

郑智文,张葵,霍斌,等.塔里木河下游流域生态输水后大型底栖动物群落结构[J].华中农业大学学报,2023,42(5):206-214.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.023

## 塔里木河下游流域生态输水后大型底栖动物群落结构

郑智文,张葵,霍斌,沈建忠,周琼,王军

华中农业大学水产学院/农业农村部淡水生物繁育重点实验室/  
长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,武汉 430070

**摘要** 为了解塔里木河下游流域内在生态输水后的水生生物资源及生态环境特征,于2019—2020年对塔里木河中下游干流、车尔臣河、台特玛湖3个区域的大型底栖动物群落结构进行了调查,并探讨其环境影响因素。调查结果显示,塔里木河下游流域中大型底栖动物共97个分类单元,隶属于3门4纲10目27科。水生昆虫为主要类群(82种),其中双翅目(47种)物种数最多,其次为鞘翅目(14种)、蜻蜓目(13种)。摇蚊科物种在不同区域均为优势种。底栖动物平均密度和生物量在5月份处于峰值,远高于8月和10月,多样性指数不具有显著的时空差异( $P>0.05$ )。塔里木河干流和车尔臣河功能摄食群主要以收集者为主(95.89%,91.86%),而台特玛湖则以收集者(50.68%)和捕食者(34.12%)为主。Mantel相关性分析结果显示,氨氮、溶解氧和高锰酸钾是影响底栖动物多样性和功能群的主要环境因子。调查结果表明,塔里木河流域底栖动物群落组成较为单一,生态环境较为脆弱,需继续开展并深化对该地区河流的生态修复和管理工作。

**关键词** 塔里木河;底栖动物;多样性指数;功能摄食群;环境因子

**中图分类号** Q958.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0206-09

塔里木河是我国最长的内陆河,发源于天山山脉、喀喇昆仑山,沿塔克拉玛干沙漠北缘自西向东前进,最终汇入台特玛湖。塔里木河全长1 321 km,流域面积达19.8万 $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>。塔里木河流域与5个国家接壤,是丝绸之路经济带建设的核心区<sup>[2]</sup>。塔里木河流域处于干旱半干旱区,气候干燥,降水量稀少,蒸发量高,生态极为脆弱<sup>[3]</sup>。自20世纪50年代起,人类活动对该地区河流生态造成深远的影响,使得塔里木河下游断流现象日益严重,地下水位下降,生态不断恶化<sup>[4]</sup>。为保护塔里木河流域的生态环境,自20世纪90年代起,相关综合治理工作逐渐提上日程。直至2022年,新疆先后23次向塔里木河实施生态输水。从2000年开始的生态输水工作趋于常态化,结束了下游河道及台特玛湖干涸近30 a的历史<sup>[1,5]</sup>。综合治理工作开展以来,塔里木河流域的地表水、地下水等生态指标已经有了较为完善的监管体系,河岸植被和湿地的恢复工作也在有条不紊地进行<sup>[1]</sup>。但目前针对塔里木河生物资源和生态环境健康的研究仍比较薄弱,相关的监测和评价工作还有待开展。

底栖动物是指生活史的全部或者大部分的时间都生活在水体底部的水生动物类群,它们在维持生态系统的结构和功能上发挥着重要作用。底栖动物活动范围小,对环境变化较敏感,能够对多种类型的污染做出反应<sup>[6]</sup>,因此是反映水体生态状况的最佳指标之一<sup>[4]</sup>。干旱区河流季节交替明显,空间尺度复杂<sup>[3,7]</sup>。而塔里木河自生态输水开展以来,长期干涸的状况得到了有效的遏制,生态输水以及河流的季节性变动带来的影响能够在底栖动物群落结构变化中显现出来。自生态输水以来,学者们已经逐步对塔里木河生态环境开展研究,如唐芳等<sup>[2]</sup>、李景远等<sup>[8]</sup>分别对塔里木河下游和车尔臣河流域的土地利用类型进行了研究,王雅梅等<sup>[9]</sup>对生态输水以来台特玛湖周边植被的多样性进行了研究。但目前,对塔里木河流域底栖动物的研究相对较少<sup>[10]</sup>。为系统了解塔里木河中下游流域在生态输水工作开展之后底栖动物群落结构的变化,笔者对塔里木河干流、车尔臣河和台特玛湖底栖动物群落结构和多样性进行研究,分析底栖动物群落的时空分布格局及环境影响

收稿日期:2022-12-06

基金项目:农业农村部财政专项“西北地区典型水域渔业资源与环境调查”(2019-2021年)

郑智文,E-mail:152960760@qq.com

通信作者:王军,E-mail:wangjun89@mail.hzau.edu.cn

因素,以期为塔里木河中下游流域的环境保护提供理论依据,为后续的生态环境调查提供参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于塔里木河中下游,包括干流、车尔臣河和台特玛湖。塔里木河干流地区气候极其干燥,年均降水量为50~80 mm,而蒸发量可达2 100~3 000 mm,其下游在生态治理之前有着近30 a干涸的历史<sup>[11]</sup>。塔里木河径流量随季节变化明显,在夏季的高山融雪和生态输水的影响下,塔里木河下游径流量主要集中于这一时期(6—9月)<sup>[12]</sup>。车尔臣河位于塔里木盆地东南部,全长813 km,是该地区径流量最大的河流<sup>[13]</sup>,降水量与河流水资源均集中于6—8月<sup>[14]</sup>,与塔里木河一同维系着塔克拉玛干沙漠东部的绿色长廊<sup>[15]</sup>。

台特玛湖是塔里木河与车尔臣河的尾间湖泊,位于塔里木盆地东南缘的冲击平原上。1970年以来,塔里木河开始长期断流,台特玛湖逐渐被沙漠覆盖,周边植被大量枯死。自2020年,第21次生态输水完成后,台特玛湖水域面积和周围湿地面积逐渐扩大<sup>[16]</sup>,植被的密度和多样性也明显增加<sup>[9]</sup>。

### 1.2 采样点的设置

根据塔里木河地形特征,利用卫星地图,采取网络格局结合历史调查进行站位布设,样点分布见表1。于2019年5月、8月、10月对塔里木河下游水域进行调查,2020年6月进行补充采样。在塔里木河干流设置3个采样点分别为塔河源、英巴扎、恰拉;车尔臣河设置6个采样点,分别为且末水电站、龙口、第二分水枢纽、环境检测站、五苇场、瓦石峡乡;台特玛湖设置采样点1个。

### 1.3 样本的采集和处理

使用1/16 m<sup>2</sup>改良彼得森采泥器采集底栖动物,每个样点采集3~5次。以250 μm孔径的分样铜筛对所采底泥进行筛洗,在白瓷盘中对标本进行挑拣之后放入75%乙醇中保存。利用解剖镜和显微镜鉴定种类、分类统计。将底栖动物标本用吸水纸吸去表面水分后,用万分之一天平称质量,最后换算成密度(ind./m<sup>2</sup>)和生物量(g/m<sup>2</sup>)。

### 1.4 水体理化指标

使用水质分析仪测定水体的水温(water temperature, WT)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、酸碱度(pH)、电导率(conductivity, Cond)、盐度(salinity, Sal)、总溶解性固体(total dissolved solids, TDS)、氧

表1 采样点分布情况

Table 1 The distribution of sampling sites

站点名称 Site name	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude
塔河源 Headwaters	81°17'54"	40°32'1"	999
英巴扎 Yingbazha	84°13'47"	41°10'51"	919
恰拉 Qiala	86°36'40"	41°3'40"	867
且末水电站 Qiemo	85°41'43"	37°43'59"	1 750
龙口 Longkou	85°35'56.27"	38°1'36.74"	1 342
第二分水枢纽 Second water distribution hub	85°30'49.93"	38°12'51.44"	1 209
环境检测站 Environmental monitoring station	85°46'30.77"	38°28'3.65"	1 125
五苇场 Wuweichang	86°31'1.16"	38°40'34.13"	1 015
瓦石峡乡 Washixia	86°40'7.58"	38°45'47.37"	989
台特玛湖 Taitema Lake	88°18'8"	39°29'38"	797

化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)。使用GPS定位工具记录采样位点的经纬度等信息。另采取1 L水样4 °C下保存,将其带回实验室后对总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)等指标进行测定。测定方法依照文献<sup>[17]</sup>进行。

### 1.5 数据分析

1) 多样性指数计算。采用物种优势度指数(Y)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(d<sub>M</sub>)、Pielou均匀度指数(J)以及Simpson(D)多样性指数对底栖动物群落结构进行分析。计算公式如下:

$$(1) \text{物种优势度指数}(Y)^{[18]}: Y = N_i \times \frac{f_i}{N}$$

公式中N表示各采样点所有物种个体总数, N<sub>i</sub>代表第i种个体总数, f<sub>i</sub>表示该物种在各采样点出现的频率,当Y>0.02时,该物种为群落中的优势种。

(2) Shannon-Wiener多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left( \frac{N_i}{N} \times \log_2 \frac{N_i}{N} \right)$$

式中,S为总物种数; N<sub>i</sub>为物种i的个体数; N为总个体数。

$$(3) \text{Margalef物种丰富度指数}: d_M = \frac{(S-1)}{\ln N}$$

式中,S代表了总物种数, N代表物种个体总数。

$$(4) \text{Pielou指数}: J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中, H'为Shannon-Wiener指数, S为物种数。

$$(5) \text{Simpson多样性指数}: D = 1 - \sum_{i=1}^S \left( \frac{N_i}{N} \right)^2$$

式中, $S$ 为物种总数, $N$ 为总个体数, $N_i$ 为第*i*个物种的个体数。

2) 统计分析。采用单因素方差分析方法(One-way ANOVA)分析不同月份、不同区域的环境因子、底栖动物密度、生物量和多样性指数的差异。采用Mantel检验分析底栖动物多样性指数和功能摄食群及其环境因子的关系。

### 1.6 功能摄食群的划分

底栖动物功能群指具有相近的结构特征或者生态功能的底栖生物群的组合<sup>[19]</sup>。根据底栖动物的摄食方式<sup>[20-21]</sup>,可以将塔里木河中下游流域大型底栖动物划分为5个功能摄食群:直接收集者(collector gatherers, CG),收集沉积于底质或附着于沉水物体上的物质;过滤收集者(collector filterers, CF),滤食悬浮于水体中的食物颗粒,摄食颗粒一般较小;刮

食者(scraper, SC),刮取底质表面或沉水物体表面的附着物;撕食者(shredders, SH),通过咀嚼、挖掘、切凿或锉磨来获取食物;捕食者(predator, PR),包括吞食者和刺吸者,它们往往攻击猎物,吞咽猎物的整个或部分身体,或者刺穿猎物的体组织并吸取体液<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子

单因素方差分析(One-way ANOVA)结果显示,塔里木河干流水温、pH、电导率、盐度、总溶解性固体、氧化还原电位、总氮、亚硝酸盐氮在3个水文期之间存在显著差异;车尔臣河水温、溶解氧、总氮、硝态氮、亚硝态氮在3个水文期中存在显著差异(表2)。

表2 塔里木河中下游流域不同月份的环境因子

Table 2 Environmental parameters of different months in the middle and lower reaches of Tarim River

指标 Index	塔里木河干流 Main stream of Tarim River			车尔臣河 Qarqan River		
	5月 May	8月 Aug.	10月 Oct.	5月 May	8月 Aug.	10月 Oct.
水温/°C WT	16.57±1.60b	25.47±1.33a	11.81±3.40b	22.60±4.81a	18.87±5.23a	7.55±3.99b
流速/(m/s) Flow velocity	—	0.63±0.21	—	1.09±0.55	0.70±0.72	0.97±0.69
透明度/cm Transparency	5.21±2.16	6.00±4.95	2.80±3.22	—	—	2.83±1.6
pH	8.08±0.13b	8.91±0.17a	7.24±0.13c	8.52±0.16a	8.48±0.05ab	8.31±0.06b
溶解氧/(mg/L) DO	7.38±1.19	7.40±1.21	8.52±0.77	7.65±0.55b	8.08±1.10b	11.75±1.32a
电导率/(μS/cm) Cond	1 925.80±644.27a	718.33±214.52b	586.67±14.74b	761.50±362.25	1 046.00±499.84	837.00±249.92
盐度‰ Sal	5.26±3.52	0.35±0.11	0.25±0.01	—	0.58±0.24	0.63±0.20
总溶解性固体/(mg/L) TDS	5 958.33±3 777.00	351.67±109.32	252.46±218.79	1 218.33±691.61	754.00±303.42	816.85±244.81
氧化还原电位/mV ORP	155.63±31.64ab	102.17±27.42b	228.10±53.16a	—	114.5±9.66	185.4±21.91
总磷/(mg/L) TP	0.05±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01	0.11±0.05	0.07±0.03	0.16±0.11
总氮/(mg/L) TN	0.50±0.21b	0.53±0.17b	0.97±0.10a	0.76±0.31ab	1.22±0.10a	0.74±0.18b
可溶性磷酸盐/(mg/L) PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.04±0.02	0.05±0.01	—	0.10±0.00	0.06±0.03	0.14±0.09
氨氮/(mg/L) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	—	0.31±0.21	0.14±0.09	0.24±0.31	0.20±0.03	0.13±0.20
硝态氮/(mg/L) NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	—	—	0.43±0.21	0.54±0.03b	0.93±0.12a	0.18±0.08c
亚硝态氮/(mg/L) NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.01±0.01b	0.03±0.00a	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.02±0.00a	0.01±0.00b
高锰酸钾指数/(mg/L) Permanganate index	3.50±2.40	1.53±0.21	2.17±1.33	1.87±1.01	1.20±0.56	1.35±0.31

注:表中同一参数不同字母表示同一河流中不同月份之间显著差异( $P<0.05$ ),未标字母表示无显著差异。横线处表示当月数据缺失。  
Note: Different letters of the same parameter in the table indicate significant differences between different months in the same river ( $P<0.05$ ); Unlabeled letters indicate no significant difference. The horizontal line indicates that data is missing in the current month.

### 2.2 种类组成

塔里木河中下游流域共检出底栖动物97种,隶属于3门4纲10目27科。节肢动物门物种数最多,总计86种,其中82种为水生昆虫,主要为双翅目(47种)、鞘翅目(14种)、蜻蜓目(13种);环节动物门6

种,软体动物门5种。

塔里木河干流采集到底栖动物36种,其中水生昆虫31种,主要由双翅目摇蚊科组成,占物种总数的75%。车尔臣河采集到底栖动物60种,其中水生昆虫50种,主要由双翅目、鞘翅目和蜻蜓目组成,分别

占物种数的45.00%、15.00%和13.33%；另有寡毛纲5种,软体动物5种。台特玛湖采集到底栖动物28种,其中水生昆虫26种,主要由蜻蜓目、鞘翅目和双翅目组成,分别占物种总数的17.24%、13.79%和51.72%；此外还有寡毛纲、水生昆虫、软甲纲等物种。

### 2.3 密度和生物量

塔里木河干流、车尔臣河与台特玛湖的底栖动物平均密度分别为263.15、211.16和141.52 ind./m<sup>2</sup>,

平均生物量为分别为2.28、0.47和0.35 g/m<sup>2</sup>。底栖动物的密度和生物量在5月达到最高值,塔里木河干流、车尔臣河和台特玛湖的密度分别为672.52、368.00和248.98 ind./m<sup>2</sup>,生物量分别为7.07、0.60和0.83 g/m<sup>2</sup>。其中,摇蚊在塔里木河干流,车尔臣河中较高的密度和生物量,而在台特玛湖中密度、生物量占比较高的物种为摇蚊和划蝽(图1)。

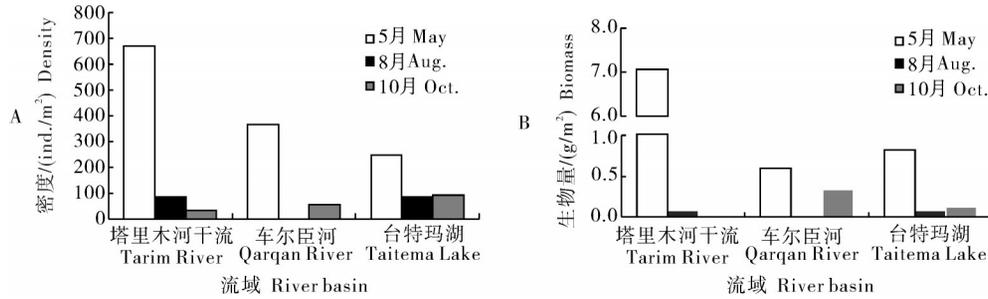


图1 塔里木河中下游不同流域底栖动物密度(A)及生物量(B)

Fig.1 Density(A) and biomass(B) of macroinvertebrates in the middle and lower reaches of Tarim River

### 2.4 优势种

塔里木河中下游区域底栖动物优势种以摇蚊为主(表3)。其中,塔里木河干流的优势种为浅白雕翅摇蚊(*Glyptotendipes pallens*)、溪流摇蚊(*Chironomus riparius*)、梯形多足摇蚊(*Polypedilum scalaenum*)和斯蒂齿斑摇蚊(*Stictochironomus sticticus*)。车尔臣河的优势种仅有弯狭摇蚊属1种(*Cryptotendipes* sp.)。台特玛湖的优势种有小划蝽(*Sigara straiata*)、

水叶亚甲科1种(*Donaciinae* sp.)、德永雕翅摇蚊(*Glyptotendipes tokunagai*)、鲜艳多足摇蚊(*Polypedilum laetum*)和蠓科1种(*Ceratopogonidae* sp.)。

### 2.5 底栖动物多样性

不同区域不同月份的多样性指数计算结果如表4所示。车尔臣河的Margalef物种丰富度指数,Shannon-Wiener多样性指数和Simpson多样性指数在5月和10月间有显著差异( $P_{dm}=0.043$ ,  $P_H=0.048$ ,  $P_D=0.038$ )。总体来看,从5月到10月,塔里木河干流的多样性指数变化趋势不明显,而车尔臣河与台特玛湖的多样性指数呈上升的趋势。

### 2.6 功能摄食群

塔里木河下游流域功能摄食群以收集者为主,不同月份之间的功能摄食群组成有较大的差异。从5月到10月,塔里木河干流的收集者占比由98.26%下降到了71.43%,呈现出下降的趋势,但其主导地位未改变。同时,塔里木河捕食者所占的比例在数次调查中有所增加,由0.52%上升到了28.57%。车尔臣河5月主要以收集者为主,占比98.04%；其他功能摄食群在10月占比有所增加,捕食者占比38.63%,刮食者占比10.23%,收集者仍为主要组成部分,占比50%。台特玛湖5月以收集者和捕食者为主,收集者占比65.23%,捕食者占比34.45%,8月则以撕食者和收集者为主,撕食者占比39.47%,收集者占比47.36%,捕食者占比下降为13.16%；10月底栖动物

表3 塔里木河中下游流域各区域底栖动物优势种及优势度

Table 3 The dominance and dominant species of macroinvertebrates at each research area

优势种 Dominant species	塔里木河 Tarim River	车尔臣河 Qarqan River	台特玛湖 Taitema Lake
小划蝽 <i>S. Straiata</i>			0.06
水叶亚甲科1种 <i>Donaciinae</i> sp.			0.04
弯狭摇蚊属1种 <i>Cryptotendipes</i> sp.		0.22	
德永雕翅摇蚊 <i>G. tokunagai</i>			0.19
浅白雕翅摇蚊 <i>G. pallens</i>	0.04		
鲜艳多足摇蚊 <i>P. laetum</i>			0.13
溪流摇蚊 <i>C. riparius</i>	0.12		
梯形多足摇蚊 <i>P. scalaenum</i>	0.02		
斯蒂齿斑摇蚊 <i>S. sticticus</i>	0.02		
蠓科1种 <i>Ceratopogonidae</i> sp.			0.04

表4 塔里木河中下游流域底栖动物多样性指数

Table 4 The diversity indices of macroinvertebrates in the middle and lower reaches of Tarim River

调查区域 Survey area	月份 Month	马格列夫指数 Margalef index	香农威尔指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielou index	辛普森指数 Simpson index
塔里木河干流 Tarim River	5月 May	1.70	1.43	0.68	0.67
	8月 Aug.	1.36	0.97	0.50	0.44
	10月 Oct.	1.29	1.33	0.80	0.67
车尔臣河 Qarqan River	5月 May	0.27	0.37	0.29	0.20
	8月 Aug.	—	—	—	—
	10月 Oct.	1.30	1.31	0.81	0.67
台特玛湖 Taitema Lake	5月 May	1.45	1.37	0.63	0.71
	8月 Aug.	1.58	1.57	0.75	0.73
	10月 Oct.	2.22	1.84	0.77	0.78

注:横线表示车尔臣河8月数据缺失。Note: Data for Qarqan River in August were not available.

以撕食者和捕食者为主,撕食者占比33.33%,捕食者占比52.63%,收集者数量下降较多,仅占14.04%(图2)。

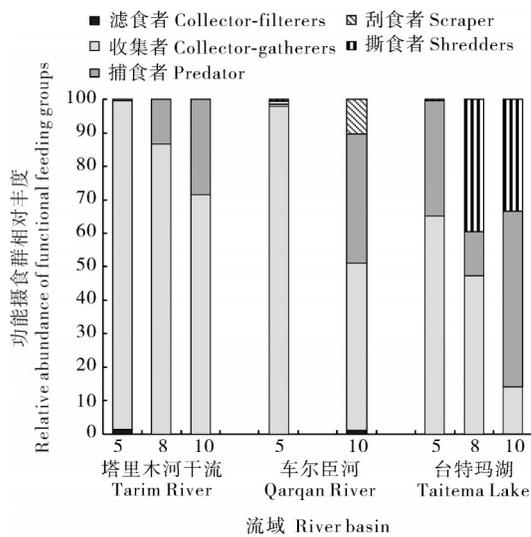


图2 底栖动物功能摄食群的相对丰度

Fig.2 The relative abundance of functional feeding groups of macroinvertebrates

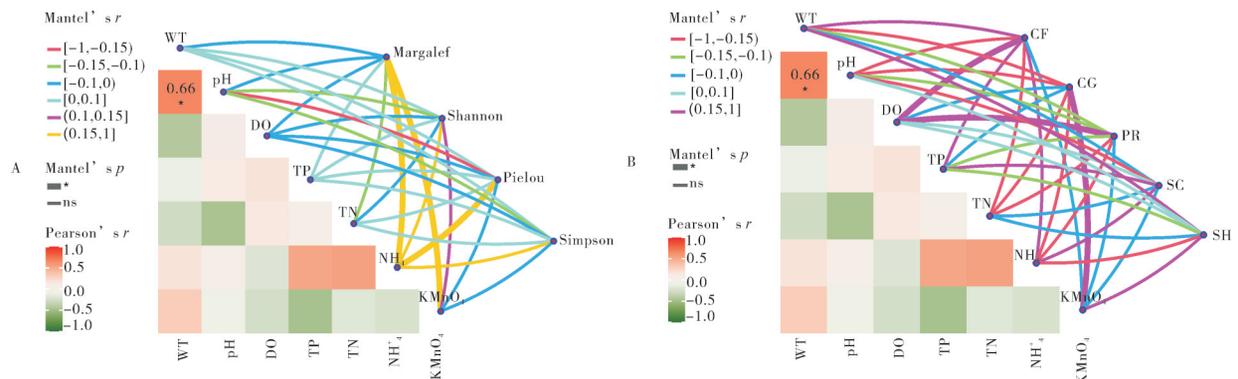


图3 多样性指数(A)及功能摄食群(B)与环境因子的Mantel检验

Fig.3 Mantel test of diversity index(A), functional feeding groups(B) and environmental factors

### 2.7 群落结构与环境因子的相关性

多样性指数与环境因子的Mantel检验结果如图3A所示。从图中可以看出,Margalef多样性指数与氨氮、高锰酸钾指数呈显著的正相关;Pielou均匀度指数与氨氮显著正相关。

功能摄食群与环境因子的Mantel检验结果如图3B所示。从图中可以看出,滤食者与溶解氧显著正相关;收集者与高锰酸钾指数显著正相关;捕食者与溶解氧显著正相关。

## 3 讨论

### 3.1 底栖动物群落结构

本研究区域位于塔克拉玛干沙漠周边,河流含沙量较高。相比于鱼类的种群结构来说,悬浮的泥沙对大型底栖无脊椎动物群落结构的影响更加显著,尤其是螻蛄科和溪泥甲科等动物更加敏感<sup>[23]</sup>。在多沙地区中,底栖动物通常以水生昆虫为主,软体动物的占比往往很低<sup>[24]</sup>。本研究共采集到底栖动物97种,95.29%的物种为水生昆虫,摇蚊为其中的主要优

势类群。软体动物多为能够适应多沙环境的基眼目生物<sup>[24]</sup>,如凸旋螺、卵萝卜螺、膀胱螺等。双翅目、蜻蜓目、鞘翅目生物是塔里木河中下游流域底栖动物的主要组成类群,半翅目昆虫也占有一定的比例。和以往调查数据相比,塔里木河干流区采集到的底栖动物物种数有所增加,优势种群也有所改变<sup>[10]</sup>。本研究的物种组成结果与其他干旱区河流底栖动物群落研究结果相似<sup>[25-28]</sup>,但与额尔齐斯河<sup>[29]</sup>、伊犁河<sup>[30]</sup>的研究结果存有较大差异,这可能由于新疆各区域气候条件不同以及流域内生境差异所导致。

3个区域底栖动物群落结构有较大的不同。车尔臣河物种数最多,并且仅在此处发现了软体动物。塔里木河干流的底栖动物密度和生物量最高,物种组成以摇蚊为主,占总物种数的75.00%。台特玛湖中采集到的物种数较少,但优势物种数量较多,且有半翅目、鞘翅目物种作为优势种群出现。在干旱区河流中,河流流动状况不均匀,导致不同区域的生境有着相当大的变化<sup>[31]</sup>,局部区域的生境变化能对底栖动物群落结构产生明显的影响<sup>[32]</sup>,使得不同区域的底栖动物组成有较大的区别。塔里木河与车尔臣河的底质均以泥沙为主,因此,摇蚊能够成为2个区域的优势种,但与塔里木河相比,车尔臣河采样点河岸植被更加茂盛,生境更加复杂多样,因此物种较为丰富。相比于河流,台特玛湖有更加稳定的水文条件,并且水域内高等水生植物十分丰富,因此,底栖动物在不同月份之间能够保持较高的物种丰富度<sup>[31]</sup>,底栖动物物种多样性较高。

底栖动物的密度和生物量在不同月份之间存有差异。5月底栖动物的密度和生物量明显高于8月和10月,这可能是塔里木河下游流域的径流量变化所致。受高山融雪增加和降雨量增大的影响,6—9月塔里木河中下游流域的径流量占全年径流量的70%~80%<sup>[22,33]</sup>,生态输水也往往在这几个月进行。突然增加的径流量将形成洪水,使底栖动物的密度和生物量大幅减少<sup>[34]</sup>,同时也会改变底栖动物的生境,影响底栖动物的生存,从而使底栖动物群落结构出现较大的变化<sup>[35]</sup>。

### 3.2 底栖动物功能摄食群

在本研究中,台特玛湖功能摄食群的组成与塔里木干流间存有较大的差异。收集者为塔里木河与车尔臣河中功能摄食群的主要组成部分,这和收集者类群的物种能够更好地适应泥沙底质的环境有关,同时也表明水体有机物质含量较高,收集者的食

物来源丰富<sup>[36]</sup>。相比于由泥沙底质为主的河流,台特玛湖中水生植物较为丰富,生境更加复杂,因此功能摄食群的组成也有所不同,主要以捕食者、收集者和撕食者为主。在台特玛湖更高的物种丰富度的影响下,功能摄食群的组成也更加多样<sup>[20]</sup>。

从5月到10月,3个区域收集者占比均有下降,而捕食者占比有所增加。一方面,由于食物来源丰富,捕食者群落得以迅速增长<sup>[37]</sup>,这同时增大了其他群落生存的压力,导致了其他种群如收集者的占比不断减小;另一方面,洪水导致了底栖动物密度和生物量的大量减少<sup>[34]</sup>,作为群落组成的主要部分,收集者的密度和生物量出现大幅减少,而其他功能摄食群由于其本身数量不高,密度和生物量减少幅度远不及收集者,因此在底栖动物中的占比有所增加。撕食者主要在8月和10月的台特玛湖中出现,而在其他区域分布较少。5月台特玛湖中的水生植物随着季节的变化开始复苏,食物来源的增加使得撕食者开始增长;8月和10月的洪水将大量碎屑及植被落叶冲刷进入水体中汇入台特玛湖,增加了撕食者的食物源,使其群落有所增长<sup>[38]</sup>。

### 3.3 环境因子对底栖动物群落的影响

在本研究中,影响功能摄食群分布的因子主要有溶解氧和高锰酸钾指数,它们与滤食者、捕食者和收集者呈显著正相关。一般来讲,在低溶氧的水体环境中,溶解氧的含量会成为影响底栖动物多样性的主要因素,过低的溶氧会影响底栖动物的生命活动<sup>[39]</sup>。高锰酸钾指数反映了水体中有机质的含量,因而能够对收集者和滤食者的摄食活动产生影响<sup>[40]</sup>。

氨氮和高锰酸钾指数与多样性指数之间呈较为明显的正相关,这和李丽娟等<sup>[21]</sup>的结论有所不同。有研究表明,不同生境下的环境因子对底栖动物群落的影响效果存在差异<sup>[41]</sup>。本次调查底栖动物群落以耐污物种为主,相较于其他底栖动物更能够适应污染物较高的环境<sup>[42]</sup>,群落能够有所发展。

底栖动物通常对环境因子的变化较为敏感,即使有微小的人类活动干扰或是季节变化,不同的底栖动物以及功能摄食群也会对此产生不同的反应<sup>[26]</sup>。本研究水域均处在沙漠地带,生态环境较为脆弱,底栖动物群落组成较为单一。因此,建议对塔里木河流域的生态环境给予更多的关注,继续开展并深化对该地区河流的生态修复和管理工作。

## 参考文献 References

- [1] 邓铭江.塔里木河生态输水与生态修复研究与实践[J].中国水利,2022(19):29-32.DENG M J.Research and practice of ecological water conveyance and ecological restoration in Tarim River[J].China water resources,2022(19):29-32(in Chinese).
- [2] 唐芳,蒲智,李小明.塔里木河下游土地利用转型图谱特征分析[J].湖北农业科学,2022,61(16):169-174,181.TANG F, PU Z, LI X Y. Analysis on the characteristics of land use transition atlas in the lower reaches of Tarim River[J]. Hubei agricultural sciences, 2022, 61(16): 169-174, 181 (in Chinese with English abstract).
- [3] 袁志毅,董其华,张向萍,等.塔里木河干流洪水漫溢现状及对策[J].西北水电,2022(3):8-12.YUAN Z Y, DONG Q H, ZHANG X P, et al. Status quo of flood overflow in the mainstream of Tarim River and countermeasures[J]. Northwest hydropower, 2022(3): 8-12 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等.塔里木河的水资源利用与生态保护[J].地理学报,2003,58(2):215-222.CHEN Y N, CUI W C, LI W H, et al. Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. Acta geographica sinica, 2003, 58(2): 215-222 (in Chinese with English abstract).
- [5] OERTLI B. Leaf litter processing and energy flow through macroinvertebrates in a woodland pond (Switzerland) [J]. Oecologia, 1993, 96(4): 466-477.
- [6] WALLACE J B, WEBSTER J R. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function[J]. Annual review of entomology, 1996, 41: 115-139.
- [7] SHELDON F, THOMS M C. Relationships between flow variability and macroinvertebrate assemblage composition: data from four Australian dryland rivers [J]. River research and applications, 2006, 22(2): 219-238.
- [8] 李景远,吴巍,周孝德,等.车尔臣河流域土地利用变化及生态环境效应分析[J].环境科学学报,2015,35(10):3330-3337.LI J Y, WU W, ZHOU X D, et al. Land use change and eco-environment effect in Qarqan River Basin[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2015, 35(10): 3330-3337 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王雅梅,张青青,徐海量,等.生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J].干旱区研究,2019,36(5):1186-1193.WANG Y M, ZHANG Q Q, XU H L, et al. Change of plant diversity in the taitema lake area before and after implementing the ecological water conveyance[J]. Arid zone research, 2019, 36(5): 1186-1193 (in Chinese with English abstract).
- [10] 姜作发,霍堂斌.新疆额尔齐斯河、塔里木河、乌伦古湖水生生物物种资源调查与研究[M].北京:中国环境出版社,2014. JIANG Z F, HUO T B. Survey and study on the aquatic species resources in Lrtys River, Tarim River and Ulungur Lake in Xinjiang Uygur Autonomous region[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [11] YU G A, DISSE M, HUANG H Q, et al. River network evolution and fluvial process responses to human activity in a hyper-arid environment: case of the Tarim River in Northwest China [J]. Catena, 2016, 147: 96-109.
- [12] FENG Q, LIU W, SI J H, et al. Environmental effects of water resource development and use in the Tarim River Basin of northwestern China [J]. Environmental geology, 2005, 48(2): 202-210.
- [13] 王旭东.新疆车尔臣河中下游地表水与地下水转化机理研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2020.WANG X D. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle and lower reaches of cherchen river in Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [14] 达伟,王书峰,沈永平,等.1957—2019年昆仑山北麓车尔臣河流域水文情势及其对气候变化的响应[J].冰川冻土,2022,44(1):46-55.DA W, WANG S F, SHEN Y P, et al. Hydrological response to the climatic changes in the Qarqan River Basin at the northern slope of Kunlun Mountains during 1957—2019 [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2022, 44(1): 46-55 (in Chinese with English abstract).
- [15] 阿布都米吉提·阿布力克木,阿里木江·卡斯木,艾里西尔·库尔班,等.新疆车尔臣河流域水域的宏观变化及其影响和驱动因素[J].冰川冻土,2015,37(2):480-492.Abdimijit·Ablekim, Alimujiang·Kasimu, Alishir·Kurban, et al. The Cherchen River watershed in Xinjiang: macroscopic spatiotemporal variation, controlling and driving effects [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2015, 37(2): 480-492 (in Chinese with English abstract).
- [16] YE Z X, CHEN S F, ZHANG Q F, et al. Ecological water demand of taitema lake in the lower reaches of the Tarim River and the Cherchen River [J/OL]. Remote sensing, 2022, 14(4): 832 [2022-12-06]. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/4/832>.
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境出版社,2002. Editorial Committee of Monitoring and Analysis Methods for Water and Wastewater, State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater [M]. Fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [18] 徐兆礼,陈亚瞿.东黄秋季浮游动物优势种聚集强度与鲢鳙渔场的关系[J].生态学杂志,1989,8(4):13-15,19.XU Z L, CHEN Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea [J]. Chinese journal of ecology, 1989, 8(4): 13-15, 19 (in Chinese with English abstract).
- [19] 鲍毅新,胡知渊,李欢欢,等.灵昆东滩围垦区内外大型底栖动物季节变化和功能群的比较[J].动物学报,2008,54(3):

- 416-427. BAO Y X, HU Z Y, LI H H, et al. Seasonal variation and functional groups of macrobenthic communities at diked and natural tidal flat, Lingkun Island, China[J]. *Acta zoologica sinica*, 2008, 54(3):416-427 (in Chinese with English abstract).
- [20] HEINO J. Patterns of functional biodiversity and function-environment relationships in lake littoral macroinvertebrates [J]. *Limnology and oceanography*, 2008, 53(4): 1446-1455.
- [21] 李丽娟, 崇祥玉, 盛楚涵, 等. 太子河大型底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8667-8674. LI L J, CHONG X Y, SHENG C H, et al. Response of riparian land-use types to functional groups of benthic macroinvertebrates in Taizi River, Liaoning Province [J]. *Acta ecologica sinica*, 2019, 39(22): 8667-8674 (in Chinese with English abstract).
- [22] CUMMINS K W, KLUG M J. Feeding ecology of stream invertebrates [J]. *Annual review of ecology and systematics*, 1979, 10: 147-172.
- [23] COUCEIRO S R M, HAMADA N, FORSBERG B R, et al. Effects of anthropogenic silt on aquatic macroinvertebrates and abiotic variables in streams in the Brazilian Amazon [J]. *Journal of soils and sediments*, 2010, 10(1): 89-103.
- [24] 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. CHI S Y, WANG R, WEI M, et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019 [J]. *Acta ecologica sinica*, 2022, 42(21): 8723-8738 (in Chinese with English abstract).
- [25] BLANCHETTE M L, PEARSON R G. Dynamics of habitats and macroinvertebrate assemblages in rivers of the Australian dry tropics [J]. *Freshwater biology*, 2013, 58(4): 742-757.
- [26] CHESSMAN B C, JONES H A, SEARLE N K, et al. Assessing effects of flow alteration on macroinvertebrate assemblages in Australian dryland rivers [J]. *Freshwater biology*, 2010, 55(8): 1780-1800.
- [27] LEIGH C, SHELDON F. Hydrological connectivity drives patterns of macroinvertebrate biodiversity in floodplain rivers of the Australian wet /dry tropics [J]. *Freshwater biology*, 2009, 54(3): 549-571.
- [28] LÓPEZ-LÓPEZ E, ELÍAS SEDEÑO-DÍAZ J, MENDOZA-MARTÍNEZ E, et al. Water quality and macroinvertebrate community in dryland streams: the case of the tehuacán-cuicatlán biosphere reserve (México) facing climate change [J/OL]. *Water*, 2019, 11(7): 1376 [2022-12-06]. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071376>.
- [29] 王军, 周琼, 谢从新, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的新疆额尔齐斯河健康评价[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 959-966. WANG J, ZHOU Q, XIE C X, et al. Health assessment of Irtysh River in Xinjiang uygur autonomous region, northwest China, based on benthic-index of biotic integrity (B-IBI) [J]. *Research of environmental sciences*, 2015, 28(6): 959-966 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张葵, 王军, 葛奕豪, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的伊犁河健康评价及其对时间尺度变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5868-5878. ZHANG K, WANG J, GE Y H, et al. Health assessment of the Ili River based on benthic index of biotic integrity (B-IBI) and the effects of different months and years [J]. *Acta ecologica sinica*, 2021, 41(14): 5868-5878 (in Chinese with English abstract).
- [31] GIAM X, CHEN W, SCHRIEVER T A, et al. Hydrology drives seasonal variation in dryland stream macroinvertebrate communities [J]. *Aquatic sciences*, 2017, 79(3): 705-717.
- [32] ZHANG Y, ZHANG J, WANG L, et al. Influences of dispersal and local environmental factors on stream macroinvertebrate communities in Qinjiang River, Guangxi, China [J]. *Aquatic biology*, 2014, 20(3): 185-194.
- [33] 陈晶. 干旱风沙区不同植被恢复模式生态效应研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015. CHEN J. Ecological benefit research of different vegetation restoration patterns in arid sandy area [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [34] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 等. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(10): 3148-3156. REN H Q, YUAN X Z, LIU H, et al. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers [J]. *Acta ecologica sinica*, 2015, 35(10): 3148-3156 (in Chinese with English abstract).
- [35] REZENDE R S, SANTOS A M, HENKE-OLIVEIRA C, et al. Effects of spatial and environmental factors on benthic a macroinvertebrate community [J]. *Zoologia*, 2014, 31(5): 426-434.
- [36] ADDO-BEDIAKO A. Spatiotemporal distribution patterns of benthic macroinvertebrate functional feeding groups in the blyde river, south Africa [J]. *Applied ecology and environmental research*, 2021, 19(3): 2241-2257.
- [37] 王博涵, 吴丹, 张吉, 等. 济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7128-7139. WANG B H, WU D, ZHANG J, et al. Diversity and temporal-spatial dynamics of macroinvertebrate functional feeding groups in the rivers of the Jinan Region [J]. *Acta ecologica sinica*, 2017, 37(21): 7128-7139 (in Chinese with English abstract).
- [38] DOBSON M. Microhabitat as a determinant of diversity: stream invertebrates colonizing leaf packs [J]. *Freshwater biology*, 1994, 32(3): 565-572.
- [39] MILBRINK G. Oligochaetes and water pollution in two deep Norwegian Lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 278(1): 213-222.
- [40] SHABANI I E, LIU M H, YU H X, et al. Benthic macroinvertebrate diversity and functional feeding groups in relation to physicochemical factors in Sanjiang plain wetlands, northeast

- China[J]. Applied ecology and environmental research, 2019, 17(2): 3387-3402.
- [41] HERLIHY A T, SIFNEOS J C, HUGHES R M, et al. The relation of lotic fish and benthic macroinvertebrate condition indices to environmental factors across the conterminous USA [J/OL]. *Ecological indicators*, 2020, 112: 105958 [2022-12-06]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105958>.
- [42] 张续同, 李卫明, 张坤, 等. 长江宜昌段桥边河大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2559-2570. ZHANG X T, LI W M, ZHANG K, et al. Spatiotemporal distribution of macroinvertebrate functional feeding groups in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River in Yichang[J]. *Acta ecologica sinica*, 2022, 42(7): 2559-2570 (in Chinese with English abstract).

## Community structure of macroinvertebrates after ecological water transportation in lower reaches of Tarim River Basin

ZHENG Zhiwen, ZHANG Kui, HUO Bin, SHEN Jianzhong, ZHOU Qiong, WANG Jun

*College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/Key Lab of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China*

**Abstract** In order to understand the aquatic organism resources and characteristics of aquatic ecological environment after ecological water transportation in the lower reaches of the Tarim River basin, from 2019 to 2020, the community structure of macroinvertebrates in the middle and lower reaches of Tarim River, Qarqan River and Taitema Lake were investigated, and the environmental influencing factors were evaluated. The survey results showed that a total of 97 taxa of macroinvertebrates taxa, belonging to 3 phyla, 4 classes, 10 orders and 27 families, were identified in this study. Aquatic insects were the main groups (82 species), among which Diptera (47 species), Coleoptera (14 species) and Odonata (13 species) were the most numerous taxa. Chironomidae species were dominant in different regions. The average density and biomass of benthic animals peaked in May, which were much higher than those in August and October, but the diversity indices had no significant difference among different time and space ( $P > 0.05$ ). The main functional feeding groups in Tarim River and Qarqan River were collector gatherers (95.89%, 91.86%), while the main functional feeding groups in Taitma Lake were collector gatherers (50.68%) and predators (34.12%). The Mantel correlation analysis showed that ammonia nitrogen, dissolved oxygen and potassium permanganate were the main environmental factors affecting the diversity and functional groups of benthic animals. The results showed that the composition of the macroinvertebrates community in the Tarim River basin was relatively simple and the ecological environment was relatively fragile. Therefore, it is necessary to carry out and deepen the ecological restoration and management of the rivers in this area.

**Keywords** Tarim River; macroinvertebrates; diversity indices; functional feeding groups; environmental factors

(责任编辑:边书京)