

DOI: 10.5846/stxb201802080347

陈静, 蒋万祥, 朱天顺, 陈青, 贺诗水, 王红妹, 王洪凯, 潘保柱. 新薛河溪流生境底栖动物群落结构季节动态. 生态学报, 2019, 39(5): - .

Chen J, Jiang W X, Zhu T S, Chen Q, He S S, Wang H M, Wang H K, Pan B Z. Seasonal dynamics of macroinvertebrate community structure in stream habitats of the Newxue River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

新薛河溪流生境底栖动物群落结构季节动态

陈 静¹, 蒋万祥^{1,2,*}, 朱天顺¹, 陈 青¹, 贺诗水¹, 王红妹¹, 王洪凯¹, 潘保柱²

1 枣庄学院生命科学学院, 枣庄 277160

2 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048

摘要:明确底栖动物在时空尺度上的自然变化规律对有效评估和保护水生生态系统十分重要。基于 2012 年季节调查数据, 对新薛河典型生境底栖动物群落季节动态进行了研究。共鉴定底栖动物 108 种, 隶属 5 门 10 纲 74 属。短脉纹石蛾、长钝直突摇蚊、拟长跗摇蚊、*Neozarelia* sp. 为研究区域优势分类单元, 相对丰度分别为 25.1%、9.8%、9.0%、8.6%; 各季节间优势分类单元组成差异较大, 3 个季度共同优势物种仅短脉纹石蛾 1 种。密度、物种丰度、香农指数表现为 4 月和 12 月显著高于 10 月; 均匀度指数 10 月份最高。非度量多维标度排序表明, 不同季节底栖动物群落结构差异显著; 对照河段(D 河段)群落结构季节间差异相对较小。指示物种法分离出了新薛河及各河段代表性物种 41 种, 但 B 河段未分离出指示物种; 双向聚类分析进一步明确了指示物种的指示属性(特有或者相对丰度最高)。

关键词:新薛河; 底栖动物; 溪流; 季节动态

Seasonal dynamics of macroinvertebrate community structure in stream habitats of the Newxue River

CHEN Jing¹, JIANG Wanxiang^{1,2,*}, ZHU Tianshun¹, CHEN Qing¹, HE Shishui¹, WANG Hongmei¹, WANG Hongkai¹, PAN Baozhu²

1 College of Life Sciences, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China

2 Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: Identifying naturally-regulated spatial and temporal variations of benthic macroinvertebrates is critical for effective assessment and conservation of aquatic ecosystems. A clear identification of spatial and temporal trends of these communities could enhance our understanding of the ecology of macroinvertebrates, definitions of effects of anthropogenic or natural disturbances on lotic communities, and assessment and conservation of lotic biodiversity. In the present study, macroinvertebrate community structure was compared among different seasons in the upper Newxue River in the year 2012 (April, October, and December), where a total of 108 macroinvertebrate taxa belonging to 74 genera and 10 classes were recorded; *Cheumatopsyche* sp., *Orthocladius vaillanti*, *Paratanytarsus* sp., and *Neozarelia* sp. were the dominant taxa, with relative abundances of 25.1%, 9.8%, 9.0%, and 8.6%, respectively. Dominant species composition was very different across seasons; *Cheumatopsyche* sp. was the only common taxon in all three seasons. Density, species richness, and Shannon index were significantly higher in April and December than in October; evenness was highest in October. Non-metric Multidimensional Scaling (NMS) analysis was used to compare the community structure among different seasons in the Newxue River and typical reaches, and the results all showed significant differences; seasonal differences in the control reach (reach D) were relatively small. A total of 41 representative species of the Newxue River and typical habitats were

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2016CL05, ZR2017LH058); 国家自然科学基金(51809228, 81703190)

收稿日期: 2018-02-08; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: uzzjiang@163.com

separated by indicator species analysis, but no species was isolated from reach B. Two-way cluster analysis further clarified the indicator attributes (unique or highest relative abundance) of the indicator species.

Key Words: Newxue River; macroinvertebrate; stream; seasonal dynamics

淡水资源存储量不到 0.006% 的河流生态系统^[1], 生活着地球上大约 10% 的已知物种^[2-3]; 保护和提升河流生物多样性对保证生态系统完整性和稳定性具有重要意义^[4]。溪流生境拥有极高的时空异质性^[5]和复杂多样的微生境^[6], 独特、多样、且不同于下游河流的水生动植物群落生活其中^[7-8], 不仅对下游河流生物多样性有重要影响(上游物种可随水流到达下游)^[9], 而且是下游河流水资源、沉积成分及有机物的主要来源^[10-11]。同时, 溪流汇水区是联系陆地和水生生态系统的纽带, 对保护和维持生态系统生物多样性意义重大^[6,12]。

气候变化引起整个流域内环境特征包括水文特征、水体理化因子、河岸植被带等随季节发生相应的改变^[13]。这些特征对水生生物的繁殖、生长、分布及种群的演替具有重要影响^[14]。底栖动物在溪流生态系统占有非常重要的地位, 如参与动物-微生物相互作用, 碎屑处理, 作为初级或次级消费者影响群落营养结构等^[15-16]; 一直是评价河流生态系统健康最为重要的类群之一。研究溪流底栖动物时空变化趋势可增强对底栖动物生态属性的理解, 识别人为或自然干扰对激流群落的影响, 以及评估和保护激流生物多样性^[17]。本文通过分析新薛河典型生境底栖动物群落结构季节动态, 以期厘清如下基本问题: (1) 群落结构的季节差异, 包括优势物种组成、密度、生物多样性等。(2) 明确造成新薛河及其典型生境群落结构差异的主要分类单元。以期通过本研究对中国北方季节性河流生物多样性保护和管理提出科学的建议, 为后续相关研究提供背景数据及理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

新薛河位于山东省西南部, 属南四湖水系, 全长 89.6 km, 流域面积 686 km²。根据生境特征, 沿水流方向选择 5 个代表性河段进行了调查, 每个河段设 3 个采样点。A 河段, 位于石嘴子水库坝下, 以缓流和静水为主, 沉积物较多。B 河段下游紧挨枣庄市山亭区, 人口较为密集, 流量受上游水库排水量限制, 河道频繁出现断流、干涸现象。C 河段位于山亭区下游, 城市污水在经过沉积处理后, 直接排到该河段。D 河段距离城区较远, 生境质量相对较好, 作为对照河段。E 河段间歇性受人为干扰(衣物涮洗、家禽活动)^[18-19]。

1.2 底栖动物采集与鉴定

2012 年 4、10、12 月, 每月中旬用 40 目网径、采样面积 0.09 m² 的索伯网(surber sampler)采集底栖动物, 将网中的底栖动物拣出, 装标本瓶中, 用 10% 的福尔马林液固定, 标本带回实验室鉴定、计数^[20-23]。每个河段沿水流方向设置采样点 3 个, 共计采集标本 42 个(4 月份河段 B 处断流)。

1.3 统计分析

单因素方差分析(One-way ANOVA analysis)和独立样本 T 检验(Independent-Samples T test)用于比较底栖动物密度、生物量、多样性指数的差异; 使用非度量多维标度排序(Non-metric Multidimensional Scaling, NMS)分析各河段底栖动物群落结构的差异性; 指示物种分析(indicator species analysis)和双向聚类分析(two-way cluster analysis)用于分析各河段指示物种及指示原因。为消除网量差异对分析结果的影响, 非度量多维标度排序中均将数据进行了 $\lg(x+1)$ 转换。

2 结果与分析

2.1 物种组成

共鉴定底栖动物 24448 只, 隶属 5 门 10 纲 74 属 108 个分类单元。短脉纹石蛾一种(*Cheumatopsyche*

sp.)、长钝直突摇蚊 (*Orthocaldius vaillanti*)、拟长跗摇蚊属一种 (*Paratanytarsus* sp.E)、摇蚊亚科一种 (*Neozarelia* sp.) 为研究区优势分类单元,相对丰度分别为 25.1%、9.8%、9.0%、8.6%(表 1)。其中,4 月份共鉴定底栖动物 63 种;*Cheumatopsyche* sp.、*Orthocaldius vaillanti*、*Neozarelia* sp. 为优势分类单元,相对丰度分别为 25.4%、15.3%、13.6%。10 月份共鉴定底栖动物 53 种;双线环足摇蚊 (*Cricotopus bicinctus*)、黄色多足摇蚊 (*Polypedilum flavum*)、*Cheumatopsyche* sp.、扁股异腹鳃摇蚊 (*Einfeldia pagana*)、流环足摇蚊一种 (*Rheocricotopus* sp.)、拟中足摇蚊 (*Parametriocnemus*)、*Paratanytarsus* sp.E、二叉摇蚊属一种 (*Dicrotendipes simpsoni*) 为优势分类单元,相对丰度分别为 13.3%、10.9%、7.1%、6.8%、6.0%、5.8%、5.4%、5.2%。12 月份共采集底栖动物 65 种;优势分类单元为 *Paratanytarsus* sp.E、*Cheumatopsyche* sp.、真开氏摇蚊属一种 (*Eukiefferiella devonica*),相对丰度分别为 27.9%、27.7%、5.2%。

表 1 新薛河各季节底栖动物优势分类单元 (%)

Table 1 Macroinvertebrates dominant taxa among different seasons in the Newxue River

优势分类单元 Dominant taxa	4 月 April	10 月 October	12 月 December	新薛河 Newxue River
短脉纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp.	25.4	7.1	27.7	25.1
双线环足摇蚊 <i>Cricotopus bicinctus</i>		13.3		
二叉摇蚊属一种 <i>Dicrotendipes simpsoni</i>		5.2		
扁股异腹鳃摇蚊 <i>Einfeldia pagana</i>		6.8		
真开氏摇蚊属一种 <i>Eukiefferiella devonica</i>			5.2	
摇蚊亚科一种 <i>Neozarelia</i> sp.	13.6			8.6
长钝直突摇蚊 <i>Orthocaldius vaillanti</i>	15.3			9.8
拟中足摇蚊 <i>Parametriocnemus</i>		5.8		
拟长跗摇蚊属一种 <i>Paratanytarsus</i> sp.E		5.4	27.9	9.0
黄色多足摇蚊 <i>Polypedilum flavum</i>		10.9		
流环足摇蚊一种 <i>Rheocricotopus</i> sp.		6.0		

2.2 密度和多样性

2.2.1 密度

对新薛河底栖动物密度季节动态进行分析(图 1),结果表明:4、10、12 月份密度均值分别为 13352、796、4575 只/m²;表现为 4 月和 12 月高于 10 月 ($P<0.05$)。其中,A 河段密度均值 4 月份最高,为 2326 只/m²,10 月份最低,为 504 只/m²;B 河段 12 月份为 7996 只/m²,10 月份为 1296 只/m²;C 河段 4 月份最高,为 39670 只/m²,10 月份最低,为 1092 只/m²;D 河段 12 月份最高,为 7530 只/m²,10 月份最低,为 796 只/m²;E 河段 12 月份最高,为 5441 只/m²,10 月份最低,为 796 只/m²。方差分析及独立样本 T 检验表明:A、D、E 河段底栖动物密度均表现为 4 月和 12 月高于 10 月 ($P<0.05$);B 河段表现为 12 月高于 10 月 ($P<0.05$);C 河段表现为 4 月高于 10 月和 12 月 ($P<0.05$)。

2.2.2 生物多样性

对生物多样性季节动态进行分析(表 2),结果表明:调查期间物种丰富度均值 4 月份最大(18.6),12 月份次之(17.5),10 月份最小(9.8);表现为 4 月、12 月>10 月 ($P<0.05$)。香农指数 4 月份最大(2.00),12 月份次

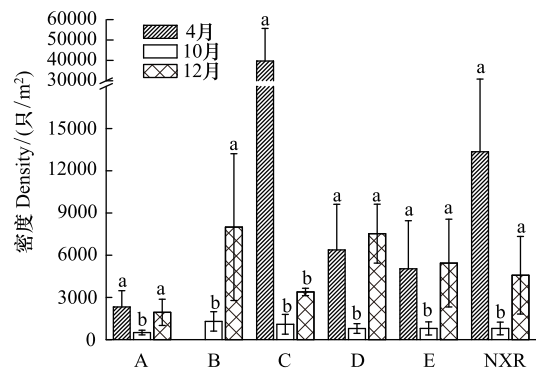


图 1 新薛河底栖动物密度季节动态

Fig.1 Seasonal dynamics of macroinvertebrates density in the Newxue River

A、B、C、D、E 分别代表 A、B、C、D、E 河段,NXR 代表新薛河

之(1.76),10月最小(1.60);表现为4月 $\geq$ 12月 $\geq$ 10月($P<0.05$)。均匀度指数10月最大(0.73),4月次之(0.69),12月最小(0.62);表现为10月 $\geq$ 4月 $\geq$ 12月($P<0.05$)。

采用方差分析和T检验对各河段生物多样性季节动态进行比较(表2),结果表明:物种丰富度在A、E河段均表现为4月、12月 $>$ 10月($P<0.05$);B河段表现为12月 $>$ 10月($P<0.05$);C河段表现为12月 $\geq$ 4月 $\geq$ 10月($P<0.05$);D河段表现为4月 $>$ 12月 $>$ 10月。香农指数在A河段表现为4月、12月 $>$ 10月($P<0.05$);D河段表现为4月 $\geq$ 10月 $\geq$ 12月($P<0.05$);B、C、E河段差异不显著($P>0.05$)。均匀度指数在A河段表现为12月 $\geq$ 4月 $\geq$ 10月($P<0.05$);B河段表现为10月 $>$ 12月($P<0.05$);C河段表现为10月 $\geq$ 12月 $\geq$ 4月($P<0.05$);D河段表现为4月、10月 $>$ 12月($P<0.05$);E河段表现为10月 $\geq$ 4月 $\geq$ 12月($P<0.05$)。

表2 新薛河底栖动物生物多样性季节动态

Table 2 Seasonal dynamics of macroinvertebrates biodiversity in the Newxue River

河段 Reaches	时间 Time	物种丰富度 Richness		香农指数 Shannon index		均匀度指数 Evenness	
		平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD
A	4月	16.0a	2.0	2.08a	0.07	0.75ab	0.06
	10月	5.3b	1.5	1.01b	0.38	0.60a	0.14
	12月	18.7a	4.9	2.37a	0.28	0.82b	0.03
B	4月	—	—	—	—	—	—
	10月	9.3a	2.9	1.37a	0.25	0.62a	0.03
	12月	15.7b	0.6	1.22a	0.33	0.44b	0.13
C	4月	15.0ab	0.0	1.85a	0.10	0.68a	0.04
	10月	12.0b	1.0	2.07a	0.18	0.84b	0.08
	12月	18.0a	2.6	2.15a	0.38	0.74ab	0.10
D	4月	20.0a	2.6	2.17a	0.06	0.72a	0.01
	10月	11.3b	0.6	1.90ab	0.31	0.79a	0.14
	12月	16.7c	0.6	1.57b	0.10	0.56b	0.04
E	4月	23.3a	4.2	1.93a	0.15	0.62ab	0.06
	10月	11.0b	1.7	1.87a	0.27	0.78a	0.11
	12月	18.7a	2.1	1.51a	0.42	0.52b	0.15
新薛河	4月	18.6a	4.1	2.00a	0.15	0.69ab	0.07
	10月	9.8b	2.9	1.60b	0.47	0.73a	0.13
	12月	17.5a	2.6	1.76ab	0.51	0.62b	0.17

2.3 群落结构季节动态

基于非度量多维标度排序,对季节间底栖动物群落结构的差异性进行研究(图2),结果表明:新薛河底栖动物群落结构于各季节间表现为显著差异(stress=14.282);各河段底栖动物群落结构季节间差异显著(A、B、C、D、E河段解析压力值(stress)分别为0.007、0.001、0.008、6.917、0.003)。

2.4 物种组成对群落结构的影响

采用指示物种法分析新薛河及各河段底栖动物群落结构季节差异(表3),结果表明:新薛河及5个河段共分离出指示物种41种。新薛河分离出28种,其中4月份20种,10月份1种,12月份7种。A河段共分离出10种,其中4月份6种,12月份4种;B河段未分离出任何指示种;C河段共分离出18种,其中4月份11种,10月份4种,12月份3种;D河段共分离出12种,其中4月份7种,10月份2种,12月份3种;E河段共15种,其中4月份7种,12月份8种。

为进一步明确物种的指示作用,基于指示物种对各河段底栖动物进行双向聚类分析(图3),结果表明:A河段,4月份指示物种 *Stictochironomus devinctus*、*Rheopelopia paramaculipennis*、*Potthastia gaedii*、*Meropelopia* sp.、*Apedilum elachistum* 仅出现在该月份,*Nais pardalis* 在该月丰度最高。12月份指示物种 *Hudsonimyia* sp. 仅在该月出现;*Radix swinhoei*、*Nematoda* spp.、*Hippeutis cantori* 相对丰度最高。

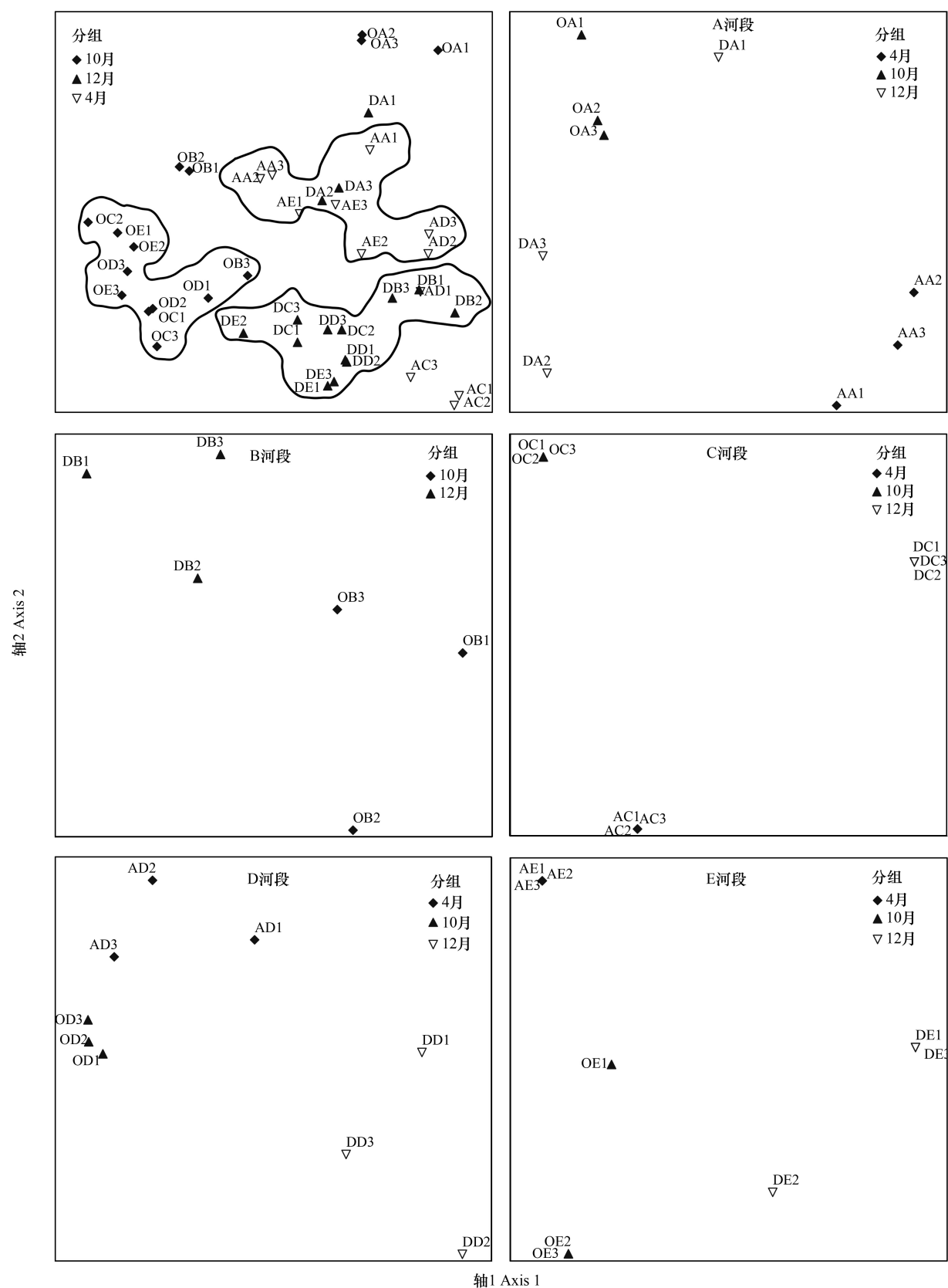


图 2 底栖动物群落结构非度量多维标度排序

Fig.2 NMS ordinal configuration of macroinvertebrates communities

图中各河段标识字母前 A:4 月, April; O:10 月, October; D:12 月, December

表 3 不同季节底栖动物群落指示物种

Table 3 Indicator species of macroinvertebrates communities in different seasons

代码 Codes	指示物种 Indicator species	A 河段 Reach A	B 河段 Reach B	C 河段 Reach C	D 河段 Reach D	E 河段 Reach E	新薛河 Newxue River
sp2	线虫纲一种 <i>Nematoda</i> spp.	12 月 *		10 月 *			
sp8	纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>					4 月 *	4 月 *
sp9	椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	12 月 *					12 月 *
sp11	尖口圆扁螺 <i>Hippeutis cantori</i>	12 月 *					12 月 *
sp13	逸仙丽翅蜉 <i>Alainites</i> sp.					12 月 *	
sp14	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.						12 月 **
sp15	细蜉 <i>Caenis</i> sp.				12 月 **		4 月 *
sp20	经石蛾 <i>Ecnomus</i> sp.			4 月 *			
sp21	尖毛小石蛾 <i>Oxyethira</i> sp.						4 月 *
sp22	短脉纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp.			4 月 *	12 月 *	12 月 *	4 月 *
sp25	狭溪泥甲 <i>Stenelmis</i> sp.					4 月 *	4 月 *
sp32	摇蚊亚科一种 <i>Apedilum elachistum</i>	4 月 *					4 月 **
sp39	二叉摇蚊属一种 <i>Dicrotendipes simpsoni</i>			10 月 *			
sp45	摇蚊亚科一种 <i>Neozarelia</i> sp.			4 月 *			4 月 *
sp46	拟长跗摇蚊 <i>Paratanytarsus</i> sp.E			12 月 *	12 月 *	12 月 *	12 月 **
sp52	流水长跗摇蚊一种 <i>Rheotanytarsus exiguus</i>				4 月 *		4 月 **
sp54	齿斑摇蚊一种 <i>Stictochironomus devinctus</i>	4 月 *					4 月 *
sp60	寡角摇蚊亚科一种 <i>Potthastia gaedii</i>	4 月 *		4 月 *			4 月 **
sp62	毛突摇蚊 <i>Chaetocladius</i> sp.			4 月 *		12 月 *	
sp63	环足摇蚊一种 <i>Cricotopus absurdus</i>				10 月 *		
sp67	真开氏摇蚊一种 <i>Eukiefferiella devonica</i>					4 月 *	
sp68	细真开氏摇蚊 <i>Eukiefferiella gracei</i>					12 月 *	
sp69	近藤水摇蚊 <i>Hydrobaenus kondio</i>					4 月 *	4 月 *
sp72	直突摇蚊属一种 <i>Orthocaldius frigidus</i>				4 月 *		4 月 *
sp73	直突摇蚊属一种 <i>Orthocaldius jacobson</i>			10 月 *			
sp77	长钝直突摇蚊 <i>Orthocaldius vaillanti</i>			4 月 *	4 月 *		4 月 **
sp79	拟中足摇蚊 <i>Parametriocnemus</i> sp.			4 月 *			4 月 *
sp81	粗腹摇蚊亚科一种 <i>Hudsonimyia</i> sp.	12 月 *		4 月 *			
sp82	粗腹摇蚊亚科一种 <i>Meropelopia</i> sp.	4 月 *				12 月 *	4 月 **
sp84	粗腹摇蚊亚科一种 <i>Reomyia</i> sp.						4 月 *
sp85	拟斑点流粗腹摇蚊 <i>Rheopelopia paramaculipennis</i>	4 月 *			4 月 *	4 月 *	4 月 **
sp88	黑蝇(蚋) <i>Simulium</i> sp.			12 月 *		12 月 *	12 月 **
sp92	大蚊 <i>Tipula</i> sp.						12 月 *
sp93	摇蚊幼虫 <i>Chironomidae</i> pupa			4 月 *	4 月 *	4 月 *	4 月 **
sp96	三角涡虫 <i>Dugesia</i> sp.			4 月 *	4 月 *		4 月 **
sp100	简明仙女虫 <i>Nais pardalis</i>	4 月 *		4 月 *	4 月 *	4 月 *	4 月 **
sp102	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>			10 月 *			
sp104	颤蚓 <i>Tubifex</i> sp.				10 月 *		
sp105	舌蛭 <i>Glossiphonia</i> sp.						10 月 *
sp107	拟扁蛭属一种 <i>Hemiclepsis</i> sp1.					12 月 *	
sp108	拟扁蛭属一种 <i>Hemiclepsis</i> sp2.			12 月 *			12 月 *

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

C 河段,4 月份指示物种 *Orthocaldius vaillanti*、*Neozarelia* sp.、*Potthastia gaedii*、*Nais pardalis*、*Hudsonimyia* sp. 仅在该月份出现; *Cheumatopsyche* sp.、*Parametriocnemus* sp.、*Chironomidae* pupa、*Chaetocladius* sp.、*Dugesia* sp.、

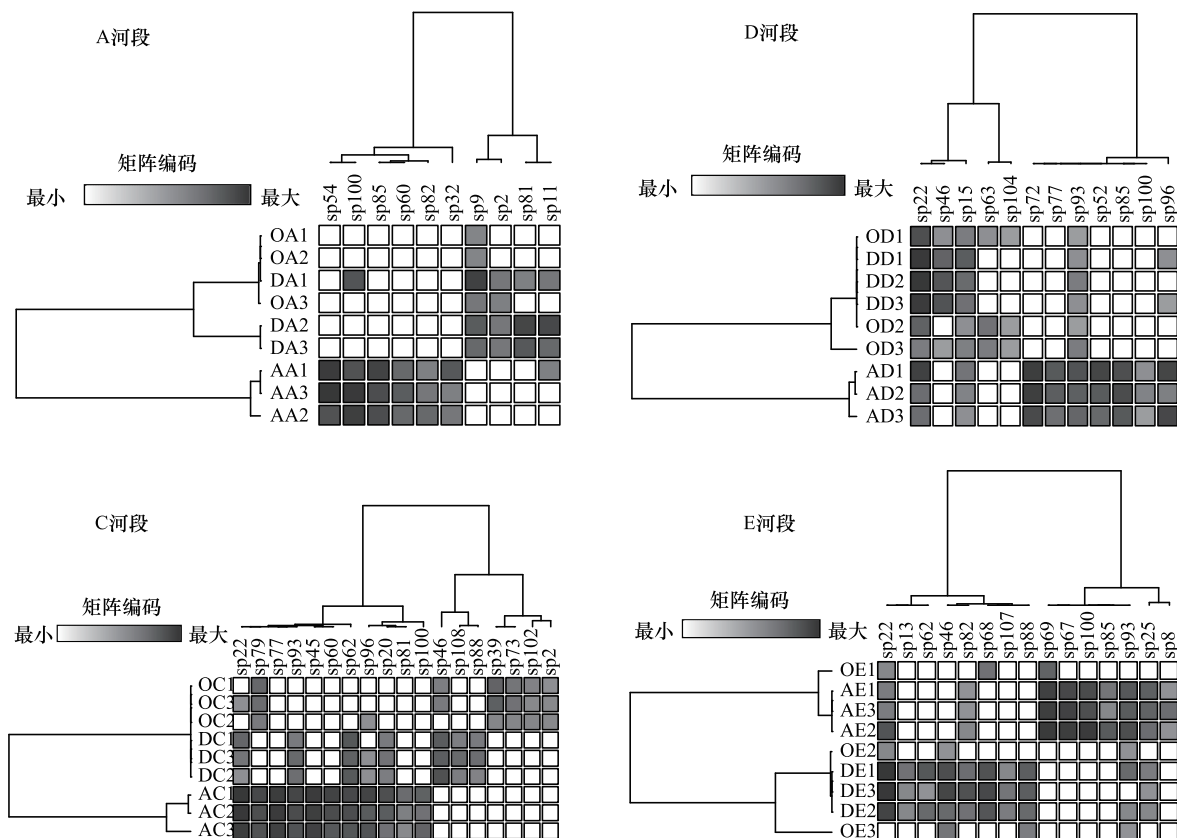


图3 基于指示物种的群落双向聚类分析

Fig.3 Two-way cluster analysis based on indicator species

Enomus sp.在该月丰度最高。*Dicrotendipes simpsoni*、*Orthocaldius jacobson*、*Branchiura sowerbyi*、*Nematoda* spp.仅在10月份采集到。*Simulium* sp.、*Hemiclepsis* sp2.仅在12月份出现,*Paratanytarsus* sp.E在12月份丰度最高。

D河段,4月份特有种为 *Orthocaldius frigidus*、*Orthocaldius vaillanti*、*Rheotanytarsus exiguus*、*Rheopelopia paramaculipennis*、*Nais pardalis*;Chironomidae pupa、*Dugesia* sp.相对丰度最高。*Cricotopus absurdus*、*Tubifex* sp.为10月份特有种。*Cheumatopsyche* sp.、*Paratanytarsus* sp.E、*Caenis* sp.相对丰度在12月份最高。

E河段,*Parafossarulus striatulus*、*Eukiefferiella devonica*、*Rheopelopia paramaculipennis*、*Nais pardalis* 为4月份特有种;*Stenelmis* sp.、*Hydrobaenus kondio*、Chironomidae pupa 相对丰度在该月最高。12月份特有种为 *Alainites* sp.、*Chaetocladius* sp.、*Hemiclepsis* sp1.; *Cheumatopsyche* sp.、*Paratanytarsus* sp.E、*Meropelopia* sp.、*Eukiefferiella gracei*、*Simulium* sp.相对丰度最高。

3 讨论

优势类群主导底栖动物群落分布格局。各季节间优势物种组成差异较大(除短脉纹石蛾为3个季度共同优势单元,*Paratanytarsus* sp.E为10、12月共同优势单元外,其它9个物种仅为某一季度的优势分类单元),一定程度上反映了季节间生境的异质性。短脉纹石蛾优势度最大,主要因为其在4、12月相对丰度最大,且这两个月份密度显著高于10月份。同时,生活史对群落组成的影响也较大,如由 *Paratanytarsus* sp.E 丰度变化可知,其卵孵化主要在10、12月之间,且绝大多数幼虫于次年4月份之前羽化。10月份优势分类单元种类多,群落均匀度高,主要原因是流速相对较大、流量相对较为充沛,水文节律的干扰使群落难以发展到少数几个物种占绝对优势的格局。密度和物种丰度整体表现为10月份低于4、12月份,主要因为该月河道水量相对充沛,河道水面较宽(栖境多样,由于竞争、捕食作用,使得物种分布相对分散),流速较大(对高流速敏感物种

数量减少或消失)。香农指数受物种丰度和均匀度共同影响,一直是水质评价的常用指标之一。相对均匀度指数,香农指数变化趋势同物种丰度更为一致;表明研究区域香农指数主要受物种丰度影响。香农指数于流量充沛的 10 月份最低,表明其主要反映的是栖息地质量,而并非水质,因为其并未考虑物种的耐污性,这和孔凡青^[24]、曹然^[25]等的研究结果是一致的。

非度量多维标度排序从群落层面验证了群落结构的季节差异。通过解析压力值可知,D 河段群落季节间差异相对较小(stress=6.917,高于其它河段),主要因为该河段水文参数(如流量、流速)相对稳定,外界干扰因素相对较少,群落组成相对稳定。从物种水平上分析群落结构的变化是评价生态环境变化的有效途径^[26]。指示物种和双向聚类分析结果呈现三个主要特点:(1)4 月份指示物种最多,特有物种最多;10 月份最少。(2)各河段指示物种组成存在较大差异。(3)B 河段未筛选出指示物种。从前一年 10 月份之后,河道流量减少、趋于稳定,到 4 月份流量小,底栖动物生活空间相对狭窄,采集到的物种相应增多;同时,4 月份也是许多昆虫羽化的时间,特别是一些优势分类元(如 *Paratanytarsus* sp.E)的羽化,为其它物种的侵入创造了空间(这是 4 月份特有物种最多的主要原因)。5 个河段共分离出指示物种 35 种(不含新薛河整体指示种),其中,属于 4 个河段共同指示物种的分类单元只有 1 个(*Nais pardalis*),属 3 个河段共同指示物种的分类单元只有 4 个(*Cheumatopsyche* sp.、*Paratanytarsus* sp.E、*Rheopelopia paramaculipennis*、Chironomidae pupa),而仅属于某一河段(生境)的指示物种高达 23 种;表明生境异质性对生物多样性的维持和保护具有重要意义。B 河段长期处于间歇性断流或干涸状态,只有具备相应性状组合的生物才能生存^[19],一定程度上限制了物种的输入和数目,增加了物种组成的相似性。

综上,通过对优势物种组成、密度、生物多样性的分析,基本明确了研究区域底栖动物群落季节动态;非度量多维标度排序从群落层面验证了群落结构的季节差异性;指示物种和双向聚类分析进一步从物种组成方面探讨了不同季节群落结构差异的原因。研究区域底栖动物群落结构具有很强的季节性,生境异质性对生物多样性的维持和保护意义重大。

致谢:野外调查及室内分析得到马相铭、李坤、李丛丛等帮助,于此谨致谢忱。

参考文献(References):

- [1] Gleick P H. Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources. New York: Oxford University Press, 1993: 13-24.
- [2] Allan J D, Flecker A S. Biodiversity conservation in running waters: identifying the major factors that threaten destruction of riverine species and ecosystems. Bioscience, 1993, 43(1): 32-43.
- [3] Strayer D L, Dudgeon D. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1): 344-358.
- [4] Jun Y C, Kim N Y, Kim S H, Park Y S, Kong D S, Hwang S J. Spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages in relation to environmental variables in Korean nationwide streams. Water, 2016, 8(1): 27.
- [5] Townsend C R. The patch dynamics concept of stream community ecology. Journal of the North American Benthological Society, 1989, 8(1): 36-50.
- [6] Meyer J L, Strayer D L, Wallace J B, Eggert S L, Helfman G S, Leonard N E. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 86-103.
- [7] Wipfli M S, Richardson J S, Naiman R J. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 72-85.
- [8] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, Sedell J R, Cushing C E. The river continuum concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(1): 130-137.
- [9] Callanan M, Baars J R, Kelly-Quinn M. Macroinvertebrate communities of Irish headwater streams: contribution to catchment biodiversity. Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy, 2014, 114B(3): 143-162.
- [10] Clarke A, Nally R M, Bond N, Lake P S. Macroinvertebrate diversity in headwater streams: a review. Freshwater Biology, 2008, 53(9): 1707-1721.

- [11] Lowe W H, Likens G E. Moving headwater streams to the head of the class. *Bioscience*, 2005, 55(3): 196-197.
- [12] Allan J D, Wipfli M S, Caouette J P, Prussian A, Rodgers J. Influence of streamside vegetation on inputs of terrestrial invertebrates to salmonid food webs. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, 60(3): 309-320.
- [13] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 923-928.
- [14] Bêche L A, McElravy E P, Resh V H. Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic-macroinvertebrates in two Mediterranean-climate streams in California, U.S.A. *Freshwater Biology*, 2006, 51(1): 56-75.
- [15] Wallace J B, Webster J R. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology*, 1996, 41: 115-139.
- [16] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *Bioscience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [17] Jiang X M, Xiong J, Xie Z C. Longitudinal and seasonal patterns of macroinvertebrate communities in a large undammed river system in Southwest China. *Quaternary International*, 2017, 440: 1-12.
- [18] 陈静, 蒋万祥, 贺诗水, 王洪凯, 卓丽玲, 陈青, 王红妹. 新薛河底栖动物物种多样性与功能多样性研究. *生态学报*, 2018, 38(9), doi: 10.5846/stxb201706241143.
- [19] 蒋万祥, 陈静, 王红妹, 贺诗水, 卓丽玲, 陈青, 王洪凯, 蔡庆华. 新薛河典型生境底栖动物功能性状及其多样性. *生态学报*, 2018, 38(6): 2007-2016.
- [20] Epler J H. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. North Florida: EPA, 2001: 1-500.
- [21] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 1-568.
- [22] Brinkhurst R O. Guide to the Freshwater Aquatic Microdrile Oligochaetes of North America. Ottawa: Dept. of Fisheries and Oceans, 1986: 1-259.
- [23] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. 中国经济动物志: 淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979: 1-134.
- [24] 孔凡青, 孙康, 周绪申. 基于 3 个生物评价指数的滦河上游水质评价研究. *环境科学与管理*, 2017, 42(4): 182-184.
- [25] 曹然, 黎征武, 毛建忠, 盛萧, 王旭涛, 邓培雁. 北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价. *水资源保护*, 2017, 33(4): 80-87.
- [26] Forde J, Shin P K, Somerfield P J, Kennedy R M. M-AMBI derived from taxonomic levels higher than species allows Ecological Status assessments of benthic habitats in new geographical areas. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 411-419.