

doi: 10.7541/2019.157

渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价

王 硕¹ 杨 涛^{1,2} 李小平^{1,2} 陈 佳¹

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 陕西省污染物暴露与生态环境健康
国际联合研究中心, 西安 710062)

摘要: 分别于2017年10月和2018年6月对渭河流域内12个采样点的浮游动物种类、物种密度、生物量和水温、电导率、溶解氧浓度和pH等水质指标进行调查, 并利用生物多样性指数法对水质进行评价。结果显示, 共鉴定出57种浮游动物(原生动物11种、轮虫33种、枝角类7种、桡足类6种)。优势种为萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*。枯水期浮游动物密度变化范围在0.72—7.84 ind./L, 平均密度为(2.79±2.11) ind./L; 浮游动物生物量为0.38—6.15 mg/L, 平均生物量为(2.31±2.64) mg/L; CCA分析表明, 水温、溶解氧、海拔和电导率与渭河流域浮游动物群落结构有明显的相关性; Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数分别为1.07、0.69。丰水期浮游动物密度变化范围在0—179.02 ind./L, 平均密度为(16.66±49.18) ind./L; 浮游动物生物量0—2448.12 mg/L, 平均生物量为(243.96±673.78) mg/L; Shannon-Wiener多样性指数Margalef丰富度指数分别为0.78、1.15。依据浮游动物种类密度和多样性指数对水质进行评价, 结果为渭河水系北道、林家村为中度污染, 魏家堡为重度污染, 咸阳、临潼、华县为轻度污染; 泾河水系杨家坪、雨落坪、张家山为中度污染; 北洛河水系刘家河、交口河、状头为中度污染。

关键词: 渭河流域; 浮游动物; 群落结构; 水质评价

中图分类号: Q145⁺.2; X824

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2019)06-1333-13

浮游动物处于水生态系统食物链的前端, 在元素循环与能量交流传递中起到连接作用, 浮游动物的群落构成和结构状况在水生态系统物质循环、能量交换等生态过程有着重要的影响作用^[1-3]。浮游动物本身以浮游植物、微小细菌和残渣碎屑为食, 是鱼类和其他水生生物的食物, 影响着水生生态系统整体的容纳量和生物资源消耗补充量^[4,5]。浮游动物在各水环境因子影响条件下有着极其敏感的变化, 其种类数量分布和物种密度大小变化与水环境条件变化密切相关, 其中温度、pH、溶解氧浓度、栖息地范围、水深深度、水质营养状态等非生物因子, 以及捕食、种内种间竞争、水生植物生长状况等生物因子对浮游动物群落结构和生物多样性有着重要影响作用。此外, 浮游动物是指示河流水质的优质类群, 基于浮游

动物群落结构, 可准确的揭示水质特征及其变化趋势^[6-10]。

渭河流域发源于甘肃省渭源县鸟鼠山, 共经过陕西、甘肃、宁夏三个省区, 渭河干流总长818 km, 流域总面积达 6.24×10^4 km², 地形复杂, 流域地形为西高东低, 且东西走向逐渐减少, 南部为秦岭山脉, 北部为黄土高原, 海拔300—3865 m。渭河流域处于典型大陆性季风气候带, 年均降雨量为572 mm, 自西向东呈递减趋势, 渭河以南地区降雨量高于渭河以北。渭河两岸有众多支流, 其中泾河为最大支流, 发源于宁夏回族自治区, 全长455.1 km, 流域面积达 4.54×10^4 km², 占渭河流域总面积的33.7%, 北洛河为渭河第二大支流, 发源于陕西白于山南麓草梁山, 河流长度为680 km, 流域面积达 2.69×10^4 km², 占渭河流域总面积的

收稿日期: 2018-09-28; 修订日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(41571512); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-282); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(GK201903080)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41571512); Shaanxi Natural Science Basic Research Project (2019JM-282); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (GK201903080)]

作者简介: 王硕(1992—), 男, 河北邯郸人; 研究生; 主要从事流域生态风险研究。E-mail: wangsl7@snnu.edu.cn

通信作者: 杨涛(1979—), 男, 陕西省宝鸡人; 副教授, 硕士生导师; 主要从事流域水生态管理与修复及流域生态风险评价与控制。E-mail: tyang@snnu.edu.cn

20%^[11, 12]。

渭河流域水环境特征研究主要以理化指标为主, 如利用DO、高锰酸盐指数、NH₃-N、总氮、总磷进行分析, 得出枯水期水质明显优于丰水期, 且非点源污染对流域水质影响最大^[12]; 基于水文、水质和水生态指标对河流健康评价, 如在渭河流域得到林家村、魏家堡和咸阳的水文情势改变程度最高, 临潼、华县的水文情势改变程度中等^[13]; 探讨浮游动物群落结构特征与水环境因子的相互关系, 得出水温、饱和度、流量和pH是影响浮游动物群落结构特征的环境因子^[14]。分析浮游动物群落结构变化特征, 并揭示水环境空间分异特征仍待进一步研究, 本研究通过调查渭河流域丰-枯水期的浮游动物群落结构, 并对水环境分异特征进行分析, 以期对渭河流域水环境污染控制和水生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设和样品采集分析

在渭河流域三大水系渭河水系、泾河水系和北洛河水系中共设置了12个采样点(图1), 对采样点处河流栖息地状况进行调查, 其中渭河布设北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县6个采样点, 泾河布设杨家坪、雨落坪、张家山3个采样点, 北洛河布设刘家河、交口河、状头3个采样点。

并于2017年10月—11月(枯水期)和2018年6—7月(丰水期)2个时间段进行浮游动物样品采集。

在每一个采样点, 用GPS (GARMIN eTrex-301)记录各点位的经纬度及海拔。用水质分析仪 (YSI Professional Plus)现场测定水质水温(T)、电导率(CON)、大气压(BP)、氨氮(NH₃-N)、溶解氧百分比(DO/%)、溶解氧浓度(DO/mg/L)和酸碱度(pH), 用流速仪(FP111)现场测定各点位水深及流速, 用激光测距仪(RX-1200i)现场测定河宽。使用2.5L采水器在河流的表层、0.5 m深处和1 m深处3个水层中均匀混合共收集50 L水样^[9], 并用25号浮游生物网过滤, 将过滤的样品放入100 mL样品瓶中, 及时加入体积分数约5%的甲醛溶液固定, 与此同时, 用25号浮游生物网在水中做“∞”形回旋1min进行采集, 样品用于浮游动物定性分析的补充。

固定后样品在实验室静置48h后虹吸上层清液浓缩至30 mL。混均匀后样品依据文献^[15]进行浮游动物定性及定量分析, 用100—400倍显微镜 (Nikon CX21)对所有样品进行计数, 并且每个样品用2片计数并求平均值, 若2片之间的差值大于15%, 则计数第3片, 取个数相近2片取平均值, 并依照公式将平均值转换为每升的个体数, 然后轮虫、枝角类和桡足类根据体长回归法, 计算每个样品中浮游动物的平均湿重并求得浮游动物的生物量^[16, 17]。

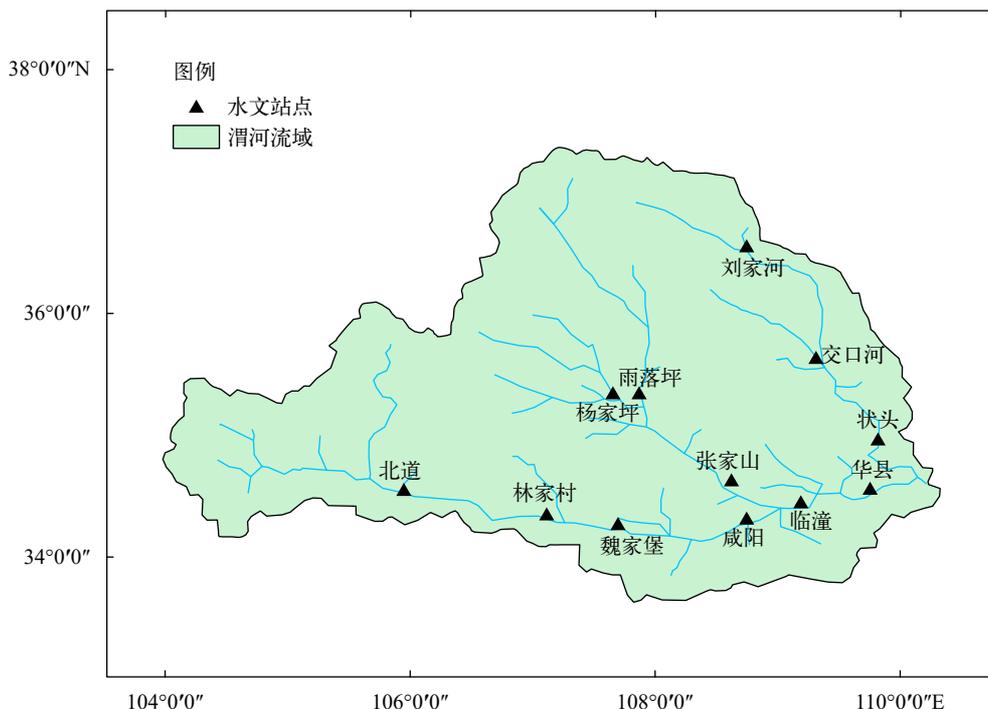


图1 渭河流域采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Wei River Basin

1.2 浮游动物群落结构参数

优势度 Y 用于指示浮游动物的出现频率和个体数量, 以确定优势种, 并且当 $Y>0.02$ 时确定为优势种:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (1)$$

采用Shannon-Wiener^[18]多样性指数 H' 、Margalef^[19]丰富度指数 d_M 来评价采样点浮游动物群落结构。

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

$$d_M = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

式中, S 为样品中物种数目, n_i 表示样品中第 i 种物种的个数, N 表示样品中所有物种个体总和。选取Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数对水质进行综合评价, 具体评价标准如表1所示。

用Canoco4.5软件对各采样点水质数据(水温、

电导率、大气压、DO浓度和pH)、栖息地状况(水深、流速、河道断面宽度)与浮游动物群落结构进行典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)。对所有水体环境数据和浮游动物群落数据矩阵除pH外都进行 $\lg(x+1)$ 转换^[15, 21]。用SPSS20.0软件对各采样点浮游动物种群密度进行聚类分析。

2 结果

2.1 环境因子与浮游动物群落结构分析

对丰-枯水期渭河流域河宽、水深、流速、温度、电导率、pH 6个环境因子与浮游动物群落进行CCA分析(图2)。

由图2可以看出在枯水期时, 第一排序轴无主要环境影响因子, 第二排序轴主要环境因子为水温, 相关系数是-0.6441, 呈极显著负相关, 其他影响因子的相关性较小。在丰水期时, 第一排序轴无主要影响因子, 第二排序轴主要环境因子为深度、流速和电导率, 相关系数分别为-0.8593, -0.6181和-0.6412, 呈极显著负相关, 其余影响因子相关性较小。

表1 多样性指数对水质评价的标准^[20]

Tab. 1 Standards of water quality assessed in terms of diversity index

指数范围Index range	级别Level	评价状态Evaluation of state	水体污染程度Pollution level
$H' > 3$	$d_M > 3$	丰富	清洁
$2 < H' \leq 3$	$2 < d_M \leq 3$	较丰富	轻污染
$1 < H' \leq 2$	$1 < d_M \leq 2$	一般	中污染
$0 < H' \leq 1$	$0 < d_M \leq 1$	贫乏	重污染
$H' = 0$	$d_M = 0$	极贫乏	严重污染

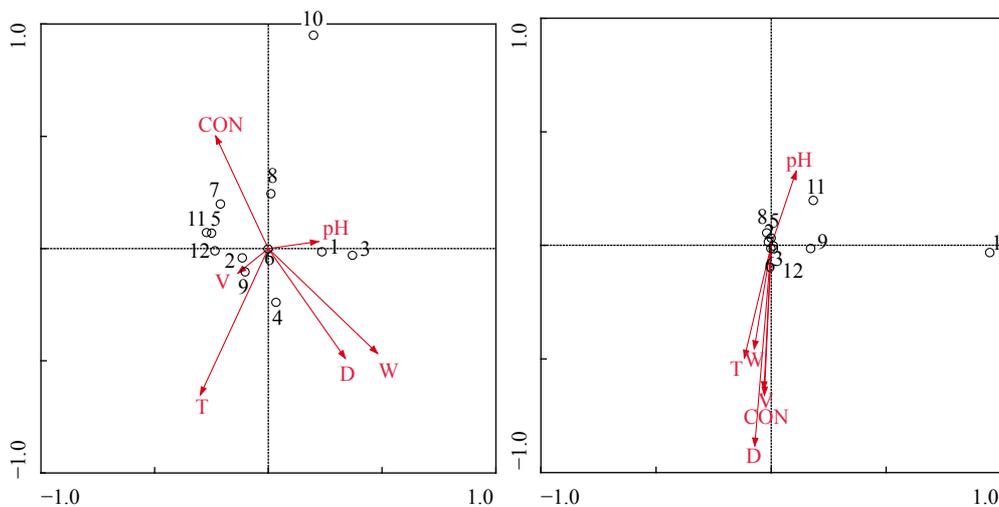


图2 渭河流域枯水期(左)和丰水期(右)环境因子与浮游动物群落的典范对应分析

Fig. 2 Canonical correspondence analysis of species-environmental factors during the dry (left) and wet (right) season of the Wei River Basin

W. 河宽; D. 深度; V. 流速; T. 水温; CON. 电导率

W. water width; D. water depth; V. current velocity; T. water temperature; CON. conductivity

由图3可以看出丰水期渭河水系河宽大于枯水期河宽, 泾河水系和北洛河水系河宽相差变化不大; 丰水期渭河水系上游和中游河深远小于枯水期, 下游几乎无差别, 泾河水系中上游河流深度在2个时期无明显变化, 但是下游河流深度丰水期

小于枯水期, 北洛河水系则相差不大; 渭河流域枯水期流速除魏家堡、临潼和刘家河3个点外, 均远大于丰水期; 丰水期渭河流域的水温均大于枯水期水温; 水体pH和电导率的差别均差别不大, 丰水期水体pH略大于枯水期水体pH, 临潼、华县

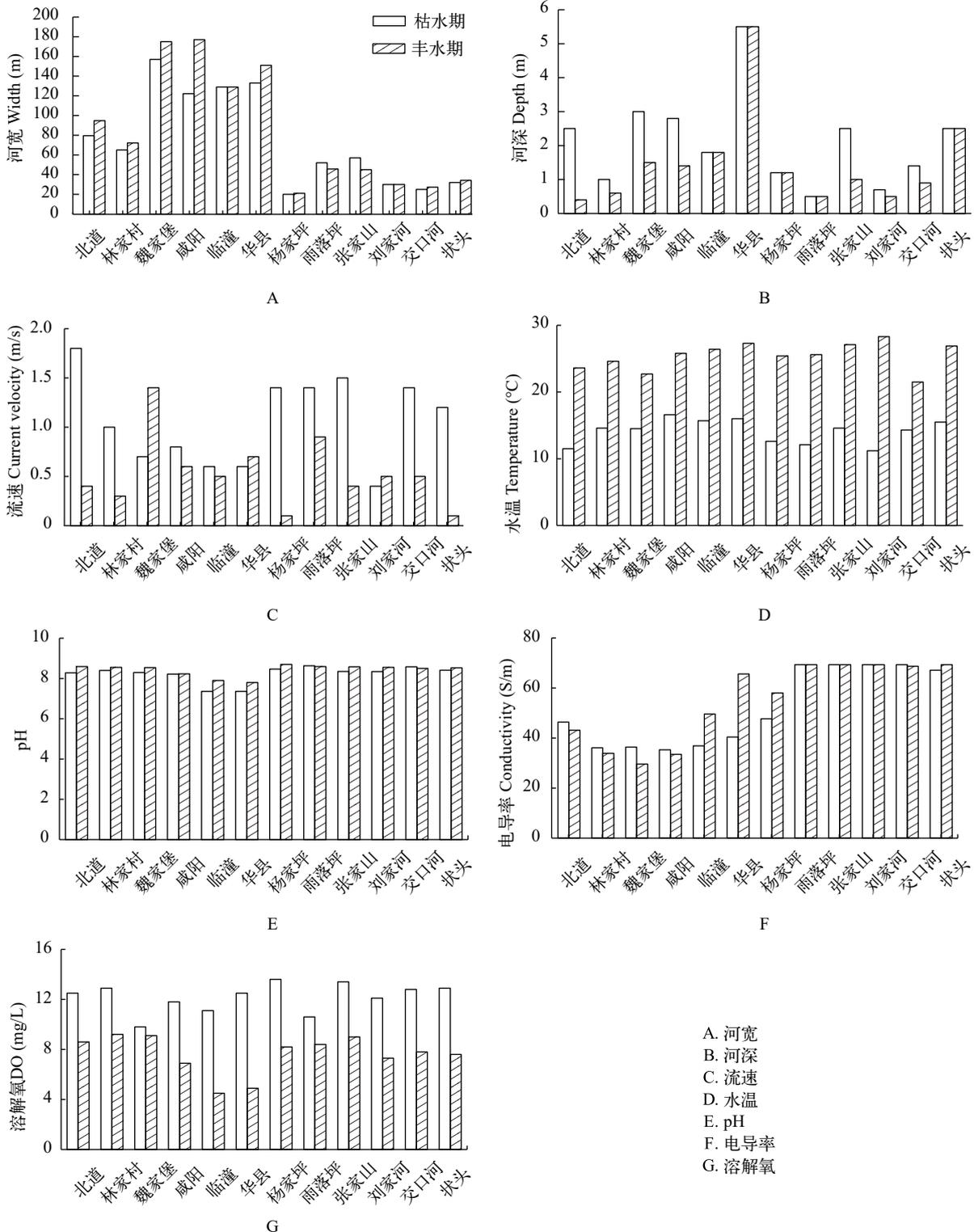


图3 渭河流域丰-枯水期环境因子对比

Fig. 3 The characteristics of environmental factors during the dry and wet season of the Wei River Basin

和杨家坪3个点位丰水期电导率略高于枯水期; 渭河流域枯水期的溶解氧浓度均大于丰水期溶解氧浓度。

2.2 浮游动物群落结构特征及水环境分析

渭河流域共发现浮游动物57种, 其中, 丰水期渭河流域浮游动物共48种, 原生动物11种, 轮虫28种, 枝角类5种, 桡足类4种; 枯水期渭河流域浮游动物共19种, 其中轮虫10种, 枝角类4种, 桡足类5种。丰水期浮游动物优势种有萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus* ($Y=0.1285$); 枯水期浮游动物的优势种有前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta* ($Y=0.0248$)、萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus* ($Y=0.0984$)、壶状臂尾轮虫 *Brachionus urceus* ($Y=0.2409$)、无节幼体 *Nauplii* ($Y=0.1523$)。2个时期的共有优势种为萼花臂尾轮虫。渭河流域丰-枯水期浮游动物种类组成见附表1。

从枯水期渭河流域丰-枯水期各点位的浮游动物的密度和生物量可知(图4), 浮游动物的总体密度在0.72—7.84 ind./L, 平均密度为(2.79±2.11) ind./L, 浮游动物的总体生物量在0.38—6.15 mg/L, 平均

生物量为(2.31±2.64) mg/L, 浮游动物总密度取决于轮虫的种群密度, 而浮游动物总生物量取决于桡足类的生物量。渭河流域枯水期浮游动物总密度和总生物量最高的是渭河(25.76 ind./L、23.48 mg/L), 泾河(3.816 ind./L、2.68 mg/L)和北洛河(3.92 ind./L、1.60 mg/L)2个水系浮游动物总密度和总生物量相差不大。

丰水期浮游动物的总体密度在0—179.02 ind./L, 平均密度为(16.66±49.18) ind./L, 浮游动物的总体生物量在0—2448.12 mg/L, 平均生物量为(243.96±673.78) mg/L(图5), 浮游动物总密度取决于轮虫的种群密度, 浮游动物总生物量也取决于轮虫的生物量。渭河流域丰水期浮游动物总密度和总生物量最高的是渭河(199.06 ind./L、2910.25 mg/L), 泾河(0.26 ind./L、6.45 mg/L)和北洛河(0.54 ind./L、10.86 mg/L)2个水系浮游动物总密度和总生物量相差不大, 与枯水期情况相同。

由图6可知, 除了临潼、华县、雨落坪和状头4个点位, 其余点位均以枯水期浮游动物种类数量大于或等于丰水期浮游动物种类数量, 并且在种

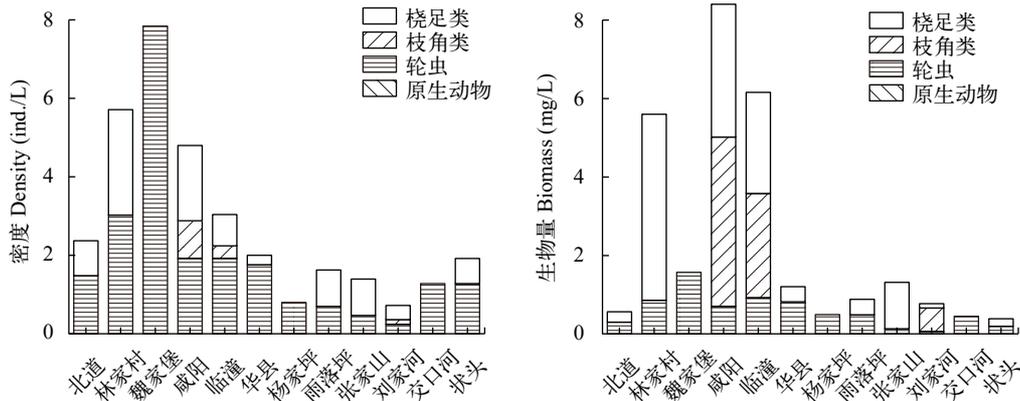


图4 枯水期渭河流域各点位浮游动物密度(左)和生物量(右)

Fig. 4 The density (left) and biomass (right) of Zooplankton during dry season of Wei River Basin

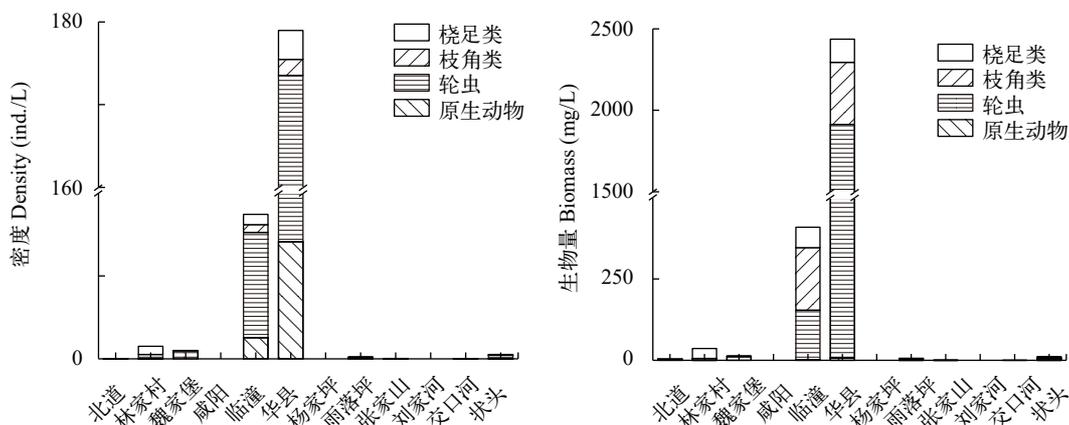


图5 丰水期渭河流域各点位浮游动物密度(左)和生物量(右)

Fig. 5 The density (left) and biomass (right) of Zooplankton during wet season of Wei River Basin

群密度上除临潼、华县2个点位外，其余点位均以枯水期浮游动物种群密度大于丰水期浮游动物种群密度。

就枯水期浮游动物种类数量和种群密度来看，渭河水系北道点位浮游动物优势种占比为100%，物种数量少且密度较高，水质处于中度污染状态，林家村和魏家堡浮游动物优势种占比为50%，物种数量少且密度高，水质处于重度污染状态，咸阳、临潼和华县浮游动物优势种占比低，物种数量多且密度较低，水质为轻度污染；泾河水系杨家坪、雨落坪和张家山浮游动物优势种占比均大于50%，物种数量少且密度较低，水质处于中度污染状态；北洛河水系刘家河点位浮游动物优势种占比为33.3%，物种数量少且密度低，水质为轻度污染，交口河和状头浮游动物占比较大，物种数量少且密度较低，水质则处于中度污染状态。

从图6丰水期浮游动物种类数量和种群密度来看，优势种只有1种不予占比考虑。渭河水系北道点位浮游动物物种数量少且密度低，水质处于轻度污染状态，林家村和魏家堡浮游动物物种数量少且密度较高，水质处于中度污染状态，临潼浮游动物物种数量多且密度较低，水质为轻度污染，华县浮游动物物种数量较多且密度极高，水质处于重度污染状态；泾河水系雨落坪和张家山点位物种数量较多且密度较小，水质为轻度污染；北洛河水系交口河和状头点位物种数量较多且密度较低，水质属于轻度污染。

2.3 浮游动物生物多样性分析与水质评价

基于公式(2)–(5)，计算了丰-枯水期渭河流域各样点的浮游动物Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数(表2)。Shannon-Wiener多样性指数(H')是用于反应生物群落结构的复杂性和稳

定性，表明群落物种内部及物种间分布的总体性指标，以及在一定程度上可以指示水体环境，该指数数值越大，表明生物多样性越高，一般认为 $H' > 1$ 属正常， $H' < 1$ 时则可能受到其他环境因素的干扰^[22]。枯水期渭河流域浮游动物的Shannon-Wiener多样性指数(H')为0—1.96，平均值为1.07；丰水期渭河流域浮游动物的Shannon-Wiener多样性指数(H')为0—2.99，平均值为0.82。Margalef丰富度指数(d_M)是指示群落或物种数目多少的量度，其值越大则表示生物多样性越高。枯水期渭河流域浮游动物的Margalef丰富度指数(d_M)变化范围是0—1.62，均值为0.69；丰水期渭河流域浮游动物的Margalef丰富度指数(d_M)变化范围是0—8.01，平均值为1.49。

根据多样性指数对水质评价标准^[20]和表1，可知浮游动物物种的生物多样性高时水质较好，Margalef丰富度指数反映的是种类数与物种密度之间的关系，可初步认为种类数量越多则水体环境状况越好，由于Margalef多样性指数只考虑种类数量和种群密度之间的关系，忽略了个体数目在各种种间的分配状况，而加入Shannon-Wiener生物多样性指数则可对此进行弥补。利用Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数对丰-枯水期渭河流域三大水系进行多样性指数评价。

枯水期渭河水系北道、林家村、魏家堡3个采样点的Margalef指数小于1，北道和魏家堡Shannon-Wiener指数小于1，林家村大于1，表明北道和魏家堡水质为重污染，物种丰富度较低，个体分布不均匀，而林家村水质为中度污染。渭河水系咸阳、临潼、华县采样点的Margalef指数大于1，Shannon-Wiener指数接近2，表明水质在为轻度污染，物种丰富度较高、个体分布较均匀；泾河水系杨家坪、雨落坪和张家山Margalef指数均小

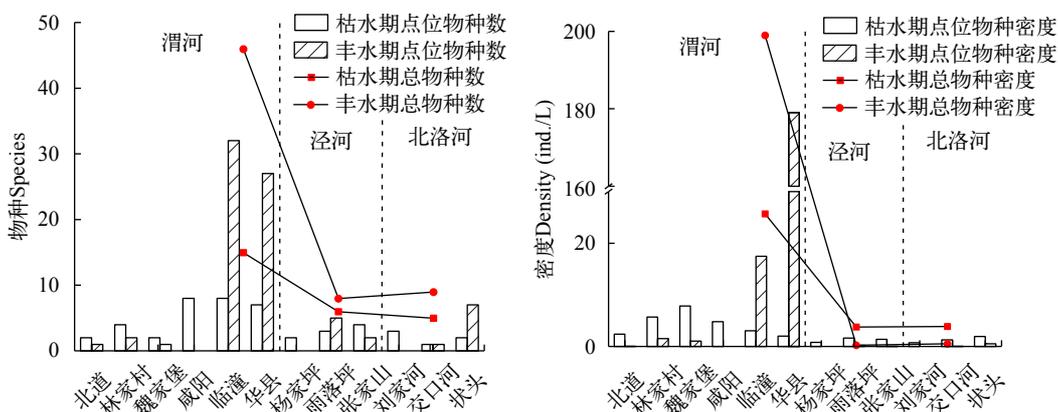


图6 丰-枯水期渭河流域浮游动物的物种类群(左)和密度(右)

Fig. 6 Species (left) and density (right) of zooplankton during dry and wet season of the Wei River Basin

表 2 丰-枯水期渭河流域浮游动物的多样性指数

Tab. 2 Phytoplankton diversity index of zooplankton during dry and wet season of the Wei River Basin

河道River		枯水期 Dry Season		丰水期 Wet Season	
		Shannon-Wiener多样性指数	Margalef丰富度指数	Shannon-Wiener多样性指数	Margalef丰富度指数
渭河Wei River	北道	0.66	0.25	0	0
	林家村	1.34	0.61	0.70	0.26
	魏家堡	0.68	0.19	0.10	0
	咸阳	1.96	1.46	0	—
	临潼	1.85	1.62	2.99	8.01
	华县	1.84	1.53	1.80	6.72
泾河Jing River	杨家坪	0.56	0.33	0	—
	雨落坪	1.00	0.54	1.64	1.03
	张家山	1.24	0.85	0.69	0.26
北洛河Beiluo River	刘家河	1.01	0.69	0	—
	交口河	0	0	0	0
	状头	0.64	0.26	1.88	1.55

于1, 杨家坪采样点的Shannon-Weiner指数小于1, 表明水质为重污染, 雨落坪和张家山采样点的Shannon-Wiener指数大于1, 表明水质为中度污染, 物种丰富度较低、个体分布较均匀; 北洛河水系上游刘家河采样点Margalef指数小于1, Shannon-Wiener指数大于1, 水质为重污染, 下游状头采样点Margalef指数和Shannon-Wiener指数均小于1, 水质为重污染, 中游交口河采样断面的两大指数均为0, 水质为严重污染, 物种单一且多样性基本丧失。

丰水期渭河水系林家村、魏家堡2个采样点的Margalef指数和Shannon-Wiener指数均小于1, 则表明林家村和魏家堡水质为重污染, 物种丰富度较低且个体分布不均匀。临潼、华县2个点位Margalef指数均远大于3, 临潼点位Shannon-Wiener指数大于2且接近3, 水质为清洁, 物种种类丰富且

个体分布均匀, 华县点位Shannon-Wiener指数大于1小于2, 则水质为轻度污染, 物种种类较丰富且个体分布较均匀; 泾河水系雨落坪点位Margalef指数和Shannon-Wiener指数均大于1, 水质为中度污染, 张家山点位两个指数均小于1, 表明水质为重污染; 北洛河水系下游状头点位两个指数均大于1小于2, 则水质为中度污染状态。在此次丰水期渭河流域中, 北道、交口河采样断面两大指数均为0, 水质为严重污染, 物种单一且多样性基本丧失; 咸阳、杨家坪和刘家河采样断面未发现浮游动物, 无法进行多样性指数分析判断, 这与当地丰水期环境因子之间相互影响作用有关。

2.4 浮游动物密度聚类分析

对丰-枯水期渭河流域各采样点的浮游动物种群密度进行聚类分析, 系统聚类方法选用最近邻元素法, 并定标尺为15 (图7)。枯水期浮游动物可分为两大类, 其中张家山、刘家河、华县、杨家坪、雨落坪、临潼、交口河、状头、咸阳、北道、林家村为第一类, 魏家堡为第二类。其中在第一类中, 张家山、刘家河、华县、杨家坪、雨落坪、临潼和交口河之间具有很强的自然属性, 可初步说明各样点具有相似的水体环境和浮游动物群落; 同样, 状头和咸阳水环境相似, 并且与上述采样点相接近。结合图1可以看出, 浮游动物的群落结构特征具有明显的地域特征, 泾河水系和北洛河水系水体环境较为相近, 水质情况相同, 而渭河水系咸阳、临潼、华县均在河流中下游地区, 泾河、北洛河在此交汇, 水质情况相近; 北道和林家村位于渭河上流, 也处于第一类中, 则水质与下游情况相似; 魏家堡单独分为第二类, 可判断魏家堡水质与第一类具有明显差别。丰水期浮游动物可分为两大类, 其中张家山、刘家河、咸阳、交口河、张家山、北道、雨落坪、状头、魏家堡、林家村、临潼为第一类,

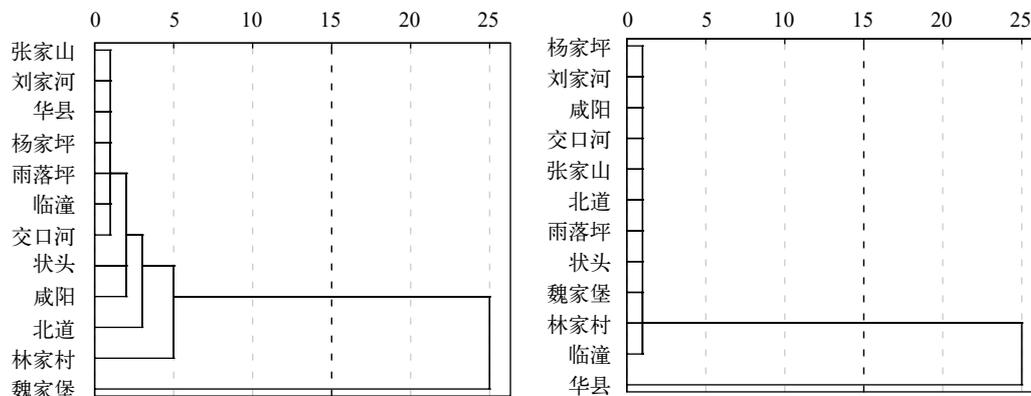


图 7 渭河流域枯水期(左)丰水期(右)浮游动物聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of zooplankton during dry (left) and wet (right) season of the Wei River Basin

华县为第二类。在第一类中，十一个点位之间具有很强的自然属性，可初步认为各样点具有相似的水体环境和浮游动物群落，并且结合图1可看出，由于丰水期降雨量的增加，各点位均有大流量水体冲刷，导致水体环境相近；华县处于渭河最下游地区，其河道较宽且河流很深，流速较缓，上游水体在此会有减缓，因此水体环境与第一类有明显差别。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构特征对比分析

在一般情况下，浮游动物种类数量增加、种群密度下降，表明水体污染程度相对较小，水质较好，如果浮游动物种类数量减少、种群密度尤其是优势种群密度增加，则说明水体污染程度相对较大，水质较差^[23]。从本研究中丰-枯水期2个时期的结果来看，丰水期渭河流域浮游动物物种数量、密度和生物量均大于枯水期，在枯水期时未发现原生动物，轮虫在两个时期物种均为最多，且枝角类和桡足类种类数量相近。2个时期均表现出密度相对较小但生物量较大的表现特征，尤其是丰水期表现的更为明显，这是环境因子和人为活动干扰等共同作用的结果^[24]。其中水温是影响浮游动物生活的必要因素^[25-27]，水温可以影响到浮游动物生活和繁殖，并且适当的温度可以促进浮游植物的生长繁殖从而提供浮游动物的食物和供氧量^[28-30]；流速也是影响浮游动物群落结构的因素，丰水期河流流速比枯水期较低，可以有益于浮游动物群落的聚集和繁殖；丰水期pH和电导率与枯水期变化不大，其中pH略大于枯水期，且pH的变化对浮游动物密度影响较大且呈正

相关^[31]。由于电导率与盐度成正比，临潼、华县、杨家坪电导率相对较高则对浮游动物群落结构变化有一定的影响^[32-34]。由于丰水期降雨量大，导致河流宽度较大，并且渭河流域整体属于河道较宽较浅，随着降雨量的增大流量的增加，河流宽度变化比深度变化大，并且渭河流域水力几何模型显示随着流量的增加，河流深度变化比流速变化大^[35]。丰水期采样时间在2018年6月而枯水期采样时间在2017年10月，由于季节和渭河流域所处气候类型的影响，所以丰水期水体水温均大于枯水期，水体中浮游动物活动和群落增加，需氧量的增加和水温的升高是导致水中溶解氧浓度减少的主要原因。也正是因为在这些因素的综合影响下，丰-枯水期浮游动物物种数量、密度和生物量才会有差别，表现出不同的结果。

本研究浮游动物群落结构与国内典型流域研究结果进行对比(表3)，其中枯水期未发现原生动物，轮虫种类数量下降85%，物种密度下降了69.5倍，生物量增长了3.67倍；枝角类种类数量增加为4种，物种密度下降了2倍，生物量增长了1263倍；桡足类种类数量增加到5种，物种密度下降3.8倍，生物量增长了109倍。丰水期原生动物种类数量增长275%，物种密度下降了9.5倍，但生物量增长了1055倍；轮虫种类数量下降58%，物种密度下降了9倍，但生物量增长了1103倍；枝角类种类数量增加为5种，物种密度下降了1.02倍，但生物量增长了98000倍；桡足类种类数量增加到4种，物种密度下降6倍，但生物量增长了1993倍。在本研究中丰-枯水期的浮游动物种类数量、密度和生物量与白海锋^[14]对渭河流域浮游动物调查数据有较大差异，其中丰水期原生动物种类数量和

表3 渭河流域不同年份浮游动物种类及密度生物量

Tab. 3 Species number, density and biomass of zooplankton in the Wei River Basin in different years

河流River	原生动物Protozoa			轮虫Rotifera			枝角类Cladocera			桡足类Copepoda			参考文献References
	种类 (Species)	密度 (ind./L)	生物量 (mg/L)										
枯水期Dry season	—	—	—	10	22.704	6.958	4	1.4	7.576	5	9.392	13.226	本研究
丰水期Wet season	11	16.88	8.44	28	174.16	2089.92	5	2.94	588	4	5.88	241.2	本研究
渭河流域Wei River Basin	4	160.8	0.008	66	1578.6	1.894	3	3.00	0.006	3	35.55	0.121	白海锋等 ^[14]
沙颍河Shaying River	—	—	—	60	—	—	12	—	—	6	—	—	刘盼盼等 ^[22]
嫩江Nenjiang River	11	2400	0.059	26	14050	7.36	3	225	1.167	6	1275	6.13	张昊 ^[39]
松花湖Songhua Lake	5	10650	0.497	10	115	0.047	5	0.533	0.044	3	0.533	0.063	邹继颖、刘辉 ^[40]
大辽河Daliaohe River	—	—	—	50	—	—	4	—	—	5	—	—	王璐璐等 ^[41]

生物量较大但密度小, 丰-枯水期2个时期轮虫种类和密度均减少较大, 但生物量增长较为明显, 枝角类生物量明显远大于对比数据, 桡足类密度小于2014年数据, 生物量大于2014年数据。渭河流域流经黄土高原, 随着降雨量的增加会导致河流中泥沙含量的增加, 河水可见度降低浑浊度增加, 会致使浮游植物量减少, 从而导致浮游动物的种类密度和生物量的改变, 有研究指出浑浊度高的水体大生物量相对较高, 与被捕食关系有关^[36]。水文条件的改变特别是降雨的改变有着很强的随机性, 降雨会对黄土高原两岸土壤进行冲刷导致水中泥沙含量增高, 污染物质和两岸农耕残留农药也会被冲刷进河水, 增大了河流流量, 这种变化会导致浮游动物群落的种类密度和生物量也会跟着随机性改变。可见, 同一条河流不同时期受到不同因素的影响, 其浮游动物群落结构并不完全相同^[37]。由于渭河流域位于黄河流域中上游, 流经黄土高原, 可携带大量泥沙使透明度降低, 而浮游动物一般没有游泳能力或游泳能力弱, 不能做长距离移动且不足以抵抗较大的流速, 所以流速大, 泥沙含量高的河流对浮游动物栖息不利^[38]。

与西部和北部地区水体相比较, 本研究与沙颍河^[22]、嫩江^[39]、松花湖^[40]和大辽河^[41]浮游动物种类特征较为相似, 均以小型浮游动物类群为主, 且轮虫种类最多, 枝角类和桡足类种类较少。由于轮虫具有孤雌生殖方式, 它们能够在很短时间内达到高丰度, 并且能够快速适应河流理化环境的变化以及水文条件的波动, 因此在浮游动物群落结构中主要是轮虫^[42]。松花湖中轮虫、枝角类和桡足类浮游动物占比与本研究枯水期结果相似, 都是以轮虫的种类数量最多, 但是松花湖浮游动物密度相对较大而生物量较小, 与本研究枯水期数据有差异, 并且松花湖水体优势种为原生动物普通表壳虫*Arcellavulgaris*。这是因为松花湖坐落于吉林市辖区, 是修建电厂大坝而形成的人工湖, 人为干扰活动很强, 水体富营养化严重, 是导致原生动物和轮虫种类较少但密度大生物量小的原因。在本研究中丰水期浮游动物物种数量与嫩江浮游动物物种数量相似, 但嫩江浮游动物密度远大于本研究丰水期数据, 但生物量远小于本研究丰水期数据。这是因为嫩江位于吉林、黑龙江和内蒙古交界处, 地处寒温带大陆性气候, 河道蜿蜒曲折流速较低, 降雨量较少且温度较低, 且有两岸滩地的农耕干扰, 是导致浮游动物密度大而生物量小的原因。在优势种上, 本研究中丰-枯水期浮游动物优势种只有萼花臂尾轮

虫*Brachionus calyciflorus*, 并且与沙颍河、嫩江、大辽河优势种均为萼花臂尾轮虫*Brachionus calyciflorus*结果一致, 萼花臂尾轮虫生活在碱性水体中, 且能够忍受严重污染环境^[43]。

3.2 渭河流域水质特征对比分析

与黄河渭河流域水质相比较, 对黄河陕西段^[44]、渭河干流陕西段^[45]、黄河兰州市区^[46]和北洛河丰水期^[47]的Shannon-Weiner多样性指数、Margalef丰富度指数进行对比。由表4可知, 本研究中枯水期渭河水系Shannon-Weiner多样性指数(1.39)与黄河陕西段(1.48)相接近, Margalef丰富度指数(0.94)介于渭河干流陕西段(0.61)和北洛河丰水期(1.65)之间; 泾河水系Shannon-Weiner多样性指数(0.94)低于其他河段, Margalef丰富度指数(0.57)与渭河干流陕西段(0.61)相近; 北洛河水系Shannon-Weiner多样性指数(0.55)和Margalef丰富度指数(0.32)均低于其他河段。在本研究中丰水期渭河水系Shannon-Weiner多样性指数(0.93)低于其他河段, 但Margalef丰富度指数(2.50)大于其他河段丰富度指数; 泾河水系Shannon-Weiner多样性指数(0.78)和Margalef丰富度指数(0.43)均小于其他河段; 北洛河水系Shannon-Weiner多样性指数(0.63)低于其他河段, Margalef丰富度指数(0.52)与渭河干流陕西段(0.61)相近。

由浮游动物多样性指数对水质评价结果(表4)可知, 枯水期三大水系水质属于中度污染-重度污染状态, 部分点位属于轻度污染-中度污染状态, 丰水期三大水系水质属于轻度污染-中度污染状

表4 与黄河渭河流域浮游动物多样性指数对比

Tab. 4 Comparison of phytoplankton diversity index of zooplankton in Wei River Basin and Yellow River

河段River	Shannon-Weiner	Margalef	参考文献References
枯水期渭河 Dry season of Wei River	1.39	0.94	本研究
枯水期泾河 Dry season of Jing River	0.94	0.57	本研究
枯水期北洛河 Dry season of Beiluo River	0.55	0.32	本研究
丰水期渭河 Wet season of Wei River	0.93	2.50	本研究
丰水期泾河 Wet season of Jing River	0.78	0.43	本研究
丰水期北洛河 Wet season of Beiluo River	0.63	0.52	本研究
黄河陕西段 Yellow River in Shaanxi	1.48	—	陈媛媛等 ^[44]
渭河干流陕西段 Wei River in Shaanxi	2.69	0.61	贾秋红等 ^[45]
黄河兰州市区段 Yellow River in Lanzhou City	1.89	1.94	白海锋等 ^[46]
北洛河丰水期 Wet season in Beiluo River	2.67	1.65	宋菊梅等 ^[47]

态, 部分点位属于中度污染-重度污染状态。这4个对比河段水质属于轻度污染-中度污染状态, 个别点位属于中度污染-重度污染状态。

参考文献:

- [1] Datta T. Zooplankton diversity and physicochemical condition of two wetlands of Jalpaiguri District, India [J]. *Journal of Threatened Taxa*, 2001, **2**(3): 576—583
- [2] Yan Q Y, Yu Y H, Feng W S, *et al.* Corresponding relations between DNA fingerprinting topological structure and species composition of plankton community in Dongting Lake [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2005, **25**(9): 2221—2226 [颜庆云, 余育和, 冯伟松, 等. 洞庭湖浮游生物群落DNA指纹拓扑结构与物种组成对应关系. *生态学报*, 2005, **25**(9): 2221—2226]
- [3] Yang L J, Lü G H, Zhu J Q, *et al.* Characteristics of zooplankton community in Hengshan reservoir and water quality assessment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(4): 720—728 [杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 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]
- [4] Li C L, Wang K. Feeding ecology progress of the herbivorous copepod [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2002, **22**(4): 593—596 [李超伦, 王克. 植食性浮游桡足类摄食生态学进展. *生态学报*, 2002, **22**(4): 593—596]
- [5] Qiu X C, Zhao H X, Sun X X. Relationships between zooplankton and water environment factors in Shahu Lake, Ningxia of Northwest China: A multivariate analysis [J]. *Chines Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 896—901 [邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. *生态学杂志*, 2012, **31**(4): 896—901]
- [6] Aoyagui A S M, Bonecker C C. Rotifers in different environments of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): Richness, abundance and the relationship with connectivity [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **522**: 281—290
- [7] Hessen D O, Faafeng B A, Smith V H, *et al.* Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes [J]. *Ecology*, 2006, **87**: 433—443
- [8] Jiang Z F, Tang F J, Dong C Z, *et al.* Population structure of zooplankton in Heilongjiang River system [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, **34**(3): 64—66 [姜作发, 唐富江, 董崇智, 等. 黑龙江水系主要江河浮游动物种群结构特征. *东北林业大学学报*, 2006, **34**(3): 64—66]
- [9] Li G G, Bao W H, Xu S L, *et al.* Seasonal change of zooplankton communities and its relationship with aquatic environments in the Yongjiang River, Ningbo [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(1): 1—12 [李共国, 包薇红, 徐石林, 等. 甬江干流浮游动物群落结构季节动态与水环境的关系. *水生生物学报*, 2015, **39**(1): 1—12]
- [10] Bai H F, Li L J, Xiang Z L, *et al.* Community structure and its relationship with environmental factors in zooplankton in Jinghe River system in Northwest China [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2015, **30**(3): 291—297 [白海峰, 李丽娟, 项珍龙, 等. 泾河水系浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2015, **30**(3): 291—297]
- [11] Zuo D P, Xu Z X, Li J Y, *et al.* Impact of climate change and human activity on streamflow in the Wei River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4): 455—461 [左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征. *水科学进展*, 2011, **22**(4): 455—461]
- [12] Wu W, Xu Z X, Yu S Y. Water quality assessment and analysis for the Wei River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, **49**(2/3): 275—281 [武玮, 徐宗学, 于松延. 渭河流域水环境质量评价与分析. *北京师范大学学报*, 2013, **49**(2/3): 275—281]
- [13] Xu Z X, Gu X Y, Liu L F. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(1): 1—7 [徐宗学, 顾晓鸣, 刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价. *水资源保护*, 2018, **34**(1): 1—7]
- [14] Bai H F, Zhao N X, Yin X W, *et al.* Community structure and relationship with environmental factors in zooplankton in Weihe River basin, Northwest China [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, **29**(3): 260—266 [白海峰, 赵乃锡, 殷旭旺, 等. 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]
- [15] Jin X C, Tu Q Y. Standard for Investigation of Lake Eutrophication (Second Edition) [M]. Beijing: China Environment Publishing Group. 1990, 245—251 [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社. 1990, 245—251]
- [16] Zhang Z S, Huang X F. Research Methods of Freshwater Plankton [M]. Beijing: Science Press. 1991, 358—387 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 1991, 358—387]
- [17] Huang X F. Observation and Analysis of Lake Ecological Investigation [M]. Beijing: Standards Press of China. 1999, 85—91 [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社. 1999, 85—91]
- [18] Shannon C E, Weaver W I. The Mathematical Theory of Communication [M]. London: University of Illinois Press. 1994, 117
- [19] Margalef D R. Information Theory in Ecology [J]. *General Systems*, 1957, **3**: 36—71
- [20] Wang S, Yu M, Liu Q R, *et al.* Phytoplankton species composition and biodiversity in Dongjiang River [J]. *Resources Science*, 2013, **35**(3): 473—480 [王珊, 于明, 刘全儒, 等. 东江干流浮游植物的物种组成及多样性分析. *资源科学*, 2013, **35**(3): 473—480]
- [21] Flores L N, Rossella R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina

- and Lake Arancio, Sicily, Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 163—178
- [22] Liu P P, Wang L, Wang P, *et al.* The characteristics of zooplankton community and water quality in the Shaying River Basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(2): 373—381 [刘盼盼, 王龙, 王培, 等. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价. *水生生物学报*, 2018, **42**(2): 373—381]
- [23] Yang S W. Atlas of Zooplankton and Phytoplankton in Dianchi and Erhai [M]. Beijing: Science Press. 2015, 352—394 [杨苏文. 滇池、洱海浮游动植物环境图谱. 北京: 科学出版社. 2015, 352—394]
- [24] Ren L P, Zhang Z, Zeng X, *et al.* Community structure of zooplankton and water quality assessment of Jialing River in Nanchong [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **10**: 1321—1326
- [25] Jiang H C, Chen H G, Song X K, *et al.* Zooplankton community structure in Jingcheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7308—7319 [姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 等. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系. *生态学报*, 2015, **35**(22): 7308—7319]
- [26] Zhang D R, Xu Z L, Gao Q, *et al.* Effects of tide and water masses on the distribution of zooplankton in different parts of Hangzhou Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**: 133—140
- [27] Ewa Paturej, Agnieszka Gutkowska. The effect of salinity levels on the structure of zooplankton communities [J]. *Archives of Biological Sciences*, 2015, **67**(2): 483—492
- [28] Aleksandra M L, Hillebrand H, Lengfellner K, *et al.* Temperature effects on phytoplankton diversity- The zooplankton link [J]. *Journal of Sea Research*, 2014, **85**(3): 359—364
- [29] Luo X, Zeng J N, Xu X Q, *et al.* Distribution of zooplankton in the Zhoushan Sea and its relationship with environmental factors in summer and autumn [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(24): 8194—8204 [骆鑫, 曾姜宁, 徐晓群, 等. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2016, **36**(24): 8194—8204]
- [30] Wu L, Feng W S, Zhang T L, *et al.* The annual fluctuation of zooplankton community and its relation with environmental factors in Lake Xiliang, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(4): 619—625 [吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 619—625]
- [31] Wang Y, Fang E J, Guo B, *et al.* Zooplankton community structure and its' relationship with environmental factors in spring of Bohai Bay in Tianjin sea area [J]. *Marine Fisheries*, 2014, **36**(4): 300—305 [王宇, 房恩军, 郭彪, 等. 渤海湾天津海域春季浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *海洋渔业*, 2014, **36**(4): 300—305]
- [32] Wang B, Liao J Y, Liu Q R, *et al.* Community structure of zooplankton and its relation with water quality in Dongjiang River [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, **49**(6): 608—612 [王博, 廖剑宇, 刘全儒, 等. 东江干流浮游动物群落结构特征及与水质的关系. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **49**(6): 608—612]
- [33] Fu Q, Zhu L X, Shen A L, *et al.* Survey and comparison of seasonal influences of thermal discharge from coastal power plant on zooplankton community [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, **45**(7): 26—33 [傅强, 朱礼鑫, 沈益绿, 等. 滨海电厂温排水对临近海域浮游动物生态特征的影响研究. *中国海洋大学学报*, 2015, **45**(7): 26—33]
- [34] Yu W S, Zhan W R, Nie X, *et al.* Variation of zooplankton communities in alongshore temporal pools and riffles of Ganjiang River during dry season [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(2): 382—391 [余文生, 詹文荣, 聂雪, 等. 枯水季节赣江近岸水洼与浅滩中浮游动物的群落差异. *水生生物学报*, 2018, **42**(2): 382—391]
- [35] Yang T, Wang S, Li X P, *et al.* River habitat assessment for ecological restoration of Wei River Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**: 17077—17090
- [36] Moshe Gophen. The impact of Turbidity on zooplankton densities in Lake Kinneret (Israel) [J]. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2015, **5**: 87—94
- [37] Xi L H, Li H M, Lin Q Q, *et al.* Structure and seasonality variations of zooplankton community in the pelagic zone of tropical Dashahe Reservoir, Guangdong, South China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1049—1058 [习丽红, 李慧明, 林秋奇, 等. 热带富营养水库敞水区浮游动物群落结构与季节变化: 以广东大沙河水库为例. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1049—1058]
- [38] Wu L, Feng W S, Chen X J, *et al.* Community structure characteristics of zooplankton in Yili region of Xinjiang in summer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(1): 163—172 [吴利, 冯伟松, 陈小娟, 等. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2008, **19**(1): 163—172]
- [39] Zhang H. The composition and community structure of zooplankton with water environmental factors of Nenjiang River downstream [D]. Northeast Forestry University, Heilongjiang. 2013 [张昊. 嫩江下游浮游动物群落结构动态特征及其与水环境因子的相关分析. 东北林业大学, 黑龙江. 2013]
- [40] Zou J Y, Liu H. Water quality and community structure of zooplankton in Songhua lake [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2014, **5**(1): 51—54 [邹继颖, 刘辉. 松花湖水水质及浮游动物群落结构的研究. *黑龙江大学工程学报*, 2014, **5**(1): 51—54]
- [41] Wang L L, Dong F, Li F F, *et al.* Metazoan zooplankton community structure and aquatic ecology of Daliaohe

- River, North China in summer [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(2): 389—395 [王璐璐, 董芳, 李芳芳, 等. 大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价. *生态学杂志*, 2013, **32**(2): 389—395]
- [42] Ju Y F, Yu H X, Yu T, *et al.* Zooplankton community structure characters and quality assessment in Harbin section of Songhua River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 646—653 [鞠永富, 于洪贤, 于婷, 等. 松花江哈尔滨段浮游动物群落结构特征与水质评价. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 646—653]
- [43] Vladimír S. Rotifers as indicators of water quality [J]. *Hydrobiologia*, 1983, **100**: 169—201
- [44] Chen Y Y, Wang Y C, Shen H B, *et al.* Community structure characteristics of zooplankton in Shaanxi section of the Yellow River [J]. *Hebei Fisheries*, 2016, **8**: 29—31 [陈媛媛, 王益昌, 沈红保, 等. 黄河陕西段浮游动物群落结构特征研究. *河北渔业*, 2016, **8**: 29—31]
- [45] Jia Q H, Li W X, Wang B H, *et al.* Study on community structure and diversity of zooplankton in Shaanxi section of the main stream of Wei River [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(33): 92—93, 97 [贾秋红, 李文香, 王博涵, 等. 渭河干流陕西段枯水期浮游动物群落结构及多样性研究. *安徽农业科学*, 2015, **43**(33): 92—93, 97]
- [46] Bai H F, Wang F, Zhang X L, *et al.* Characteristics of zooplankton community structure for the Yellow River in Lanzhou city [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(5): 51—57 [白海锋, 王丰, 张星朗, 等. 黄河兰州市区段秋季浮游动物群落结构特征. *水生态学杂志*, 2015, **36**(5): 51—57]
- [47] Song J M, Bai H F, Lu Y Y, *et al.* Investigation of zooplankton community structure and preliminary evaluation of water quality during the rainy season in Beiluo River [J]. *Hebei Fisheries*, 2014, **7**: 29—30, 50 [宋菊梅, 白海锋, 鲁媛媛, 等. 北洛河丰水期浮游动物群落结构调查及水质初步评价. *河北渔业*, 2014, **7**: 29—30, 50]

ZOOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE AND THE WATER QUALITY IN THE WEI RIVER BASIN

WANG Shuo¹, YANG Tao^{1,2}, LI Xiao-Ping^{1,2} and CHEN Jia¹

(1. *Tourism and Environment College of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*; 2. *International Joint Research Centre of Shaanxi Province for Pollutant Exposure and Eco-environmental Health, Xi'an 710062, China*)

Abstract: To evaluate the water quality situation, this study investigated zooplankton species, density and biomass and the main water quality indexes like water temperature, conductivity, DO and pH in 12 cross-sections in the Wei River Basin in October of 2017 and June of 2018, respectively, using the biological diversity index method. 57 species of zooplankton species (11 species of protozoa, 33 species of rotifers, 7 species of cladocerans, 6 species of copepods) were identified, and the dominant species was *Brachionus calyciflorus*. During dry season, the density of zooplankton varied between 0.72—7.84 ind./L with the average density of (2.79±2.11) ind./L, and the biomass ranged from 0.38 to 6.15 mg/L with the average biomass of (2.31±2.64) mg/L. The diversity indices of Shannon-Wiener and Margalef were 1.07 and 0.69, respectively. The canonical correspondence analysis indicated that the community structure of zooplankton in the Wei River Basin was primarily affected by the water environment including temperature, DO, altitude and conductivity. During wet season, the density of zooplankton varied between 0—179.02 ind./L with an average density of (16.66±49.18) ind./L, and the biomass ranged 0—2448.12 mg/L with an average biomass of (243.96±673.78) mg/L. The diversity indices of Shannon-Wiener and Margalef were 0.78 and 1.15, respectively. The water quality of Wei River in Beidao and Linjiacun was moderately polluted, and the water qualities in Weijiabao were heavy pollution, and in Xianyang, Lintong, Huaxian the water qualities were light pollution. The water quality of Jing River in Yangjiaping, Yuluoping and Zhangjiashan was moderately polluted. The water quality of Beiluo River in Liujiahe, Jiaokouhe and Zhuangtou was moderately polluted.

Key words: Wei River Basin; Zooplankton; Community structure; Water quality assessment

附录 渭河流域浮游动物种类组成

Appendix Species number of zooplankton in the Wei River Basin

浮游动物Zooplankton	丰水期Wet season	枯水期Dry season
表壳虫 <i>Arcella</i> sp.	+	—
螳状独缩虫 <i>Carchesium polypinum</i>	+	—
匣壳虫 <i>Centropyxis</i> sp.	+	—
针棘匣壳虫 <i>Centropyxis aculeata</i>	+	—
靴纤虫 <i>Cothurnia</i> sp.	+	—
纤毛虫 <i>Ciliophora</i> spp.	+	—
砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	+	—
褶累枝虫 <i>Epistylis plicatilis</i>	+	—
尾草履虫 <i>Paramecium caudatum</i>	+	—
吸管虫Suctorida spp.	+	—
钟虫 <i>Vorticella</i> sp.	+	—
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	+	—
卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>	+	+
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	+	+
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularia</i>	+	—
蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	+	—
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+	+
尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>	+	—
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	+	—
壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	+	+
同尾轮虫 <i>Diurella</i> sp.	—	+
猪吻轮虫 <i>Dicranophorus</i> sp.	—	+
椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senta</i>	+	—
大肚须足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>	+	—
椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senla</i>	—	+
顶生三肢轮虫 <i>Filinia terminalis</i>	+	—
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	+	—
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	+	+
道李沙腔轮虫 <i>Lecane doryssa</i>	+	—
月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>	+	—
蹄行腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	—	+
单趾轮虫 <i>Monostyla</i> sp.	—	+
环顶巨腕轮虫 <i>Pedalia fennica</i>	+	—
奇异巨腕轮虫 <i>Pedalia mira</i>	+	—
广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	+	—
扁平泡轮虫 <i>Pompholys complanata</i>	+	—
轮虫 <i>Rotaria</i> sp.	+	—
橘色轮虫 <i>Rotaria citrina</i>	+	—
长足轮虫 <i>Rotaria neptunia</i>	+	—
裂足轮虫 <i>Schizocerca diversicornis</i>	+	—
刺盖异尾轮虫 <i>Trichocerca capucina</i>	+	—
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+	—
等刺异尾轮虫 <i>Trichocerca stylata</i>	+	—
方块鬼轮虫 <i>Trichotria tetractis</i>	+	—
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	+	+
网纹溞 <i>Ceriodaphnia</i> sp.	—	+
圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>	—	+
蚤状溞 <i>Daphnia pulex</i>	+	+
短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	+	—
吻状异尖额溞 <i>Disparalona rostrata</i>	+	—
裸腹溞 <i>Moina</i> sp.	+	—
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vivinus vicinus</i>	—	+
剑水蚤桡足幼体Copepod larvae <i>Cyclopis</i>	+	—
跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	+	+
汤匙华剑水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	—	+
台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>	+	+
无节幼体 <i>Nauplii</i>	+	+

注: “+”表示出现, “—”表示未出现

Note: “+”observed, “—” not observed