

汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的底栖动物群落特征及水质生物评价*

侯易明, 潘保柱**, 蒋小明, 蒋万祥, 朱朋辉, 张磊, 杨海强

(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 汉江上游是丹江口水库的水源区, 其生态环境状况对保障汉江全流域及南水北调中线生态安全起着举足轻重的作用. 本研究于 2017 年 11 月和 2018 年 4 月对汉江上游干流及源于秦岭南麓的 5 条典型支流开展了系统调查, 旨在摸清汉江上游干流支流的底栖动物群落特征, 以及评价其水质状况. 共采集到大型底栖动物 240 种, 其中水生昆虫 209 种, 软体动物 13 种, 环节动物 9 种, 其他类群 9 种. 其中四节蜉 *Baetis* sp. 在各条河流中均为优势种, 此外其他优势种还有拟细裳蜉 *Paraleptophlebia* sp.、细蜉 *Caenis* sp.、扁蜉 *Heptagenia* sp.、花翅蜉 *Baetiella* sp.、直突摇蚊 *Orthocladius* sp.、纹石蛾 *Hydropsyche* sp.、蜉蝣 *Ephemera* sp.、带肋蜉 *Cincticostella* sp.、高翔蜉 *Epeorus* sp.、似波摇蚊 *Symptothastia* sp. 和真开摇蚊 *Eukiefferiella* sp.. 从各类群的密度来看, 水生昆虫在汉江及五条支流中均占有绝对优势, 占总密度的 90.8%~98.9%, 而在生物量上, 除汉江干流中软体动物占绝对优势外, 水生昆虫在各支流中均占有绝对优势, 占总生物量的 47.0%~98.9%. 就功能摄食类群的密度而言, 直接收集者在汉江干支流中均为最主要功能摄食类群, 而从生物量方面来看则表现出差异性, 捕食者是金水河和旬河中最主要功能摄食类群, 刮食者为汉江干流和月河中最主要功能摄食类群, 直接收集者是金钱河中最主要功能摄食类群, 滤食者为渭水河中最主要功能摄食类群. 冗余分析结果表明, 流速、总磷和电导率为影响汉江干支流底栖动物分布的关键环境因子. 采用底栖动物生物指数(BI)和 Shannon-Wiener 指数进行水质生物评价, 结果显示除汉江的极个别断面、渭水河和月河下游及旬河的中下游河段处于轻-中度污染状态外, 其他调查河段均处于清洁状态. 本研究结果可为汉江上游流域生态管理和科学保护提供依据.

关键词: 汉江上游流域; 丹江口水库; 底栖动物; 群落特征; 水质生物评价

Benthic macroinvertebrate community characteristics and bioassessment of water quality in the mainstem of upper Hanjiang River and its typical tributaries in the southern slope of the Qinling Mountains*

HOU Yiming, PAN Baozhu**, JIANG Xiaoming, JIANG Wanxiang, ZHU Penghui, ZHANG Lei & YANG Haiqiang

(State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in the Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R.China)

Abstract: The upper reaches of the Hanjiang River are the source-water area of the Danjiangkou Reservoir. Its ecological status plays an important role in ensuring the ecological security of the Hanjiang River Basin and the South-to-North Water Transfer Project. In November 2017 and April 2018, we conducted a systematic survey in the upper reaches of the Hanjiang River and its five typical tributaries, in order to find out the characteristics of benthic macroinvertebrate communities in the upper reaches of the Hanjiang River and the typical tributaries of the southern slope of the Qinling Mountains, and to evaluate their bioassessment of water quality. Altogether 240 species of macroinvertebrates were collected, including 209 species of aquatic insects, 13 species of mollusks, 9 species of annelids and 9 species of other groups. Among them, *Baetis* sp. was the dominant species in all rivers. In addition, other species included *Paraleptophlebia* sp., *Caenis* sp., *Heptagenia* sp., *Baetiella* sp., *Orthocladius* sp., *Hydropsyche* sp.,

* 2019-11-19 收稿; 2020-02-14 收修改稿.

国家自然科学基金项目(31770460, 51622901)资助.

** 通信作者; E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn.

Ephemera sp., *Cincticostella* sp., *Epeorus* sp., *Sympotthastia* sp. and *Eukiefferiella* sp. From the density of various groups, aquatic insects had an absolute advantage in the Hanjiang River and its five tributaries, accounting for 90.8%–98.9% of the total density. In terms of biomass, in addition to the absolute advantage of mollusks in the main stream of the Hanjiang River, aquatic insects had an absolute advantage in each tributary, accounting for 47.0%–98.9% of the total biomass. In terms of the density of functional feeding groups, direct collectors were the main functional feeding groups in the Hanjiang River and its tributaries, while there were differences in terms of biomass. The predators were the main functional feeding groups in the Jinshui River and the Xun River. The scrapers were the main functional feeding group of the Hanjiang River and the Yue River. The collector-gatherers were the main functional feeding group in the Jinqian River. The collector-filterers were the main functional feeding group in the Xushui River. The redundancy analysis results showed that velocity, total phosphorus and conductivity were the key environmental factors affecting the distribution of benthic macroinvertebrate in the Hanjiang River and its tributaries. The bioassessment of water quality was carried out by using the biotic index (BI) and the Shannon-Wiener index. The evaluation results showed that a few stream sections of the Hanjiang River, the downstream of the Xushui River, the downstream of the Yue River and the mid-lower reaches of the Xun River were slightly to moderately polluted, the other stream sites were in a clean state. The research results can provide basis for ecological management and scientific protection in the upper reaches of the Hanjiang River.

Keywords: Upper Hanjiang River Basin; Danjiangkou Reservoir; benthic macroinvertebrate; community characteristics; bioassessment of water quality

汉江上游流域位于秦岭南麓,流域面积占汉江流域总面积的 34.4%^[1],是汉江流域的重要来水区,更是丹江口水库的水源地。因丹江口水库的来水主要来自于汉江上游流域,故上游流域的水环境状况会直接影响到中线调水的供水安全问题,其水生态健康状况会直接关系着中线调水的生态安全问题。然而,近些年来,人类活动如水坝建设、挖砂、农业及城镇污水等导致了水的量与质发生了改变,从而影响到某些河段的生态健康水平^[2-5]。因此,有必要对汉江上游流域的水生态健康和水质状况进行评价。传统的水环境参数对水质的评价具有瞬时性,而人类活动对水体的影响是长期作用的^[6],故需要选择对水环境的长期变化具有指示作用的水生指示生物来开展水质生物评价更加全面和客观。

大型底栖无脊椎动物(以下简称底栖动物)一般而言是一类不能通过 500 μm 孔径筛网,生活史全部或大部分时间生活于水体底部的水生动物群^[7]。底栖动物是河流生态系统中的重要组成部分,具有种类多,生活周期长,活动场所比较固定,便于采集的特点,且不同种类对水质的敏感性差异大、受外界干扰后群落的变化趋势经常可以预测,对环境的长期变化有着很好的指示作用,因此,它们是了解河流生态系统结构和功能及健康状况的关键类群^[7-8]。以往的研究^[9-10]主要集中在汉江的某些支流,Wang 等^[10]以金钱河为研究区域,研究了土地类型和水质状况对底栖动物群落结构的影响;Li 等^[9]则对汉江上游的多条支流进行了分析,研究了人类活动干扰下,生境因子与空间因子对底栖动物群落格局的影响。总的来说,以往对汉江上游支流的底栖动物进行了较为深入的研究,而包括汉江干流及支流的流域尺度的研究却非常缺乏。

因此,本研究针对汉江上游干流及其典型支流,系统开展了水环境和底栖动物的群落调查,旨在达到以下目标:1)摸清汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的底栖动物群落特征;2)分析汉江上游干支流群落差异及其成因;3)评价汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的水质状况。以期对汉江上游流域生态管理和科学保护提供依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况及采样断面布置

汉江干流发源于陕西省宁强县,自西向东流经陕西省内汉中、安康两市,并于安康市白河县流出陕西省境内。汉江上游流域位于亚热带季风气候区,平均温度为 13.2℃,多年平均降雨量为 895 mm,流域东西长度为 400 km,南北宽度为 250 km,流域面积为 5.47 万 km^2 ,占汉江全流域 34.4%,干流长度 652 km,约占汉江全流域 41.3%,流域内主要地貌类型为山区峡谷,山区丘陵和盆地^[1]。流域内自然资源丰富,流域大多数支流发源于秦岭南麓,秦岭素有“南北植物荟萃、南北生物物种库”之美誉。

本研究于 2017 年 11 月和 2018 年 4 月对汉江干流及其五条典型支流:渭水河(XS)、金水河(JS)、月河

(YH)、旬河(XH)、金钱河(JQ)开展系统的水生态调查. 分别在汉江上游干流的 7 个水文站设置采样断面(HJ-1~HJ-7), 同时在每条支流设置 5 个采样断面, 共计 32 个样断面. 研究区域及采样断面位置见图 1.

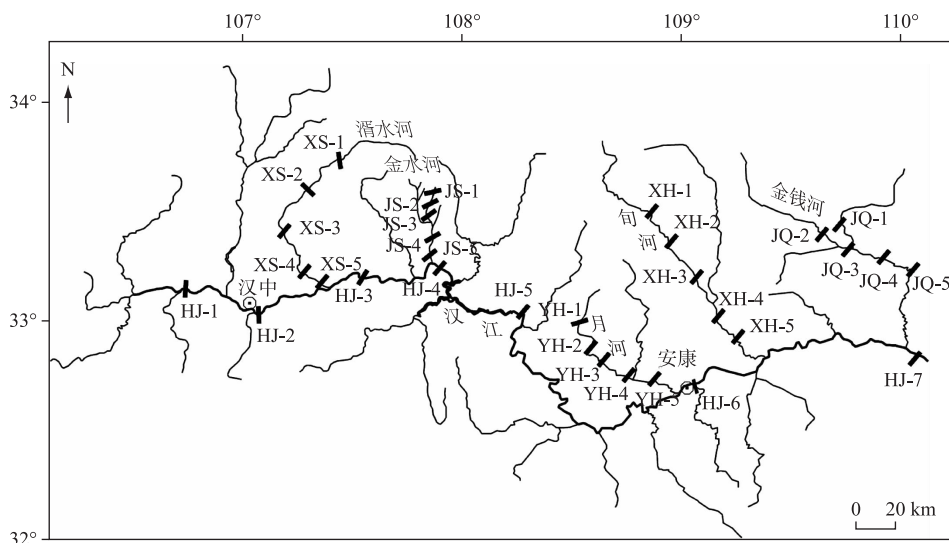


图 1 汉江流域及采样断面分布

Fig.1 Hanjiang River Basin and the distribution of sampling sections

1.2 研究方法

1.2.1 环境因子测定 在环境因子的测定中,通过 Hach HQ30d 便携式多参数分析仪现场测定水温、溶解氧、电导率和 pH 四个环境参数,通过 Hach 2100Q 便携式浊度仪现场测定浊度,通过 Global Water FP211 直读式流速仪测定流速. 将水样带回实验室测定总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷浓度,相关方法参照《水和废水监测分析方法》,叶绿素 *a* 则是将水样通过放有 0.45 μm 滤膜的抽滤装置抽滤,将滤膜在低温黑暗条件下保存,之后通过提取离心,再用分光光度计进行测定^[11]. 底质类型划分依据为:沙和淤泥(Sand and silt, <2 mm)、砾石(Gravel, 2~32 mm)、小卵石(Pebble, 32~64 mm)、卵石(Cobble, 64~256 mm)和大石(Boulder, >256 mm)^[9].

1.2.2 底栖动物样品采集与处理 底栖动物用筛网孔径 420 μm 的手持 D 型网(网口宽度 0.3 m)在河流浅滩处采集,每个断面均采集 5 个平行样点,每个样点的采集面积均为 0.3 m^2 . 所有样品用河水淘洗后装入密封袋,带回室内置于白色解剖盘中分拣底栖动物标本,并放入装有 75% 浓度酒精的样本瓶中固定,带回实验室将标本鉴定至尽可能低的分类单元^[12-16]、计数和称重. 将统计后样本划分为 5 类功能摄食类群(Functional Feeding Groups, FFGs),分别为撕食者(Shredders, SH)、过滤收集者(Collector-filterers, FC)、直接收集者(Collector-gatherers, GC)、刮食者(Scrapers, SC)和捕食者(Predators, PR)^[17-18].

1.2.3 数据分析与方法 运用 Excel 2010 和 Origin 2018 软件对底栖动物数据进行统计并绘制相关图表. 通过 ArcGIS 10.4 对汉江流域图进行绘制. 对不同样点底栖动物的密度、生物量以及多样性进行计算. 把不同耐受程度的物种分为三类^[21]:设耐污值为 X ,则耐污种($X \geq 7$)、中度耐污种($3 < X < 7$)和敏感种($X \leq 3$),并计算其物种数、密度及生物量. 多样性分析选择 Shannon-Wiener 指数(H').

采用单因素方差分析(One-way analysis of variance)比较汉江干支流间底栖动物不同类群的密度和生物量的空间差异. 若组间差异显著,则进行多重比较,如果方差齐性,则进行 Tukey HSD 检验;如果方差不具齐性,则选用 Games-Howell 进行检验,以上分析在 SPSS 25.0 中完成.

对底栖动物群落做除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),DCA 结果中第一轴的值 gradient length 为 3.07 (< 4),因此本研究选用冗余分析(redundancy analysis, RDA)^[19]. 对底栖动物与环境因子的关系进行分析(为了优化分析,将环境因子中相关性大于 0.75 的参数剔除,然后将除 pH 外的其他参

数和物种密度数据进行 $\lg(x+1)$ 转换). 并用前选 (forward selection) 和 Monte Carlo 转置法确定对底栖动物类群分布具有重要且独立作用的最少环境变量组合. 该最小变量组用于最终的 RDA 中. 本研究采用 R 语言中的 Vegan 软件包 (R development core team, 2012) 进行 RDA 排序分析和作图^[9].

水质分析选择底栖动物生物指数 (BI 指数) 及 Shannon-Wiener 指数 (H').

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \tag{1}$$

$$BI = \sum_{i=1}^n \frac{n_i \cdot X_i}{N} \tag{2}$$

式中, S 为总物种数; n_i 是第 i 种个体数; N 为总个体数; $P_i = n_i/N$; X_i 是第 i 个分类单元的耐污值. 参照 Karr^[20] 等使用的水质生物评价指数值与分值的转换方法, 计算 BI 指数水质生物评价分级标准. 具体方法为: 参照相关文献^[21-23] 中大型底栖动物各分类单元耐污值计算 BI 值. 应用所有样点的 BI 值, 通过频数分析, 以 5% 分位数对应的值作为标准, 小于该值表示水质最清洁, 大于该值至最大值分布范围四等分, 分值从小到大依次分别代表清洁、轻污染、中污染和重污染. BI 指数水质标准的确定: 根据 BI 指数的计算结果 (最小值为 1.32, 最大值为 9.4), 得出 5% 分位点为 2.35. Shannon-Wiener 指数水质标准的确定: 采用黄玉瑶等提出的国内大型底栖无脊椎动物 Shannon-Wiener 指数划分的水质标准^[24]. Shannon-Wiener 指数及 BI 指数确定的水质标准见表 1.

表 1 生物指数与水质等级标准
Tab.1 Biological index and water quality grade standard

生物指数	最清洁	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
BI	<2.35	2.36~4.11	4.12~5.88	5.89~7.64	>7.64
H'	—	>3	2~3	1~2	0~1

2 结果

2.1 环境参数

在表 2 物理参数中, 汉江干流的电导率显著高于部分支流, 而部分支流中水温、pH、溶解氧和流速则显著高于干流. 其中水温以月河最高, 金水河最低. pH 各支流均高于干流, 为弱碱性. 流速和溶解氧则是金水河最高, 旬河流速均值较低. 浊度在干支流间不具有显著性差异. 在化学参数中, 汉江干流中总氮、硝态氮和亚硝态氮的浓度显著高于各支流, 而月河中氨氮和总磷浓度显著高于干流和其他支流, 叶绿素 a 浓度则以金水河最低, 显著低于干流及其他支流. 可见汉江干流及月河中营养盐浓度较高, 而金水河的营养盐浓度较低. 在底质类型中, 各支流卵石的百分比含量显著高于干流, 而沙和淤泥的百分比含量干流则显著高于大部分支流. 而大石、小卵石和砾石的百分比含量在干支流间不具有显著性差异.

2.2 底栖动物种类组成及分布

汉江干流及其 5 条支流共采集并鉴定出底栖动物 240 种, 隶属于 5 门 9 纲 24 目 84 科 197 属, 其中, 水生昆虫 56 科 168 属 209 种 (占总物种数的 87.1%), 软体动物 9 科 11 属 13 种 (占 5.4%), 环节动物 5 科 9 属 9 种 (占 3.7%), 其他类群 (节肢动物门甲壳纲 5 科 5 属 5 种, 蛛形纲 1 科 1 属 1 种, 扁形动物门 1 科 2 属 2 种, 线形动物门 1 科 1 属 1 种) 共 8 科 9 属 9 种 (占 3.7%) (图 2). 目级水平物种数统计见表 3.

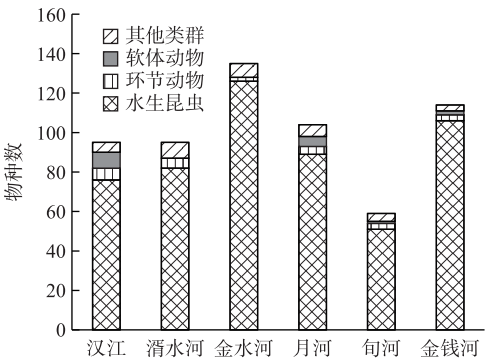


图 2 汉江干支流各类群底栖动物物种数
Fig.2 Number of various group benthic macroinvertebrate species in the Hanjiang River and its tributaries

表2 汉江干流及其5条支流环境参数(平均值±标准差)*

Tab.2 Environmental variables of the Hanjiang River and its five tributaries (Mean±SD)

参数		汉江干流(n=7)	渭水河(n=5)	金水河(n=5)	月河(n=5)	旬河(n=5)	金钱河(n=5)	F	P
物理参数	水温/℃	15.2±1.4 ^b	12.7±0.7 ^c	12.4±1.6 ^c	18.9±1.8 ^a	15.8±2.6 ^b	17.9±2.3 ^{ab}	8.99	<0.001
	pH	8.23±0.24 ^b	8.42±0.31 ^a	8.57±0.11 ^a	8.39±0.19 ^a	8.63±0.16 ^a	8.49±0.31 ^a	3.29	0.02
	电导率/(μS/cm)	303.7±61.2 ^a	164.6±43.8 ^b	152.0±72.0 ^{ab}	289.7±15.8 ^a	271.3±101.7 ^{ab}	295.6±66.0 ^{ab}	5.14	0.13
	溶解氧/(mg/L)	9.07±0.50 ^b	9.86±0.29 ^a	9.94±0.15 ^a	9.36±0.95 ^{ab}	9.85±0.52 ^a	8.96±0.45 ^b	3.61	0.002
	流速/(m/s)	0.21±0.18 ^b	0.44±0.34 ^b	0.94±0.31 ^a	0.58±0.35 ^b	0.29±0.46 ^b	0.63±0.46 ^{ab}	3.04	0.027
化学参数	浊度/NTU	65.62±82.13	13.38±6.35	5.29±4.28	58.24±48.33	16.21±7.40	31.82±35.15	1.50	0.225
	总氮/(mg/L)	2.850±0.481 ^a	1.82±0.120 ^c	1.385±0.286 ^d	2.230±0.184 ^b	1.915±0.004 ^c	2.125±0.117 ^{bc}	28.40	<0.001
	氨氮/(mg/L)	0.615±0.060 ^b	0.535±0.032 ^b	0.625±0.095 ^b	0.970±0.332 ^a	0.640±0.219 ^b	0.485±0.067 ^b	7.48	<0.001
	硝态氮/(mg/L)	1.775±0.477 ^a	1.255±0.095 ^b	0.585±0.081 ^c	1.085±0.173 ^b	1.015±0.308 ^b	1.050±0.262 ^b	13.09	<0.001
	亚硝态氮/(mg/L)	0.330±0.156 ^a	0.040±0.007 ^b	0.035±0.011 ^b	0.100±0.028 ^b	0.110±0.014 ^b	0.145±0.004 ^b	28.04	<0.001
底质类型	总磷/(mg/L)	0.061±0.007 ^b	0.058±0.007 ^b	0.039±0.002 ^c	0.084±0.001 ^a	0.055±0.000 ^b	0.056±0.004 ^b	24.11	<0.001
	叶绿素 a/(μg/L)	3.960±1.563 ^b	4.150±0.537 ^a	2.185±0.499 ^c	4.410±0.226 ^a	5.095±1.715 ^a	5.240±0.976 ^a	7.23	<0.001
	大石/%	4.29±9.32	4.30±2.80	10.90±9.97	1.90±4.24	4.70±3.55	1.60±1.56	1.35	0.275
	卵石/%	36.21±20.00 ^b	65.20±14.29 ^a	71.80±8.02 ^a	48.70±19.8 ^a	50.30±26.82 ^a	61.20±12.62 ^a	2.97	0.030
	小卵石/%	14.43±5.70	16.40±5.75	11.00±8.37	19.14±5.76	18.40±10.55	24.40±9.32	1.81	0.146
	砾石/%	11.93±11.83	4.60±4.39	2.70±4.39	8.50±10.75	8.00±6.92	6.80±4.96	0.90	0.495
	沙和淤泥/%	32.71±17.65 ^a	9.30±12.30 ^{ab}	2.80±3.03 ^b	22.66±22.93 ^{ab}	18.00±21.53 ^{ab}	16.23±18.34 ^b	3.06	0.026

* 同一行内上标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表3 底栖动物目级水平物种数统计

Tab.3 Number of benthic macroinvertebrate species in order level

门	纲	目	科数目	属数目	种数目		
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	颤蚓目 Tubificida	2	6	6		
		单向蚓目 Haplotaxida	1	1	1		
	蛭纲 Hirudinea	吻蛭目 Rhynchobdellida	1	1	1		
		咽蛭目 Pharyngobdellida	1	1	1		
软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	Littorinimorpha	2	2	2		
		Mesogastropoda	2	2	2		
		Architaenioglossa	2	1	2		
		Hygrophila	4	2	4		
	瓣鳃纲 Lamellibranchia	帘蛤目 Venerida	1	2	2		
		贻贝目 Mytilida	1	1	1		
		节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	蜉蝣目 Ephemeroptera	10	22	22
				广翅目 Megaloptera	1	3	3
毛翅目 Trichoptera	15			26	28		
鞘翅目 Coleoptera	10			11	13		
蜻蜓目 Odonata	6			13	13		
襀翅目 Plecoptera	7			14	14		
双翅目 Diptera	8			76	112		
半翅目 Hemiptera	4			4	4		
甲壳纲 Crustacea	等足目 Isopoda	1		1	1		
	十足目 Decapoda	1		3	3		
	端足目 Amphipoda	1	1	1			
	蛛形纲 Arachnida	真螨目 Acariformes	1	1	1		
扁形动物门 Platyhelminthes	涡虫纲 Turbellaria	三肠目 Tricladida	1	2	2		
		线形动物门 Nematomorpha	线虫纲 Nematoda	—	1	1	1
合计				84	197	240	

在汉江干流及五条支流的底栖动物种类组成中,水生昆虫均占绝对优势(图2);金水河物种数最多,为135种;旬河物种数最少,为59种.汉江干支流间不同耐受程度的物种数体现为:金水河敏感种最多,金钱河的中度耐污种最多(图3).

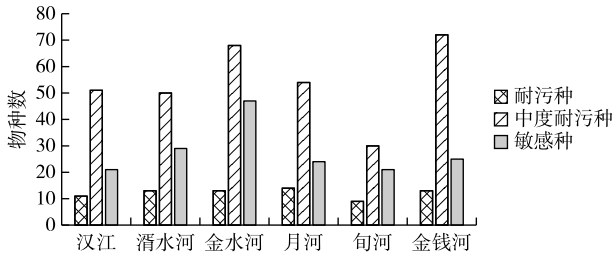


图3 汉江干支不同耐受程度的物种数

Fig.3 Number of species with different tolerance levels in Hanjiang River and its tributaries

2.3 不同类群的密度和生物量

汉江干支流中,不同类群底栖动物的总密度和生物量见图4,各条河流中水生昆虫均为优势类群.汉江干流底栖动物总密度和总生物量分别为143 ind./m²和3.197 g/m²;渭水河底栖动物总密度和总生物量分别为161 ind./m²和0.796 g/m²;金水河底栖动物总密度和总生物量分别为346 ind./m²和3.699 g/m²;月河底栖动物总密度和总生物量分别为325 ind./m²和1.748 g/m²;旬河底栖动物总密度和总生物量分别为59 ind./m²和0.306 g/m²;金钱河底栖动物总密度和总生物量分别为481 ind./m²和1.634 g/m².水生昆虫的密度在汉江干支流中占比在90.8%~98.9%范围内,除汉江干流与月河外,其生物量在其他支流中的占比也均达到87.1%以上.

对不同分类类群密度及生物量进行方差分析表明,底栖动物的总密度($F = 13.728, P < 0.001$)和生物量($F = 8.503, P < 0.001$)、水生昆虫的密度($F = 14.167, P < 0.001$)和生物量($F = 17.377, P < 0.001$)、软体动物的密度($F = 18.881, p < 0.001$)和生物量($F = 9.459, P < 0.001$)以及环节动物的密度($F = 8.543, P < 0.001$)和生物量($F = 10.810, P < 0.001$)在汉江干支流间均存在显著性差异,而其他类群的密度和生物量在汉江干支流间不具有显著性差异(图4).金钱河、金水河和月河中的总密度和水生昆虫的密度显著高于汉江、渭水河和旬河,金水河和汉江干流在总生物量上显著高于其他各支流.软体动物的密度表现为汉江干流断面远高于各支流,而环节动物的密度和生物量在月河、渭水河和金钱河3条支流中相对较高(图4).对不同耐受程度物种的密度和生物量进行方差分析,结果表明中度耐污种的密度占比及敏感种的生物量占比在干支流间具有显著差异(表4).

表4 汉江干支流不同耐受程度物种的密度和生物量占比(平均值±标准差)*

Tab.4 Density and biomass percentage of species with different tolerance levels in the Hanjiang River and its tributaries(Mean±SD)

物种		汉江 (n=7)	渭水河 (n=5)	金水河 (n=5)	月河 (n=5)	旬河 (n=5)	金钱河 (n=5)	F	P
密度占比/%	耐污种	12.4±21.79	4.48±2.06	5.52±5.50	10.02±13.48	29.11±32.15	2.01±1.49	1.702	0.169
	中度耐污种	56.49±12.27 ^{ab}	45.96±7.34 ^b	53.74±3.65 ^b	50.79±12.06 ^b	49.37±16.26 ^b	69.36±10.15 ^a	2.741	0.041
	敏感种	20.62±16.39	42.92±6.02	38.78±5.56	29.78±20.70	21.67±13.40	23.75±10.61	2.566	0.051
生物量占比/%	耐污种	1.63±2.58	2.40±2.26	1.96±1.93	6.02±5.50	3.34±3.63	8.44±8.41	1.499	0.150
	中度耐污种	43.68±28.79	20.17±14.05	33.32±10.81	45.04±27.84	43.01±24.28	32.18±12.84	1.016	0.428
	敏感种	13.96±17.75 ^b	50.16±25.49 ^a	42.78±20.74 ^a	16.50±16.47 ^b	18.33±23.63 ^b	36.87±16.52 ^{ab}	3.148	0.024

* 同一行内上标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$).

汉江及其5条支流优势种和相对丰度见表5,在汉江干流及其5条支流中,四节蜉 *Baetis* sp.均为优势

种,且在汉江、渭水河、金水河、月河和金钱河中为最具优势的种群,相对丰度在 14.8%~24.5%之间,在旬河中的相对丰度也占到 13.3%;其次似动蜉 *Cinygmina* sp.是渭水河、金水河、月河和旬河 4 条河的优势种,相对丰度在 5.5%~9.0%之间;扁蜉 *Heptagenia* sp.在三条河中为优势种;拟细裳蜉 *Paraleptophlebia* sp.、直突摇蚊 *Orthocladius* sp.、纹石蛾 *Hydropsyche* sp.、带肋蜉 *Cincticostella* sp.、蜉蝣 *Ephemera* sp.作为优势种出现在两条河流中;花翅蜉 *Baetiella* sp.和真开摇蚊 *Eukiefferiella* sp.作为优势种仅出现在一条河流中。蜉蝣目的优势种在四条河中占比最大。此外摇蚊科作为优势种出现在渭水河、旬河和金钱河中。毛翅目中的纹石蛾 *Hydropsyche* sp.出现在渭水河和金水河中。

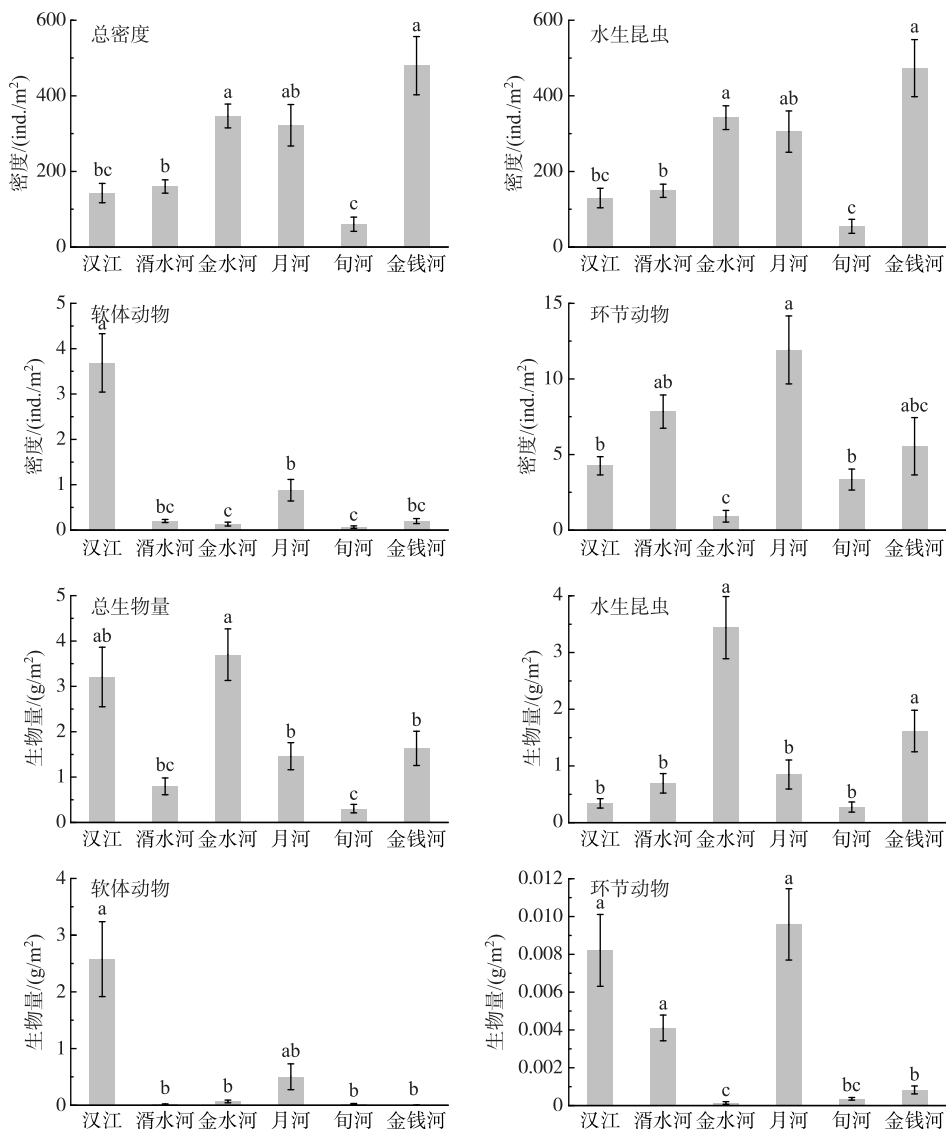


图4 汉江及其5条支流不同类群底栖动物密度和生物量(平均值±标准误)
(字母不同表示存在显著差异($P < 0.05$))

Fig.4 Density and biomass of benthic macroinvertebrate of different groups in the Hanjiang River and its five tributaries (Mean±SE) (Different letters indicate significant differences($P < 0.05$))

表 5 汉江及其支流底栖动物优势种和相对丰度*

Tab.5 The dominant species and relative abundance of macroinvertebrates in the Hanjiang River and its tributaries

河流	优势种和相对丰度
汉江	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(14.8%)、拟细裳蜉 <i>Paraleptophlebia</i> sp.(9.5%)、细蜉 <i>Caenis</i> sp.(6.9%)、扁蜉 <i>Heptagenia</i> sp.(6.6%)、花翅蜉 <i>Baetiella</i> sp.(5.9%)
渭水河	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(24.5%)、直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.(9.4%)、似动蜉 <i>Cinygmina</i> sp.(9.0%)、纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp.(7.1%)、蜉蝣 <i>Ephemera</i> sp.(6.5%)
金水河	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(18.7%)、带肋蜉 <i>Cincticostella</i> sp.(10.8%)、高翔蜉 <i>Epeorus</i> sp.(8.6%)、似动蜉 <i>Cinygmina</i> sp.(5.5%)、纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp.(5.7%)
月河	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(22.5%)、拟细裳蜉 <i>Paraleptophlebia</i> sp.(10.7%) 扁蜉 <i>Heptagenia</i> sp.(7.1%)、似动蜉 <i>Cinygmina</i> sp.(7.1%)、细蜉 <i>Caenis</i> sp.(7.1%)、蜉蝣 <i>Ephemera</i> sp.(7.0%)
旬河	带肋蜉 <i>Cincticostella</i> sp.(20.6%)、四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(13.3%)、扁蜉 <i>Heptagenia</i> sp.(9.6%)、似动蜉 <i>Cinygmina</i> sp.(7.8%)、似波摇蚊 <i>Symptothastia</i> sp.(5.6%)
金钱河	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.(20.7%)、直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.(18.3%)、真开氏摇蚊 <i>Eukiefferiella</i> sp.(7.8%)

* 相对丰度>5%的类群定义为优势种.

2.4 不同功能摄食类群的密度和生物量

汉江干流及其 5 条支流中,直接收集者的密度占比均最大,占比在 51.1%~66.9%范围内,其中金钱河的比例最高,最低为金水河(图 5).而在生物量上,汉江干流及其 5 条支流的功能摄食类群分布则表现出较大的差异:在金水河和旬河中,捕食者最具优势,分别占总密度的 41.5%和 44%,代表物种有广翅目鱼蛉 *Corydalus* sp.、襁翅目 *Agnatina* sp.和纯襁 *Paragnetina* sp.;而在汉江和月河中,刮食者比重最大,分别为 88.1%和 61.7%,代表物种有环棱螺 *Bellamya* sp.;在金钱河中,直接收集者占比最大,占到 40.5%,代表物种有四节蜉 *Baetis* sp.;在渭水河中,滤食者的占比最大,达 39.2%,代表物种有等蜉 *Isonychia* sp..

2.5 底栖动物群落分布与环境因子的关系

经过筛选,发现流速、总磷、电导率为影响汉江干支流底栖动物分布的关键环境因子.模型置换检验具有显著性($P=0.001$),此外前两排序轴具有显著性($P<0.05$),前两轴的特征值为 0.817 和 0.402,共解释了 18.7%(矫正 R^2 值)的群落结构变化.从各因子进入 RDA 分析的顺序及其解释率可知,流速和总磷的解释率相对较高.

从底栖动物群落分布与环境因子之间关系的 RDA 分析结果可以看出(表 6),流速与第一排序轴相关性较高,而总磷与第二轴相关性较高,电导率与两个轴相关性相似. RDA 排序图表明(图 6),环境因子影响了物种的分布.而位于排序图外围的物种,说明它们对特定的环境因子会做出响应,第一轴最大正值的物种为四节蜉 *Baetis* sp.,它受流速影响较大.霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri* 分布在总磷和电导率较高的环境中.而弯握蜉属 *Drunella* sp.、带肋蜉属种 1 *Cincticostella* sp.1、带肋蜉属种 2 *Cincticostella* sp.2、角石蛾 *Stenopsyche* sp.、高翔蜉 *Epeorus* sp.和扁蜉 *Heptagenia* sp.主要分布在流速较高,总磷和电导率较低的金水河断面中.而在第二轴的较大负值的物种有细蜉 *Caenis* sp.、蜉蝣属 *Ephemera* sp.,主要分布在总磷和流速较高的断面中,此类断面中还分布有等蜉 *Isonychia* sp.、拟细裳蜉 *Paraleptophlebia* sp.、小蜉 *Ephemerella* sp.和纹石蛾 *Hydropsyche* sp..

表 6 底栖动物群落分布与环境因子之间关系的 RDA 分析结果

Tab.6 Summary statistics for the Redundancy Analysis (RDA) relating macroinvertebrate communities to environmental variables

环境因子	前选环境因子		与排序轴的相关系数		典范系数	
	<i>F</i>	<i>P</i>	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2
流速	5.417	0.001	0.390	-0.025	1.559	-1.008
总磷	2.415	0.001	-0.160	-0.211	-4.379	-19.639
电导率	1.808	0.033	0.204	-0.178	0.036	-0.660

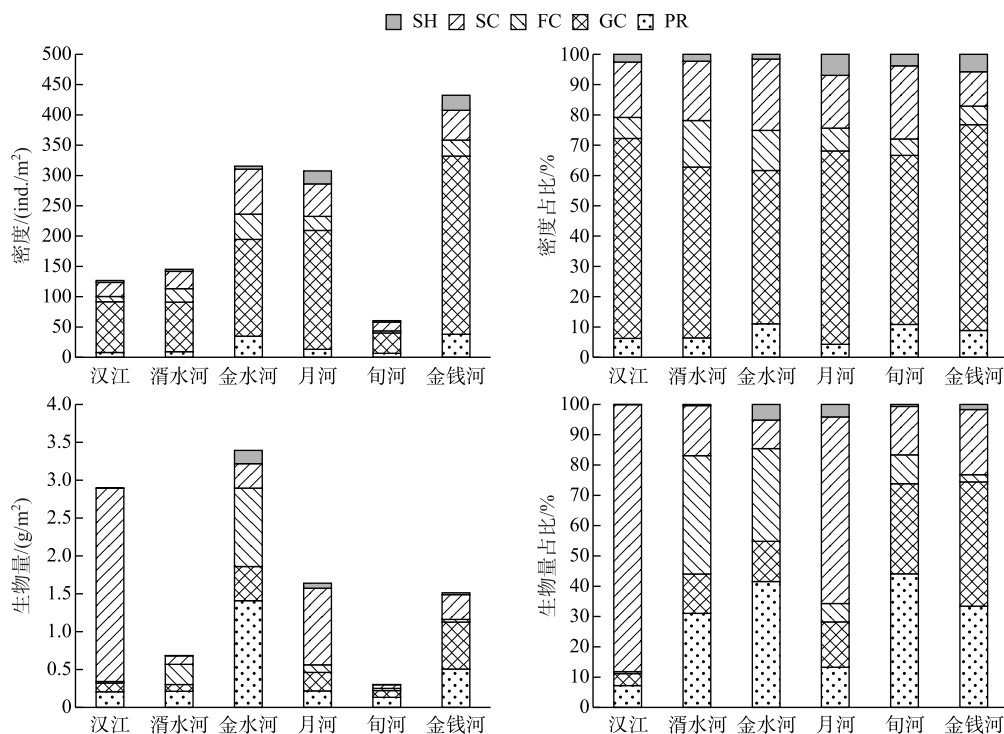


图5 汉江及其5条支流不同功能摄食类群的密度和生物量及其在各河流中的占比
(SH-撕食者; SC-刮食者; FC-过滤收集者; GC-直接收集者; PR-捕食者)

Fig.5 Density and biomass of different functional feeding groups in the Hanjiang River and its five tributaries and their proportion in each river

(SH-Shredders; SC-Scrapers; FC-Collector-filterers; GC-Collector-gatherers; PR-Predators)

2.6 水质生物评价

水质分析采用 Shannon-Wiener 指数与 BI 指数的评价结果(表7),在研究的32个断面中, BI 指数对水质的分析,共有25个断面为“清洁”、6个断面为“轻度污染”和1个断面为“中度污染”。Shannon-Wiener 指数对水质的评价中,共有25个“清洁”、3个“轻度污染”、4个“中度污染”。根据水质分析结果可以看出,水质状况的优劣大致呈现出金水河>金钱河>渭水河>月河>汉江>旬河的趋势。除旬河外,各条支流水质状况均优于汉江干流,且大致呈现出各条河上游水质状况优于下游的趋势。在汉江的个别断面,渭水河、月河下游及旬河的中下游存在着轻度—中度污染,其他断面均为清洁状态。

3 讨论

本次调查中各条支流均发源于秦岭南麓,森林覆盖率较高,生境状况良好,为众多清洁物种提供了生存条件。从调查结果来看,汉江上游的干支流维系了较高的底栖动物多样性,其中金水河、金钱河和月河的底栖动物都超过100种,这3条河流的底栖动物物种多样性和密度都高于汉江上游干流。相较于干流而言,各支流受人类活动影响较小,河流的生境条件较好,河床稳定性和异质性也更高。许多研究表明^[25-29],河床稳定性和生境异质性越高,生物多样性也就越高。

本次调查中,旬河底栖动物的多样性明显低于汉江干流及其他支流,在物种数、密度及生物量上均为6条河流最低。这是由于旬河的大部分调查断面都受到水电站、采石挖砂等人类活动的严重干扰,人类活动干扰对溪流生物的群落结构和功能影响严重^[30-31]。水电站蓄水使得原始河段被淹没,造成河流生境单一化,导致底栖动物的物种数减少^[32]。采石采砂改变了河流理化性质,导致河流的水质污浊,干扰了初级生产者的

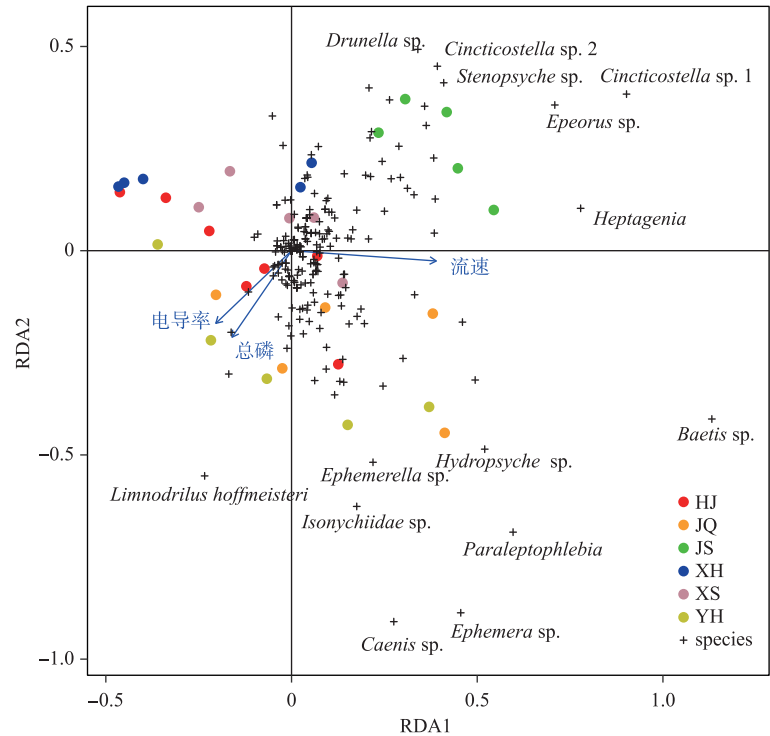


图 6 底栖动物群落结构与环境因子的冗余分析排序图

Fig.6 RDA plots of macroinvertebrate community structure and significant environmental variables

表 7 汉江干流及其 5 条支流中各断面水质生物评价结果

Tab.7 Bioassessment of water quality in sampling sections of the Hanjiang River and its five tributaries

断面	BI	水质级别	H'	水质级别	断面	BI	水质级别	H'	水质级别
HJ-1	3.20	清洁	3.21	清洁	JS-5	2.68	清洁	3.89	清洁
HJ-2	5.41	轻度污染	2.68	轻度污染	YH-1	2.91	清洁	3.31	清洁
HJ-3	3.84	清洁	3.54	清洁	YH-2	3.05	清洁	3.42	清洁
HJ-4	2.62	清洁	3.24	清洁	YH-3	4.09	清洁	3.19	清洁
HJ-5	2.79	清洁	3.21	清洁	YH-4	5.54	轻度污染	2.60	轻度污染
HJ-6	3.77	清洁	1.69	中度污染	YH-5	4.80	轻度污染	3.51	清洁
HJ-7	4.15	轻度污染	3.09	清洁	XH-1	3.20	清洁	3.54	清洁
XS-1	3.46	清洁	3.46	清洁	XH-2	2.56	清洁	3.23	清洁
XS-2	3.07	清洁	3.52	清洁	XH-3	6.42	中度污染	1.60	中度污染
XS-3	3.16	清洁	3.41	清洁	XH-4	3.13	清洁	1.75	中度污染
XS-4	2.69	清洁	3.31	清洁	XH-5	4.50	轻度污染	1.14	中度污染
XS-5	4.40	轻度污染	2.92	轻度污染	JQ-1	4.04	清洁	3.64	清洁
JS-1	2.71	清洁	4.40	清洁	JQ-2	3.39	清洁	4.11	清洁
JS-2	2.82	清洁	4.19	清洁	JQ-3	4.00	清洁	3.57	清洁
JS-3	3.14	清洁	3.93	清洁	JQ-4	3.10	清洁	3.74	清洁
JS-4	2.77	清洁	3.73	清洁	JQ-5	3.47	清洁	3.10	清洁

光合作用,影响了初级生产者的生长,进而影响到底栖动物的食物来源;此外它直接改变了河床的结构,对底栖动物的栖息环境造成直接破坏,直接影响其种类的数量和密度^[33-34]。

干支流中底栖动物的生物量与密度的变化趋势不一致,干流的密度低于大多数支流,而干流的生物量仅少于金水河,相比其他支流较高。相较支流,汉江干流出现了更多的软体动物(图4),以往的研究^[35]表明汉江中下游同样出现了较多的软体动物。软体动物个体生物量较大,使得干流生物量相较支流而言较大。软体动物主要栖息在河床浅水区的泥沙底质中,有机质含量丰富,在水草茂盛的缓流水域环境中,其种类和种群数量往往也越多^[36]。在调查过程中发现,相较各支流而言,汉江干流的绝大部分断面上,河床底质中均含有泥沙,为软体动物提供了适宜的栖息生境。与以往研究相比^[35],汉江上游干流底栖动物的生物量远小于中下游干流的平均水平。这可能与本研究中河流自上而下有机物质的增加有关,丰富的有机质更有利于其生长和发育^[37]。

RDA分析表明流速、总磷、电导率是影响汉江干支流底栖动物群落分布的主要环境因子。流速对底栖动物影响显著,通常急流水域中的含氧量一般达到饱和,适合喜氧型底栖动物栖息;反之,流速缓慢或者静止的水域中含氧量较低,适合需氧量低的底栖动物栖息^[38]。本研究中流速与卵石($r=0.688, P<0.01$)有着显著的相关性,卵石作为河流生境异质性的的重要组成部分,是水生昆虫的主要栖息环境^[39],这也是汉江部分支流底栖动物多样性较高的主要原因。金水河流速较快,生境异质性较高,为适应激流生境的广翅目鱼蛉 *Corydalus* sp.、襁翅目 *Agnetina* sp.和纯襁 *Paragnetina* sp.等捕食者提供了生存环境,捕食者是金水河中主要功能摄食类群,其分布状况受水环境和流速影响较大^[40]。在流速分布较缓的断面(如汉江干流及旬河下游河段)则主要分布了一些寡毛类及摇蚊,它们大部分属于直接收集者,在流速较缓的状况下便于获取沉降的有机细颗粒^[40]。而在流速相对适中的断面(如渭水河)适宜依靠水流作用获取食物的滤食者栖息^[41]。耐污种霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri* 的密度与水体中总磷浓度呈现正相关,而清洁种弯握蜉 *Drunella* sp.和角石蛾 *Stenopsyche* sp.等则与水体中的总磷浓度呈现负相关关系,此外总磷浓度还与其他营养盐相关性较高,如总氮($r=0.407, P<0.05$)和氨氮($r=0.438, P<0.01$),表明营养盐的增加在一定程度改变了底栖动物群落的空间分布格局,这也与以往的研究结论一致^[42]。

水质生物评价等级与不同耐受程度物种现存量高低呈现的趋势基本一致,主要表现为金水河与金钱河水质较好,旬河水质相对较差,大部分支流水质状况优于汉江干流,RDA分析也表明大部分支流断面中清洁物种分布较多,说明这些区域水质状况良好。此外,各条河流水质状况大致呈现出上游优于下游的趋势,汉江干支流均发源于山区,其上游人类活动影响较小,随着河流从上游向下游过渡,人类活动加剧,对河流健康也产生了影响^[43-44]。从分析结果可知,在汉江下游、月河下游及旬河下游断面,BI指数和Shannon-Wiener多样性指数对水质的评价结果表现出一定的差异性。这与两种指数对水质的评价方式有关,Shannon-Wiener指数对水质的分析主要考虑底栖动物群落的结构,并未考虑物种耐污能力的区别;而BI生物指数主要考虑了物种的耐污程度^[45]。由此可见,水质生物评价应该选择合适的参数对其进行分析,可结合多参数的特点相互参考,互相补充。本文通过底栖动物对水质进行评价,而Li等^[9]通过水环境参数及人类活动干扰程度对断面的水质进行分类,其对两条支流水质评价结果与本文基本一致,但考虑到水环境参数的瞬时性和人类活动干扰强弱的模糊性,相较之下水质生物评价更为可靠,因为底栖动物的状况反映着环境效应的综合影响,表征了长期的水质状况。但在今后的水质生物评价中,可以将水环境参数及人类活动干扰程度考虑进来,从而得到更为客观的评价结果。

根据对汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的底栖动物群落特征分析、水质状况及结合现场调查实际情况,对该区域的生态管理提出以下几点意见:1、加强环境监督,减少对天然河流的人为干扰,特别是减少对河段的采石挖砂等破坏性的人类活动;2、加强汉江上游流域点源面源污染的治理,从源头加强对水源地的保护;3、合理进行水电开发,水电开发有利于促进地区经济的发展,合理地开发和利用减少对区域生态的不利影响;4、加强区域大型底栖动物的调查、监测及研究,完善水环境评价体系,为区域研究开展提供理论和研究基础,为相关部门提供决策参考。

4 参考文献

- [1] Xin JF. Study on watershed water ecological carrying capacity of upper reaches of Hanjiang River (Shaanxi Section) [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. [辛晋峰. 汉江上游(陕西段)流域水生态承载力研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.]

- 论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.]
- [2] Liu ZX. Water quality status and governance enhancement path in the upper reaches of Hanjiang River. *Water Resources and Development Research*, 2016, **16**(8): 75-77. [刘宗显. 汉江上游水质现状及治理强化路径. 水利发展研究, 2016, **16**(8): 75-77.]
- [3] Wu WJ. Forecast of the impact of Xunyang hydropower station to Ankang's water source and the water quality in the overall reservoir in the upper reaches of Hanjiang River [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. [吴文娟. 汉江上游旬阳水电站对安康水源地的影响及库区整体水质预测研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2009.]
- [4] Li TY, Yin JX, Zhang LL *et al.* Analysis on runoff evolution trend of upper Hanjiang River and its influential factors. *Yan-gtze River*, 2011, **42**(9): 19-22. [李桃英, 殷峻暹, 张丽丽等. 汉江上游径流演变趋势及影响因素分析. 人民长江, 2011, **42**(9): 19-22.]
- [5] Zhang WC. Study on health evaluation and water ecological restoration of Pingchuan section in Han River [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. [张伟超. 汉江汉中平川段河流健康评价及水生态修复研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2018.]
- [6] Chen L, Wang DB, Jun S. Macroinvertebrate community structure and relationships with environmental factors in the Lhasa River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 4-16. [陈丽, 王东波, 君珊. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2019, **39**(3): 4-16.]
- [7] Liang YL, Wang HZ. Benthic Animals (Chapter 10). In: Liu JK ed. *Advanced aquatic biology*. Beijing: Science Press, 1999: 241-259. [梁彦龄, 王洪铸. 底栖动物(第十章). 见: 刘建康编. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999: 241-259.]
- [8] Morley SA, Duda JJ, Coe HJ *et al.* Benthic invertebrates and periphyton in the elwha River Basin: Current conditions and predicted response to dam removal. *Northwest Science*, 2008, **82**(1): 59-72.
- [9] Li ZF, Wang J, Liu ZY *et al.* Different responses of taxonomic and functional structures of stream macroinvertebrate communities to local stressors and regional factors in a subtropical biodiversity hotspot. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 1288-1300.
- [10] Wang XZ, Tan X. Macroinvertebrate community in relation to water quality and riparian land use in a subtropical mountain stream, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(17): 14682-14689.
- [11] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [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: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [12] Brinkhurst RO ed. *Guide to the freshwater aquatic microdrile oligochaetes of North America*. Canada: Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 84, 1986.
- [13] Dudgeon D ed. *Tropical Asian Streams: Zoobenthos, ecology and conservation*. vol. 1. Hong Kong: Hong Kong University Press, 1999.
- [14] Epler JH. Quality NCDOW. *Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina: A Guide to the Taxonomy of the Midges of the Southeastern United States, Including Florida*. St. Johns River Water Management District, 2001.
- [15] Liu YY, Zhang WZ, Wang YX *et al* eds. *Freshwater Molluscs of Chinese Economic Fauna*. Beijing: Science Press, 1979.
- [16] Morse JC, Yang L, Tian L eds. *Aquatic insects of China useful for monitoring water quality*. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [17] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al.* *Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable River: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish (2nd edition)*. Washington, DC: US EPA, Office of Water, 1999: B1-B50.
- [18] Wetzel RG, Likens GE. *Limnological analyses*. The Quarterly Review of Biology. Springer, 2000: 101.
- [19] Leps J, Smilauer P. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. London: University of Cambridge Press, 2003.
- [20] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.
- [21] Wang BX. Water quality bioassessment using benthic macroinvertebrates [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. [王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2003.]

- [22] Zhao R, Gao X, Ding S *et al.* Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(14): 4797-4809. [赵瑞, 高欣, 丁森等. 辽河流域大型底栖动物耐污值. 生态学报, 2015, **35**(14): 4797-4809.]
- [23] Wang JG, Huang HB, Yang MX *et al.* Tolerance values of benthic macroinvertebrates and bioassessment of water quality in the Lushan Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, **9**(3): 279-284. [王建国, 黄恢柏, 杨明旭等. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价. 应用与环境生物学报, 2003, **9**(3): 279-284.]
- [24] Huang YY, Teng DX. Application of large invertebrate community structure characteristics and its diversity index to monitor the pollution of the canal. *Sinozoologia*, 1982, (2): 133-146. [黄玉瑶, 滕德兴. 应用大型无脊椎动物群落结构特征及其多样性指数监测蓟运河污. 动物学集刊, 1982, (2): 133-146.]
- [25] Shumway CA, Hofmann HA, Dobberfuhl AP. Quantifying habitat complexity in aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, 2007, **52**(6): 1065-1076.
- [26] Zhao N, Wang ZY, Pan BZ *et al.* Ecological functions of riverbed structures with different strengths in the Xiaojiang River basin. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2014, **54**(5): 584-589. [赵娜, 王兆印, 潘保柱等. 小江流域不同强度河床结构的生态学作用. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, **54**(5): 584-589.]
- [27] Pan BZ, Wang ZY, Yu GA. Assemblage characteristics of macrozoobenthos in the source region of the Yangtze River and the source region of the Yellow River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(3): 369-374. [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. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 369-374.]
- [28] Duan XH, Wang ZY, Cheng DS. Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(4): 1664-1672. [段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. 生态学报, 2007, **27**(4): 1664-1672.]
- [29] Zhu PH, Pan BZ, Li ZW *et al.* Macroinvertebrate communities characteristics and their responses to fluvial geomorphological feature of typical debris flow gullies in the Xiaojiang River Basin, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 869-880. DOI: 10.18307/2019.0325. [朱朋辉, 潘保柱, 李志威等. 云南小江流域典型泥石流沟中底栖动物群落特征及其对河流地貌的响应. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 869-880.]
- [30] Usseglio-Polatera P, Bournaud M, Richoux P *et al.* Biomonitoring through biological traits of benthic macroinvertebrates: how to use species trait databases? *Assessing the Ecological Integrity of Running Waters*, 2000, **422/423**: 153-162.
- [31] Dolédec S, Statzner B. Invertebrate traits for the biomonitoring of large European rivers: an assessment of specific types of human impact. *Freshwater Biology*, 2008, **53**: 617-634.
- [32] Sharma CM, Sharma S, Borgstrom R *et al.* Impacts of a small dam on macroinvertebrates: A case study in the Tinau River, Nepal. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2005, **8**(3): 267-275.
- [33] Erftemeijer PLA, Lewis RRR. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **52**(12): 1553-1572.
- [34] Nairn R, Michel J. A biological and physical monitoring program to evaluate long-term impacts from sand dredging operations in the United States outer continental shelf. *Journal of Coastal Research*, 2009, **20**: 126-137.
- [35] Chi SY, Cheng S, Wang HJ *et al.* Zoobenthos communities in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(5): 82-90. [池仕运, 陈胜, 汪红军等. 汉江中下游底栖动物群落结构特征研究. 水生态学杂志, 2014, **35**(5): 82-90.]
- [36] Liu J. Biodiversity of Mollusca in the Xiang River [Dissertation]. Changsha: Hunan Normal University, 2006. [刘俊. 湘江软体动物多样性研究[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2006.]
- [37] Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW *et al.* The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**: 130-137.
- [38] Ren QH, Yuan XZ, Liu H *et al.* The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(10): 3148-3156. [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. 生态学报, 2015, **35**(10): 3148-3156.]
- [39] Chen HM, Qu XD, Wang F. Research progress of river dynamic influences on the distribution of macroinvertebrates. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(5): 758-765. [陈含墨, 渠晓东, 王芳. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 758-765.]

- [40] Jiang WX, Cai QH, Tang T *et al.* The functional feeding group ecology of macroinvertebrate in Xiangxi River system. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5207-5218. [蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛等. 香溪河水系大型底栖动物功能摄食类群生态学. 生态学报, 2009, **29**(10): 5207-5218.]
- [41] Fu XC, Tang T, Jiang WX *et al.* Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(1): 45-52. [傅小城, 唐涛, 蒋万祥等. 引水型电站对河流底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2008, **28**(1): 45-52.]
- [42] Wu DH, Yu HY, Wu HY *et al.* Estimation of river nutrients thresholds based on benthic macroinvertebrate assemblages: A case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 483-488. [吴东浩, 于海燕, 吴海燕等. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 483-488.]
- [43] Xiao SC, Xiao HL. Advances in the study of the water regime process and driving mechanism in the Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(7): 748-755. [肖生春, 肖洪浪. 黑河流域水环境演变及其驱动机制研究进展. 地球科学进展, 2008, **23**(7): 748-755.]
- [44] Moya N, Hughes RM, Eduardo D *et al.* Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(3): 840-847.
- [45] Jiang XM, Cheng JL, Xiong J *et al.* Macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality in pohe stream, one of the headwater streams of Huanggai lake water network. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(9): 1040-1046. [蒋小明, 程建丽, 熊晶等. 黄盖湖水系河源区——蟠河大型无脊椎动物群落与水质评价. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(9): 1040-1046.]