

新疆伊犁河大型底栖动物群落及水质生物评价*

于帅¹ 贾娜尔·阿汗^{2**} 张振兴¹ 李昆¹ 孙东东¹ 杨海军¹

¹东北师范大学生命科学学院 长春 130000

²伊犁师范学院生物与地理科学学院 伊宁 835000

摘要 利用大型底栖动物进行河流生态系统健康评价是一种有效且能够综合反映河流生态系统变化的生物评价方法,对于河流监测、管理与保护具有重要指导作用. 2014年7月和2015年7月对新疆伊犁河支流喀什河和巩乃斯河共17个样点的大型底栖动物群落进行调查分析,共采集大型底栖动物19 735头,分10目39科81属(种),其中水生昆虫、软体动物和寡毛类分别占93.8%、2.5%和3.7%. 采用Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Margalef指数、BMWP记分系统和ASPT记分系统对伊犁河进行水质健康评价. 结果表明伊犁河河流健康状况整体较好,但不同河段间的水质健康等级差异较大. 其中喀什河水质健康等级为亚健康和健康的河段占35.6%,差与极差的河段占20.0%;巩乃斯河水质健康等级为亚健康和健康的河段占84.0%,不存在健康等级为差和极差的样点. 其中ASPT记分系统和Pielou指数评价结果在灵敏度上稍差,Shannon-Wiener指数、Margalef指数和BMWP记分系统更适合伊犁河地区的水质生物评价. (图5 表4 参31)

关键词 大型底栖动物; 群落结构; 水质; 生物指数; 伊犁河

CLC X824 : Q179.4

Macroinvertebrate community structure and water quality bioassessment of the Yili River, Xinjiang*

YU Shuai¹, JIANAER Ahan^{2**}, ZHANG Zhenxing¹, LI Kun¹, SUN Dongdong¹ & YANG Haijun¹

¹School of Life Science, Northeast Normal University, Changchun 130000, China

²College of Biology and Geography Sciences, Yili Normal University, Yining 835000, China

Abstract Using macroinvertebrates to assess river health has been proved to be an effective bioassessment method, which can comprehensively reflect the changes of the river ecosystem and play an important guiding role in river monitoring, management, and protection. Sampling macroinvertebrates was carried out in 17 sites in two tributaries of Yili River, i.e., Kashi River and Kunnes River. A total of 81 macroinvertebrate species, belonging to 39 families and 10 orders, were collected, of which 75 species (93.8%) were aquatic insects, 2 species (2.5%) were mollusks, and 3 species (3.7%) were oligochaetes. Based on Shannon-Wiener index, Pielou index, Margalef index, biological monitoring working party (BMWP) score system, and average score per taxon (ASPT) score system, the ecosystem health of Yili river was evaluated. The results showed that the health of the aquatic ecosystem of Yili River was at a high level as a whole. However, health quality ratings among different sampling sites were different. According to the results, in Kashi River, the sites that were in the “healthy” and “subhealthy” conditions accounted for 35.6%, and the percentage of the “poor” and “very poor” sites was 20.0%. For the Kunnes River, sites that were in the “healthy” and “subhealthy” conditions accounted for 84.0%, and there were no sites in the “poor” and “very poor” conditions. Pielou index and ASPT evaluation systems showed slightly inferior sensitivity, while Shannon-Wiener index, Margalef index, and BMWP score were found to be suitable indices for bioassessment in Yili River.

Keywords macroinvertebrates; community structure; water quality; biotic index; Yili River

大型底栖动物作为河流生态系统的重要组成部分,对河流生态系统的物质循环和能量流动具有重要作用,目前已成为河流生态系统的热点研究方向之一^[1-2]. 相对于鱼类和藻类等水生生物,大型底栖动物具有生命周期长,活动范围窄,分布范围广,不同种类对环境压力敏感性不一等特性,已被广泛应用于河流水质生物评价^[3-4]. 我国底栖动物水质生物

学评价研究于20世纪80年代展开,目前已逐渐成为河流健康评价的主要手段之一^[5-6].

伊犁河是流经中国和哈萨克斯坦的一条国际河流,对我国新疆地区的农业发展和电力供应起着重要作用^[7]. 近年来,随着“西北大开发”战略的实施,伊犁河流域经济迅速发展,但却造成了环境破坏的日益严重,如人类活动导致了河道的淤积与侵蚀、河流水文结构的变化等^[8];伊犁河支流喀什河上游的河道采砂已造成吉林台水电站上游河段水体呈乳白色,其上分布的5座大中型水电站也对河流生境造成了一定的影响;旅游开发也逐渐成为伊犁河生态环境破坏的

收稿日期 Received: 2016-08-26 接受日期 Accepted: 2016-09-19

*国家自然科学基金项目(U1303182)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1303182)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: jiana0999@126.com)

一项重要因素。但目前关于伊犁河的大型底栖动物水质生物学评价尚未展开,对于伊犁河水体的破坏情况尚无水质生物学方面的认识。本研究以2014年7月和2015年7月伊犁河支流巩乃斯河和喀什河的大型底栖动物调查研究为依据,分析了各断面的水质情况,探讨了不同生物指数对伊犁河水质评价的反映灵敏程度,找寻适合于伊犁河水质的大型底栖动物评价指数,以期对伊犁河水环境的监测和管理提供支持与指导作用。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样点情况

研究区域位于新疆伊犁哈萨克自治州伊犁河流域,属大陆性中温带干旱气候,流域年平均气温10.4℃,年平均降水量417.6 mm。伊犁河发源于哈萨克斯坦境内的汗腾格里峰北坡,流经中国与发源于中国境内的第二、三大支流喀什河和巩乃斯河汇集,最后注入巴尔喀什湖。伊犁河全长1 236.5 km,国内主源流长442 km。喀什河上共建有5座不同等级的大、中型梯级水电站(图1),其上游河段河道采沙造成吉林台一级水电站以上河段水体呈乳白色,河流生境严重破坏。其中K4和K6分别位于吉林台二级水电站和托海水电站大坝的正下方;K7、K8和K9位于国家级自然保护区小叶白腊自然保护区,受到人为干扰较少;G6、G7和G8样点位于那拉提旅游风景区内,受到一定的旅游活动干扰。具体样点分布见图1,样点环境参数见表1。

1.2 样本采集与环境指标测定

分别于2014年7月和2015年7月对伊犁河17个样点的大型底栖动物进行了定量采集。采用0.09 m²的索伯网(Surber sampler)于每个调查断面依据不同生境比例进行5次重复采样。采集到的样本分别装入塑封袋标号,带回实验室于白瓷盘中挑拣。将挑拣出的底栖动物装入50 mL的标本瓶中,加入75%的酒精溶液保存,在解剖镜下分类鉴定、计数。底栖动物的鉴定主要依照Morse、Merriitt and Cummins等^[9-12]。水体

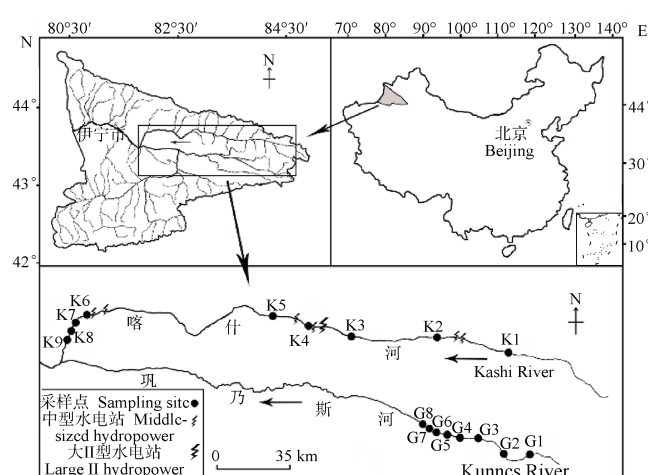


图1 样点布设及水电站分布示意图。

Fig. 1 Location of the sampling sites and hydropower plants.

pH值(pH)、水温(WT)用HANNA HI 8424便携式防水型Ph/ORP/℃测定仪现场测定,流速(CV)采用LS300-A便携式流速仪在每个采样点处进行测定,溶氧(DO)、电导率(CON)采用Hach SenION 156便携式多参数测定仪测定,带有刻度的木棍测定水深,同时采用Garmin MAP 60 CSX型定位仪对各断面进行标记,获得各样点的经纬度及海拔数据。

1.3 数据处理与水质生物评价标准

数据统计学分析使用SPSS 19.0软件,作图使用SigmaPlot 12.5软件。文中相关公式如下: 1) Shannon-Wiener多样性指数^[13](H')计算公式为 $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$,其中 S 为物种丰富度, P_i 为第 i 种个体数占总个体数 N 的比例, $P_i = n_i/N$ 。2) Margalef多样性指数^[14](D)计算公式为 $D = S - 1/\ln N$, S 和 N 同上。3) Pielou均匀度指数^[15](J')计算公式为 $J' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i / \log_2 S$, S 和 P_i 同上。4) BMWP记分系统^[16-18]计算公式为 $BMWP = \sum t_i$, t_i 为科 i 的BMWP的分数(即每科的敏感值)。5) ASPT记分系统^[19]计算公式为 $ASPT = \sum t_i/n$, t_i 同上, n 为总的科级分类单元。6)

表1 伊犁河各采样点环境指标

Table 1 Environmental indices of the sampling sites in Yili River

环境指标 Environmental index	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
海拔 Elevation (h/m)	2259	2065	1429	1254	1027	827	796	785	773	1680	1645	1594	1589	1577	1387	1382	1376
水深 Water depth (d/cm)	13.4	18.4	15.7	25.0	23.2	37.5	38.5	33.6	24.6	19.3	21.9	23.0	23.3	25.5	22.1	20.0	23
流速 Flow velocity (v/m s ⁻¹)	0.35	0.30	0.33	0.25	0.44	0.22	0.10	0.46	0.47	0.44	0.69	0.76	0.55	0.51	0.50	0.45	0.20
水温 Water temperature (θ/°C)	13.3	13.7	12.7	11.6	14.7	16.6	17.4	16.6	17.0	12.6	11.9	11.5	10.9	10.4	14.9	12.7	17.9
溶氧 Dissolved oxygen (ρ/mg L ⁻¹)	9.3	9.7	9.7	9.3	9.9	9.3	9.8	10.4	10.4	9.5	10.1	9.7	8.8	9.8	9.7	9.9	9.2
电导率 Conductivity (κ/μS cm ⁻¹)	158.3	155.9	115.8	179.1	275.0	244.5	268.5	245.5	248.0	113.2	148.0	148.3	134.9	135.9	167.1	127.9	215.0
pH	8.6	8.8	8.9	8.4	9.0	8.4	8.9	8.8	8.8	8.8	8.7	8.6	8.5	8.9	8.5	8.5	7.4
主要人类活动 Main human activity	河道采砂 Sand excavation	河道采砂 Sand excavation	河道采砂 Sand excavation	水电开发 Hydropower development	-	水电开发 Hydropower development	-	-	-	-	-	-	-	-	旅游开发 Tourism development	旅游开发 Tourism development	旅游开发 Tourism development

McNaughton优势度指数^[20] (Y) 计算公式为 $Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$; 其中 f_i 为第 i 种在各样点中出现的频率, n_i 为第 i 种的个数, 以 $Y > 0.02$ 确定优势种. 水质评价指标等级划分标准见表2.

2 结果与分析

2.1 种类组成及优势种分析

本次研究共采集到大型底栖动物19 735头, 隶属于10目39科81(属)种. 其中水生昆虫76种, 占总物种数的93.8%; 软体动物2种, 寡毛类3种, 分别占总物种数的2.5%和3.7%. 两条河流共有物种46种, 索伦森相似性指数为71.3%, 表明两条河流底栖动物群落相似性较高. 巩乃斯河优势种为似动蜉(*Cinygmmina* sp.)、蚰(*Simulium* sp.)、截脉沼石蛾(*Apatania* sp.)、粗腹摇蚊(*Pelopia* sp.)和假蜉(*Iron* sp.). 喀什河优势种为粗腹摇蚊(*Pelopia* sp.)和纹石蛾(*Hydropsyche* sp.).

2.2 物种丰富度、密度及生物量

从图2和图3可以看出, 伊犁河各样点底栖动物物种丰富度、密度和生物量三者的变化规律较为一致, 其均值分别为11种、1 319 ind/m²和4.3 g/m². 两条支流的差异较为明显, 喀什河的平均物种数约为7种, 而巩乃斯河则达到约16种. 其中位于坝下的K6样点平均物种数仅为1种, G5样点高达19种. 喀什河平均密度为739 ind/m², 巩乃斯河为1 973 ind/m². K6样点底栖动物密度最低, 仅13 ind/m²; G6样点密度最高, 达3 217 ind/m². 喀什河平均生物量为2.43 g/m², 巩乃斯河为6 474.3 g/m². 喀什河各样点中, K2样点生物量明显高于其他样点, 为8.42 g/m², 其中纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)为主要贡献者.

2.3 生物多样性

伊犁河流域底栖动物的多样性指数显示, 支流巩乃斯河底栖动物多样性总体水平较高, 且变化幅度不大. 位于旅游

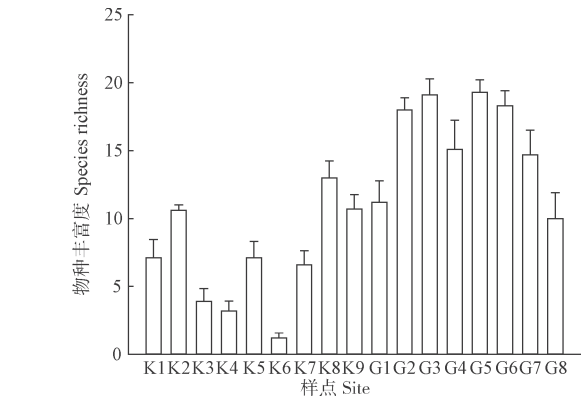


图2 伊犁河各样点底栖动物物种丰富度.
Fig. 2 Species richness of macroinvertebrates at the sampling sites in Yili River.

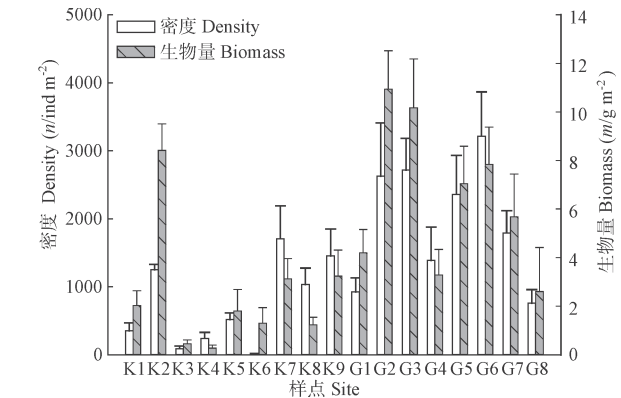


图3 伊犁河各样点密度与生物量.
Fig. 3 Density and biomass of macroinvertebrates at the sampling sites in Yili River.

风景区内的G6、G7、G8存在一定的下降趋势, 可能是受到旅游活动的影响. 喀什河各样点间多样性差异明显, 其中处于

表2 大型底栖无脊椎动物水质生物指标评价标准^[21-22]
Table 2 Assessment criteria of organism subindex based on macroinvertebrates^[21-22]

指标 Index	健康 Healthy	亚健康 Subhealthy	一般 Normal	差 Poor	极差 Very poor
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	> 3.0	2.0-3.0	1.0-2.0	0.1-1.0	0
Pielou指数 Pielou index	0.8 - 1.0	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	0-0.2
Margalef指数 Margalef index	> 3.5	2.5-3.5	2.0-2.5	1.0-2.0	0-1.0
BMWP记分系统 BMWP score system	> 81	51-80	25-50	10-24	0-9
ASPT记分系统 ASPT score system	> 4.1	3.6-4.0	3.1-3.5	2.1-3.0	0-2.0

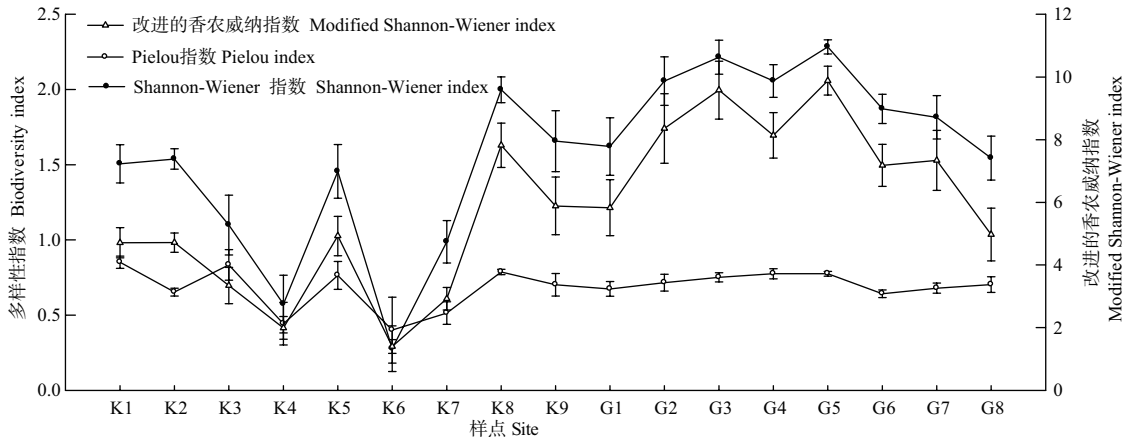


图4 伊犁河各样点底栖动物群落多样性.
Fig. 4 Biodiversity of macroinvertebrates at the sampling sites in Yili River.

吉林台二级水电站和托海水电站正下方的K4和K6样点多样性水平最低,其Shannon-Wiener指数、改进的Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数数值分别为0.6、2.0、0.4和0.3、1.4、0.4.喀什河下游的K7至K9底栖动物多样性显著升高,可能是保护区对河流生态系统起到了恢复作用.

2.4 功能摄食类群

参照Barbour等的方法^[23]对伊犁河底栖动物进行功能摄食类群划分,主要分为5个类群,分别为收集者(Gather-collectors, GC)、捕食者(Predators, PR)、刮食者(Scrapers, SC)、撕食者(Shredders, SH)和滤食者(Filter-collectors, FC).在整个研究区域中,共采集到捕食者26种、收集者24种、撕食者和刮食者各13种、滤食者6种.在数量组成上,收集者为主要类群,占比56.13%;其次是刮食者,占比20.81%;滤食者和捕食者分别占比10.61%和9.90%;撕食者占比最低,仅2.56%.支流巩乃斯河中收集者占43.02%;其次为刮食者31.57%;捕食者和滤食者分别占比12.00%和9.71%;撕食者占比3.70%.支流喀什河收集者占比高达67.79%;滤食者次之,为11.40%;刮食者和捕食者分别为11.24%和8.03%;撕食者仅占比1.55%.就单个样点来看,K1、K2、G1和G2的功能摄食类群组成较为完整,而电站大坝正下方的K4、K6样点则功能摄食类群组成单一,小叶白腊自然保护区内下游样点(K8、K9)的功能摄食类群逐渐恢复较为复杂的组成.巩乃斯河从上游到下游收集者呈上升的趋势,相反滤食者则呈现相对下

降的趋势(图5).

2.5 水质生物评价及各指数评价结果分析

对伊犁河各样点水质进行生物学评价,结果(表3)显示伊犁河河流健康状况整体较好,其中亚健康及以上状态样点占比60.7%,但两条支流健康状况差异较大.巩乃斯河亚健康及以上状态占比87.5%,不存在差或极差样点.喀什河亚健康及以上状态占比35.6%,主要是上游和下游受到人为干扰较少的样点;差及极差健康等级占比20.0%.其中位于大坝正下方的K4与K6样点的Margalef指数和BMWP指数水质评价等级为极差,表明这两点受到水电开发的影响最为严重.

对伊犁河底栖动物多样性指数、BMWP和ASPT记分系统5种评价结果的相关性进行分析,结果显示除了Pielou指数与Margalef指数和BMWP记分系统之间无显著相关性之外,其余指数之间相关性均达到显著或极显著水平(表4).其中,BMWP指数和Margalef指数相关性最高($r = 0.907$),其次是Margalef指数和Shannon-Wiener指数($r = 0.827$),表明各生物评价指数在伊犁河生态系统健康评估上具有较高的一致性.但不同指数之间的评价结果存在一定的差异,一般及以下状态样点在Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Margalef指数、BMWP记分系统和ASPT记分系统评价结果中分别占比76.47%、17.65%、35.29%、58.82%和11.76%,表明Pielou指数和ASPT记分系统评价结果在灵敏度上稍差.

表3 基于底栖动物的伊犁河水质生物评价

Table 3 Health assessment of Yili River based on biodiversity index

样点 Sites	Sannon-Wiener 多样性指数 Shannon- Wiener index	Shannon-Wiener 多样性指数评价 Assessment of Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度 指数 Pielou index	Pielou 均匀度指 数评价 Assessment of Pielou index	Margalef 多样性指数 Margalef index	Margalef 多样性指数 评价 Assessment of Margalef index	BMWP 记分 BMWP score	BMWP 记分系统评价 Assessment of BMWP score	ASPT 记分 ASPT score	ASPT 记分系统评价 Assessment of ASPT score
K1	1.506	一般 Normal	0.852	健康 Healthy	1.927	差 Poor	35.5	一般 Normal	6.00	健康 Healthy
K2	1.539	一般 Normal	0.653	亚健康 Subhealthy	3.153	亚健康 Subhealthy	48.4	一般 Normal	6.10	健康 Healthy
K3	1.099	一般 Normal	0.834	健康 Healthy	0.970	差 Poor	17.3	差 Poor	4.80	健康 Healthy
K4	0.573	差 Poor	0.443	差 Poor	0.709	极差 Very poor	9.4	极差 Very poor	2.85	差 Poor
K5	1.456	一般 Normal	0.764	亚健康 Subhealthy	1.822	差 Poor	24.7	差 Poor	3.95	亚健康 Subhealthy
K6	0.277	差 Poor	0.400	差 Poor	0.139	极差 Very poor	4.0	极差 Very poor	3.20	一般 Normal
K7	0.988	差 Poor	0.514	一般 Normal	1.974	差 Poor	14.7	差 Poor	3.42	亚健康 Subhealthy
K8	1.999	一般 Normal	0.787	亚健康 Subhealthy	3.106	亚健康 Subhealthy	48.2	一般 Normal	5.85	健康 Healthy
K9	1.657	一般 Normal	0.702	亚健康 Subhealthy	2.804	亚健康 Subhealthy	37.4	一般 Normal	5.75	健康 Healthy
G1	1.622	一般 Normal	0.674	亚健康 Subhealthy	2.956	亚健康 Subhealthy	53.6	亚健康 Subhealthy	7.35	健康 Healthy
G2	2.056	亚健康 Subhealthy	0.716	亚健康 Subhealthy	4.439	健康 Healthy	77.3	亚健康 Subhealthy	7.30	健康 Healthy
G3	2.215	亚健康 Subhealthy	0.752	亚健康 Subhealthy	4.278	健康 Healthy	72.9	亚健康 Subhealthy	6.70	健康 Healthy
G4	2.057	亚健康 Subhealthy	0.775	亚健康 Subhealthy	3.574	健康 Healthy	63.5	亚健康 Subhealthy	6.75	健康 Healthy
G5	2.284	亚健康 Subhealthy	0.775	亚健康 Subhealthy	4.240	健康 Healthy	74.2	亚健康 Subhealthy	7.15	健康 Healthy
G6	1.872	一般 Normal	0.642	亚健康 Subhealthy	4.781	健康 Healthy	79.3	亚健康 Subhealthy	7.15	健康 Healthy
G7	1.816	一般 Normal	0.679	亚健康 Subhealthy	3.567	健康 Healthy	55.5	亚健康 Subhealthy	6.50	健康 Healthy
G8	1.545	一般 Normal	0.703	亚健康 Subhealthy	2.815	亚健康 Subhealthy	37.8	一般 Normal	6.20	健康 Healthy

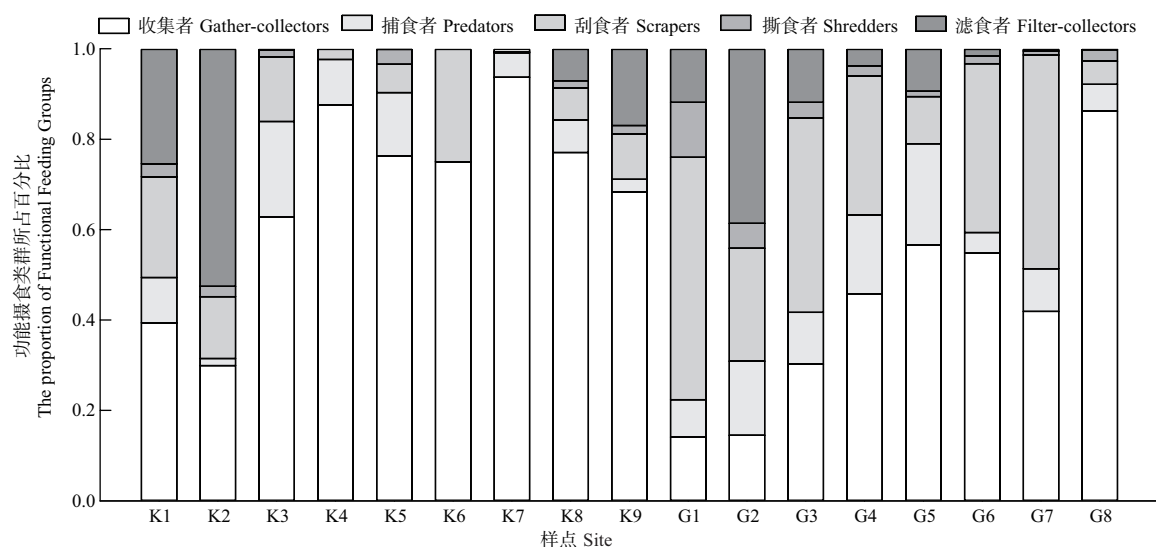


图5 伊犁河各采样点底栖动物功能摄食类群变化。

Fig. 5 The proportion of Functional Feeding Groups of macroinvertebrates at the sampling sites in Yili River.

表4 各生物评价指数之间的Spearman秩相关系数

Table 4 Spearman ranking correlation coefficients between macroinvertebrates indices

生物指数 Biotic index	Shannon-Wiener	Pielou	Margalef	BMWP	ASPT
Shannon-Wiener	1.000				
Pielou	0.519*	1.000			
Margalef	0.827**	0.264	1.000		
BMWP	0.789**	0.355	0.907**	1.000	
ASPT	0.706**	0.753**	0.636**	0.756**	1.000

**：在置信度（双侧）为 0.01 时相关性极显著；*：在置信度（双侧）为 0.05 时相关性显著。

Value with "***" mean significantly different ($P < 0.01$); value with "*" mean significantly different ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 伊犁河底栖动物群落特征

研究区域主要位于伊犁河山区河段，底栖动物资源较为丰富。研究显示，伊犁河底栖动物在物种数、密度和多样性方面整体处于较高水平，但不同样点之间差异较大。其中支流喀什河底栖动物群落可能受近年来人为活动加剧的影响，其物种数、密度、生物量和生物多样性等方面均出现不同程度的退化。特别是喀什河河道上游的河道采砂，河流水体理化方面均逐渐恶化。郑小康等研究表明河道采砂能够引起水体悬浮物浓度的增加，造成泥沙中吸附的重金属等物质的解吸，同时也改变了水流流态和泥沙输移过程，这会在水生生物的栖息、觅食和产卵^[24]。本研究发现，水电开发直接造成了大坝正下方样点的底栖动物群落严重退化，撕食者和滤食者消失。电站大坝对河流底栖动物的消极影响已有不少报道^[25-26]。特别是像吉林台水电站和托海水电站这样的大中型水电站，能够完全改变河流流态特征，造成物质和能量变化以及河流生境的不稳定性等一系列影响^[27-28]，从而不适合底栖动物的生存。另外从物种组成上来看，喀什河从上游至下游的河流底栖动物组成：由以水生昆虫为主导（上游采砂河段）向以寡毛类为主导（电站大坝下）转变；这表明在一定范围内水电开发对底栖动物群落造成的影响要大于河道采

砂对底栖动物群落的影响。

3.2 底栖动物各指数水质生物评价结果及评价结果分析

大型底栖动物作为河流生态系统的重要组成部分，相比于河流鱼类和藻类有着不可比拟的优势，能够较好地反映河流生态系统健康状况^[1, 29-30]。本研究采用传统的生物多样性指数和基于科级敏感值的BMWP记分系统，以及在BMWP记分系统上发展而来的ASPT记分系统对伊犁河进行水质的生物学评价。以生物分类为基础的多样性指数能够适用于多种类型水体的评价^[31]，而BMWP记分系统和ASPT记分系统则弥补了传统生物多样性将不同生物分类单元视为相同地位的不足，同时只需要将底栖动物鉴定到科级，降低了对鉴定人员的技能要求，有利于底栖动物水质生物评价的广泛应用^[18]。

研究中选取的各生物指数水质评价结果和群落结构反映的河流生态系统状况相似，能够良好地反映出河流的受损状况。各指数间的评价结果存在较高的相关性，表明各生物指数在评价结果上较为一致。但不同指数之间确实存在一定的差异性，如Pielou指数和ASPT记分系统在灵敏度上不如其他3种指数。因此，本研究认为底栖动物Shannon-Wiener指数、Margalef指数和BMWP记分系统更适合于伊犁河的水质评价。研究结果显示巩乃斯河水质由于受到人为干扰较少尚处较好状态，但旅游开发河段水质健康状况呈现出退化趋势。喀什河的水质状态相对较差，这与喀什河较高的开发程度相符合。目前，伊犁河特别是喀什河受到人类活动的影响日益严重，旅游、河道采砂和水电开发活动等仍在继续开展，因此，希望今后在伊犁河开发的同时能够加强对河流生态系统的保护工作，河流监测和水质生物评价工作也应该持续进行，为更好地指导河流保护和管理提供科学依据。

参考文献 [References]

- 任海庆, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 周上博. 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, 10: 3148-3156 [Ren HQ,

- Yuan XZ, Liu H, Zhang YW, Zhou SB. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **10**: 3148-3156]
- 2 何逢志, 任泽, 董笑语, 杨开华, 王敏, 黎道丰, 蔡庆华. 神农架林区河流生态系统健康评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20** (1): 35-39 [Li FZ, Reng Z, Dong XY, Yang KH, Wang M, Li DF, Cai QH. River ecosystem health assessment of the Shennongjia Forest Region [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (1): 35-39]
 - 3 Giorgio A, DeBonis S, Guida M. Macroinvertebrate and diatom communities as indicators for the biological assessment of river Picentino (Campania, Italy) [J]. *Ecol Ind*, 2016, **64**: 85-91
 - 4 Bertoli M, Azzoni M, Pizzul E. A comparison between biomonitoring methods for the analysis of macrobenthic invertebrate communities in different river types of Friuli Venezia Giulia [J]. *Annales Ser Hist Nat*, 2014, **24** (2): 139-146
 - 5 Cao Y, Hawkins C P. The comparability of bioassessments: a review of conceptual and methodological issues [J]. *J N Am Benthol Soc*, 2011, **30** (3): 680-701
 - 6 李娣, 牛志春, 王霞, 吕学研, 蔡琨, 于红霞. 长江江苏段底栖动物群落结构与多样性分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, **21** (1): 96-100 [Li T, Niu ZC, Wang X, Lv XY, Cai K, Yu HX. Distribution and diversity of microbenthic communities in the Jiangsu Reach of the Yangtze River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (1): 96-100]
 - 7 孙慧兰, 李卫红, 陈亚鹏. 新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2010, **30** (4): 887-894 [Sun HL, Li WH, Chen YP. Response of ecological services value to land use change in the Ili River Basin, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (4): 887-894]
 - 8 董文福. 伊犁河流域的水电开发与环境保护[J]. *干旱环境监测*, 2012, **26** (2): 115-117 [Dong WF. Hydropower development and environmental protection of the Yili River Basin [J]. *Arid Environ Monit*, 2012, **26** (2): 115-117]
 - 9 Morse JC, Yang LF, Tian LX. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994:
 - 10 Merritt RW, Cummins KW. An Introduction to the Aquatic Insects of North America [M]. Dubuque: Kendall/Hunt Pub. Co., 2008
 - 11 大连水产学院. 淡水生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1982 [Dalian Fisheries University. Freshwater Biology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982]
 - 12 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京: 中国言实出版社, 2011 [Wang JC, Wang XH. Chironomid Larvae in the North of China [M]. Beijing: China Yanshi Press, 2011]
 - 13 Shannon EC, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Illinois: Urbana University of Illinois Press, 1949
 - 14 Margalef DR. Information theory in ecology [J]. *Gen Syst*, 1957 (3): 36-71
 - 15 Pielou EC. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession [J]. *J Theor Biol*, 1966, **10** (2): 370-383
 - 16 Chessman BC, Growns JE, Kotlash AR. Objective derivation of macroinvertebrate family sensitivity grade numbers for the SIGNAL biotic index: application to the Hunter River system, New South Wales [J]. *Mar Freshwater Res*, 1997, **48** (2): 159-172
 - 17 Hellawell JM. Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management [M]. Amsterdam: Applied Science Publishers, 1986
 - 18 刘玉, Vermaat JE, de Ruyter ED, de Kruijf HAM. ISO-BMWP底栖动物监测法在中国河流有机污染评价中的修正及应用[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, **43** (4): 102-105 [Liu Y, Vermaat JE, de Ruyter ED, de Kruijf HAM. Modification and application of biomonitoring ISO-BMWP method of macrofauna in river pollution evaluation in China [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2004, **43** (4): 102-105]
 - 19 Armitage PD, Moss D, Wrighe JF. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites [J]. *Water Res*, 1983, **17** (3): 333-347
 - 20 McNaughton SJ. Relationship among functional properties of Californian grassland [J]. *Nature*, 1967, **216** (5111): 168-169
 - 21 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. *环境科学*, 2012, **33** (7): 2281-2287 [Geng SW, Qu XD, Zhang Y, Lin KD. Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. *Environ Sci*, 2012, **33** (7): 2281-2287]
 - 22 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010 [Duan XH, Wang ZY, Xu MZ. Benthic Macroinvertebrate and Application in the Assessment of Stream Ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010]
 - 23 巴伯. 溪流及浅河快速生物评价方案—着生藻类、大型底栖动物及鱼类[M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 2011 [Barbour MT. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Stream and Wadeable River: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish [M]. 2nd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2011]
 - 24 郑小康, 崔长勇, 崔振华. 黄河干流河道采砂对生态环境的影响及对策[J]. *人民黄河*, 2016 (1): 42-44 [Zheng XK, Cui CY, Cui ZH. Impact of sand excavation in river courses of the main Yellow River on ecological environment and the countermeasures [J]. *Yellow River*, 2016 (1): 42-44]
 - 25 Holt CR, Pfitzer D, Scalley C. Longitudinal variation in macroinvertebrate assemblages below a large-scale hydroelectric dam [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **755** (1): 13-26
 - 26 陈洪, 李厚琼, 吴迪. 乌江梯级电站开发对大型底栖无脊椎动物群落结构和多样性的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19** (12): 1462-1470 [Chen H, Li HQ, Wu D. Effects of step hydroelectric exploits on community structure and biodiversity of macroinvertebrates in Wujiang River [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2010, **19** (12): 1462-1470]
 - 27 贾兴焕, 蒋万祥, 李凤清, 唐涛, 段树桂, 蔡庆华. 大型水电站对河流底栖藻类群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, **20** (7): 1731-1738 [Jia XH, Jiang WX, Li FQ, Tang T, Duan SG, Cai QH. Impacts of large hydropower station on benthic algal communities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (7): 1731-1738]
 - 28 Anderson D, Moggridge H, Warren P. The impacts of 'run-of-river' hydropower on the physical and ecological condition of rivers [J]. *J Water Environ*, 2015, **29** (2): 268-276
 - 29 Angeler DG, Goedkoop W. Biological responses to liming in boreal lakes: an assessment using plankton, macroinvertebrate and fish communities [J]. *J Appl Ecol*, 2010, **47** (2): 478-486
 - 30 孙小玲, 蔡庆华, 李凤清, 杨顺益, 谭路. 春季昌江大型无脊椎动物群落结构及功能摄食类群的空间分布[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18** (2): 163-169 [Sun XL, Cai QH, Li FQ, Yang SY, Tan L. Spatial distribution of community structure and functional feeding groups of macroinvertebrates of Changjiang River, a tributary of Poyang Lake in spring [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (2): 163-169]
 - 31 苏华武, 江晶, 温芳妮, 李晓宇, 阎云君. 湖北清江流域叹气沟河底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. *湖泊科学*, 2008, **20** (4): 520-528 [Su HW, Jiang J, Wen FN, Li XY, Yan YJ. Community structures of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Tanqigou Stream of Qingjiang River Basin, Hubei Province [J]. *J Lake Sci*, 2008, **20** (4): 520-528]