

DOI: 10.5846/stxb201804120838

韩洁, 宋蒙蒙, 张杰, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 浑河流域大型底栖动物摄食功能群对栖息地环境的选择适应性. 生态学报, 2019, 39(6): - .

Han J, Song M M, Zhang J, Yin X W, Xu Z X, Zhang Y. Selective adaptations of macrobenthic functional feeding groups in the Hunhe River basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

浑河流域大型底栖动物摄食功能群对栖息地环境的选择适应性

韩 洁¹, 宋蒙蒙¹, 张 杰¹, 殷旭旺^{1,*}, 徐宗学², 张 远³

1. 大连海洋大学, 水产与生命学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023

2. 北京师范大学, 水科学研究院, 北京 100875

3. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012

摘要: 在生态系统中特定的环境变量组合对应着特定的物种群落结构。栖息地环境的不同, 大型底栖动物的分布和所表现出的生物学特征也存在差异。本研究在浑河流域选取 22 个点位进行调查, 通过对大型底栖动物进行功能群分类并结合生物性状分析(BTA, Biological Traits Analysis)对浑河流域不同大型底栖动物摄食功能群对栖息地环境的选择适应性进行研究。研究结果表明: 捕食者功能群主要以毛翅目为主; 直接收集者功能群主要以双翅目为主; 刮食者功能群主要以基眼目为主; 过滤收集者多为颤蚓目。浑河流域不同大型底栖动物摄食功能群存在明显的空间差异, 典范对应分析结果显示: 影响捕食者功能群的驱动因子是流速, 直接收集者功能群的驱动因子是 IOS 指数, 刮食者功能群的驱动因子是溶解氧; 过滤收集者功能群的驱动因子是溶解氧和电导率。生物性状分析结果显示: 捕食者功能群身体上附有一层硬壳保护, 可在水中自由活动, 多分布流速较快, 底质复杂的小鹅卵石、圆石的底质中; 直接收集者只有头壳具有较厚的甲壳质壁, 头部口器不能直接摄食, 所以多以微粒有机颗粒为主, 分布在石块、部分圆石以及部分粗砂中; 刮食者多以藻类、菌类等为食, 足腺多分泌粘液, 多粘附在较深流速缓慢, 底质多为细沙粗粒, 食物来源充足的水体; 过滤收集者喜栖于淤泥底质中, 吸食淤泥或过滤有机碎屑, 故多分布于淤泥与细沙底质中。

关键词: 底栖动物; 摄食功能群; 生物性状; 栖息环境; 选择适应性

Selective adaptations of macrobenthic functional feeding groups in the Hunhe River basin

HAN Jie¹, SONG Mengmeng¹, ZHANG Jie¹, YIN Xuwang^{1,*}, XU Zongxue², ZHANG Yan³

1 Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

2 College of water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The combination of specific environmental variables in an ecosystem corresponds to a specific species community structure. There are also differences in the distribution of macrobenthos and their biological characteristics. In this study, 22 sites in the Hunhe River basin were selected for investigation. The functional macrobenthic feeding groups were grouped together with biological traits analysis (BTA) to identify the habitat and adaptations of different functional feeding groups in the Hunhe River basin. The results showed that spatial differences between different functional feeding groups were significant. The predator group was mainly from the order Trichoptera, the collector-gatherers were dominated by Diptera,

基金项目: 辽宁省优秀人才支持计划项目(LR2015009); 国家自然科学基金(51279005); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(NO. 2015ZX07202012)

收稿日期: 2018-04-12; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

and the scrapers were mainly Basommatophora. Most of the collector-filterers belonged to Tubificida. Canonical correspondence analysis results showed that the driving factor affecting the predator group was the flow rate, that for the collector-gatherers was the IOS index, that for the scrapers was dissolved oxygen, and that for the collector-filterers were dissolved oxygen and conductivity. The results of the BTA showed that the predator functional group had a layer of hard-shell protection, could move freely in water, and redistribute quickly in the small pebbles and cobblestones with fast flow velocity and complex sediments. The collector-gatherers had a thicker shell. Their chitinized heads and mouthparts meant that these organisms could not feed directly, and scavenged organic particles distributed mainly in the coarse sand and on round stones. Scrapers mostly fed on algae, fungi, etc. Their foot glands secrete mucus, by which they can adhere to shore or underwater sediments. These species are found in areas with slower flow rates, with mostly fine sandy bottoms and abundant food sources. Collector-filterers like to roost in silt, sucking mud or filtering organic debris. The type of sediment is mostly silt and fine sand.

Key Words: macrobenthos; functional feeding group; biological traits analysis; habitat ; selective adaptation

在自然界生物与周围环境有着密切的关系,生物与环境之间不断地进行交互作用,进而形成一个稳定的生态系统^[1]。在水生态系统中,大型底栖动物是河流中分布最为广泛的类群之一且存活时间较长^[2-3]。大型底栖动物对于环境条件的变化较为敏感^[4],不同大型底栖动物类群对于栖息地和食物选择等具有不同的要求^[5],栖息地环境的改变会影响大型底栖动物群落的组成、分布以及多样性^[6]。Dolédéc 提出:物种的出现具有较强的随机性,而分析生物性状则可以更深入的了解物种与栖息环境的相关性^[7]。Beauchard^[8]也曾指出:在底栖动物的研究中,生物性状与栖息环境的关系更应得到重视。生物性状是物种在自然选择压力与胁迫因子下长期作用的结果^[9],因此物种的生物学特性具有测量群落功能多样性的潜力,以及评价和预测生物群落受干扰后群落功能的变化趋势,从而间接反映生态系统功能多样性的变化趋势^[10-11]。底栖动物在不同的栖息环境下呈现出不同的生物学特征,生物性状的改变及频率都和相关环境条件有关^[12]。

特定的环境变量组合往往对应着特定的底栖动物群落结构^[13],殷旭旺^[6]在太子河流域研究表明:水体流量的不同会影响大型底栖动物的分布。王博涵^[14]在济南河流中的研究发现:在淮河和黄河不同流域内影响大型底栖动物群落分布的环境因子不同。Richards 的研究表明:河段尺度上的水沙变量对底栖动物群落结构具有非常强的预测性,不同的水沙环境下底栖动物群落构成差异显著^[15]。利用生物性状特征作为评价指标的标准,探求大型底栖动物群落与环境之间的协同关系,可以进一步的对大型底栖动物群落进行相关性研究^[16]。

对于大型底栖动物的研究多采用群落结构参数来进行一系列的评价,有研究指出:传统的群落结构研究对生态系统的性能提供了相当有限的信息,而物种功能群与生态系统之间的相关性相对于群落结构更为紧密^[17]。功能群是将生物类群划分成具有相同功能,或者利用相同资源的类群。功能群分类方式在一定程度上降低对物种分类的鉴定要求,弱化了群落内种类之间的关系,强调了功能群的集体作用^[18]。大型底栖动物群落结构构成具有较强的功能特性,功能群对于研究大型底栖动物群落结构和功能组成具有重要作用^[19]。基于大型底栖动物获取食物来源的形态学和行为适应的摄食功能群(FFG)分类方法已经作为评估环境条件对水生生物影响的重要工具^[20]。研究大型底栖动物功能群可以更有效地反映生物与环境的关系^[21]。

浑河发源于清源县长白山支脉滚马岭,流经辽宁中部城市群,是沿岸城市废水排放的主要通道。浑河上游建有大伙房水库,水库以上区域为低山丘陵,森林覆盖率高;中下游为平原地区,河网交错,土地开发利用程度较高;下游河口段地势低洼,水面宽阔^[22],生境特征明显。本研究以浑河作为研究对象,使用生物性状分析(Biological traits analysis,简称为 BTA)与传统的多样性分析相结合,对浑河流域大型底栖动物与其栖息环境进行研究。通过对不同功能群的底栖动物生存环境进行调查,分析浑河流域大型底栖摄食功能群结构的变化规律,了解底栖生物与栖息地之间的相关性,为浑河流域生态环境保护和环境管理提供基础数据,也为进一步制定

保护方案提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点设置

浑河水系(40°20′—41°00′N,122°20′—125°21′E)位于辽宁省东部地区,流域面积 $1.14\times 10^4\text{ km}^2$,全长 415 km。本研究于 2012 年 5 月—6 月在浑河流域根据底质类型、流速、水深等条件选取 22 个采样位点(采样点设置如图 1)并以此为依据进行分组(分组情况如表 1)对河流的栖息地环境生态进行监测,并采集大型底栖动物样品。

表 1 浑河流域点位以及功能群分布

Table 1 Sediment type and hydrological parameter different location in Hunhe River						
点位 Size	所处河流 River	底质类型 Sediment type	水深 Depth/cm	流速 Speed/(m/s)	主要功能群 Functional group	代表种群 Representative group
组 1:H1—H5	苏子河段	小鹅卵石、圆石以及粗砂粒	17—35.5	0.6—5.5	PR	毛翅目
组 2:H6—H10	红河、英额河段	石块、部分圆石及部分粗砂粒	5.7—32	0.35—1.7	GC	双翅目
组 3: H11—H16、H18	浑河中游	粗砂砾和细砂砾	2—200	0.1—0.3	SC	基眼目
组 4: H19—H22、H25	浑河下游	淤泥和细沙	30—400	0.1—0.4	FC	颤蚓目

PR:捕食者, *Predator*; GC:直接收集者, *Collector-gatherers*; SC:刮食者, *Scrapers*; FC:过滤收集者, *Collector-filterers*。H1—H25,是采样点,请参看图 1

1.2 生物数据的采集与鉴定

1.2.1 采集方法

在选定的点位 100 m 的范围内,采用索伯网(网口为 40 cm×40 cm,网孔径为 500 μm)随机采集 2 个平行样本。将采集的样本放入 60 目网筛中筛洗,通过人工挑出动物活体并将其放入 70% 的酒精中保存,带回实验室在显微镜(OLYMPUS-CX21)或解剖镜(OLYMPUS-SZX7)下进行分类和计数,依据相关的文献资料^[23-25]进行样品鉴定,尽量鉴定到最低分类单元。

1.2.2 生境指标

生境指标主要测量了水深、流速、电导率、总溶解固体、水体硬度以及底质类型。其中水深、流速使用流速仪(FP111)当场进行测量;电导率(Cond)、总溶解固体(TDS)均用水质分析仪(YSL Pro 2000)进行当场测量。选取 2 L 的水样,4℃ 保存 48 小时内运送回实验室,根据标准方法^[26]测定水体硬度(TD)、溶解氧含量(DO)。

底质的测定使用分样筛和量杯采集并测量不同粒径的底质体积,底质标准按漂石(>256 mm),大卵石(128—256 mm),小卵石(64—128 mm)大圆石(32—64 mm),小圆石(16—32 mm),粗粒(8—16 mm),细粒(4—8 mm),砂(<4 mm)。根据公式^[28]计算底质指数(IOS)=0.08%漂石+0.07%大卵石+0.06%小卵石+0.05大圆石+0.04%小圆石+0.03%粗粒+0.02%细粒+0.01%沙。

其余生境信息根据河流栖息地生境评价指标^[29]进行当场人工记录。为减少误差,所有点位均有一人负责。

1.3 功能群的划分

功能摄食群的概念最早由 Cummins^[30]在 20 世纪 70 年代提出,按照其理论根据食性类型将浑河的底栖

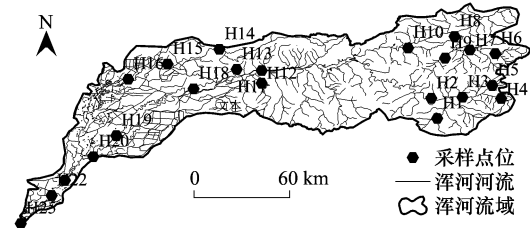


图 1 浑河流域采样点分布

Fig.1 The sampling sites distribution in Hunhe River

动物分为以下 5 类功能摄食类群(表 2):

- (1)捕食者(Predator, PR)以捕食其他水生动物为食。
- (2)直接收集者(Collector-gatherers, GC)主要收集河底的各种有机细颗粒(>0.45mm 且<1mm 的有机物颗粒)为食。
- (3)刮食者(Scrapers, SC)主要以各种营固着生活的生物类群为食。
- (4)过滤收集者(Collector-filterers, FC)主要以各种细有机颗粒为食。
- (5)撕食者(Shredders, SH)主要以各种凋零物和粗有机颗粒(有机物粒径>1 mm)为食。

1.4 生物性状(BTA)分析

根据 Bremner 等人^[11, 31]的研究,对底栖生物按生活史、形态、生活适应和行为等特征进行分类。并根据浑河流域出现的大型底栖动物实际特点,确定大型底栖动物以生活方式、身体构造、摄食方式和生殖模式为主的 4 类生物性状进行分析(表 2)。

表 2 大型底栖动物群落生物性状变量与分类
Table 2 Biological trait variables and categories used to describe functioning diversity of macrobenthic communities

生物性状 Trait	分类 Category	代表种群 Representative group	生物性状 Trait	分类 Category	代表种群 Representative group
生活方式 Life style	底埋型(埋在水底泥中)	颤蚓目	摄食方式	捕食者	毛翅目
	钻蚀型(钻入木石或水生植物茎叶中)	双翅目	Feeding methods	直接收集者	双翅目
	底栖型(在水底土壤表面生活,稍微活动)	基眼目		撕食者	十足目
	自由移动型	毛翅目		刮食者	基眼目
身体构造	软体	颤蚓目		过滤收集者	颤蚓目
Body design	软保护	基眼目	生殖模式	无性繁殖	颤蚓目
	外骨骼	毛翅目 双翅目	Reproductive modes	有性繁殖(包括胎生和产卵)	毛翅目 双翅目 基眼目

1.5 数据处理

应用多响应置换过程(multi-response permutation procedures, MRPP)分析浑河大型底栖动物群落结构的空
间异质性。计算各点位大型底栖动物的各类生物指数,包括 Margalef 种类丰度、Pielou 均匀度指数、Shannon-Winner 多样性指数,并对以上指标作为参数在浑河流域底质指数不同的河段下进行单因素方差分析(one-way ANOVA),若 P 值小于 0.05,则差异性显著。对底栖物种密度首先进行除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA),得出物种的单峰影响值梯度 SD,若 $SD>2$,则进行典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),若 $SD<2$,则进行冗余度分析(Redundancy Correspondence Analysis, RDA)。同时对数据进行 9999 次蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo Test, MCT),来判断显著影响浑河流域底栖动物群落分布特征的环境因子($P<0.05$)。对于出现的物种进行优势度计算,根据公式: $Y=(n_i/N)/f_i$,式中 N 为各断面中所有底栖动物的栖息密度的四次方根; n_i 为物种 i 的栖息密度; f_i 为物种 i 在各点位出现的频率, $Y>0.02$ 则为优势种。为减小种间数量差异对计算结果的影响,对各物种的栖息密度均进行四次方根转化^[32]。

用 SPSS 16.0 进行相关数据分析,多响应置换过程分析在 PC-ORD 5.0 上进行分析,DCA 和 CCA 在 Canoco 4.5 上进行,香农威纳指数和均匀度指数计算在 Biodiversity pro 上进行,柱状图与箱体图分析 OriginPro 7.5 上进行。除 pH 以外,所有水体环境数据和底栖群落结构数据均进行数据对数转换 $[\log_{10}(x+1)]$ 。

2 结果

2.1 大型底栖动物物种组成

本次共采集到大型底栖动物 48(属)种,隶属 5 纲 8 目 22 科,流域整体以节肢动物为主,其次是环节动

物。常见物种为三带环足摇蚊(*Cricotopus trifasciatus*)、三轮环足摇蚊(*Cricotopus triannulatus*)、双线环足摇蚊(*Cricotopus bicinctus*)、克拉伯水丝蚓(*Limnodrilus claparedeianus*)。其中组 1 的物种密度平均值为 1327 个/ m^2 ;组 2 物种密度平均值为 742 个/ m^2 ,组 3 物种密度平均值为 205 个/ m^2 ,组 4 平均物种密度平均值为 703 个/ m^2 。多重比较结果显示大型底栖动物群落结构在不同的栖息环境下具有显著的差异($P<0.01$)。

MRPP 结果显示浑河不同分组点之间底栖生物群落具有明显的空间异质性($P<0.001$)。根据箱体图结果显示:组 1 与组 3、组 3 与组 4 在香农-威纳指数与均匀度指数上具有差异(图 2)。

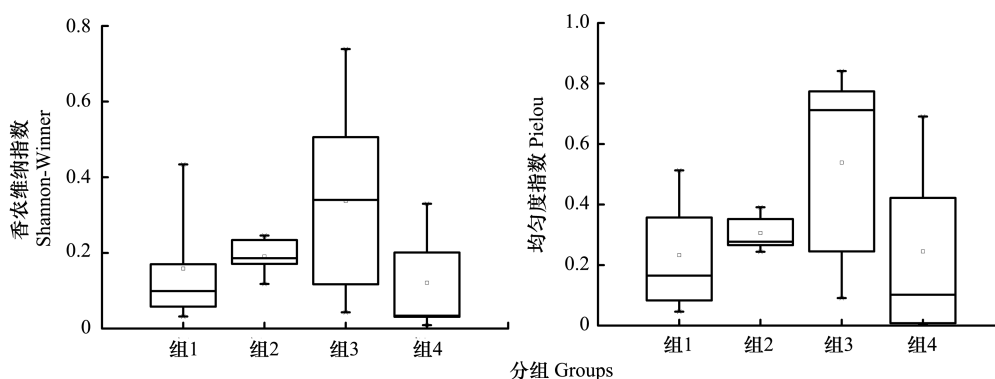


图 2 大型底栖动物群落结构特征的比较分析

Fig 2 Comparison of community structure of macroinvertebrates

2.2 大型底栖动物摄食功能群结构

浑河共出现 5 种底栖摄食功能群,主要以直接收集者功能群(11 种)为主,主要为双翅目,物种数量占采集样品总数的 64.46%,该功能群主要以双线环足摇蚊(*Cricotopus bicinctus*)和三轮环足摇蚊(*Cricotopus trifasciatus*)为主,分别占总功能群物种数量的 44%和 35.16%,优势度分别为 0.16 和 0.08;其次是过滤收集者(6 种),主要为颤蚓目,物种数量占总样品数的 21.51%,主要物种为克拉伯水丝蚓(*Limnodrilus claparedeianus*)占总功能群物种数量的 92.33%,优势度为 0.22;捕食者(20 种)主要为毛翅目占总样品数的 12.3%,该功能群主要以纹石蛾科(*Hydropsychidae*)为主,占总功能群物种数量的 45.48%,优势度为 0.07;刮食者(9 种)主要为基眼目,占总采集样品数的 1.98%,主要以铜锈环菱螺(*B. aetuginosa*)为主占总功能群物种数量的 67.8%,优势度为 0.067;撕食者 2 种(由于撕食者种类较少,且生物量与密度较少,无法辨别其是否存在规律性,故本文将不对此功能群展开研究)。

图 3 为各功能群在不同分组中所占的比重。结果表明:组 1 中 PR>GC>SH>FC,组 2 中 GC>PR>SH>FC,组 3 中 SH>GC>PR>FC,组 4 中 FC>GC>SH>PR。PR 功能群多分布在底质类型为小鹅卵石、圆石以及粗细沙中;GC 功能群多分布在石块、部分圆石以及部分粗砂中;SC 功能群多分布在粗砂粒与细沙粒中;而 FC 功能群则分布在淤泥与细沙的底质中。并且多重比较结果显示在不同栖息环境之间大型底栖动物的摄食功能群结构具有显著差异($P<0.01$)。

2.3 不同底质类型环境因子的差异

根据 SPSS 单因素方差分析不同点位分组之间的部分栖息环境的差异性(表 3)。除流速和溶解氧含量外,其他各项因子均在各分组点位呈现显著的差异性。

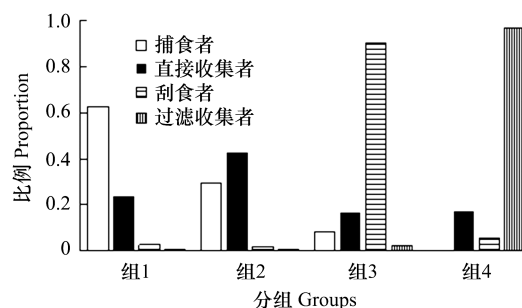


图 3 不同底质类型底栖摄食功能群结构

Fig.3 Structure of functional feeding groups under different IOS

表 3 不同底质类型环境因子比较 (平均值±标准差)

Table 3 Comparison of different IOS environment factors in Hunhe River (Mean± SD)					
项目 Item	组 1 Group 1	组 2 Group 2	组 3 Group 3	组 4 Group 4	P 值 Pvalue
IOS	4.50±0.99	4.09±0.71	0.96±0.22	0.36±0.06	<0.01
D	23.19±3.19	18.18±4.7	118.85±31.62	221.67±50.26	0.01
V	1.71±0.95	0.91±0.23	0.15±0.028	0.16±0.049	0.057
Cond	169.98±25.5	176.80±21.8	590.1±116.2	421.70±279.0	<0.01
TDS	125.45±15.01	134.29±14.45	387.72±80.88	445.25±19.91	<0.01
TH	616.60±102.2	536.30±43.6	1107.64±93.45	1181.25±56.07	<0.01
HES	134.20±5.17	138.60±13.74	102.00±7.58	102.00±4.91	0.006
DO	11.18±0.71	10.88±1.38	11.33±4.87	7.76±3.42	0.287

IOS:底质指数,Index of the substrate; D:水深,Depth; V:流速,Velocity; Cond:电导率,Conductivity; TDS:总溶解固体,Total dissolved solid; TH:硬度,total hardness; HES:栖息地评价,Habitat evaluation system; DO:溶解氧含量,Dissolved oxygen content

对浑河流域 22 个采样点位进行除趋势对应分析 (DCA),其物种的单峰影响值梯度为 4.260 (SD>2),表明浑河流域底栖群落结构对生态梯度的响应是非线性的,因此运用典范对应分析对浑河流域的水文条件及水环境因子进行分析,筛选影响底栖动物群落分布的因子。CCA 结果显示:IOS 指数 ($P=0.029$, $F=1.435$)、总溶解固体 TDS ($P=0.03$, $F=1.685$)、电导率 ($P=0.001$, $F=1.564$) 是影响底栖动物分布的主要因子。

根据 CCA 结果显示 (图 4):PR 功能群的驱动因子是流速,SC 功能群的驱动因子是溶解氧;FC 功能群的驱动因子是溶解氧和电导率,GC 功能群的驱动因子是 IOS 指数。

2.4 不同功能群 BTA 差异

优势类群主导底栖动物群落结构^[33],Tomanova^[34]在研究中发现不同的底栖群落在属之间具有相似的栖息环境。因此根据表 2 中所列的 3 类生物性状以及相关书籍与参考文献^[1,6,23-25]对浑河所出现底栖摄食功能群选取具有代表性的优势种进行生物性状分析与划分 (表 4)。浑河流域底栖生物不同功能群主要分布在不同的生境中,并且不同功能群的底栖动物在生物性状上均呈现明显不同。

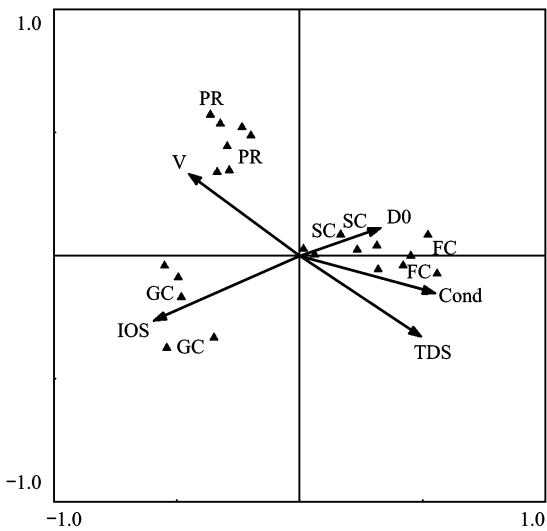


图 4 底栖功能群与环境因子的相关性分析

Fig. 4 Concordance between functional feeding groups and species-environmental relationships

表 4 浑河流域底栖摄食功能群主要物种 BTA 比较分析

Table 4 Comparison BTA between functional feeding groups in Hunhe River																
项目 Item	功能群 Functional groups															
	PR				SC				FC				GC			
	毛翅目				双翅目				基眼目				颤蚓目			
优势物种分布情况 (百分比)	组 1	组 2	组 3	组 4	组 1	组 2	组 3	组 4	组 1	组 2	组 3	组 4	组 1	组 2	组 3	组 4
	62.4	29.5	8.09	0	23.5	42.6	16.6	17.2	27.3	1.83	83.9	5.5	0.58	0.16	2.57	96.7
身体构造	外骨骼 (硬化的盾板)				外骨骼 (甲壳质壁)				软保护 (有厣)				软体 (生有少数发状刚毛)			
生活方式	自由移动型				钻蚀型				底栖型				底埋型			
生殖模式	有性生殖				有性生殖				有性生殖				无性生殖			
耐污值	4				6				6				9			

3 讨论

本次在浑河流域采集到大型底栖动物 48(属)种,隶属 5 纲 8 目 22 科,流域整体以毛翅目为主,其次是颤蚓目。主要优势物种为三带环足摇蚊(*Cricotopus trifasciatus*)、三轮环足摇蚊(*Cricotopus tri annulatus*)、双线环足摇蚊(*Cricotopus bicinctus*)、克拉伯水丝蚓(*Limnodrilus claparedeianus*)等。应用多响应置换过程结果显示:浑河流域内底栖动物功能群分布具有明显的空间异质性。从大型底栖动物的分布上看,在 1 组苏子河段,底栖动物密度和生物量最高,Beauger^[35]研究结果:在 32—256 mm 的粒径(即鹅卵石、圆石以及粗砂粒)中,底栖动物在这种复杂的栖境中能隐蔽生存因此具有较高的密度与生物量,这与本研究的结果相一致。Beisel^[36]指出底栖动物的密度随着水深的增加而降低,这与本研究结果大致相同。

底栖动物对不同的栖息环境表现出不同的偏好,每一种环境都支持着一组特定的底栖动物群落^[1]。浑河流域共出现 5 种底栖摄食功能群,以直接收集者功能群为主,主要分布在底质类型为石块、部分圆石以及部分粗砂中;捕食者功能群多分布在底质类型为小鹅卵石、圆石以及粗细沙中;在粗砂粒与细沙粒中主要以刮食者功能群为主;滤食者功能群则分布在淤泥与细沙的底质中。通过比较四个分组之间环境因子的差异性,除流速和溶解氧含量外,其他各项因子均在各分组点位呈现显著的差异性。典范对应分析结果显示:PR 功能群的分布受到流速的影响,在流速较快的苏子河河段 PR 功能群是优势种群。在济南地区河流的研究中提出:捕食者丰度受到流量限制,主要适合一些对激流适应能力强的昆虫生活^[14],这与本研究中对 PR 功能群的研究一致。影响 GC 功能群的驱动因子是 IOS 指数,红河与英额河,底质类型复杂,栖息环境复杂性较高,生物多样性较高,水体内有机质含量较高^[6],更适宜摄食有机质颗粒的直接收集者功能群生存。

通过比较分析不同功能群优势物种的生物性状,可以发现不同功能群在身体构造、生活方式、运动方式等生物学特征上具有明显的差异(表 4)。浑河流域大型底栖动物的生物性状表现为:其以毛翅目为主的捕食者功能群身体上均附有一层硬壳保护,并且可以在水体中自由活动,大多毛翅目都不筑巢,因此多分布在底质复杂的水体中用小鹅卵石、圆石等碎石来遮掩身体^[25-27];而以双翅目为主直接收集者只有头壳具有较厚的甲壳质壁,头部口器不能直接摄食,所以多以微粒有机颗粒为主,生活方式多为钻蚀在水生植物表面或组织内要成通道形成巢穴,一方面是为了躲避捕食,另一方面是为了摄取食物^[25]。以基眼目为主的刮食者体表有盾,多以藻类、菌类等为食,足腺多分泌粘液,可附着在岸边或水底。这种生物性状更适应粘附在较深流速缓慢的岸边或水底并且食物来源充足的水体。在项珍龙等人^[37]对浑河流域硅藻的研究结果显示,浑河中游具有更多的硅藻种类,底质多为细沙粗粒,可滞留更多的粗颗粒有机物,能为刮食者功能群提供丰富的食物来源^[19]。浑河下游由于人类活动频繁,水体污染严重,底质类型多为淤泥与细沙,以颤蚓目为主的过滤收集者喜栖于淤泥底质中,吸食淤泥或过滤有机碎屑,耐污性极高,随着淤泥中有机物的增加,颤蚓的某些耐污种类个体数量能够猛烈增加^[13],并且下游地区其他生物存活较少,使其成为浑河下游的主要物种。

参考文献(References):

- [1] 董双林, 赵文. 养殖水域生态学. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [2] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Systems*, 1997, 11(3/4): 269-278.
- [3] 田胜艳, 张文亮, 张锐. 大型底栖动物在海洋生态系统中的作用. *盐业与化工*, 2009, 38(2): 50-54.
- [4] Yamada K, Tanaka Y, Era T, Nakaoka M. Environmental and spatial controls of macroinvertebrate functional assemblages in seagrass ecosystems along the Pacific coast of northern Japan. *Global Ecology and Conservation*, 2014, 2: 47-61.
- [5] Oertli B, Indermühle N, Angélibert S, Hinden H, Stoll A. Macroinvertebrate assemblages in 25 high alpine ponds of the Swiss National Park (Cirque of Macun) and relation to environmental variables. *Hydrobiologia*, 2008, 597(1): 29-41.
- [6] 殷旭旺, 韩洁, 王博涵, 金文, 杨璐, 陈海, 吴丹. 太子河流域底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *水产学杂志*, 2017, 30(3): 40-44.
- [7] Dolédec S, Statzner B, Bournaud M. Species traits for future biomonitoring across ecoregions: patterns along a human-impacted river. *Freshwater Biology*, 1999, 42(4): 737-758.

- [8] Beauchard O, Verissimo H, Queirós A M, Herman P M J. The use of multiple biological traits in marine community ecology and its potential in ecological indicator development. *Ecological Indicators*, 2017, 76: 81-96.
- [9] Lamouroux N, Dolédec S, Gayraud S. Biological traits of stream macroinvertebrate communities: effects of microhabitat, reach, and basin filters. *Journal of the North American Benthological Society*, 2004, 23(3): 449-466.
- [10] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 2006, 9(6): 741-758.
- [11] Díaz S, Cabido M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(11): 646-655.
- [12] Townsend C R, Hildrew A G. Species traits in relation to a habitat templet for river systems. *Freshwater Biology*, 2010, 31(3): 265-275.
- [13] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [14] 王博涵, 吴丹, 张吉, 殷旭旺, 赵长森, 窦同文. 济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态. *生态学报*, 2017, 37(21): 7128-7139.
- [15] Richards C, Haro R, Johnson L, Host G. Catchment and reach-scale properties as indicators of macroinvertebrate species traits. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 219-230.
- [16] Bremner J. Species' traits and ecological functioning in marine conservation and management. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 366(1/2): 37-47.
- [17] Córdova-Tapia F, Zambrano L. Fish functional groups in a tropical wetland of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Neotropical Ichthyology*, 2016, 14(2): e150162.
- [18] Terborgh J, Robinson S. Guilds and their utility in ecology//Kikkawa J, Anderson D J A, eds. *Community Ecology: Pattern and Process*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986: 65-90.
- [19] 蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 渠晓东. 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.
- [20] Brisbois M C, Jamieson R, Gordon R, Stratton G, Madani A. Stream ecosystem health in rural mixed land-use watersheds. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2008, 7(5): 439-452.
- [21] 李欢欢, 鲍毅新, 胡知渊, 等. 杭州湾南岸大桥建设区域潮间带大型底栖动物功能群及营养等级的季节动态. *动物学报(英文版)*, 2007, 53(6): 1011-1023.
- [22] 殷旭旺, 张远, 渠晓东, 刘颖, 李庆南, 孟伟. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2732-2740.
- [23] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. *An Introduction to the Aquatic Insects of North American*. 4th ed. Dubuque: Kendall Hunt Publishing, 2008.
- [24] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫. 北京: 中国言实出版社, 2011.
- [25] 刘月英, 张文珍, 王跃先. 中国经济动物志-淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] 闵文武, 韩洁, 王培培, 金文, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 太子河流域硅藻群落与驱动因子的定量关系. *环境科学研究*, 2016, 29(5): 672-679.
- [28] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936.
- [29] Cummins K W. Structure and function of stream ecosystems. *BioScience*, 1974, 24(11): 631-641.
- [30] Bremner J, Rogers S I, Frid C L J. Matching biological traits to environmental conditions in marine benthic ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 2006, 60(3/4): 302-316.
- [31] 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 武玮, 闵文武. 应用硅藻指数评价渭河流域水生态健康状况. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 317-321.
- [32] 林良羽, 童春富, 李秀珍. 崇明东滩藻类盐渍带大型底栖动物功能群的划分及其分布特征. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2229-2237.
- [33] Tomanova S, Moya N, Oberdorff T. Using macroinvertebrate biological traits for assessing biotic integrity of neotropical streams. *River Research and Applications*, 2008, 24(9): 1230-1239.
- [34] Beauger A, Lair N, Reyes-Marchant P, Peiry J L. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics. *Hydrobiologia*, 2006, 571(1): 63-76.
- [35] Beisel J N, Usseglio-Polatera P, Thomas S, Moreteau J C. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, 389(1/3): 73-88.
- [36] Molles M C Jr. Trichopteran communities of streams associated with aspen and conifer forests: long-term structural change. *Ecology*, 1982, 63(1): 1-6.
- [37] 项珍龙, 杨璐, 李晨, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 浑河流域底质类型对硅藻群落分布特征的影响. *环境科学学报*, 2018, 38(2): 570-578.