

王玉莲, 闫龙, 曾庆慧, 等. 南水北调西线水源区大型底栖动物的适宜水文条件[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 557-565. WANG Y L, YAN L, ZENG Q H, et al. Hydrological conditions for the benthic macroinvertebrates of the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 557-565. (in Chinese)

# 南水北调西线水源区大型底栖动物的适宜水文条件

王玉莲<sup>1,2</sup>, 闫龙<sup>1</sup>, 曾庆慧<sup>1</sup>, 唐家璇<sup>1,3</sup>, 张丰搏<sup>1</sup>, 胡鹏<sup>1</sup>

(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. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 3. 天津大学水利工程仿真与国家安全重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**为探索南水北调西线工程水源区大型底栖动物群落结构及其适宜的水文条件,于2022年7月(汛期)及11月(非汛期)在南水北调西线工程水源区开展了2次大型底栖动物采样调查,共记录大型底栖动物50个分类单元。结果表明:西线水源区底栖动物群落组成以节肢动物昆虫纲(Insecta)为绝对优势,占总分类单元数的90.20%。其中,汛期以扁蜉(*Heptageniidae sp.*, 优势度  $Y=19.9%$ )为第一优势种,非汛期以蜉(*Perlidae sp.*, 优势度  $Y=13.8%$ )为第一优势种。时间上,汛期生物密度更高,但非汛期生物多样性及物种均匀度更高;空间上,西线工程上线方案调水河段的生物多样性及生物密度明显高于下线方案。在0~1.0 m/s的流速范围内,不同流速区间的物种数及Margalef多样性指数具有显著差异;且无论是汛期还是非汛期,流速在0.5~1.0 m/s的底栖动物物种数及各项生物多样性指数均处于最高水平。在0~0.6 m的水深范围内,不同水深区间的生物量在汛期或非汛期均具有显著差异,且底栖动物密度整体在0~0.2 m区间内的平均值最高。针对水源区8个优势物种,利用栖息地使用模拟法,得到西线工程水源区河流大型底栖动物优势物种的适宜水文条件为水深0.2~0.4 m、流速0.3~0.6 m/s。

**关键词:**南水北调西线工程;水源区;大型底栖动物;群落结构;适宜水文条件

**中图分类号:** Q958.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0057

南水北调西线工程是从长江上游调水至黄河上中游的一项跨流域调水工程,是解决黄河流域和我国北方地区水资源短缺问题的措施<sup>[1]</sup>。西线工程水源区位于长江上游的江河源区,野生动植物资源十分丰富,但自然生态环境相对脆弱<sup>[2]</sup>。目前西线工程仍处于规划论证阶段,水源区河流生态流量目标的合理确定一直是研究的热点,也是决定调水工程可调水量的重点和难点<sup>[3-6]</sup>。近年来,考虑水生生物生境需求的栖息地模拟法被广泛应用于生态流量的评估与计算<sup>[7-10]</sup>中,底栖动物作为食物网中能量流动和物质循环的中间环节,具有不可替代的作用<sup>[11-14]</sup>,可被当作栖息地模型的目标物种。底栖动物对水文水力条件具有敏感响应,因此也常被作为确定河流生态流量目标的指示物种<sup>[7,15]</sup>。

大型底栖动物的物种丰富度和分布格局受河流级别、流速、坡度及基质多样等河道生境特征和地质特征等因素的影响<sup>[16-17]</sup>。早在2009年,刘莹<sup>[18]</sup>开展了南水北调西线一期调水工程对水源区底栖动物的影响研究,结果表明因调水引起的河道流速、水深以及水面面积的变化都会导致底栖动物物种数的减少;此后对南水北调西线工程水源区底栖动物的研究较少,仅见少量针对雅砻江、大渡河等相关流域开展的调查研究<sup>[19-23]</sup>,但均距离调水工程坝址较远。为探索南水北调西线工程水源区大型底栖动物的适宜水文条件,本研究通过采样调查分析西线工程水源区河流大型底栖动物群落结构,识别水源区大型底栖动物优势物种的适宜水文条件,为西线工程水源区生态流量的确定提供支撑。

收稿日期: 2023-11-07 修回日期: 2024-03-31 网络出版时间: 2024-05-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240521.1307.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3205000; 2022YFC3202003); 国家自然科学基金项目(52122902; 52394233; U2240202; 52109045)

作者简介: 王玉莲(1998—),女,安徽阜阳人,主要从事水文水资源研究。E-mail: [wangyl0711@126.com](mailto:wangyl0711@126.com)

通信作者: 胡鹏(1985—),男,湖北荆州人,博士,正高级工程师,主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail: [hp5426@126.com](mailto:hp5426@126.com)

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

南水北调西线工程规划水源区涉及金沙江、雅砻江、大渡河及其支流,其中一期工程涉及的主要是雅砻江、大渡河及其支流。本研究分别于 2022 年 7 月和 2022 年 11 月在西线工程水源区开展了 2

次大型底栖动物采样调查,依据西线工程规划调水线路及拟建坝址,分别于雅砻江干流(Y01-Y03)以及支流达曲(Y04)、鲜水河(Y05)、泥曲(Y06-Y07),大渡河干流(D02-D03)以及支流玛柯河(D01)、阿柯河(D04-D05)、杜柯河(D06)进行监测,共设置 13 个监测样点(图 1)。

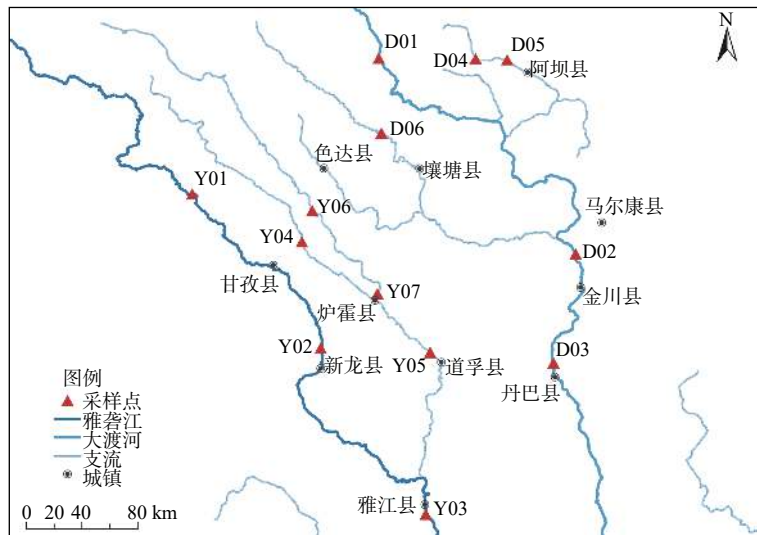


图 1 南水北调西线工程水源区采样点位

Fig. 1 Sampling points of the water source area of the Western Route of South-to-North Water Transfers Project

### 1.2 样品采集与测定

#### 1.2.1 样品采集

根据《生物多样性观测技术导则 淡水底栖动物大型无脊椎动物》(HJ 710.8—2014),采用 50 cm×50 cm 的索伯网定量采集底栖动物,分别在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 水深区间内各重复采集 3 次。将肉眼可见的大型底栖动物在现场人工挑拣到 100 ml 采样瓶内,添加 5%~10% 甲醛溶液保存待检。因河段水文情势及道路问题,部分河段未能采集到底栖动物,2 次采样调查共采集到 73 个样品。其中,第 1 次采样涉及 11 个河段、共采集到 48 个样品;第 2 次采样涉及 10 个河段,共采集到 25 个样品。样品转入实验室后,使用显微镜和解剖镜分类计数,尽可能鉴定到最小分类单元;并用万分之一天平秤称重,计算密度、生物量。

#### 1.2.2 水文条件测定

流速采用 SonTek Flow Tracker 2 手持式声学多普勒流速仪测定;水深采用直尺测定;将样方内大型底栖动物挑拣干净后,记录底质类型。底质分类标准<sup>[24]</sup>为砂(<4 mm)、细砾(4~8 mm)、粗砾(8~16 mm)、小圆石(16~32 mm)、大圆石(32~64 mm)、

小卵石(64~128 mm)、大卵石(128~256 mm)和漂石(>256 mm)。经调查,西线工程水源区各点位底质均为小卵石(64~128 mm),部分点位掺杂细砾(4~8 mm),底质条件较均匀,故本研究仅对水深及流速因子深入分析。

### 1.3 数据分析

#### 1.3.1 整体思路

首先利用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)<sup>[25]</sup>方法,对样本数据进行组间多重比较,分析不同流速、水深梯度下底栖动物各项生物指数的变化及各水文因子对各项生物指数的影响程度。在了解不同水文条件下底栖动物生物指数的变化情况后,采用排序分析方法对水源区大型底栖动物优势物种与水文因子之间的关系进行分析,得到各优势物种对不同水文因子的响应程度。在此之前,先对大型底栖动物相对丰度进行去趋势对应分析(decoupled correspondence analysis, DCA)<sup>[26]</sup>,结果显示 DCA 轴的梯度大于 3,故选择典范对应分析方法(canonical correspondence analysis, CCA)。结合加权平均法计算各优势物种的水文条件最适值及适宜区间<sup>[27-28]</sup>,并用单样本 *t* 检验(双尾)检验物

种生境因子的最适值与该生境因子的平均值是否存在显著差异。最后,采用“栖境使用模拟法”构建优势物种的栖境因子适宜度曲线,该方法可直接从指示生物在栖境中的分布计算所得,可操作性强<sup>[29]</sup>。

### 1.3.2 优势度值和多样性指数

采用优势度值( $Y$ )确定优势物种( $Y \geq 2\%$ )<sup>[30]</sup>, Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D_m$ )、Pielou 均匀度指数( $J'$ )分析各样点底栖动物多样性特征<sup>[31]</sup>,具体公式为

$$Y = (N_i/N) \times F_i \quad (1)$$

$$H' = - \sum_i^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

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

$$J' = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

式中: $N$ 为所有物种的个体数总和; $N_i$ 为物种 $i$ 的个体数; $F_i$ 为物种 $i$ 在各采样点出现的频率; $S$ 为物种总数; $P_i$ 为物种 $i$ 的个体数占个体总数的比例。

### 1.3.3 适宜水文条件区间

采用加权平均法确定各优势物种的水文条件最适值及适宜区间,具体公式为

$$X_w = \sum_j (n_j x_j / \sum_j n_j) \quad (5)$$

$$X_{SD} = \sqrt{\sum_j n_j (x_j - X_w)^2 / \sum_j n_j} \quad (6)$$

式中: $X_w$ 为栖境因子的最适值; $X$ 表示栖境因子; $x_j$ 为采样点 $j$ 的栖境因子值; $X_{SD}$ 为栖境因子的加权标准差,即栖境因子的适宜区间; $n_j$ 为采样点 $j$ 某物种的个体数。

在 R 4.2.3 中进行 DCA、CCA 排序分析,涉及的 R 语言包有“vegan”“ggrepel”“ggplot2”。单因素方差分析和单样本  $t$  检验均在 SPSS 26.0 中进行运算。

## 2 研究结果

### 2.1 大型底栖动物物种组成

调查期间,共采集到大型底栖动物 50 个分类单元,隶属于 3 门 4 纲 10 目 32 科。群落组成:以节肢动物昆虫纲(*Insecta*)为绝对优势,共 45 种,占总分类单元数的 90%;涡虫纲(*Turbellaria*) 2 种;寡毛纲(*Oligochaeta*) 2 种;甲壳纲(*Crustacea*) 1 种。其中:昆虫纲包括双翅目(*Diptera*) (18 种)、蜉蝣目(*Ephemeroptera*) (9 种)、毛翅目(*Trichoptera*) (8 种)、

鞘翅目(*Coleoptera*) (5 种)、襀翅目(*Plecoptera*) (3 种)以及半翅目(*Hemiptera*) (2 种);涡虫纲包括三肠目(*Tricladida*) (2 种);寡毛纲包括单向蚓目(*Haplotaxida*) (1 种)、颤蚓目(*Tubificida*) (1 种);甲壳纲包括端足目(*Amphipoda*) (1 种)。

时间上:汛期(7 月)共采集到大型底栖动物 37 种,其中昆虫纲 33 种、寡毛纲 2 种、涡虫纲 1 种、甲壳纲 1 种;非汛期(11 月)共采集到大型底栖动物 25 种,其中昆虫纲 23 种、甲壳纲 1 种、涡虫纲 1 种。

空间上:雅砻江干流共采集到底栖动物 32 种,支流 30 种;大渡河干流共采集到底栖动物 8 种,支流 36 种。除涡虫纲(2 种)仅在雅砻江干流(Y03)出现过之外,其余昆虫纲、寡毛纲、涡虫纲及甲壳纲底栖动物分布相对均匀。

### 2.2 大型底栖动物群落结构季节差异

两季节样品中,昆虫纲均占绝对优势,2 次采集共同出现的有蜉蝣(*Ephemera sp.*)、四节蜉(*Baetidae sp.*)、小蜉(*Ephemerellidae sp.*)、扁蜉(*Heptageniidae sp.*)、新蜉(*Neophemeridae sp.*)、短尾石蝇(*Nemouridae sp.*)、角石蛾(*Stenopsychidae sp.*)、舞虻(*Empididae sp.*)、大蚊(*Tipulidae sp.*)以及伪鹬虻(*Athericidae sp.*)共 10 个分类单元。汛期优势物种( $Y \geq 2\%$ )分别为扁蜉( $Y=19.9\%$ )、襀(*Perlidae sp.*,  $Y=17.1\%$ )、钩虾(*Gammarus sp.*,  $Y=13.3\%$ )、伪鹬虻(*Athericidae sp.*,  $Y=2.3\%$ )以及弯握蜉(*Drunella sp.*,  $Y=2.2\%$ ),分别隶属于端足目、蜉蝣目、襀翅目以及双翅目;非汛期优势物种有石蝇(*Perlidae sp.*) ( $Y=13.8\%$ )、小蜉(*Ephemerellidae sp.*) ( $Y=8.3\%$ )、扁蜉(*Heptageniidae sp.*) ( $Y=7.5\%$ )以及短尾石蝇(*Nemouridae sp.*) ( $Y=3.2\%$ ),分别隶属于蜉蝣目、襀翅目,除端足目外,其余均隶属于昆虫纲(图 2)。汛期与非汛期的大型底栖动物中,EPT(蜉蝣目、襀翅目、毛翅目)丰度分别占总数的 63.4%、83.9%。

对水源区不同时期大型底栖动物多样性及生物量参数进行单样本  $t$  检验,结果(表 1)显示:汛期的底栖动物密度显著大于非汛期( $p < 0.01$ ),而非汛期的底栖动物 Pielou 均匀度指数显著大于汛期( $p < 0.01$ ); Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数以及生物量未表现出明显差异,但汛期整体平均值小于非汛期。

### 2.3 不同水文条件与大型底栖动物的关系

通过单因素方差分析方法分析不同流速、水深

梯度下底栖动物各项生物参数的变化,结果见表 2、表 3。其中:基于流速缓急程度,以 0~0.3 m/s、0.3~0.5 m/s 及 >0.5 m/s 进行梯度划分;水深梯度则基于采样时的水深区间进行梯度划分。表 2 和表 3 显示:在 0~1.0 m/s 的流速范围内,不同流速区间的物种数及 Margalef 多样性指数具有显著差异;无论是汛期还是非汛期,0.5~1.0 m/s 区间内的底栖动物

物种数及生物多样性指数均处于最高水平;在 0~0.6 m 的水深范围内,不同水深区间的生物量在汛期或非汛期均具有显著差异,而其他指标差异不显著。汛期时,水深 0.2~0.4 m 范围内的底栖动物物种数、多样性指数和生物量平均值更高;非汛期时,水深 0~0.2 m 范围内的底栖动物多样性指数、密度和生物量平均值更高。

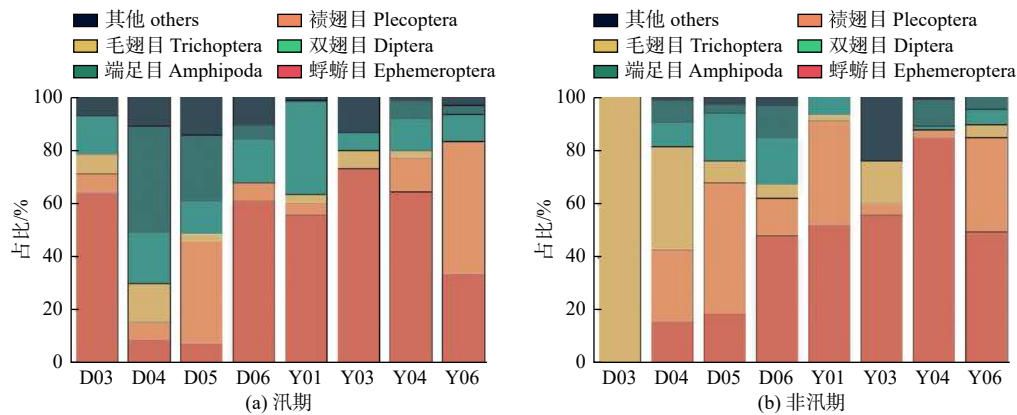


图 2 西线工程水源区不同时期底栖动物物种丰度占比

Fig. 2 Composition of benthic macroinvertebrates communities in the water source area of the Western Route Project at different time periods

表 1 西线工程水源区不同时期生物多样性指数及生物参数

Tab. 1 Biodiversity indices and biological parameters in the water source area of the Western Route Project at different periods

生物指数	汛期(S=48)	非汛期(S=25)	p
Shannon-Wiener多样性指数	1.18±0.06	1.40±0.11	0.073
Margalef丰富度指数	0.71±0.06	0.79±0.09	0.428
Pielou均匀度指数	0.16±0.01**	0.22±0.02**	0.001
密度/(ind·m <sup>-2</sup> )	78.69±10.04**	25.27±4.11**	0
生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	1.41±0.28	1.42±0.32	0.985

注:表中数值为“平均值±标准差”;\*指 $p<0.05$ ;\*\*指 $p<0.01$ ;S为样本数。

表 2 流速对西线工程水源区底栖动物影响的 ANOVA 分析和多重比较

Tab. 2 ANOVA analysis and multiple comparisons of the impact of flow velocity on benthic macroinvertebrates in the water source area of the Western Route Project

时期	流速 $v$ /(m·s <sup>-1</sup> )	样点数/个	分类单元/个	Shannon-Wiener多样性指数	Margalef丰富度指数	Pielou均匀度指数	密度/(ind·m <sup>-2</sup> )	生物量/(g·m <sup>-2</sup> )
汛期	0≤ $v$ <0.3	26	5.38±0.56 <sup>b</sup>	1.04±0.09	0.59±0.08 <sup>b</sup>	0.14±0.01	72.35±11.06	1.08±0.23
	0.3≤ $v$ <0.5	12	6.92±0.71 <sup>ab</sup>	1.37±0.09	0.79±0.10 <sup>ab</sup>	0.18±0.01	66.33±15.41	1.23±0.29
	≥0.5	10	7.90±0.95 <sup>a</sup>	1.33±0.13	0.92±0.13 <sup>a</sup>	0.18±0.02	110.03±33.95	2.50±1.15
非汛期	0≤ $v$ <0.3	14	4.14±0.48	1.09±0.14	0.49±0.07	0.17±0.02	20.19±6.13	0.75±0.30
	0.3≤ $v$ <0.5	5	7.20±0.97	1.71±0.12	0.97±0.15	0.27±0.02	25.60±7.03	2.06±1.15
	≥0.5	6	9.50±0.85	1.86±0.06	1.33±0.13	0.29±0.01	36.83±6.13	2.46±0.40

注:表中数值为(平均值±标准差);a、b为组间差异标识,即a组数值与b组数值之间有显著差异,含相同字母数值组之间无显著差异。

## 2.4 西线水源区优势物种适宜水文条件

针对不同时期的优势物种,通过典范对应分析方法(CCA)对各优势物种与其水文因子进行排序

(图 3),并采用加权平均法对各优势物种的适宜水文条件进行计算(表 4)。CCA 排序结果显示,水源区内各优势物种对于水文因子的响应程度不同,如:

短尾石蝇(*Nemouridae*)、襁(*Perlidae*)与流速呈较强正相关,其适宜流速相对较大;扁蜉(*Heptagenia*)与流速呈较强负相关,其适宜流速相对较小;伪鹬虻(*Athericidae*)、弯握蜉(*Drunella*)、钩虾(*Gammarus*)

与水深呈较强负相关,其适宜流速相对较小。由于水源区河流底质均为卵石类型,各优势物种对底质的偏好差异性较小。

表3 水深对西线工程水源区底栖动物影响的 ANOVA 分析和多重比较

Tab. 3 ANOVA analysis and multiple comparisons of the impact of water depth on benthic macroinvertebrates in the water source area of the Western Route Project

时期	水深H/ m	样点数/ 个	分类单元/ 个	Shannon-Wiener 多样性指数	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数	密度/ (ind·m <sup>-2</sup> )	生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )
汛期	0≤H<0.2	25	6.16±0.61	1.18±0.10	0.69±0.08	0.16±0.01	100.30±15.53 <sup>b</sup>	1.42±0.25 <sup>b</sup>
	0.2≤H<0.4	13	6.92±0.74	1.25±0.08	0.79±0.10	0.17±0.01	71.14±16.51 <sup>ab</sup>	2.05±0.91 <sup>ab</sup>
	0.4≤H<0.6	11	5.36±1.01	1.00±0.17	0.58±0.14	0.13±0.02	31.45±9.08 <sup>a</sup>	0.54±0.15 <sup>b</sup>
非汛期	0≤H<0.2	6	7.33±1.20	1.64±0.09	0.99±0.19	0.26±0.01	39.61±12.33	2.80±0.99 <sup>b</sup>
	0.2≤H<0.4	11	5.18±0.82	1.27±0.17	0.65±0.13	0.20±0.03	19.91±4.00	1.01±0.34 <sup>b</sup>
	0.4≤H<0.6	8	6.25±1.16	1.39±0.24	0.82±0.18	0.22±0.04	21.88±6.19	0.95±0.32 <sup>a</sup>

注:表中数值为(平均值±标准差);a、b为组间差异标识,即a组数值与b组数值之间有显著差异,含相同字母数值组之间无显著差异。

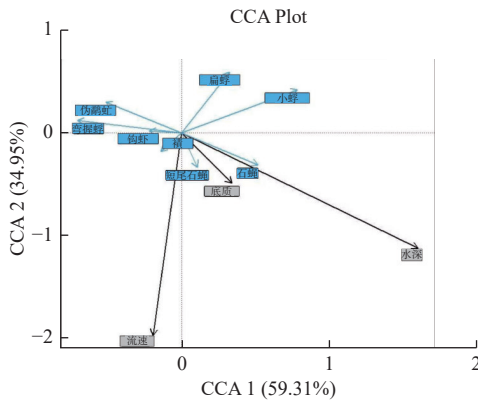


图3 西线工程水源区大型底栖动物优势物种与水文因子之间的 CCA 排序

Fig. 3 CCA ordination diagram of benthic macroinvertebrates dominant species and hydrological factors in the water source area of the Western Route Project

表4 西线工程水源区底栖动物优势物种的水文因子加权平均值

Tab. 4 Hydrological factor weighted averages of macroinvertebrate dominant species in the water source area of the Western Route Project

分类单元	水深/m	流速/(m·s <sup>-1</sup> )
钩虾( <i>Gammarus</i> )	0.30±0.16	0.54±0.22**
小蜉( <i>Ephemerella</i> )	0.35±0.17	0.38±0.21*
弯握蜉( <i>Drunella</i> )	0.24±0.15	0.53±0.21*
扁蜉( <i>Heptagenia</i> )	0.32±0.15	0.36±0.19
襁( <i>Perlidae</i> )	0.32±0.13	0.51±0.22**
短尾石蝇( <i>Nemouridae</i> )	0.28±0.16*	0.62±0.27*
伪鹬虻( <i>Athericidae</i> )	0.31±0.19	0.48±0.22

注:表中数值为“平均值±标准差”;\*指单样本t检验p<0.05;\*\*指单样本t检验p<0.01。

结合表4可知,各个优势物种的水深、流速适

宜范围不尽相同,但部分物种的适宜水文条件范围相似。小蜉(*Ephemerella*)、伪鹬虻(*Athericidae*)、扁蜉(*Heptagenia*)的适宜水文条件在水深0.31~0.35 m、流速0.36~0.48 m/s范围内,适合生存在水体适中且流速适中区域;钩虾(*Gammarus*)、弯握蜉(*Drunella*)、襁(*Perlidae*)、短尾石蝇(*Nemouridae*)的适宜水文条件在水深0.24~0.30 m、流速0.51~0.61 m/s范围内,适合生存在水深较浅但流速较急区域;石蝇(*Perla*)的适宜水文条件在水深0.38 m、流速0.51 m/s左右,适合生存在水体相对较深且流速较急区域。水源区优势物种整体的适宜水文条件范围在水深0.24~0.38 m、流速0.36~0.62 m/s。

综合各优势物种的水文因子加权平均值(表4)以及优势物种在不同水文条件下的出现频率,通过栖境使用模型法构建水源区优势物种水文条件适宜度曲线(图4)。水深适宜度曲线[图4(a)]表明水源区优势物种的适宜水深主要集中在0.2~0.4 m,超过0.4 m后底栖动物的适宜度逐渐下降,但在0.4~0.6 m水深区间内仍适合较多物种生存;流速适宜度曲线[图4(b)]表明水源区优势物种的适宜流速主要集中在0.3~0.6 m/s范围内,当流速增大至1.0 m/s时,底栖动物的适宜度逐渐减少并趋近于0。

### 3 讨论

#### 3.1 西线水源区底栖动物时空分布特征

7月和11月分别属于西线水源区河流的汛期和非汛期,不同时期的底栖动物群落结构的组成及丰度也有所不同<sup>[22]</sup>。水源区河流汛期与非汛期的大

型底栖动物中 EPT 丰度较高,分别占总数的 63.4%、83.9%,表示水源区水体较为清洁。从时间上看,由于汛期频繁降水会影响底栖动物的现存量及多样性水平,一般河流在非汛期的底栖动物密度、生物多样性及物种均匀度都高于汛期<sup>[25-26,32]</sup>。水源区河流非汛期时的底栖动物生物多样性及物种均匀度高于汛期,但非汛期所采集的栖动物密度较小,物种群落丰富度不高。一方面可能与两时期集样品时的样本数量及采样河段未能完全统一有关;另一

方面也因水源区河流底栖动物以水生昆虫为主,由于水生昆虫生活史较短,在类似西线工程水源区的高海拔地区下,冬季温度寒冷,营养来源减少,大部分水生昆虫多以滞育虫卵态生存<sup>[32]</sup>,可能会对肉眼采集过程造成影响。整体来看,为保障水源区非汛期的底栖动物生物多样性,在西线工程水源区生态需水目标的确定过程中,考虑加强非汛期的生态基流保障十分重要。

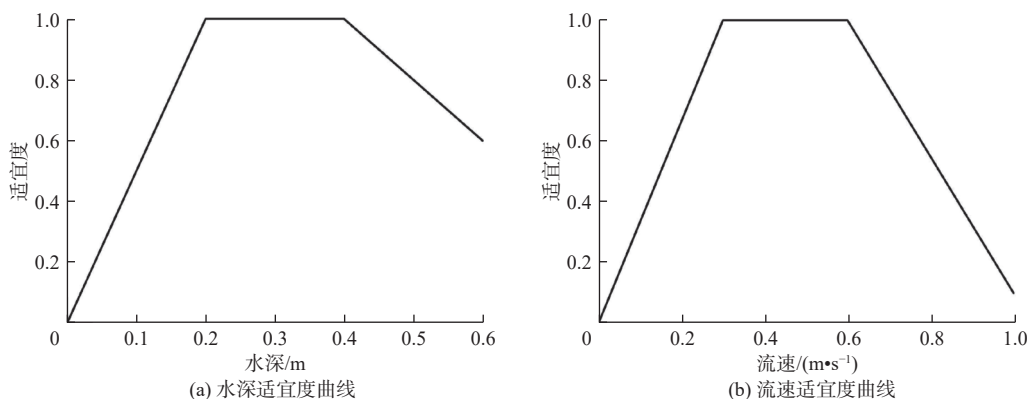


图 4 西线工程水源区大型底栖动物优势物种生境适宜度曲线

Fig. 4 Habitat suitability curves of benthic macroinvertebrates dominant species in the water source area of the Western Route Project

从空间上看,经过南水北调西线工程上线方案调水路线的河段生物多样性及生物密度明显高于经过下线调水方案的河段。采样期间,下线方案的水源水库均已建成或在建,河流底栖动物群落结构也因水利工程的建设受到不同程度的干扰<sup>[33-34]</sup>。可以预见,若开展上线方案建设,将对上线水源区及其下游的底栖动物多样性带来巨大影响,底栖动物作为食物网中物质循环与能量流动的中间环节,势必会进一步影响上线方案水源区所在河流生态系统的整体健康。

### 3.2 西线水源区优势物种适宜水文条件的合理性分析

底栖动物群落的物种丰度最大值一般出现在流速为 0.3~1.2 m/s 的各种底质中<sup>[35]</sup>,同样地,水源区河流流速在 0.3~1.0 m/s(表 3)物种密度及生物多样性指数较高,且蜉蝣目、襀翅目、双翅目等物种分布较广、数量较多。蜉蝣目扁蜉属体型较扁,运动能力差,一般生活在湖泊及大型河流的近岸缓流处,遇急流可通过吸附在卵石和漂砾表面减少水流阻力<sup>[36]</sup>。蜉蝣目小蜉科(如小蜉属)一般生活在激流到湖泊的边缘水域,因活动能力不强,行动较为缓慢,大多生存在缓慢到中等流速水域;而以撕食性为主

的弯握蜉属可在游泳时通过腹部后半部击打水面,以适应流速较大水域<sup>[37]</sup>。襀翅目稚虫对水质相对敏感,一般生活在通气性良好、洁净的流水区域,大部分部分襀翅目稚虫主要生活在溪流、河流下岩石或卵石内,其相对扁平的体型及腹部浓密的刚毛可使其紧密地抵抗急流<sup>[38]</sup>。双翅目水生昆虫部分幼虫喜静水(如伪鹬虻属),一般选择缓慢流动或静止的水域,以埋在泥沙中吸取有机物质<sup>[39]</sup>。本研究结果显示:水源区内蜉蝣目小蜉属、扁蜉属适宜生存流速较缓区域,在 0.31~0.39 m/s;蜉蝣目弯握蜉属、襀翅目襀属、短尾石蝇属适宜生存在流速较急区域,在 0.51~0.61 m/s;双翅目伪鹬虻适宜生存在流速适中区域,在 0.45 m/s 左右。由此可认为水源区内各优势物种的适宜流速计算结果均在合理范围内。

一般来说,水流过浅或过深,底栖动物本身或作为其重要食物来源的水生植物都会因光照强弱受到不同程度的影响<sup>[40-41]</sup>,故在 0.16~0.50 m 处<sup>[35]</sup>底栖动物群落的生物多样性和生物密度最高。由图 3 可知,水源区在 0.1~0.5 m 水深区间内均存在底栖动物密度较高的点位,且 0.15~0.20 m 水深处生物密度最高。单因素方差分析显示不同水深区间对于各生物多样性指数的影响并不显著,这可能因为此次采

样是涉水采样,没有采集到高水深下的底栖动物样本,在0~0.6 m的水深区间下,水源区底栖群落结构难以表现出明显差异。

#### 4 结论与展望

分析南水北调西线工程水源区大型底栖动物群落结构及适宜水文条件,得出以下结论:

调查期间,共记录西线水源区大型底栖动物50属种,群落组成以节肢动物昆虫纲(Insecta)为绝对优势,占总分类单元数的90.20%。其中,汛期以扁蜉为第一优势种,非汛期以石蝇为第一优势种。

从时间上看,西线工程水源区非汛期的生物多样性及物种均匀度高于汛期,加强非汛期的生态基流保障对维持水源区河流生物多样性十分重要;从空间上看,西线工程上线方案调水河段的底栖生物多样性及生物密度明显高于下线方案调水河段。

根据适宜度模型结果,推荐水源区河流大型底栖动物优势物种的适宜水深、流速范围分别为0.2~0.4 m、0.3~0.6 m/s,成果可为西线工程水源区底栖动物的适宜生境模拟和评价提供支撑。

总体来看,目前关于西线水源区底栖动物分布及适宜水文条件的研究较少,本次研究也仅仅针对一年内的采样结果进行了分析,未来需基于此项结果持续开展监测评价,进一步摸清西线水源区底栖动物分布状态和生态-水文响应特征,支撑南水北调西线工程的科学论证。

#### 参考文献:

- [1] 张金良,马新忠,景来红,等.南水北调西线工程方案优化[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2020,18(5):109-114. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0098.
- [2] 尹炜,翟红娟,邓志民,等.南水北调西线工程水源区生态需水研究[J].*人民长江*,2023,54(6):41-46,65. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.06.006.
- [3] 陈克恭,师安隆.南水北调西线工程调水与用水的统一性思考[J].*人民黄河*,2022,44(2):7-11,26. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.02.002.
- [4] 曹鹏飞,陈梅,苏柳,等.南水北调西线一期工程对调水河流及生态环境的影响分析[J].*水利发展研究*,2018,18(2):15-18. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2018.02.005.
- [5] 王煜,周翔南,彭少明,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*,2023,34(3):336-348. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.002.
- [6] 张丹,鲍军,李想,等.考虑河流生态需水约束的调水规模研究[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(5):917-929. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0089.
- [7] 班璇,郭舟,熊兴基,等.长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J].*水利学报*,2020,51(8):936-946. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200026.
- [8] 李友光,刘士峰,王慧亮,等.基于多物种栖息地适宜度模型的河道生态流量确定方法与应用[J].*灌溉排水学报*,2022,41(5):139-146. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021545.
- [9] SCHNEIDER M, KOPECKI I, TUHTAN J, et al. A fuzzy rule-based model for the assessment of macrobenthic habitats under hydropeaking impact[J].*River Research and Applications*,2016,33(3):377-387. DOI: 10.1002/rra.3079.
- [10] 王瑞玲,黄锦辉,葛雷,等.基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J].*水利学报*,2020,51(9):1175-1187. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200184.
- [11] H THORP J, P COVICH A. Ecology and classification of north american freshwater invertebrates[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [12] P COVICH A, A PALMER M, A CROWL T. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J].*BioScience*,1999,49(2):119-127. DOI: 10.1109/TGRS.2005.861413.
- [13] 张又,蔡永久,张颖,等.河流大型底栖动物对环境压力的响应:以太湖、巢湖流域为例[J].*湖泊科学*,2021,33(1):204-217. DOI: 10.18307/2021.0111.
- [14] 吴思萱,曾庆慧,胡鹏,等.伊通河城区段底栖动物完整性对水质的响应时滞[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(1):160-171. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0017.
- [15] 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. DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2023.03.031.
- [16] 周雄冬,刘逸博,徐梦珍,等.高原河流底栖动物对侧向水文连通性的响应:以泉吉河为例[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2023,63(5):818-829. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.22.021.
- [17] 贺湛斐,童春富.太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征[J].*生态学报*,2023,43(11):4619-4631. DOI: 10.5846/stxb202202060299.
- [18] 刘莹.调水工程对水源区生态环境的影响[D].北京:北京林业大学,2009.
- [19] 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(1):

- 158-162. DOI: [10.1159/000132439](https://doi.org/10.1159/000132439).
- [20] 滕龙. 水电工程建设对生态环境影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.
- [21] 张汉峰. 锦屏一级水电站建库前的底栖无脊椎动物多样性调查[J]. *内江师范学院学报*, 2006(4): 61-64. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1785.2006.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1785.2006.04.017).
- [22] 张葵, 周连凤, 陈威, 等. 雅砻江下游大型底栖无脊椎动物群落结构及与环境因子的关系[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 1857-1866. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230106.007](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230106.007).
- [23] 黄尤优, 曾燊, 刘守江, 等. 大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 132-140. DOI: [10.13227/j.hjcx.2016.01.018](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2016.01.018).
- [24] ALLAN J D CASTILLO-M-M. Stream ecology: Structure and function of running waters[M]. Netherlands: Springer, 2007.
- [25] 韦建福, 敬凯, 王延辉, 等. 南溪河大型底栖无脊椎动物群落结构及其季节变化[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 30-38. DOI: [10.15928/j.1674-3075.202104190118](https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202104190118).
- [26] 张宇航, 张敏, 彭文启, 等. 永定河流域大型底栖动物群落分布格局及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3880-3888. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202011.038](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202011.038).
- [27] G JOWETT-I, J RICHARDSON. Microhabitat preference of benthic invertebrates in a New Zealand river and the development of in-stream flow-habitat models for delectidum spp[J]. *New Zealand Journal of Marine Freshwater Research*, 1990, 24: 19-30. DOI: [10.1080/00288330.1990.9516399](https://doi.org/10.1080/00288330.1990.9516399).
- [28] J SMITH-A, W BODE-R, S KLEPPEL-G. A nutrient biotic index (NBI) for use with benthic macroinvertebrate communities[J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7: 371-386. DOI: [10.1016/j.ecolind.2006.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.03.001).
- [29] GORE J A LAYZER-J-B-MEAD-J. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: A role in stream management and restoration[J]. *Regulated Rivers-Research & Management*, 2001, 17: 527-542. DOI: [10.1002/rrr.650](https://doi.org/10.1002/rrr.650).
- [30] 李映成, 李卫明, 张续同, 等. 长江支流玛瑙河氮形态与大型底栖动物功能摄食类群分布关系研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(7): 348-362. DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2022.0489](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2022.0489).
- [31] 胡芮, 王儒晓, 杜诗雨, 等. 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化[J]. *生物多样性*, 2020, 28(12): 1558-1569. DOI: [10.17520/biods.2020023](https://doi.org/10.17520/biods.2020023).
- [32] 池仕运, 王瑞, 魏秘, 等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8723-8738. DOI: [10.5846/stxb202103250790](https://doi.org/10.5846/stxb202103250790).
- [33] 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 等. 梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3266-3274. DOI: [10.13227/j.hjcx.201912084](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201912084).
- [34] WANG J, DING C Z, TAO J. et al. Damming affects riverine macroinvertebrate metacommunity dynamics: Insights from taxonomic and functional beta diversity[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 763: 142945. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142945](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142945).
- [35] BEAUGER A, LAIR N, REYES MARCHANT P. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 571: 67-76. DOI: [10.1007/s10750-006-0217-x](https://doi.org/10.1007/s10750-006-0217-x).
- [36] 周雄冬. 青藏高原底栖动物对河流地貌的响应研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [37] 张敏. 中国大陆小蜉科系统分类(昆虫纲: 蜉蝣目)[D]. 江苏: 南京师范大学, 2021.
- [38] 张永娇, 刘玉双. 辽西义县组赭翅目昆虫化石及其古生态分析[J]. *世界地质*, 2017, 36(4): 1025-1030. DOI: [10.3969/j.issn.1004-5589.2017.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5589.2017.04.001).
- [39] 中国科学院中国动物志委员会. 中国动物志, 昆虫纲. 第六十五卷, 双翅目, 鹬虻科, 伪鹬虻科[M]. 北京: 科学出版社 2016.
- [40] 孙刚. 底栖动物的生物扰动效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [41] HENRITACHET. 淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.

## Hydrological conditions for the benthic macroinvertebrates of the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project

WANG Yulian<sup>1,2</sup>, YAN Long<sup>1</sup>, ZENG Qinghui<sup>1</sup>, TANG Jiakuan<sup>1,3</sup>, ZHANG Fengbo<sup>1</sup>, HU Peng<sup>1</sup>

(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. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The Western Route of the South-to-North Water Transfers Project represents a vital strategic initiative



aiming at alleviating water scarcity in the Yellow River basin and northern China. Despite being in the planning and evaluation phase, establishing ecologically sustainable flow targets for rivers in the water source area remains a critical and challenging aspect of water diversion planning. In recent years, researchers have utilized the sensitive responses of benthic macroinvertebrates to hydrological conditions as indicators for determining ecological flow targets. However, there has been limited investigation into benthic macroinvertebrates in the water source area of the Western Route Project, with only a few studies conducted in distant locations such as the Yalong River and Dadu River, far from the proposed dam sites. To address this gap and explore the community structure of benthic macroinvertebrates while identifying suitable hydrological conditions in this region, two extensive surveys were conducted during both flood and non-flood seasons in 2022.

Variations in benthic macroinvertebrate biological indices under different flow rates and water depths was analyzed using one-way analysis of variance and canonical correspondence analysis. Additionally, the research assessed the relationships between dominant benthic macroinvertebrate species and hydrological factors, determining optimal hydrological conditions and suitable ranges for dominant species using weighted averaging. Significant differences between optimal values and mean values of habitat factors were determined through a two-tailed *t*-test, while habitat suitability curves for dominant species were constructed using habitat simulation methods.

The results revealed the presence of 50 genera of benthic macroinvertebrates in the two surveys, with the class *Insecta* dominating the community, constituting 90.20% of the total taxon. The dominant species varied temporally, with *Heptageniidae sp.* dominating during the flood season ( $Y=19.9%$ ), and *Perlidae sp.* dominating during the non-flood season ( $Y=13.8%$ ). Temporally, higher biological density was observed during the flood season, while higher biodiversity and species evenness were noted during the non-flood season. Spatially, biodiversity and biological density were significantly higher in the upper-route of the diversion project compared to the lower-route. Significant differences in species richness and the Margalef diversity index were observed among different velocity intervals within the 0-1.0 m/s range, with the highest number of species and various biodiversity indices found in the 0.5 to 1.0 m/s range during both flood and non-flood periods. Similarly, significant differences in biomass were observed between different depth intervals within the 0-0.6 m range, with the highest benthic macroinvertebrate density recorded in the 0-0.2 m interval. Targeting seven dominant species in the water source area, suitable hydrological conditions were determined to be a water depth of 0.2-0.4 m and flow velocity of 0.3-0.6 m/s using habitat suitability simulation methods.

In conclusion, during the survey period, 50 genera of benthic macroinvertebrates were recorded in the water source area of the Western Route Project, with *Insecta* being the dominant group, particularly *Heptageniidae sp.* during the flood season and *Perlidae sp.* during the non-flood season. Temporally, higher biological diversity and species evenness were observed during the non-flood season, emphasizing the importance of ecological base flow protection during this period to maintain river biodiversity. Spatially, benthic biological diversity and density were higher in the upper scheme water diversion sections compared to the lower scheme water diversion sections. The recommended suitable ranges for water depth and flow velocity for dominant species of large benthic animals in the water source area rivers were determined to be 0.2-0.4 m and 0.3-0.6 m/s, respectively. These findings can contribute valuable insights for simulating and evaluating suitable habitats for benthic animals in the water source area of the Western Route Project.

**Key words:** the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project; water source area; benthic macroinvertebrates; community structure; suitable hydrological conditions