

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019021203

王林芳, 李华, 党晋华, 等. 汾河上中游流域大型底栖动物群落特征及其多样性评价[J]. 环境化学, 2020, 39(1): 128-137.

WANG Linfang, LI Hua, DANG Jinhua, et al. Characteristics and diversity evaluation of macrobenthos in upper and middle reaches of Fen River basin[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(1): 128-137.

汾河上中游流域大型底栖动物群落特征及其多样性评价*

王林芳^{1,2,3} 李 华^{1,3**} 党晋华^{2**} 赵 颖² 乔鹏明²

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原, 030006; 2. 山西省环境科学研究院, 太原, 030027;

3. 山西大学资源与环境研究所, 太原, 030006)

摘 要 为探究汾河上中游流域大型底栖动物群落特征,研究了汾河上中游流域 17 个采样点位的大型底栖动物物种组成、空间分布、与水质环境因子的关系及其多样性。研究结果表明,汾河上中游流域共鉴定出大型底栖动物 4 门 6 纲 25 科,共 37(属)种,且不同采样点位大型底栖动物的种类、生物密度和生物量具有明显的空间异质性;水质环境因子对汾河上中游流域大型底栖动物的影响大小排序为 $DO > TP > CON > NH_3-N > TN > pH > BOD_5$,不同种类大型底栖动物的主要水质影响因子不同;汾河上中游流域 17 个采样点中,大型底栖动物多样性最好为“一般”等级,占总采样点位的 29%，“较差”等级采样点位占 41%，“差”等级采样点位占 30%，汾河上中游流域大型底栖动物的多样性综合评价为“较差”等级。

关键词 汾河上中游流域, 大型底栖动物, 群落特征, 生物多样性。

Characteristics and diversity evaluation of macrobenthos in upper and middle reaches of Fen River basin

WANG Linfang^{1,2,3} LI Hua^{1,3**} DANG Jinhua^{2**} ZHAO Ying² QIAO Pengming²

(1. School of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan, 030006, China;

2. Shanxi Province Research Academy of Environmental Science, Taiyuan, 030027, China;

3. Institute of Resources and Environment Engineering of Shanxi University, Taiyuan, 030006, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of macrobenthos community in the upper and middle reaches of Fen River basin, the species composition, spatial distribution, relationship with water quality and environmental factors, and diversity of large benthic species were studied across 17 sites in the upper middle reaches of the Fen River basin. During the study, 37 species of macrobenthos animals were identified, belonging to 25 families, 6 classes, and 4 phyla. Besides, it was found that the species, density and biomass of macrobenthos at different sites have obvious spatial heterogeneity. Effects of water quality and environmental factors on macrobenthos in the upper middle reaches of Fen River basin followed the order: $DO > TP > CON > NH_3-N > TN > pH > BOD_5$. The influencing factors of benthic water quality are different. In 17 sampling sites, the best level of macrobenthos diversity is "general", accounting for 29%. Poor level sampling sites comprised 41% and worst level 30%. The comprehensive evaluation of the diversity of macrobenthic animals is "

2019 年 2 月 12 日收稿 (Received: February 12, 2019).

* 山西省重点研发项目(201803D31211-1, 201803D221002-4), 山西省自然科学基金(201701D121116, 201801D121261) 和国家自然科学基金(41601202)资助。

Supported by the Key R&D Projects in Shanxi Province(201803D31211-1, 201803D221002-4), Shanxi Natural Science Foundation Project (201701D121116, 201801D121261) and National Natural Science Foundation of China(41601202).

** 通讯联系人, Tel: 13934603466, E-mail: lihua@sxu.edu.cn; 13453192368, E-mail: 984736173@qq.com

Corresponding author, Tel: 13934603466, E-mail: lihua@sxu.edu.cn; 13453192368, E-mail: 984736173@qq.com

poor" level in the upper and middle reaches of Fen River.

Keywords: upper and middle reaches of Fen River basin, macrobenthic, community characteristics, biological diversity.

水生动物研究是水生态学研究的一个重要部分,大型底栖动物是水生态系统中分布最为广泛的物种之一,是河流生态系统的重要组成部分^[1-3].大型底栖动物是指个体大于 0.5 mm,生活史的全部或部分在水体底部的水生无脊椎动物群.它们寿命长,迁移能力弱,对环境变化反应迅速,在物质循环和能量流动中起着重要作用,因此被作为指示生物广泛应用于河流生态评价中^[4-6].大型底栖动物的类群组成决定了河流中物质循环和能量流动的方式^[7].因此,大型底栖动物群落生态学研究,对河流的保护、利用和管理具有重要的指导作用^[8].

国内学者对长江口、珠江口、泉州湾、乐清湾、渤海湾、天津等近岸海域、太子河流域、雅鲁藏布江流域、渭河流域、黄河口的底栖生物群落结构进行调查与研究^[12-25].汾河上中游流域处于山西中部区域,近年来对于汾河上中游流域水生生物的研究少有报道.因此本研究选取汾河上中游流域,于 2016 年 5 月在汾河上中游流域布点 17 个进行采集调查,以期初步了解汾河上中游流域大型底栖动物的群落特征、空间分布、水质影响因子及其多样性,为汾河流域水域生态学的研究提供基础资料.

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 采样点布设

汾河是山西境内第一大河,是黄河第二大支流,全长 716 km,流域面积 39471 km²,纵贯山西南北,汇聚源自吕梁、太行两大山区的支流,流经太原、临汾和运城三大盆地,至万荣注入黄河,是山西人民的“母亲”河.汾河上中游流域从汾河发源地宁武管涔山麓至灵石王庄断面,流域面积为 26210 km²,流经忻州市宁武县、静乐县和岚县;吕梁市交城县、文水县、汾阳市、孝义市和交口县;太原市阳曲县、娄烦县、清徐县、尖草坪区、万柏林区、杏花岭区、小店区和晋源区;晋中市昔阳县、和顺县、太谷县、祁县、平遥县、介休市和灵石县,该流域属温带大陆性季风气候,为半干旱、半湿润型气候过渡区,四季变化明显.降雨的年际变化较大,年内分配不均,全年 70%降雨量集中在 6 月—9 月份,并且多以暴雨形式出现;降水量总体分布趋势图为南北两端和东西两侧山区高,中部盆地低,全流域多年平均降水量为 489.3 mm,其中汛期降水量占全年的 78.8%,多年平均蒸发量 2008 mm,年平均气温 6—13 ℃.

考虑到汾河上中游流域不同污染源、不同水质、水库、支流汇入、城市等因素,结合国控点和省控点,在布置采样点时,设置了 17 个监测断面,分别是雷鸣寺(S1)、马头营汇口(S2)、洪河汇流(S3)、鸣水河(S4)、静乐监控点(S5)、河岔(S6)、曲立(S7)、涧河大桥(S8)、古交上游(S9)、寨上(S10)、柴村桥(S11)、小店桥(S12)、晋阳湖(S13)、温南社(S14)、平遥铁桥(S15)、义棠(S16)、南关(S17),采样布点图见图 1.

1.2 样品的处理

大型底栖动物的采集及处理依据《生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物》(HJ 710.8—2014),水样的采集依据《水质采样技术指导》(HJ494—2009)和《水质样品的保存和管理技术规定》(HJ493—2009).具体方法如下:采用索伯网(Surber,网口为 30 cm×30 cm,网孔径为 500 μm 采集,通过筛洗后将残渣和碎屑置于白瓷盘中,将底栖动物逐一拣出.拣出的动物用 10%甲醛溶液进行固定,再进行种类鉴定和计数^[23-26].

1.3 水体理化因子分析

每次采集底栖动物之前,先在样点 100 m 的范围内随机采集 1 个水体样本,低温保存送回实验室待测.水环境测定指标有:氨氮(NH₃-N)、化学需氧量(COD_{Cr})、生化需氧量(BOD₅)、阴离子表面活性剂(LAS)、石油类(Petroleum)、总磷(TP)、总氮(TN)、氟化物(F⁻)、酸碱度(pH)、电导率(CON)、溶解氧(DO).样品测定依据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》^[26]进行.

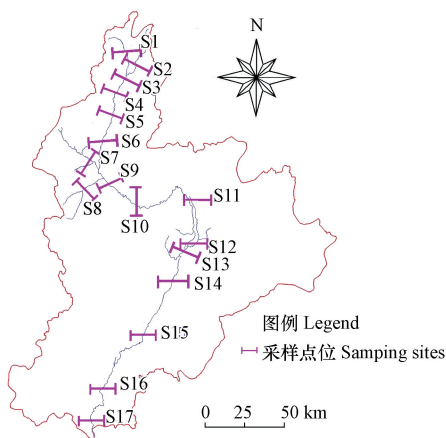


图 1 汾河上中游流域采样站点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the upper and middle reaches of the Fen River basin

1.4 大型底栖动物多样性指标

大型底栖动物空间分布特征采用生物密度(D),生物量($m_{\text{底栖}}$)两个指标来表述.大型底栖动物多样性评价采用大型底栖动物多样性综合指数(N)^[9-22].

2 结果与讨论 (Results and discission)

2.1 大型底栖动物群落特征

2016 年 5 月,于汾河上中游流域 17 个采样点共鉴定出底栖动物 37(属)种,隶属于 4 门 6 纲 25 科,其中环节动物 9(属)种,占总物种数 24.3%;软体动物 5(属)种,占总物种数 13.5%;节肢动物有 22(属)种,占总物种数 59.4%;另外,涡虫纲 1 种,占总数的 2.7%,底栖动物各类群组成如图 2 所示.汾河上中游流域环节动物门最常见的种为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*);节肢动物门中昆虫纲有 20(属)种,主要由蜉蝣目(Ephemeroptera)、襀翅目(Plecoptera)、毛翅目(Trichoptera)和双翅目(Diptera)组成,其中 EPT 类水生昆虫共 4(属)种,常见种为四节蜉(*Baetis* sp.),双翅目水生昆虫共 12(属)种,常见种为直突摇蚊 sp.1(*Orthocladius* sp.1).

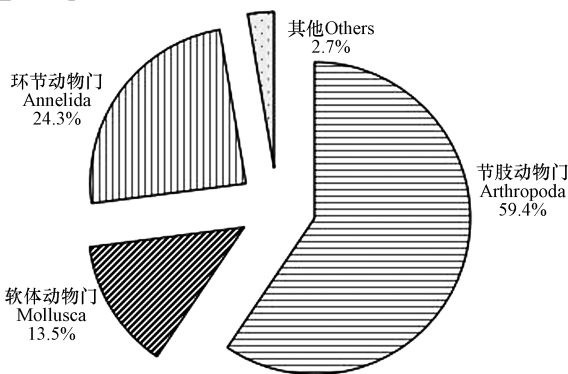


图 2 汾河上中游流域大型底栖动物群落组成

Fig.2 Composition of macrobenthos community in the upper middle reaches of the Fen River basin

汾河上中游流域的 17 个采样点中,单个采样点大型底栖动物物种数最高的为位于源头的 S1 采样点,有 11(属)种,且其底栖动物种类数最多,包括了节肢动物门、软体动物门、环节动物门和涡虫纲(Turbellaria),除了 S11 和 S13 采样点有软体动物门,其它采样点均只有节肢动物门和环节动物门;且其它样点大型底栖动物物种种类数均比 S1 点位低,这可能是因为 S1 采样点处于源头,水质及其他环境因子质量较好,S1 中生物密度占比达 42%的双齿钩仙女虫(*Uncinaiis uncinata*)的存在也说明这种情况,但

随着大型底栖动物生存环境的变化,尤其是污染的增加,使其物种种类有所减少.结果表明,汾河上游大型底栖动物物种种类优于中游,徐梦珍等^[20]对雅鲁藏布江流域底栖动物多样性的研究结果也表现出同样的规律.

2.2 大型底栖动物空间分布特征

2.2.1 大型底栖动物生物密度

从图 3 可以看出,汾河上中游流域 17 个采样断面大型底栖动物的密度在 2—111644 ind·m⁻²之间,平均值为 8977 ind·m⁻²,其中 S7 样点密度值最高,为 1.1×10⁵ ind·m⁻²,是生物密度次高点 S10 采样点的 5 倍,是生物密度最低点 S11 采样点的 9304 倍;其次为 S10、S9、S16 和 S17,其密度分别为 2.2×10⁴ ind·m⁻²,4322 ind·m⁻²,3536 ind·m⁻²和 2978 ind·m⁻²;其余样点的密度值均低于 S17,剩余样点的生物密度大小依次为 S5>S14>S2>S15>S1>S6>S3>S4>S8>S12>S13>S11.

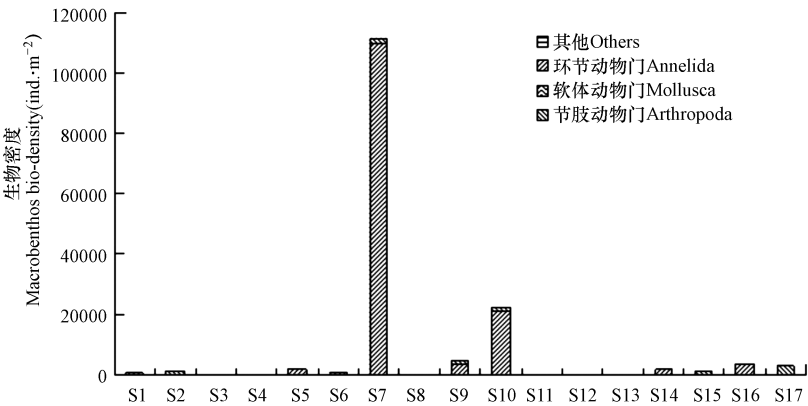


图 3 汾河上中游流域大型底栖动物生物密度空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of macrobenthos bio-density in the upper middle reaches of the Fen River basin

从图 4 可以看出,节肢动物门和环节动物门是汾河上中游流域的主要大型底栖动物物种.仅 S1 采样断面四类物种都有,节肢动物门和环节动物门占 93%,软体动物门占 4%,其它占 3%;S2、S3、S4、S6、S15、S17 共 7 个样点中以节肢动物门为主,节肢动物门占总物种 65%以上,其中 S2 和 S17 样点节肢动物门占比达 100%;S5、S7、S9、S10、S12、S14、S16 采样断面以环节动物门为主,占总物种 80%以上,其中 S14 采样断面环节动物门占 100%;S8 采样断面节肢动物门和环节动物门各占 50%;S13 采样断面节肢动物门和软体动物门各占 50%.软体动物门仅在 S1、S11、S13 采样断面检出.

2.2.2 大型底栖动物生物量

汾河上中游流域大型底栖动物生物量从 0.09—213.33 g·m⁻²,大型底栖动物生物量的平均水平为 17.33 g·m⁻²,最大值也出现在 S7 采样断面,为 213.33 g·m⁻²(图 5),是生物量次高点 S16 采样点的 7 倍,是生物量最低点 S8 采样点的 2370 倍;其余采样断面的底栖动物生物量均低于 30 g·m⁻²,各采样断面大型底栖动物生物量排序为 S7>S16>S14>S1>S5>S11>S2>S10>S17>S15>S9>S6>S13>S3>S12>S4>S8.各采样点生物密度高的样点生物量不一定高,这是因为不同样点的底栖动物物种组成不同,而不同物种的重量不一样.

S7 采样点生物密度和生物量都过高,这可能是因为该采样点上游是城镇污水处理厂,主要来源为生活污水,其排放水中含有较高的营养成分,为大型底栖动物的生存提供了营养条件,且该采样点的大型底栖动物类型主要为颤蚓科(Tubificidae)中的霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、中华河蚬(*Rhyacodrilus sinicus*)、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*),占该采样点生物密度和生物量的 98.8%和 99%,为典型的耐污种.在水生态系统中,氮、磷是衡量水体富营养化程度的关键指标,其含量影响底栖动物分布,其中氮为主要制约因素^[2].总氮在河流中作为重要的营养盐指标能够显著影响大型底栖动物的物种组成和分布^[27].人类活动强度与大型底栖动物的群落组成具有显著相关性^[22].

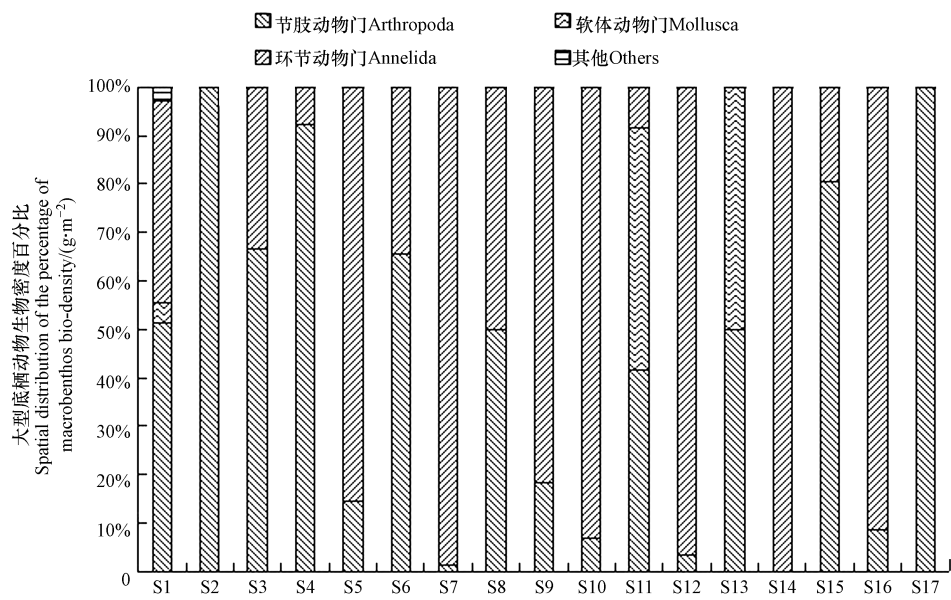


图 4 汾河上中游流域大型底栖动物生物密度百分比空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of the percentage of macrobenthos bio-density in the upper and middle reaches of the Fen River basin

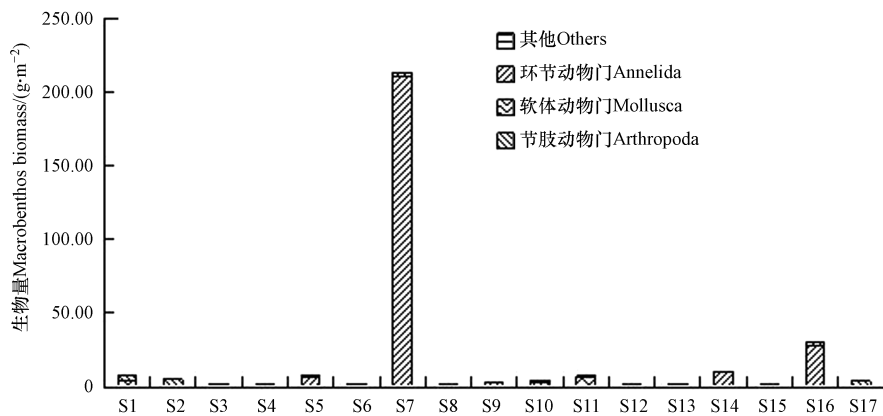


图 5 汾河上中游流域大型底栖动物生物量空间分布
Fig.5 Spatial distribution of macrobenthos biomass in the upper and middle reaches of the Fen River basin

2.3 大型底栖动物群落与水质的关系
2.3.1 汾河上中游流域水质主要污染因子分析

对 17 个采样断面采集的水质分析得到的 9 个指标进行主成分分析,从中筛选出影响流域水质的主要污染因子.各指标数据的 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)系数为 0.76,大于 0.7,说明各指标数据适合进行主成分因子分析.选取特征值大于 1 的成分作为主成分,为 F1、F2、F3、F4,共 4 个主成分,共解释了总变异的 85%.

因子载荷值越高,表明水质污染因子与主成分间的关系越密切,从表 1 中看出,COD_{Cr}、LAS、Petroleum 和 F 的因子载荷值小于 0.7,而其它 7 项水质污染因子的载荷值均大于 0.7,由此得出,COD_{Cr}、LAS、Petroleum 和 F 与水质污染状况的相关性过低,其不是汾河上中游流域主要水质污染因子.因此 NH₃-N、BOD₅、TP、TN、pH、CON、DO 为汾河上中游流域水质主要污染因子.

环境因子对大型底栖动物属种分布相关性中 DO、pH 和 CON 为正相关,TP、TN、NH₃-N 和 BOD₅ 为负相关.除颤蚓科外,其它种类大型底栖动物主要受 DO、pH 和 CON 影响,且为正相关,其它指标影响为负相关.颤蚓科主要受 TP、TN、NH₃-N 的影响,为正相关,其它指标影响为负相关.颤蚓科的分布主要受

营养元素的供给影响,而其他大型底栖动物则对溶氧含量和水质酸碱程度以及电导等水质因子更为敏感.说明汾河上中游流域中营养盐、DO、pH 和 CON 等对群落结构的分布状况起着重要作用,陈丽等对拉萨河流域研究也得出相似的结论^[28]. Marshall 和 Elliott^[29] 将影响生物群落结构的变量分为 3 类:环境因子、生物间的相互作用以及生物因子可以影响环境因子的方式.汾河上中游流域大型底栖动物与水质相关指标的关系研究中,仅涉及到水质部分化学指标,非常有限,不足以解释物种的大多数变化.CCA 分析结果显示,还有近 15% 有关底栖动物群落组成和环境因子之间的关系并未包含进来.因此,其他环境因子诸如沉积物中的重金属含量^[30]、食物资源的可用性(附着藻类、枯叶作为食物)^[31]、物种间的作用^[32]、土地利用类型及河岸带植被、河流的底质类型^[33-39] 均需要在今后的研究中作为影响底栖动物分布的因素而加以考虑^[40-41].

表 1 汾河上中游流域水质污染因子旋转后的因子载荷率

Table 1 Loadings of rotated aquatic environmental factors					
水质污染因子 Physical and chemical parameters	F1	F2	F3	F4	
NH ₃ -N	0.922	0.238	-0.041	0.095	
COD _{Cr}	0.625	-0.241	-0.027	0.477	
LAS	0.103	0.342	0.510	-0.183	
BOD ₅	0.158	0.884	0.081	0.201	
Petroleu	-0.066	0.199	0.536	0.322	
TP	0.612	0.723	0.133	0.083	
TN	0.835	0.466	0.118	-0.190	
F ⁻	0.410	0.662	0.030	0.491	
pH	-0.025	-0.418	0.789	0.104	
CON	0.887	0.178	-0.028	0.161	
DO	-0.085	-0.328	-0.179	-0.829	

2.3.2 大型底栖动物与主要水质污染因子的 CCA 分析

将前文水质污染因子主成分分析筛选出的 7 个指标与大型底栖动物生物密度进行典型对应分析(CCA),得到图 6,大型底栖动物的两个排序轴和环境因子的两个排序轴均近似垂直,相关系数为 0,说明 CCA 分析的结果是可靠的.

从表 2 可以看出,前两个排序轴的特征值分别为 0.775、0.566,不同环境因子对各个排序轴的贡献率不同,前两个排序轴表达了物种-环境因子 54% 的变量信息,其中第一排序轴的贡献最大,达 31.2%.排序轴能真实的反映环境因子对大型底栖动物属种分布的影响程度.

表 2 CCA 分析中各轴的重要值、物种变量以及物种-环境因子的累积百分数

Table 2 Eigenvalue of each axis, cumulative percentage of species and species-environmental variables in CCA				
轴 Axis	重要值 Eigenvalue	物种-环境因子相关性 Species-environment correlation	物种变量累积百分数 Cumulative percentage of species data variance	物种-环境变量累积百分数 Cumulative percentage of species-environment variance
1.0	0.775	0.967	14.4	31.2
2.0	0.566	0.948	24.9	54.0
3.0	0.387	0.859	32.0	69.6
4.0	0.361	0.930	38.7	84.1

从图 6 中的箭头长度可以看出,环境因子对大型底栖动物属种分布相关性大小排序为 DO>TP>CON>NH₃-N>TN>pH>BOD₅;从箭头所处的象限,可以看出 DO、pH 和 CON 与第一排序轴为正相关,TP、TN、NH₃-N 和 BOD₅与第一排序轴负相关.因此,综合而言,汾河上中游流域水质污染因子对大型底栖动物属种分布影响程度为 DO>TP>CON>NH₃-N>TN>pH>BOD₅.

此外从图 6 中还可以看出,除颤蚓科外,其它种类大型底栖动物主要受 DO、pH 和 CON 影响,从箭

头和第一排序轴的夹角可以看出,DO、pH 和 CON 对大型底栖动物(除颤蚓科)的影响关系为正相关,其它指标影响为负相关.颤蚓科主要受 TP、TN、NH₃-N 的影响,其对颤蚓科的影响为正相关,其它指标影响为负相关.

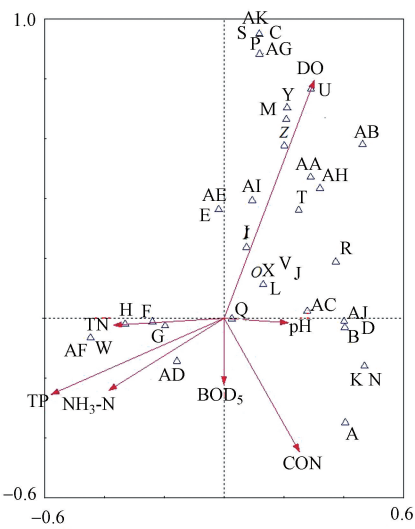


图 6 汾河上中游流域环境因子与底栖动物属种的典型对应分析双轴图

Fig.6 Results of canonical correspondence analysis for aquatic environmental factors and macrozoobenthic assemblages

A=*Nais pardalis* ; B=*Nais elinguis* ; C=*Uncinaiis uncinata*;D=*Chaetogaster diaphanus*;E=*Paranais frici* ;
F=*Limnodrilus hoffmeisteri*;G=*Rhyacodrilus sinicus*; H=*Branchiura sowerbyi*; I=*Enchytraeidae* sp. ; J=*Bellamyia* sp. ;
K=*Parafossarulus striatulus*; L=*Stenothyra glabra*; M=*Radix swinhoei*; N=*Hippeutis* sp. ; O=*Macrobrachium* sp. ; P=*Gammarus* sp. ;
Q=*Podura* sp. R=*Baetis* sp. ; S=*Limnephilidae* sp. ; T=*Hydropsyche* sp. ; U=*Ophiogomphus* sp. ; V=*Somatochlora* sp. ; W=*Saldidae* sp. ;
X=*Elmidae* sp. ; Y=*Antocha* sp. ; Z=*Bezzia* sp. ; AA=*Rheopelopia* sp. ; AB=*Hydrobaenus* sp. ; AC=sp.1*Orthocladius* sp.1;
AD=*Chironomus* sp. ; AE=*Microchironomus* sp. ; AF=*Harnischia* sp. ; AG=sp.1*Polypedilum* sp.1;AH=sp.2*Polypedilum* sp.2;
AI=*Tanytarsus* sp. ; AJ=YWY;AK= *Turbellaria* sp.

2.4 汾河上中游流域大型底栖动物多样性评价

依据《流域生态健康评估技术指南(试行)》选取反映大型底栖动物多样性的多个指标进行综合评估,表征大型底栖动物的物种完整性状况.利用(a)大型底栖动物分类单元数(S);(b)大型底栖动物EPT 科级分类单元比(EPT_r-F);(c)大型底栖动物 BMWP 指数(BMWP);(d)大型底栖动物 Berger-Parker 优势度指数(D)4 个指标标准话后的平均值用来表征大型底栖动物的多样性.

17 个采样断面的大型底栖动物多样性综合指数见表 3,依据《流域生态健康评估技术指南(试行)》中的分级标准(表 4),可对这些样点进行赋分,综合指数 N 乘以 100 即为其用于划分等级的分值,得到 17 个采样断面大型底栖动物多样性评价结果(表 5).

表 3 汾河中上游流域大型底栖动物多样性综合指数

Table 3 Comprehensive index of macrobenthos diversity in the upper middle reaches of the Fen River basin					
	S	EPT _r -F	BMWP	D	N
S1	0.820	0.10	0.27	0.80	0.5
S2	0.492	0.36	0.23	0.54	0.4
S3	0.492	0.36	0.10	0.85	0.4
S4	0.246	0.36	0.09	0.32	0.3
S5	0.492	0.36	0.09	0.81	0.4
S6	0.328	0.36	0.09	0.56	0.3
S7	0.246	0.04	0.04	0.51	0.2
S8	0.410	0.04	0.10	0.69	0.3
S9	0.246	0.77	0.09	0.25	0.3
S10	0.082	0.04	0.04	0.09	0.1

续表3

	S	EPT _r -F	BMWP	D	N
S11	0.574	0.04	0.11	0.80	0.4
S12	0.246	0.04	0.04	0.20	0.1
S13	0.246	0.04	0.02	0.69	0.2
S14	0.000	0.04	0.01	0.00	0.0
S15	0.082	0.04	0.04	0.27	0.1
S16	0.492	0.04	0.04	0.38	0.2
S17	0.082	0.04	0.02	0.19	0.1

表 4 大型底栖动物多样性综合指数分级标准

Table 4 Classification criteria for macrobenthos diversity index					
指标内容 index	优秀 Excellent	良好 Good	一般 Generally	较差 Poor	差 Worst
	80≤N<100	60≤N<80	40≤N<60	20≤N<40	0≤N<20
大型底栖动物多样性综合指数	0.8≤N<1	0.6≤N<0.8	0.4≤N<0.6	0.2≤N<0.4	0≤N<0.2

从表 5 中可以看出汾河上中游流域 17 个采样断面大型底栖动物多样性没有处于优秀和良好等级的采样断面;处于“一般”等级的采样断面有 5 个,分别为 S1、S2、S3、S5、S11,主要分布在静乐县上游区域,占总采样断面的 29%;处于“较差”等级的采样断面有 7 个,分别为 S4、S6、S7、S8、S9、S13、S16,主要分布在静乐县至汾河太原入口区域,占总采样断面的 41%;其余采样断面处于“差”等级,占 30%。

综上所述,可计算出汾河中上游流域大型底栖动物样性综合指数为 0.3,对应的分级标准为较差(表 6)。

表 5 汾河上中游流域大型底栖动物综合多样性指数赋分及等级划分

Table 5 Classification and classification of macrobenthos comprehensive diversity index in the upper and middle reaches of the Fen River basin									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
得分	50	41	45	25	44	33	21	31	34
等级	一般	一般	一般	较差	一般	较差	较差	较差	较差
	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	
得分	6	38	13	25	1	11	24	8	
等级	差	一般	差	较差	差	差	较差	差	

表 6 汾河中上游流域大型底栖动物综合多样性指数及赋分

Table 6 Comprehensive diversity index and scores of macrobenthos in the upper middle reaches of the Fen River basin			
汾河上中游流域 The upper middle reaches of the Fen River basin	底栖动物多样性综合指数 Comprehensive index of benthic diversity	分级标准 Level	赋分 Score
	0.3	较差	31

与其他指数相比,多样性综合指数通过选取大型底栖动物多样性的多个指标进行综合评估,能更好的表征大型底栖动物的物种完整性状况.汾河上中游流域大型底栖动物的多样性分级中,没有“优秀”和“较好”等级的样点,最好为“一般”等级.大型底栖动物的多样性综合指数整体随着从上游到中游的趋势逐渐降低.这可能是因为汾河上游为水源地保护区,随着地理位置逐渐向南,汾河纳污量的增加,汾河水质逐渐变差^[42].S13 和 S16 采样点的大型底栖动物多样性等级也为“一般”,这可能是因为汾河干流沿线支流汇入的结果.综合评价,汾河上中游流域大型底栖动物的多样性等级为“较差”,说明汾河整体的生态环境较差,不利于大型底栖动物的生存,汾河流域是山西省工业集中、农业发达的地区,在山西省的经济发展中具有举足轻重的作用,同时沿途人口稠密,厂矿众多,沿岸的人类活动增加,致使底栖生物丰富度减小^[18].水流条件(如水温,流速)、河道条件(如河床结构,河流形态),以及滨岸条件(如堤岸形

态,滨岸植被)等都对塑造雅江流域底栖动物群落结构起着重要作用^[20].

3 结论(Conclusion)

汾河上中游流域共鉴定出大型底栖动物 4 门 6 纲 25 科,共 37(属)种,其中环节动物占 24.3%,软体动物占 13.5%,节肢动物占 59.5%,涡虫纲占 2.7%.不同采样点位大型底栖动物的种类、各物种的数量及重量差别较大,具有明显的空间差异性.处于汾河源头的 S1 采样点物种最丰富,但生物密度和生物量最高的采样点位 S7.

水质指标对汾河上中游流域大型底栖动物的影响大小排序为 $DO > TP > CON > NH_3-N > TN > pH > BOD_5$.不同种类大型底栖动物的主要水质影响因子不同,颤蚓科主要受 TP、TN、 NH_3-N 的影响,其它种类大型底栖动物主要受 DO、pH 和 CON 影响.

汾河上中游流域大型底栖动物的多样性综合评价为“较差”等级.17 个采样点中最好为“一般”等级,占总采样点位的 29%，“较差”等级采样点位占 41%，“差”等级采样点位占 30%.

参考文献(References)

- [1] 渠晓东,曹明,邵美玲,等.雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物[J].应用生态学报,2007,18(1):158-162.
QU X D, CAO M, SHAO M L et al. Macrobenthos in Jinping reach of Yalongjiang River and its main tributaries. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 158-162 (in Chinese)
- [2] 高欣,牛翠娟,胡忠军.太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2011,22(12):3329-3336.
GAO X, NIU C J, HU Z J. Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3329-3336 (in Chinese).
- [3] 朱晓君,陆健健.长江口九段沙潮间带底栖动物的功能群[J].动物学研究,2003(5):355-361.
ZHU X J, LU J J. Functional groups of zoobenthos in the intertidal zone of Jiuduansha, the Yangtze River estuary [J]. Zoological Research, 2003(5): 355-361 (in Chinese).
- [4] PLAFKIN J L, BARBOUR M T, PORTER K D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers [C]. Rapport US EPA, 1989:444/4-89-001
- [5] SMITH M J, KAY W R, EDWARD D H D, et al. AusRivAS: using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia [J]. Freshwater Biology, 1999 41(2): 269-282.
- [6] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. Freshwater Biol, 1999, 41(2): 221-234.
- [7] TOWNSEND C R, THOMPSON R M, MC INTOSH A R, et al. Disturbance, resource supply and food-web architecture in streams [J]. Ecology Letters, 1998(1): 200-209.
- [8] HEINO J, MUOTKA T, MYKRA H, et al. Defining macroinvertebrate assemblage types of headwater streams: Implications for bioassessment and conservation [J]. Ecological Applications, 2003, 13: 842-852.
- [9] 张培玉. 渤海湾近岸海域底栖动物生态学与环境质量评价研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
ZHANG P Y. Studies on ecology of zoobenthos and environmental quality assessment in coastal waters of Bohai Bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005 (in Chinese).
- [10] WANG X G, WANG C S, ZHANG D S, et al. Abundance and biomass of Meiofauna in the Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf waters in spring [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4717-4727.
- [11] ZHANG J H, GAO Y, FANG H D, et al. Ecological characteristics of macrobenthic communities in Pearl River Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2989-2999.
- [12] DU Y F, XU K D, LEI Y L, et al. Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 431-440.
- [13] JIA H B, HU H Y, TANG J L, et al. The macrobenthos ecology of the southern Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(6): 842-849.
- [14] LI R G, WANG J J, ZHENG C X, et al. The ecology of macrobenthos community in Quanzhou Bay [J]. Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3562-3571.
- [15] LANG H, ZHENG C R, ZHOU S Q, et al. Study on benthos community ecology in the southern estuary of the Minjiang Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(S1): 52-56.
- [16] LIAO Y B, SHOU L, ZENG J N, et al. A comparative study of macrobenthic community under different mariculture types in Xiangshan Bay, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 646-653.
- [17] DU F Y, WANG X H, LI C H, et al. Macrobenthic community structure in Daya Bay, South China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1091-1098.
- [18] 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等.天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征[J].生态学报,2011,31(20):5875-5885.
FENG J F, WANG X M, MENG W Q, et al. Variation characteristics of macrobenthic communities structure in Tianjin coastal region in

- summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5875-5885 (in Chinese).
- [19] 苏玉, 王东伟, 文航, 等. 太子河流域本溪段水生生物的群落特征及其主要水质影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1801-1808
- SU Y, WANG D W, WEN H, et al. Aquatic organisms community characteristics and major environmental factors in Benxi Section of Taizi River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1801-1808 (in Chinese).
- [20] 徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等. 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2351-2360.
- XU M Z, WANG Z Y, PAN B Z, et al. Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2351-2360 (in Chinese).
- [21] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口大型底栖动物群落结构特征及其与环境因子的耦合分析[J]. *海洋学报*, 2014, 36(4): 62-72.
- WU B, SONG J M, LI X G. Characteristics of benthic macroinvertebrate community structure and its coupling relationships with environment factors in Huanghe estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(4): 62-72 (in Chinese).
- [22] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 218-226.
- YIN X W, XU Z X, GAO X, et al. Macrobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 218-226 (in Chinese).
- [23] 王洪铸. 中国小蚓类研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- WANG H T. A study on the Chinese small earthworms[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese).
- [24] 刘月英, 张文珍, 王耀先. 中国经济动物志(淡水软体动物)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- LIU Y Y, ZHANG W Z, WANG Y X. Chinese economic zoology (freshwater mollusks)[M]. Beijing: Science Publishing Company, 1979 (in Chinese).
- [25] EPLER J H. Identification manual for the larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina [M]. North Carolina: North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Division of Water Quality, 2001.
- [26] MORSE J C, YANG L F, TIAN L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [27] WU D H, YU H Y, WU H Y, et al. Estimation of river nutrients thresholds based on benthic macroinvertebrate assemblages a case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 483-488.
- [28] 陈丽, 王东波, 君珊. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 757-769.
- CHEN L, WANG D B, JUN S. Macroinvertebrate community structure and relationships with environmental factors in the Lhasa River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 757-769 (in Chinese).
- [29] MARSHALL S, ELLIOTT M. Environmental influences on the fish assemblage of the Humber estuary, U.K. [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46: 175-184.
- [30] CLEMENTS W H. Benthic invertebrate community responses to heavy metals in the Upper Arkansas River Basin, Colorado[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1994, 13: 30-44.
- [31] RICHARDSON J S. Food, microhabitat, or both Macroinvertebrate use of leaf accumulations in a montane stream[J]. *Freshwater Biology*, 1992, 27: 169-176.
- [32] ENGLUND G, SARNELLE O, COOPER S D. The importance of data-selection criteria: Meta analysis of stream predation experiments[J]. *Ecology*, 1999, 80: 1132-1141.
- [33] JIANG X M, XIONG J, QIU J W, et al. Structure of macro-invertebrate community in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, 95: 42-57.
- [34] HAWKINS C P, MURPHY M L, ANDERSON N H. Effect of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in Cascade Range stream of Oregon[J]. *Ecology*, 1982, 63: 1840-1856.
- [35] CULP J M, WALDE S J, DAVIES R W. Relative importance of substrate particle size and detritus to stream benthic macroinvertebrate microdistribution[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, 40: 1568-1574.
- [36] MINSHALL G W. Aquatic insect substratum relationships//RESH V H, ROSENBERG D M. The ecology of aquatic insects[M]. New York: Praeger Publishers, 1984: 358-400.
- [37] ORMEROD S J, EDWARDS R W. The ordination and classification of macroinvertebrate assemblages in the catchments of the River Wye in relation to environmental factors[J]. *Freshwater Biology*, 1987, 17: 533-546.
- [38] COLLIER K J, WILCOCK R J, MEREDITH A S. Influence of substrate type and physicochemical conditions on macroinvertebrate faunas and biotic indices of some lowland Waikato, New Zealand, streams[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1998, 32: 1-19.
- [39] BUSS D F, BAPTISTA D F, NESSIMIAN J L, et al. Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 518: 179-188.
- [40] ZAMPELLA P A, BUNNELL J F, PROCOPIO N A, et al. Macro-invertebrate assemblages in blackwater streams draining forest land and active and abandoned cranberry bogs[J]. *Wetlands*, 2008, 28: 390-400.
- [41] DUDGEON D. The influence of riparian vegetation on macroinvertebrate community structure in four Hong Kong streams[J]. *Journal of Zoology*, 1988, 216: 609-627.
- [42] 赵然, 李中宇, 贾立明, 等. 松花江干流底栖动物与水质相关性分析[J]. *环境化学*, 2018, 37(1): 173-180.
- ZHAO R, LI Z Y, JIA L M, et al. Correlation analysis between macroinvertebrates and water quality of Songhua River[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(1): 173-180 (in Chinese).