

南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构及环境驱动因子

张丰搏¹, 胡 鹏¹, 闫 龙¹, 唐家璇², 闫肖瑶¹, 王玉莲³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 3. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为评估南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构及环境驱动因子,于2022年7月(汛期)和11月(非汛期)开展监测采样工作。采用生物多样性指数和丰度-生物量比较曲线(ABC曲线)作为大型底栖动物群落特征参数,分析大型底栖动物群落在水源区的结构,并对其进行多元排序和Pearson相关性分析。结果表明:共采集45种大型底栖动物,隶属于4门5纲10目32科44属,其中优势种8种,所有优势物种出现频率均大于50%,水源区大型底栖动物群落结构一致性较高;水源区Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数均值分别为4.01、1.68、0.61;多数采样区域大型底栖动物的ABC曲线呈纠缠态势,其丰度和生物量累积百分比的差值面积在0附近波动,群落以小个体物种为主;优势种以耐污值低的敏感种类为主,说明河流几乎不受污染,水体清洁;pH值是影响水源区大型底栖动物群落结构的主要环境驱动因子。

关键词:南水北调西线工程;大型底栖动物群落;生物多样性指数;ABC曲线;环境驱动因子

中图分类号:Q958.8

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0135-07

Structure of benthic macroinvertebrate assemblages and environmental driving factors in water source area of upper line of South-to-North Water Diversion Project (West Route) // ZHANG Fengbo¹, HU Peng¹, YAN Long¹, TANG Jiaxuan², YAN Xiaoyao¹, WANG Yulian³ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To evaluate the structure of benthic macroinvertebrate communities and the environmental driving factors in the source area for the upper line of the South-to-North Water Diversion Project (West Route), monitoring and sampling work was carried out in July (flood season) and November (non-flood season) of 2022. Biodiversity index and abundance-biomass comparison curve (ABC curve) were used as characteristic parameters of benthic macroinvertebrate communities to analyze the structure in the water source area and to conduct multivariate ordination and Pearson correlation analysis. The results showed that a total of 45 species of benthic macroinvertebrates were collected, belonging to 4 phyla, 5 classes, 10 orders, 32 families, and 44 genera, of which 8 were dominant species and had a frequency of occurrence greater than 50%. The consistency of the benthic macroinvertebrate community structure in the water source area was high. The mean values of Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index in the water source area were 4.01, 1.68, and 0.61, respectively. The ABC curve in most sampling areas showed an entangled pattern, and the area of the difference between the cumulative percentage of abundance and biomass fluctuated near 0, with the community dominated by small-bodied species. The dominant species were mainly sensitive species with low pollution tolerance, indicating that the river was almost free from pollution and the water was clean. pH was the main environmental driving factor affecting the structure of the benthic macroinvertebrate community in the water source area.

Key words: South-to-North Water Diversion Project (West Route); benthic macroinvertebrates community; biodiversity index; ABC curve environmental driving factor

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202003, 2021YFC3200202); 国家优秀青年科学基金项目(52122902); 国家重点实验室自主研究课题项目(SK12022ZD02); 水生态安全保障人才创新团队项目(WR0145B022021)

作者简介:张丰搏(1995—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:756790875@qq.com

通信作者:闫龙(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yanlong@iwhr.com

南水北调西线工程是指从长江上游调水至黄河上游的长距离调水工程,用于解决黄河上中游地区和渭河关中平原的缺水问题^[1-2]。目前西线一期工程推荐上下线组合方案,即上线调水 40 亿 m³,下线调水 40 亿 m³,共计调水 80 亿 m³^[3]。上线方案路线(仍处论证阶段)途径雅砻江、大渡河源头区,并将部分淹没三江源国家级自然保护区,穿越 4 个省级及以下自然保护区,因此探究调水工程的生态影响意义重大^[4-6]。

由于大型底栖动物在水体中活动区域相对固定,不做大尺度迁移^[7-8],调水工程的建设对调水河段的大型底栖动物有显著影响^[9]。调水河段筑坝蓄水后,引水坝址库区水位大幅上涨,导致库区大型底栖动物栖息地被淹没,群落结构发生明显改变,由以需氧型底栖动物为主的群落向以厌氧型底栖动物为主的群落转变^[10]。坝址下游河道水量减少,导致栖息地改变和水环境容量下降,大型底栖动物生物量减少^[11]。在水库、大坝等挡水建筑物对于大型底栖动物群落的影响研究中,一般采用坝址上游或支流未受影响的自然河段中大型底栖动物群落与受影响河段进行比对^[12-15],这是由于研究开展时,挡水建筑物已然建成,无法获得工程建设前的数据,无法准确核算调水后大型底栖动物生态损失量。基于此,本研究于 2022 年 7 月(汛期)和 11 月(非汛期)对南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构、类群多样性特征、生境稳定性状态以及水源区调水河段水质进行调查分析,并利用多元排序法和 Pearson 相关性分析研究底栖动物群落与环境驱动因子响应关系,以期明晰南水北调西线工程上线水源区调水前后大型底栖动物群落结构演变机制提供基础支撑。

1 监测与采样

1.1 监测河段设置

南水北调西线工程上线从雅砻江流域热巴至黄河流域贾曲,依据调水规划和 SL/T793—2020《中华人民共和国水利行业标准》,在调水沿线布设监测河段,包括热巴(R1)、阿安(R2)、仁达(R3)、珠安达(R4)、霍那(R5)、克柯(R6)和安斗乡(R7)。同时,在达曲与泥曲汇合下游鲜水河、雅砻江增设监测河段,包括朱巴(R8)、道孚(R9)和雅江(R10),为分析调水河段大型底栖动物群落相似性做参照。监测河段布设位置见图 1。每个监测河段布设 3 个监测断面,共计 30 个监测断面,其中霍那(R5)监测河段由于疫情原因,未能在 11 月采到样品。

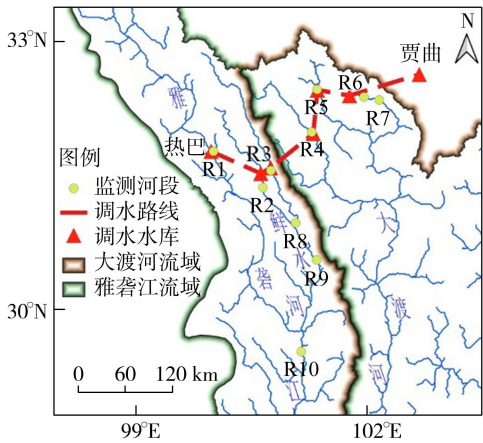


图 1 南水北调西线工程上线监测河段
Fig.1 Monitoring river sections in upper line of South-to-North Water Diversion Project (West Route)

1.2 大型底栖动物采集与鉴定

于 2022 年 7 月(汛期)和 11 月(非汛期)开展采样工作。每个监测断面采用标准索伯网采集 3 个样品,每个样品加入 70% 的乙醇保存,带回实验室用体式显微镜观察计数并称量,鉴定至属级水平。

1.3 水环境理化指标采集与测定

使用哈希 HQ30d 多参数水质检测分析仪现场测定 pH 值、可溶性盐浓度(EC)、溶解氧(DO)和水温(T)。依据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,在实验室中检测总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH₃-N)。依据 HJ501—2009、HJ776—2015、HJ84—2016《中华人民共和国国家环境保护标准》,在实验室中检测溶解性有机碳(DOC)、溶解性硅(Si)和硝酸盐氮(NO₃⁻-N)。依据 GB7483—1987《中华人民共和国国家标准》,在实验室中检测亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)。依据 DL/T502.3—2006《中华人民共和国电力行业标准》,在实验室中检测全硅(TSi)。

2 研究方法

采用大型底栖动物的丰度(A)、生物量(B)、生物多样性指数、丰度-生物量比较曲线(abundance-biomass comparison curve, ABC 曲线)的 W 值作为大型底栖动物群落特征参数,分析水源区大型底栖动物群落的结构。

a. 生物多样性指数及优势度。采用 Margalef 丰富度指数(D_m)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度(J')、优势度(Y),对大型底栖动物群落特征进行评价,计算公式为

$$D_m = (S - 1) / \ln N \tag{1}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \tag{2}$$

其中

$$p_i = n_i / N$$
$$J' = H' / \log_2 S \quad (3)$$

$$Y = \sum_i f_i n_i / N \quad (4)$$

式中: S 为总物种数; N 为总丰度; p_i 为第 i 种物种在总丰度中的比例; n_i 为第 i 种物种的丰度; f_i 为第 i 种物种在所有监测河段出现的频率。

b. 生境稳定性分析。大型底栖动物群落的生境稳定性状况通过 ABC 曲线描述。ABC 曲线表示每个监测河段的累积丰度和累积生物量的关系,其差值面积为 W 值,可用于描述底栖动物群落生境被扰动程度。计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{B_i - A_i}{50(S - 1)} \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 种物种的丰度累积百分比; B_i 为第 i 种物种的生物量累积百分比。

c. 大型底栖动物物种与环境因子相关性分析。使用 SPSS 13.0 对水源区 15 项水环境理化指标进行主成分分析,挑选荷载因子大于 0.6 的环境因子,并剔除相关性较强因子,用于大型底栖动物与环境驱动因子的相关性分析。相关分析采用 Pearson 相关性分析和多元排序法,并采用置换检验显著的环境驱动因子。

d. 群落相似性聚类。通过 Pearson 分层聚类法^[16]对各监测河段底栖动物物种丰度进行聚类,分析大型底栖动物群落相似性。

3 结果与分析

3.1 大型底栖动物群落结构

3.1.1 物种组成及优势种

南水北调西线工程上线水源区 10 个采样区间、30 个采样点、2 次采样共采集到 2487 个大型底栖动物。大型底栖动物共 45 种,隶属于 4 门 5 纲 10 目 32 科 44 属。其中线形动物门 1 种,占比 2.2%; 环形动物门和扁形动物门各 2 种,分别占比 4.4%; 节肢动物门种类最多,共计 40 种,占比高达 88.9%。根据各物种丰度与出现频率统计,各监测河段优势度 $Y > 0.02$ 的物种共计 8 种(表 1),均属于节肢动物,1 种属于甲壳纲,7 种属于昆虫纲。优势种有钩虾属、小蜉属、弯握蜉属、扁蜉属、襁属、短尾石蝇属、纹石蚕属、伪鹬虻属,所有优势物种在监测河段出现的频率都大于 50%,都是广泛分布的物种。且水源区所有监测河段物种数平均值为 17 种,其中,最低值出现在 R8,为 10 种;最高值为 21 种,从 R2 采集。可见,研究区大型底栖动物物种组成和种类差异不大。

3.1.2 物种丰度、生物量以及生境稳定性评价

图 2 为各监测河段大型底栖动物丰度与生物

表 1 优势种属及优势度

Table 1 Dominant species and degree of dominance

优势种属	Y	出现频率/%
钩虾属 <i>Gammaridae</i> sp.	0.22	80
扁蜉属 <i>Heptageniidae</i> sp.	0.19	100
襁属 <i>Perlidae</i> sp.	0.17	100
小蜉属 <i>Ephemerellidae</i> sp.	0.07	100
纹石蚕属 <i>Hydropsychidae</i> sp.	0.04	90
短尾石蝇属 <i>Nemouridae</i> sp.	0.03	90
伪鹬虻属 <i>Athericidae</i> sp.	0.03	90
弯握蜉属 <i>Drunella</i> sp.	0.03	70

量分布。由图 2 可见,除 R2 与 R10 大型底栖动物丰度与生物量有明显差异外,其他监测河段大型底栖动物丰度与生物量整体趋势基本一致。所有监测河段平均丰度为 57 个/ m^2 ,其中 R9 丰度最低,为 23 个/ m^2 ,R5 丰度最高,为 157 个/ m^2 。所有监测河段平均生物量为 1.51 g/ m^2 ,其中 R7 生物量最高,为 3.60 g/ m^2 ;R10 生物量最低,为 0.19 g/ m^2 。

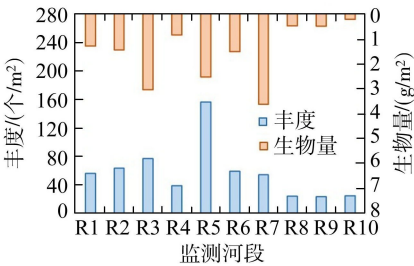


图 2 各监测河段大型底栖动物丰度与生物量分布

Fig. 2 Abundance and biomass distribution of benthic macroinvertebrates of monitoring river sections

图 3 为各监测河段的 ABC 曲线。由图 3 可见,监测河段 R2、R4、R5、R8、R10 曲线趋势特征相似,即初始丰度累积百分比高于生物量累积百分比,后期生物量累积百分比超过丰度,最后重叠在一起,两条曲线呈纠缠态势,说明这些地区大型底栖动物个体数由 1 种或几种个体非常小的物种占优势,生境稳定性欠佳。R1、R3、R6 监测河段丰度累积百分比与生物量趋势基本一致,生境稳定性一般。R7 与 R9 监测河段生物量累积百分比起始位置始终高于丰度,表明大型底栖动物群落未受到明显的干扰,生境稳定性较好。各监测河段 W 值排列次序与 ABC 曲线的特征基本一致,R1 ~ R10 的 W 值分别为 0.095、0.015、0.069、-0.008、-0.059、0.050、0.233、-0.033、0.173、0.039。监测河段 R2、R4、R5、R8、R10 的 W 值在 0 附近波动,生境稳定性欠佳。生境稳定性一般的监测河段 W 值大于 0.05、小于 0.1,包括 R1、R3、R6。监测河段 R7 和 R9 未受明显干扰,生境稳定性较好, W 值都大于 0.1。所有监测河段 W 值由大到小为:R7、R9、R1、R3、R6、R2、R4、R8、R10、R5。

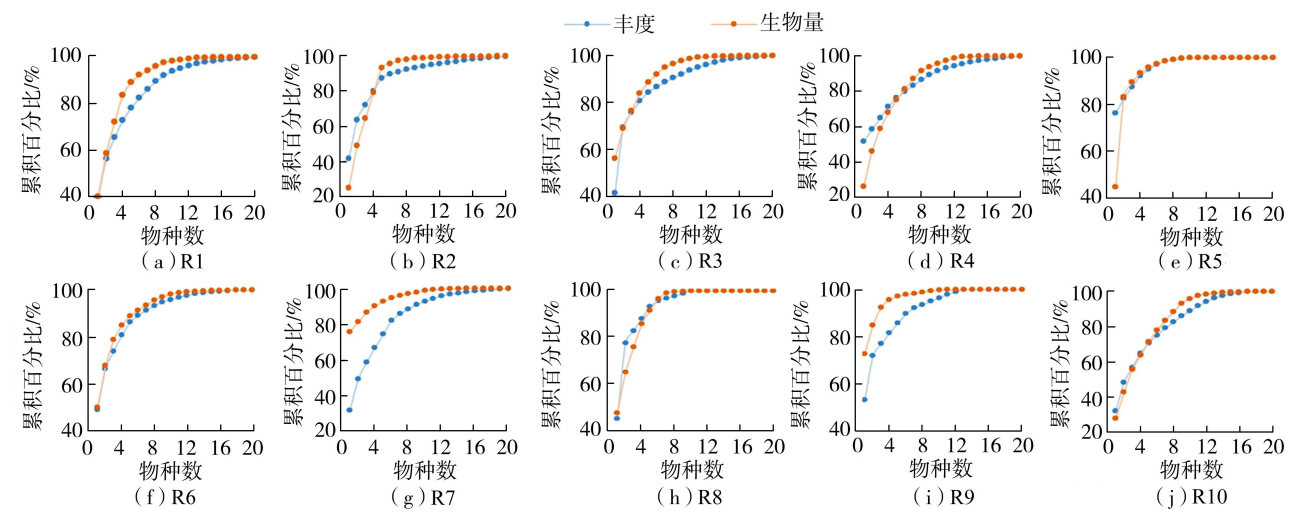


图3 各监测河段的ABC曲线
Fig.3 ABC curves of each monitoring river section

3.1.3 生物多样性

图4为各监测河段生物多样性指数分布。由图4可见,各监测河段Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数变化趋势基本一致,但Margalef指数变化幅度更大,Pielou均匀度指数相近,变化幅度较小。研究区内Margalef指数平均值为4.01,Shannon-Wiener多样性指数平均值为1.68,Pielou均匀度平均值为0.61。生物多样性指数的最高值皆出现在监测河段R10,最低值出现在R5。整体而言,除R5外,研究区调水河段生物多样性指数普遍比较接近且较小,大型底栖动物群落生物多样性一般。

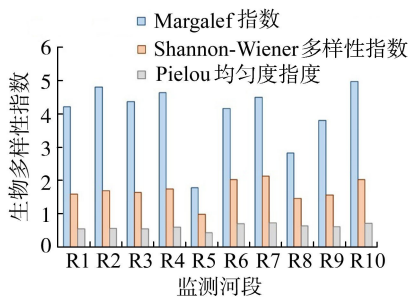


图4 各监测河段生物多样性指数分布
Fig.4 Distribution of biodiversity indexes of monitoring river sections

3.2 群落特征指标与环境驱动因子相关性分析

对所有环境驱动因子的开展主成分分析,最终筛选出8个主要环境驱动因子,分别为 T 、 EC 、 pH 值、 TP 、 TN 、 TSi 、 DO 和 DOC 。将反映各监测河段大型底栖动物群落结构的指标与8个主要环境驱动因子进行Pearson相关性分析,结果见图5。由图5可见,丰度与 TP 呈显著正相关关系,与 pH 值和 DOC 呈显著负相关关系,相关系数分别为0.84、-0.9、

-0.69。Margalef丰富度指数与 TP 呈显著负相关关系,相关系数为-0.8。Shannon-Wiener多样性指数与 DO 呈显著正相关关系,与 T 、 TP 、 EC 呈显著负相关关系,相关系数分别为0.72、-0.64、-0.72、-0.68。Pielou均匀度指数与 TP 呈显著负相关关系,与 DO 呈显著正相关关系,相关系数分别为-0.64、0.74。 W 值和生物量与环境驱动因子没有显著相关性。

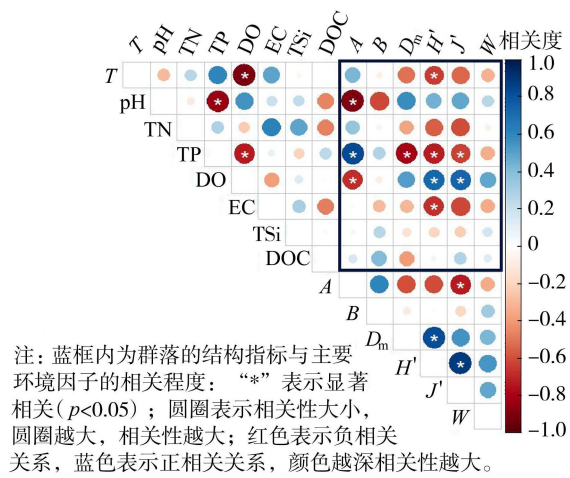


图5 大型底栖动物群落特征与环境驱动因子相关性分析热图

Fig.5 Correlation analysis between large benthic macroinvertebrate community characteristics and environmental driving factors

对研究区监测河段大型底栖动物物种和环境驱动因子开展典范对应分析,结果显示总惯量为1.17,其中第一、二轴特征值占比较大,为0.31和0.23,分别解释26.8%和21.6%的物种数据方差变异以及28.7%和23.1%的物种-环境关系变异。各项环境驱动因子中, pH 值($R^2 = 0.64, p < 0.05$)对大型底栖

动物群落有显著影响。图 6 为大型底栖动物物种与主要环境驱动因子典范对应分析排序图。由图 6 可见,大型底栖动物丰度特征呈现 3 个群体特征,群类 1 包含 5 种优势种,为小蜉属(s8)、扁蜉属(s11)、襁属(s17)、短尾石蝇属(s18)、伪鹬虻属(s36),受到环境驱动因子 pH 值明显正向效应,与电导率、TN、DO、TSi、*T* 呈正相关关系,且与 TP、DOC 呈负相关关系。群类 2 包含 3 种优势种,为钩虾属(s6)、弯握蜉属(s9)、纹石蚕属(s19),与 TP、DO 呈正相关关系,与 TN、DO、TSi、*T*、电导率、pH 值呈负相关关系。群类 3 不包含优势种,与 pH 值、*T*、TP 呈正相关关系,与电导率、TN、DOC、TSi、DO 呈负相关关系。

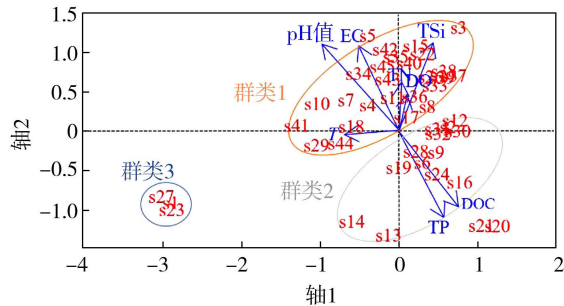


图 6 大型底栖动物物种与主要环境驱动因子典范对应分析排序图

Fig. 6 Canonical correspondence analysis sorting plot of large benthic macroinvertebrates and major environmental driving factors

3.3 群落相似性聚类

图 7 为大型底栖动物群落特征聚类分析树状图。由图 7 可见,在聚类中,R5 自聚一类,其次是 R3,这两个监测河段相对独立性较高。细化聚类后可分为 3 个群体,群体 1 包括 R6 和 R7,群体 2 包括 R1、R2 和 R4,群体 3 包括 R8、R9 和 R10。进一步对各群体细化后,群体 2 中 R2 和 R4 归为一类,群体 3 中 R8 和 R9 归为一类。

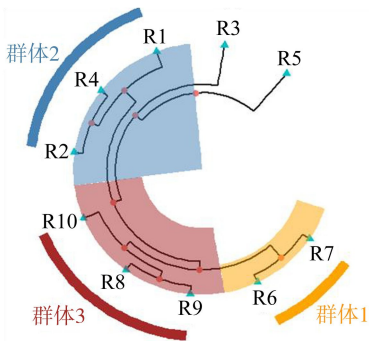


图 7 大型底栖动物群落特征聚类分析树状图

Fig. 7 Cluster analysis tree diagram for large benthic macroinvertebrate community characteristics

4 讨论

4.1 大型底栖动物群落结构特征

本文调查涵盖了南水北调西线工程上线所有调水点以及鲜水河(炉霍至雅江段)共计 10 个监测河段,采集到 2 478 个底栖动物,记录 45 种物种,是近年来较为全面的南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落现状调查。由于人类扰动较少,河流基本保持原始状态,监测河段优势物种多以耐污值低的敏感种类为主。目前,雅砻江、大渡河源头区大型底栖动物群落结构和分布特征的相关研究较少,但潘保柱等^[17]在相近纬度和海拔的黄河源、长江源开展大型底栖动物群落调查研究,共采集大型底栖动物 66 种,其中长江源大型底栖动物 29 种,黄河源大型底栖动物 48 种,与本文调查得到大渡河流域、雅砻江流域水源区物种数相近。

在人类活动较少的区域,环境因子是影响大型底栖动物群落结构的主要因素^[18-19]。虽然水源区水源相对独立,但是 TN、TP 等生源要素和高程等地理属性差异不大,因此优势种在所有监测河段中出现频率均超过 50%,大型底栖动物群落结构一致性较高。并且聚类分析中也清晰地解释了水源区群落结构的一致性,R6 和 R7 自聚一类是由于这两个监测河段都在阿柯河上,R8、R9、R10 自聚一类是由于 R8、R9 在鲜水河上,而且 R10 位于鲜水河汇入口附近的雅砻江干流,这也是 R10 与其他两河段有距离差的原因。最后 R1、R2、R4 自聚一类,显示了虽然这 3 个水源相对独立,但是其具有相似的大型底栖动物群落结构,说明调水后自流河段的大型底栖动物群落结构不一定发生显著改变。

4.2 大型底栖动物主要环境驱动因子

典范对应分析结果显示,环境驱动因子对大型底栖动物群落物种结构和分布有影响,其中 pH 值有显著影响($p<0.05$)。河水的酸碱性对水生生态系统有着重要的影响,过酸(pH 值小于 5)或者过碱(pH 值大于 9)对于水体中的生物都是有害的^[20]。由于 pH 值的变化能影响生态系统中不同初级生产者的生产效率,因此大型底栖动物的群落结构对该指标有着显著响应^[21]。本文调研中群类 1 与 pH 值呈正相关关系,而群体 2 与 pH 值呈负相关关系。同时,图 5 也显示水源区大型底栖动物的丰度与 pH 值呈显著负相关关系。

典范对应分析中也提到了 TP、*T*、EC 和 TSi 对大型底栖动物物种的影响,原因可能是①在水生生态系统中,磷循环会直接影响水生生态系统的初级生产力,为浮游生物和微生物的生产提供必要的营养支撑。而浮游生物作为大型底栖动物的重要食物供

应来源,磷元素的变化会间接影响大型底栖动物的生物多样性和生境稳定性^[22],同时,在相关性分析中显示,TP 与 pH 值呈显著相关关系,TP 的变化也会影响到 pH 值的变化。②气候的变化会改变水体中 T 和 EC 值,气温越高,高海拔地区冻融现象更明显,土壤中含高离子浓度的地下水被更多地释放入河流中,EC 值更高,同时水体 T 也由于热交换作用而升高。图 5 也显示 T 与 EC 呈正相关关系。③TSi 作为河流泥沙的重要指标,其变化代表着河流中泥沙转换,大型底栖动物的物理运动和生理活动影响泥沙中的有机组成和再活化泥沙附着的营养物质。

5 结 语

为评价南水北调西线工程上调水沿线水生态环境本底,以及合理开发利用雅砻江、大渡河流域水源区水资源,本文在 2022 年 7 月(汛期)和 11 月(非汛期)对水源区大型底栖动物类群多样性特征、生境稳定性及其环境驱动因子展开调查。南水北调西线工程上线水源区 10 个监测河段,共采集大型底栖动物 45 种,属于隶属于 4 门 5 纲 10 目 32 科 44 属。优势度大于 0.02 的优势物种共计 8 种。优势种在所有监测河段出现的频率均大于 50%,且基于群落相似度分析可得出,监测河段大型底栖动物群落结构一致性较高。优势种以耐污值低的敏感种类为主,说明河流水体清洁。研究区 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均值分别为 4.01、1.69、0.61,监测河段生物多样性指数普遍比较接近且较小,大型底栖动物群落生物多样性一般。同时,ABC 曲线呈纠缠态势, W 值在 0 附近波动,研究区大型底栖动物群落以小个头底栖动物为主导,大个头的底栖动物较少,生境稳定性一般。水源区水体主要环境驱动因子为 T 、EC、pH 值、TP、TN、TSi、DO 和 DOC。其中,对大型底栖动物群落物种结构和分布有显著影响的是 pH 值。总而言之,虽然南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物的生物多样性和生境稳定性一般,但群落结构一致性较高,且水源区水体清洁,污染较低。

参考文献:

[1] 张金良,景来红,李福生,等. 南水北调西线工程总体布局及一期工程方案研究[J]. 人民黄河,2023,45(5):1-5. (ZHANG Jinliang, JING Laihong, LI Fusheng, et al. Study on overall layout and phase I project of West Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Yellow River,2023,45(5):1-5. (in Chinese))

[2] 沈凤生,洪尚池,谈英武. 南水北调西线工程主要问题研究[J]. 水利水电科技进展,2002,22(1):1-5. (SHEN Fengsheng, HONG Shangchi, TAN Yingwu. Study of

main problems on West Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2002,22(1):1-5. (in Chinese))

[3] 王煜,彭少明,周翔南,等. 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置[J]. 水科学进展,2023,39(5):1-12. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHOU Xiangnan, et al. Water allocation of the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project based on balanced provisioning of water resources in the Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2023,39(5):1-12. (in Chinese))

[4] 王浩,王建华,胡鹏. 水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护,2021,37(2):1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection,2021,37(2):1-9. (in Chinese))

[5] 吴腾,申孙平,李涛,等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (WU Teng, SHEN Sunping, LI Tao, et al. Influence of operation of Sanshengong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(5):401-405. (in Chinese))

[6] 白涛,洪良鹏,喻佳,等. 基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度[J]. 水资源保护,2022,38(5):132-140. (BAI Tao, HONG Liangpeng, YU Jia, et al. Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):132-140. (in Chinese))

[7] SZAŁ KIEWICZ E, KAŁUŻA T, GRYGORUK M. Detailed analysis of habitat suitability curves for macroinvertebrates and functional feeding groups [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):10757.

[8] COCCIAC, ALMEIDA B A, GREEN A J, et al. Functional diversity of macroinvertebrates as a tool to evaluate wetland restoration[J]. Journal of Applied Ecology,2021,58(12):2999-3011.

[9] 常留红,王瀚锐,章富君,等. 梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制[J]. 水资源保护,2023,39(1):216-224. (CHANG Lihong, WANG Haoyue, ZHANG Fujun, et al. Influence mechanism of local hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession [J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):216-224. (in Chinese))

[10] LINARES M S, ASSIS W R R, LEITÃO R P, et al. Small hydropower dam alters the taxonomic composition of benthic macroinvertebrate assemblages in a neotropical

river[J]. River Research and Applications,2019,35(6):725-735.

[11] ZHANG H, ZHU C, MO K, et al. Dam cascade alters taxonomic composition of benthic macroinvertebrate community in upper Yangtze River[J]. River Research and Applications,2021,37(8):1070-1079.

[12] CALAPEZ A R,SERRA S R,RIVAES R,et al. Influence of river regulation and instream habitat on invertebrate assemblage structure and function[J]. Science of the Total Environment,2021,794:148696.

[13] SOFI M S,HAMID A,BHAT S U,et al. Biotic alteration of benthic macroinvertebrate communities based on multispatial-scale environmental variables in a regulated river system of Kashmir Himalaya [J]. Ecological Engineering,2022,177:106560.

[14] 阿膺兰,胡鹏,曾庆慧,等. 基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):253-260. (A Yinglan,HU Peng,ZENG Qinghui,et al. Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in Taoer River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 253-260. (in Chinese))

[15] YANG Z, HE S, FENG T, et al. Spatial variation in the community structure and response of benthic macroinvertebrates to multiple environmental factors in mountain rivers [J]. Journal of Environmental Management,2023, 341:118027.

[16] 焦庆东,杨庆媛,冯应斌,等. 基于 Pearson 分层聚类的重庆市土地利用分区研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31 (6): 173-178. (JIAO Qingdong, YANG Qingyuan, FENG Yingbin, et al. Research on land-use division of Chongqing based on Pearson hierarchical clustering [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31 (6): 173-178. (in Chinese))

[17] 潘保柱,王兆印,余国安. 长江源和黄河源的大型底栖动物群落特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):369-374. (PAN Baozhu, WANG Zhaoyin, YU Guoan. Assemblage characteristics of macrozoobenthos in the source region of the Yangtze River and the source region of the Yellow River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2012,21(3):369-374. (in Chinese))

[18] ROGER G N S,SAMUEL F M,DONALD-L'OR N M,et al. Characterization by benthic macroinvertebrates and some environmental factors of streams in the East Cameroon region[J]. World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences,2022,11(1):5-17.

[19] VARADINOVA E, SAKELARIEVA L, PARK J, et al. Characterisation of macroinvertebrate communities in Maritsa River (South Bulgaria): relation to different environmental factors and ecological status assessment [J]. Diversity,2022,14(10):833.

[20] DOU Q, DU X, CONG Y, et al. Influence of environmental variables on macroinvertebrate community structure in Lianhuan Lake[J]. Ecology and Evolution,2022,12(2):e8553.

[21] STEWART N A, SCHRIEVER T A. Local environmental conditions influence species replacement in Great Lakes interdunal wetland macroinvertebrate communities [J]. Freshwater Biology,2023,68(1):46-60.

[22] VAGHEEI H, LAINI A, VEZZA P, et al. Ecohydrologic modeling using nitrate, ammonium, phosphorus, and macroinvertebrates as aquatic ecosystem health indicators of Albaida Valley (Spain) [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2022,42:101155.

(收稿日期:2023-03-20 编辑:王芳)

+++++

(上接第 134 页)

[20] 谢三桃,杨富宝. 巢湖流域磨墩水库流域水环境污染源调查及防治对策[J]. 水利规划与设计,2019(4):30-36. (XIE Santao, YANG Fubao. The investigation and preventions countermeasures of water environment for Modun Reservoir basin in Chaohu Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2019 (4): 30-36. (in Chinese))

[21] 王羽辉,谢三桃,骆克斌,等. 现代农业灌溉减排模式的建立与应用[J]. 水资源保护,2016,32(1):161-166. (WANG Yuhui, XIE Santao, LUO Kebin, et al. Establishment and application of modern agricultural reduction irrigation model [J]. Water Resources Protection,2016,32(1):161-166. (in Chinese))

[22] 吴若静,谢三桃. 多塘系统在巢湖山丘面源污染控制中的应用[J]. 水利规划与设计,2016(3):18-21. (WU Ruojing, XIE Santao. Application of multi pond system in non-point source pollution control in Chaohu Hilly Area [J]. Water Resources Planning and Design, 2016 (3): 18-21. (in Chinese))

[23] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1): 42-49. (in Chinese))

[24] 陈丽娜,韩龙喜,谈俊益,等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型[J]. 水资源保护, 2021, 37 (6): 128-134. (CHEN Lina, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 128-134. (in Chinese))

(收稿日期:2023-03-08 编辑:王芳)