,其次为原生动物,且浮游动物丰度主要受轮虫影响,这与许多受污染河流中浮游动物的群落特征相似^[2, 26]。浮游植物和浮游动物丰度的时空变化趋势基本一致,这可能与浮游植物为浮游动物提供食物来源有关^[27]。研究表明,水温对浮游生物丰度的影响较大^[28-29],夏季光照、温度等条件适宜浮游植物的大量繁殖,充足的食物来源也为浮游动物的繁殖提供了条件。因此,在研究中浮游植物和浮游动物丰度的季节变化明显,夏季浮游生物丰度明显高于其他季节。空间分布上,下游浮游生物丰度整体高于上游,浮游植物和浮游动物丰度的最高值分别出现在 S6、S7 采样点。浮游生物丰度受水体中有机质、营养盐的影响,S6 处污水处理厂的出水使此处水体有机质、营养盐含量明显升高,随着水体的流动,S7 采样点有机质、营养盐的含量也相对较高,进而导致某些浮游生物的大量繁殖。浮游动物丰度未出现在有机质、营养盐最丰富的 S6 采样点,说明浮游生物丰度不仅受有机质、营养盐的影响,还受水体环境中其他因素的影响。

3.2 水质评价

浮游生物群落结构、丰度、多样性指数及水体理化指标等均能在一定程度上反映水体的水质状况。浮游植物在贫营养水体中金藻占主体,中营养型水体硅藻占主体,富营养型水体则以绿藻、蓝藻占主体^[2]。本研究中浮游植物夏秋以绿藻、蓝藻为主,冬春以硅藻为主,说明灞河城市段水体处于中富营养型状态。浮游植物优势类群中的颤藻属、微囊藻属、伪鱼腥藻属和裸藻属等均为耐污种类,同时浮游动物全年以轮虫为主,且轮虫优势种中大部分为耐污的臂尾轮虫属和龟甲轮虫属,表明灞河城市段水体受到了一定程度的污染。由理化

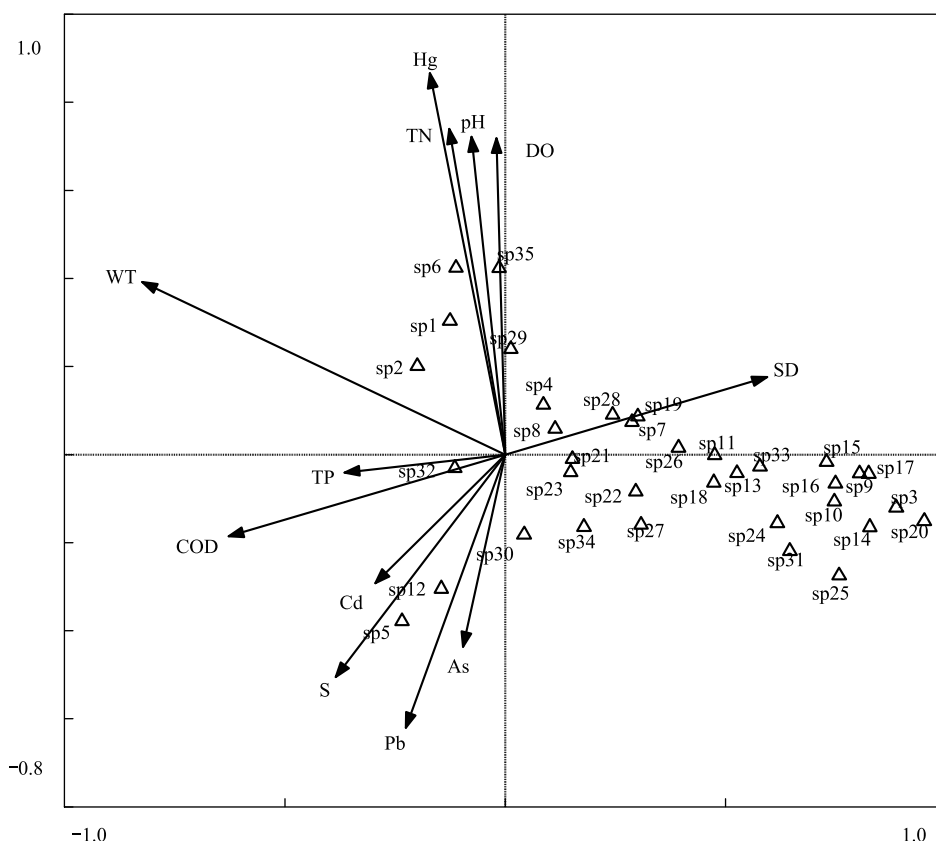


图6 浮游植物与环境因子的 CCA 排序图

Fig.6 CCA biplot of phytoplankton species and environmental variables

指标的监测结果可知,调查期间灞河城市段水质状况较差,全年营养盐含量均较高,也表明灞河城市段水质受到一定程度的污染。根据多样性指数评价标准对水质状况进行综合评价可知,灞河城市段水体属于中污型,特别是污水处理厂出水口附近污染最为严重。

研究区域的 8 个采样点中 S1 与 S2 之间的河道为浅水区,种植有树木及大型水生植物,由于河床上植物的修复作用,S2 采样点与 S1 采样点相比,水体中重金属含量偏低,但 COD_{Mn} 和 TN 的浓度偏高,这可能由于 S2 采样点紧邻橡胶坝,经坝顶水的流量在枯水期为 $3\text{—}4\text{ m}^3/\text{s}$,而在丰水期为 $400\text{—}800\text{ m}^3/\text{s}$,巨大的水流冲击使下层沉积物中的污染物与上层水体进行了物质交换。而 S3 采样点处水体趋于平静,污染物浓度均低于 S1 采样点且透明度明显升高,进一步表明水生植物对污染河流水体具有一定的修复作用。浐河在欧亚大道以下 1 km 处与灞河交汇,其枯水期流量为 $1\text{—}2\text{ m}^3/\text{s}$,而丰水期为 $50\text{—}200\text{ m}^3/\text{s}$,杜麦等^[30]发现,浐河西安段由于生活污水和工业废水的大量排入导致其水质较差,本研究中,S5 采样点位于浐河与灞河交汇处的下游,S5 采样点污染物浓度和浮游生物丰度均高于 S4 采样点,且溶解氧和浮游生物多样性指数低于 S4 采样点,其可能原因是浐河的汇入带入了一些污染物,使 S5 附近污染物增多,对浮游生物有显著影响。西安市某污水处理厂位于灞河下游附近,其尾水排放量为 25 万 t/d,排放标准为一级 A 类水,S6 采样点位于污水处理厂出水口附近,由于污水处理厂尾水的排放,导致其污染物浓度和浮游生物丰度较高,溶解氧和浮游生物多样性指数较低,表明此处水体水质污染严重。处于下游的 S7 和 S8 采样点由于水体的自净能力,污染物浓度和浮游生物丰度逐渐降低,溶解氧和浮游生物多样性指数逐渐上升,表明水质状况较 S6 采样点有所改善。

3.3 环境因子对浮游生物群落分布的影响

浮游生物群落结构受环境因素的综合影响,且不同水体中环境因素对群落结构的影响也存在差异。李喆等^[23]对松花江哈尔滨段的研究表明,水温、浊度、 COD_{Mn} 和 TP 是影响浮游植物分布的主要环境因子, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、

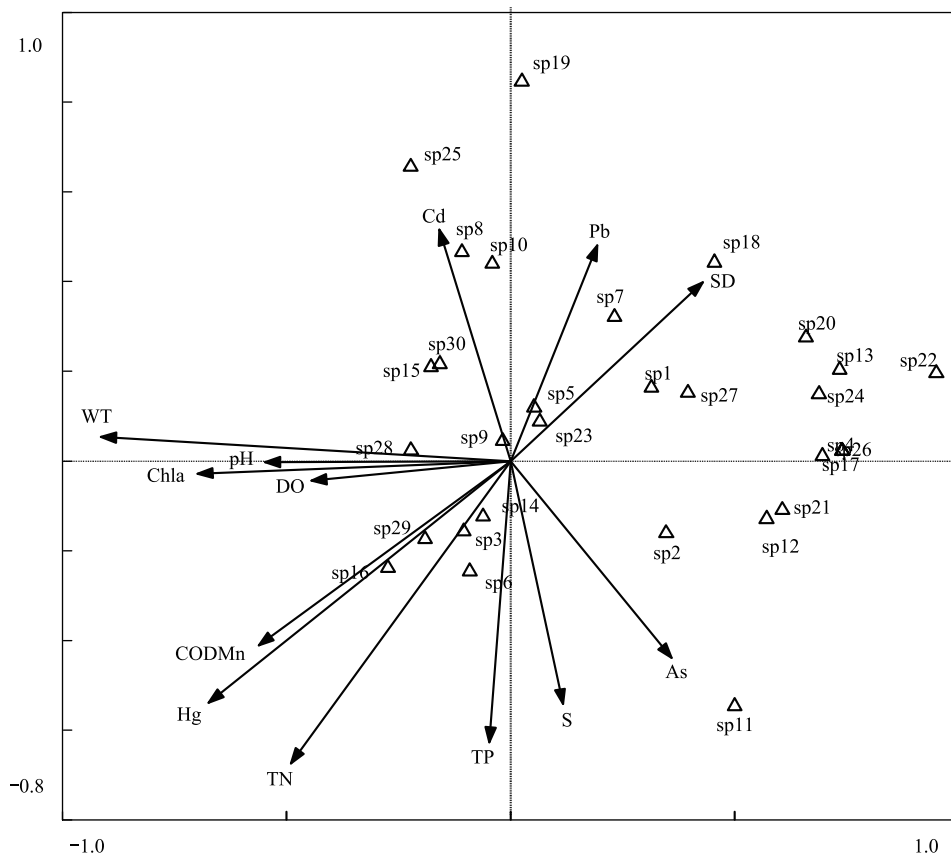


图7 浮游动物与环境因子的 CCA 排序图

Fig.7 CCA biplot of zooplankton species and environmental variables

Ca 和 TP 与浮游动物关系密切;杜明勇等^[31]对太湖流域的研究表明,影响该区浮游植物群落变化的主要环境因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP,而影响浮游动物群落变化的主要环境因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN、WT 和 DO。在本研究中,浮游植物群落分布主要与 WT、TN、pH、DO 和 Hg 有关,其中大部分属于温水性种类的蓝藻与温度呈正相关,而冷水性种类的硅藻和隐藻则与温度呈负相关。营养盐含量能够影响浮游植物的群落结构组成^[32],蓝藻门中的颤藻属、微囊藻属和伪鱼腥藻属,绿藻门的小球藻属,以及硅藻门的菱形藻属等耐污物种均与营养盐有较好的正相关性,该结果与相关研究结果类似^[18,33]。周彦峰等^[34]在对怀洪新河的研究中发现,pH 会影响浮游植物的群落结构及分布。在本研究中,WT、TN、TP、Chla 和 Hg 是影响浮游动物群落分布的主要环境因子。研究表明,水温影响浮游动物的体温、新陈代谢强度、生长发育以及繁殖周期^[35-36],进而影响其丰度的变化以及群落结构的分布^[37-38]。杨亮杰等^[39]指出轮虫适宜生活在温暖水体中,徐梅等^[40]发现高温不利于枝角类部分物种的生长发育,这与本研究中轮虫类大部分物种与 WT 呈正相关、枝角类部分物种与 WT 呈负相关的结果一致。叶绿素 a 在一定程度上能够反映浮游动物饵料生物的水平,本研究中轮虫类大部分物种与 Chla 呈显著正相关,说明饵料生物是影响轮虫群落结构的重要因素^[41]。水体中氮、磷营养盐浓度的升高会引起浮游植物密度的增加(即 Chla 含量的升高),进而间接影响浮游动物的生长及分布^[42]。CCA 排序图显示,TN、TP 与 Chla 之间均存在一定的正相关性,此结果进一步证实了以上观点。

本研究发现灞河城市段下游已受到一定程度的污染,污水处理厂的出水是灞河污染加重的一个主要来源,浐河的汇入也带入了一些污染物;景观河道对污染水体具有一定的修复作用,这将为城市水体的修复治理提供了理论依据。典范对应分析(CCA)表明除常规影响因子外,重金属对浮游生物群落分布也存在一定的影响,其中 Hg 对浮游生物群落结构影响较大。

参考文献 (References):

- [1] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2004, 34(3): 236-248.
- [2] 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 熊钢, 张建国, 马晓, 陈丽婷. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析. *水生生物学报*, 2013, 37(3): 488-494.
- [3] 孙小军, 魏炳乾, 周孝德, 王战平. 西安市灞河流域水环境现状分析及治理对策. *自然灾害学报*, 2009, 18(5): 168-173.
- [4] 徐志端, 刘维. 西安浐灞河截污工程对水质改善的效果研究. *西安理工大学学报*, 2011, 27(1): 18-23.
- [5] 王战平. 灞河地表水水质现状及污染防治对策. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(2): 145-147.
- [6] 李振兴, 张晓斌. 西安市浐灞河下游水质污染状况评价. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(3): 151-153, 156-156.
- [7] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [8] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [10] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱 (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [11] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Shannon C E. A mathematical theory of communications. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [13] Margalef R. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [14] 沈韞芬, 章宁涉, 龚循矩, 施之新, 魏印心, 郑英. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [15] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. *生态学杂志*, 1989, 8(4): 13-15, 19-19.
- [16] De Souza Cardoso L, Da Motta Marques D. Hydrodynamics-driven plankton community in a shallow lake. *Aquatic Ecology*, 2009, 43(1): 73-84.
- [17] Beyene A, Addis T, Kifle D, Legesse W, Kloos H, Triest L. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *Ecological Indicators*, 2009, 9(2): 381-392.
- [18] 李思阳, 韩志勇, 许振成, 赵学敏, 姚玲爱, 魏东洋, 张娟, 胡芳. 高州水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. *水生态学杂志*, 2013, 34(5): 16-24.
- [19] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 673-687.
- [20] 袁聪, 陶诗雨, 张莹莹, 高建操, 杨彦平, 王在照. 安康水库表层浮游藻类群落结构及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2167-2176.
- [21] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [22] 李秋华, 韩博平. 基于 CCA 的典型调水库浮游植物群落动态特征分析. *生态学报*, 2007, 27(6): 2355-2364.
- [23] 李喆, 霍堂斌, 唐富江, 王念民. 松花江哈尔滨段冰下浮游生物群落结构与环境因子的相关分析. *水产学杂志*, 2014, 27(6): 44-50.
- [24] 张军燕, 张建军, 沈红保, 陈媛媛. 泾河宁夏段夏季浮游生物群落结构特征. *水生态学杂志*, 2011, 32(6): 72-77.
- [25] Reynolds C S. *Ecology of freshwater phytoplankton*. New York: Cambridge University Press, 1984.
- [26] 白海峰, 赵乃锡, 殷旭旺, 鲁媛媛, 武玮, 徐宗学. 渭河流域浮游动物的群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 260-266.
- [27] 夏品华, 马健荣, 李存雄, 林陶, 詹金心, 伍庆. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析. *环境科学研究*, 2011, 24(4): 378-386.
- [28] 王彦, 申玉春, 叶宁, 刘丽, 吴灶和. 流沙湾浮游生物的群落结构与时空分布. *广东海洋大学学报*, 2012, 32(6): 66-73.
- [29] 张军燕, 高志, 沈红保, 李瑞娇, 余斌. 拉萨河春季浮游生物群落结构特征研究. *淡水渔业*, 2017, 47(4): 23-28, 62-62.
- [30] 杜麦, 陈小威, 王颖. 基于多元统计分析的浐灞河水水质污染特征研究. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2017, 38(6): 88-92.
- [31] 杜明勇, 于洋, 阳振, 陈非洲, 张民, 芮琪, 孔繁翔. 太湖流域 2012 年枯水期浮游生物群落结构特征. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 724-734.
- [32] Nydick K R, Lafrancois B M, Baron J S, Johnson B M. Nitrogen regulation of algal biomass, productivity, and composition in shallow mountain lakes, Snowy Range, Wyoming, USA. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(7): 1256-1268.
- [33] 陈立婧, 吴淑贤, 彭自然, 胡忠军, 王武, 薛俊增. 2008 年苏州阳澄湖浮游藻类群落结构与环境因子的 CCA 分析. *生物学杂志*, 2012, 29(6): 65-69.
- [34] 周彦锋, 宋江腾, 刘凯, 蒋书伦, 尤洋. 怀洪新河浮游植物群落结构与水环境因子的关系研究. *生态科学*, 2017, 36(1): 35-42.
- [35] Devreker D, Souissi S, Seuront L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the eastern English Channel. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(2): 145-162.
- [36] Lenz P H, Hower A E, Hartline D K. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea). *The Biological Bulletin*, 2005, 209(1): 75-85.
- [37] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [38] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 刘宁, 何健龙, 程玲, 王月霞. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [39] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 徐镇, 金春华. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. *水生生物学报*, 2014, 38(4): 720-728.
- [40] 徐梅, 吴芳仪, 刘靓靓, 王变, 孙庆业, 周忠泽. 焦岗湖浮游甲壳动物群落结构的季节动态. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1254-1262.
- [41] Špoljar M, Habdija I, Prime-Habdija B, Sipos L. Impact of environmental variables and food availability on rotifer assemblage in the karstic barrage Lake Visovac (Krka River, Croatia). *International Review of Hydrobiology*, 2005, 90(5/6): 555-579.
- [42] 高子涵, 张健, 皮杰, 张婷, 李德亮, 肖调义. 湖南省大通湖浮游动物群落结构及其与环境因子关系. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 733-740.