

南溪河大型底栖无脊椎动物群落结构及其季节变化

韦建福¹, 敬 凯¹, 王延辉¹, 孙红英²

(1. 云南师范大学生命科学学院, 生物能源持续开发利用教育部工程研究中心,

云南省生物质能与环境生物技术重点实验室, 云南 昆明 650500;

2. 南京师范大学生命科学学院, 江苏省生物多样性与生物技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 研究南溪河流域大型底栖动物的群落结构及其季节动态, 为该流域生物多样性保护和管理提供科学依据。2020 年 8 月和 11 月对云南南溪河水系进行了 2 次大型底栖无脊椎动物调查, 共采集到物种个体数 9 421 个, 鉴定出 208 种(属), 隶属 4 门 7 纲 73 科。该区域大型底栖无脊椎动物以水生昆虫为主, 共 171 种, 占 82.2%; 软体动物次之, 28 种, 占 13.5%。水生昆虫中蜉蝣目、双翅目、毛翅目和蜻蜓目为优势类群。大多数样点的生物多样性指数值处于较高水平。无论丰水期还是枯水期, 大型底栖无脊椎动物在物种组成和个体数量上均以水生昆虫为主, 丰水期的物种数、个体数量和密度(125 种、4 026 个和 307 个/m²)均显著低于枯水期(153 种、5 395 个和 347 个/m²), 但丰水期的生物量(5.71 g/m²)高于枯水期(3.23 g/m²)。物种优势度由高到低分别为四节蜉科一种(*Baetidae* sp.)、纹石蛾属一种(*Hydropsyche* sp.)、蚋科一种(*Simuliidae* sp.)、亚非蜉属一种(*Afromurus* sp.)、扁蜉属一种(*Heptagenia* sp.), 其中前 4 种在丰水期和枯水期均为优势种。南溪河大型底栖无脊椎动物多样性受到海拔、河道底质和干扰强度的影响, 在海拔 1 000~1 500 m 的地区多样性最高, 淤泥质底质和重度干扰使大型底栖无脊椎动物的物种数和密度显著降低。

关键词: 南溪河; 大型底栖无脊椎动物; 群落结构; 多样性

中图分类号: Q959 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)04-0030-09

河流生态系统是世界上最重要生态系统之一。在该系统中, 无论是物种丰富度还是丰度, 大型底栖无脊椎动物无疑都是主要的生物类群。大型底栖无脊椎动物是体长大于 500 μm 、分类学上高度多样化的类群(Mandaville, 2002), 广泛分布于湖泊、水库、河流等静水和流水水体(Pacini et al, 2018)。其中多样性最高的是水生昆虫, 其大多数物种能穿越水陆 2 个界面, 在淡水和陆地生态系统之间通过食物网完成物质的输送和能量的交换, 是连接淡水和陆地生态系统的重要纽带(Allan & Castillo, 2007)。大型底栖无脊椎动物也是水生生态系统中有有机物质的主要处理者, 处理了进入溪流的大部分河岸凋落物(Covich et al, 1999), 同时其自身又是淡水鱼类的主要食物来源(Vidotto-Magnoni & Carvalho, 2009), 因而, 大型底栖无脊椎动物在河流生态系统的营养循环中起着重要的连接作用, 参与了物质循环和能量流动等关键生态过程(丛明, 2010)。大型底栖无脊椎动物对水质变化敏感, 受到人为干扰后

群落结构容易发生改变, 其变化趋势可以反映河流受污染的性质和程度, 被广泛用于河流水生生物监测和水生态系统健康评价。因而, 研究大型底栖无脊椎动物群落的构成及其变化对于了解河流健康状况, 保护和恢复河流生态系统具有重要的意义(Barman, 2014)。

大型底栖无脊椎动物种类多, 物种和分类单元鉴别困难, 且大多数地区缺乏基本的调查, 因而国内外的研究目前仍侧重于了解河流和湖泊底栖动物的群落组成以及季节动态(朱迪等, 2009; 李斌等, 2013; 陈亚男等, 2018; 陈义永等, 2018), 研究环境因子对大型底栖无脊椎动物分布的影响(Katano et al, 2021; You et al, 2021), 以及使用 β -多样性指数和系统发育学等(Doretto et al, 2021; 胡芮等, 2020)方法, 借助群落的物种组成、种群数量和物种对水环境敏感的特性进行水生态环境健康评价(Jiang et al, 2021)。国内对大型底栖无脊椎动物开展的工作主要集中在中部、东部及北方地区(龚成等, 2021; 李超等, 2020; 宋聘等, 2020)。西南山区, 特别是横断山地区, 生物多样性丰富, 河流湖泊众多, 但对大型底栖动物的研究大多仅涉及到滇池、洱海等湖泊生态系统(王丽珍等, 2007; 黄明雨, 2020), 也开展了对怒江(李斌等, 2013)和澜沧江(李晋鹏等, 2018)等河流, 但总体而言, 对云南横断山区河流生态系统的研究仍然相对较少。

收稿日期: 2021-04-19 修回日期: 2022-07-13

基金项目: 生态环境部“生物多样性调查、观测和评估项目(2019-2023 年)”(ZDGC2019-003-02-B08)。

作者简介: 韦建福, 男, 硕士研究生, 研究方向为动物学。

E-mail: weijianfu1995@163.com

通信作者: 敬凯。E-mail: dunlin@sina.com

南溪河为元江-红河水系重要的一级支流,河流及其流域位于滇东南红河州和文山州的大围山和文山2个国家级自然保护区之间。该区域属于印度板块与欧亚板块碰撞带所构造的横断山系南延部分,地质构造复杂,既具有古生代地层,又有中生代和新生代的地层,生物地理区系古老而特殊,生物多样性丰富(杨宇明等,2008;税玉民等,2018)。同时该地区也是云贵高原滇东石漠化岩溶区向横断山纵向岭谷区过渡的区域,为云南省重要的生态脆弱区之一。对元江一级支流南溪河开展大型底栖动物多样性研究,有助于了解该区域的生物多样性状况。本研究通过对南溪河水系大型底栖无脊椎动物物种组成、个体数量和空间分布的调查,研究该流域大型底栖动物的群落结构及其季节动态,分析环境因子的影响,为该流域生物多样性保护和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点设置

南溪河为元江-红河水系重要的一级支流,位于元江左岸,地跨中国云南省和越南的老街省,中国境内全长169.2 km,流域面积3 354.7 km²。流域内地势北高南低,地形起伏大,属深切切割中山地貌,以宽谷和峡谷为主,山顶大多平缓,但落差巨大。流域位于西南季风与东南季风交替出现地带,由亚热带高原季风气候渐变至热带山地季风雨林湿润气候。流域内降雨充沛,雨季主要集中在5-8月。从整个流域看,降雨量从上游向下游逐渐递增,河谷地带因海拔低,夏季炎热,最高气温可达40.9℃。

整个南溪河流域共设置了35个样点(图1)。样点设置于上游、中游、下游的干流河段、干流与支流汇口以及部分支流上有代表性的断面或点位。样点设置时综合考虑河流所在的森林、农田、水利工程以及养殖区等景观因素,并根据断面或点位的数量、间距、海拔落差,河流的宽度、河流流速、底质类型等环境异质性程度进行调整。

1.2 样品的采集与处理

分别于2020年8月(丰水期)和11月(枯水期)对35个样点进行相同标准的采样。基于水流、基质、河流宽度以及采样点的生境类型等的不同选择适当的采样工具,包括索伯网(面积0.09 m²,网径425 μm)、踢网(面积1 m²,网径425 μm)以及D网(面积0.09 m²,网径425 μm)等(Barbour et al,2010)。每个样点随机选择3个区域,完成3次重复采样。采集的样品用95%乙醇固定保存,带回实验室进行标本鉴定并计数,用滤纸吸干液体称量湿重(精确到0.0001 g)。

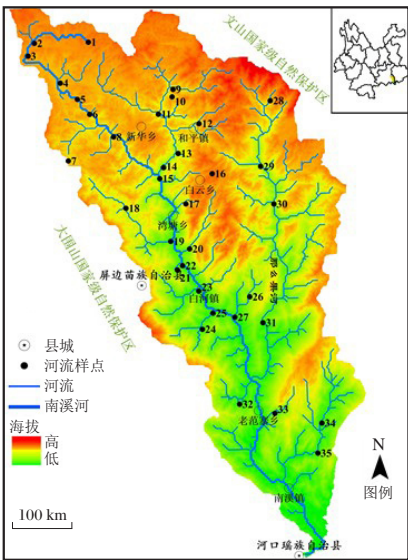


图1 南溪河流域水系、地形及采样点分布
Fig. 1 Hydrology and topography in the Nanxi River basin and sampling site locations

1.3 环境因子调查及分组

大型底栖无脊椎动物的多样性受到河流物理条件,如采样点位置、河流形态、水文以及人类活动等多种因素的影响,为了解河流环境因子的作用,调查时记录样点的海拔、河流宽度、水深、基质类型和人为干扰等环境因子情况,并根据调查点的环境状况对样点进行分组(表1),包括水深、河道宽度、海拔、河流基质、干扰水平。河流底质分组主要依据调查点河流的基质,如岩石质、砾质、淤泥质等;干扰水平则主要根据大型底栖无脊椎动物栖息地受到干扰的程度,依次划分为栖息地完全丧失、轻微破坏、河道固化后生境缓慢恢复、生境未受到任何干扰4个等级。

表1 南溪河大型底栖无脊椎动物采样点生境分组
Tab.1 Habitat grouping of sites for macroinvertebrate sampling in Nanxi River

生境因子	分组	样点数	占比/%
水深	0~0.5 m	22	62.9
	0.5~1.0 m	8	22.9
	>1.0 m	5	14.3
河道宽度	0~5 m	17	48.6
	5~10 m	12	34.3
	>10 m	6	17.1
海拔	0~5 00 m	11	31.4
	501~1 000 m	8	22.9
	1 001~1 500 m	9	25.7
	>1 500 m	7	20.0
基质	岩石	16	45.7
	卵石	9	25.7
	砾石	3	8.6
	淤泥	7	20.0
干扰水平	重度干扰	10	28.5
	轻度干扰	14	40.0
	恢复期	5	14.3
	原始状态	6	17.1

1.4 数据分析

用 Margalef 丰富度指数(D_{Ma})、Pielou 均匀度指数(J)、Shannon–Wiener 多样性指数(H')以及 Simpson 多样性指数(D)评价各样点的大型底栖无脊椎动物多样性(胡茵等,2020)。根据 Berger–Parker 优势度指数(Y)确定底栖动物优势种,当 $Y\geq 0.02$ 时,即可认为是优势种(徐兆礼和陈亚瞿,1989)。计算公式如下:

$$Y=(N_i/N)\times f_i \tag{1}$$

式中: N 为群落总个体数量, N_i 为第 i 物种的个体数, f_i 为该物种在各样点中出现的频率。

使用配对样本 t 检验进行数据差异分析。使用 Kolmogorov–Smirnov 进行数据正态性检验。使用单因素方差分析(ANOVA)进行组间多重比较,分析环境因子的影响。使用 Excel 软件进行生物多样性指数及

相关数据的计算,SPSS 15.0 软件对数据进行统计分析,显著性检验设定 $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。数据使用平均值 $\pm$ 标准误(Mean $\pm$ SE)表示。

2 结果与分析

2.1 南溪河大型底栖动物的群落结构及多样性

2.1.1 物种组成及数量 调查期间共采集到大型底栖无脊椎动物 9 421 个,丰、枯水期分别为 4 026 个和 5 395 个。隶属于扁形动物、环节动物、软体动物和节肢动物 4 个动物门、7 纲 73 科 208 种。在群落组成上,水生昆虫占绝对优势,共 171 种,占 82.2%,其次是软体动物,28 种,占 13.5%,其他类群相对较少(表 2)。水生昆虫中,双翅目 59 种、蜉蝣目 32 种、蜻蜓目 27 种,毛翅目 22 种,鞘翅目 17 种,为水生昆虫的主要类群。

表 2 不同时期南溪河大型底栖动物的物种数和个体数量占比 %

Tab.2 Percentages of benthic macroinvertebrate species and individual numbers at the levels of class and order in different water periods of Nanxi River

分类群	个体数量占比			物种数占比		
	丰水期	枯水期	整体	丰水期	枯水期	整体
昆虫纲 Insecta	89.27	95.90	93.07	76.80	84.31	82.22
蜉蝣目 Ephemeroptera	49.15	46.82		13.60	17.65	
襀翅目 Plecoptera		0.43			1.96	
毛翅目 Trichoptera	19.97	18.38		12.00	9.80	
蜻蜓目 Odonata	3.13	1.84		13.60	11.11	
双翅目 Diptera	11.64	24.45		20.00	33.33	
广翅目 Megaloptera	1.28	1.43		0.80	1.31	
鞘翅目 Coleoptera	2.42	1.54		12.00	3.27	
半翅目 Hemiptera	1.65	1.04		4.00	5.22	
鳞翅目 Lepidoptera	0.12	0.09		0.80	0.65	
甲壳纲 Crustacea	0.15	0.11	0.13	1.60	0.65	0.96
等足目 Isopoda	0.05			0.80		
十足目 Decapoda	0.10	0.05		0.80	0.65	
腹足纲 Gastropoda	9.07	3.17	5.69	15.20	10.45	12.02
柄眼目 Stylommatophora	0.05	0.11		0.80	0.65	
基眼目 Basommatophora	4.49	2.00		6.40	3.92	
中腹足目 Mesogastropoda	4.46	0.89		8.00	5.88	
瓣鳃纲 Lamellibranchia	0.42	0.15	0.27	2.40	0.65	1.44
蚌目 Unionoida	0.02			0.80		
帘蛤目 Veneroida	0.39	0.15		1.60	0.65	
蛭纲 Hirudinea	0.94	0.41	0.64	1.60	2.61	1.92
无吻蛭目 Arhynchobdellida	0.64	0.28		0.80	1.31	
吻蛭目 Rhynchobdellida	0.27	0.13		0.80	1.31	
寡毛纲 Oligochaeta	0.10	0.09	0.10	1.60	0.65	0.96
颤蚓目 Tubificida	0.10	0.09		1.60	0.65	
涡虫纲 Turbellaria	0.05	0.17	0.12	0.80	0.65	0.48
三肠目 Tricladida	0.05	0.17		0.80	0.65	

大型底栖无脊椎动物的物种数为2~48种,平均(23.9±1.8)种;个体数量为6~1 048个,平均(269±40)个。

在采集到的全部9 421个大型底栖无脊椎动物中,水生昆虫个体数量占比最高,达93.1%,其主要类群是蜉蝣目、毛翅目和双翅目,占比86.0%,其中蜉蝣目为4 514个,占比为47.9%;软体动物次之,占比5.7%(表2)。

2.1.2 生物量和密度 调查的大型底栖动物生物量为0.1~15.8 g/m²,平均(4.47±0.64) g/m²,密度为19~1 456 个/m²,平均(327±54)个/m²。生物量和密度较大的区域出现在中游和上游之间,最大值为上游的8号样点(图2),该区域为南溪河干流与中游四岔河交汇的山地溪流;生物量和密度较小的区域出现在海拔落差较大的中游和下游,即湾塘乡和白河镇之间。密度最低在上游的4号样点,仅19 个/m²,生物量最低为中游的20号样点,仅0.1 g/m²。

2.1.3 生物多样性指数 南溪河大型底栖动物多样性指数分析结果见表3,Margalef丰富度指数(D_{Ma})(4.21±0.25)、Shannon-Wiener多样性指数(H')(3.16±0.11)平均值均大于3,其中接近2/3的样点多样性指数值超过3,Margalef丰富度指数大于3的样点26个,Shannon-Wiener指数23个,显示南溪河的大型底栖动物的多样性较高;Simpson指数(D)(0.82±0.02)和Pielou均匀度指数(J)(0.73±0.02)平均值均大于0.7。

表3 南溪河样点大型底栖动物多样性指数
不同指数值范围的样点占比

Tab.3 Average diversity indices of benthic macroinvertebrates in Nanxi River and percentage of the sampling sites in each diversity index range					
指数值范围	$D_{Ma}/\%$	$H'/\%$	指数值范围	$D/\%$	$J/\%$
0~1	0.00	0.00	0~0.25	0.00	0.00
1~2	5.71	8.57	0.25~0.5	2.86	5.71
2~3	20.00	25.71	0.5~0.75	14.29	31.43
>3	74.29	65.71	0.75~1	82.86	62.86

2.2 大型底栖无脊椎动物群落季节性变化

2.2.1 物种组成的季节差异 南溪河在丰水期和枯水期分别采集到大型底栖无脊椎动物125种和153种。无论在物种数上还是个体数量上,水生昆虫均为占比最高的类群(表4)。水生昆虫丰水期有96种,枯水期129种,占比分别为76.8%和84.3%,为绝对优势类群,其中又以蜉蝣目、毛翅目、蜻蜓目、双翅目以及鞘翅目为主;软体动物其次,分别占比为17.6%和11.1%。个体数量上,水生昆虫丰、枯水

期分别为3 594个和5 174个,占比89.3%和95.9%。丰水期占比较高的是蜉蝣目、毛翅目、双翅目和蜻蜓目;枯水期则为蜉蝣目、双翅目、毛翅目、和蜻蜓目。其中蜉蝣目为占比最高,丰水期和枯水期分别为49.2%和46.8%。

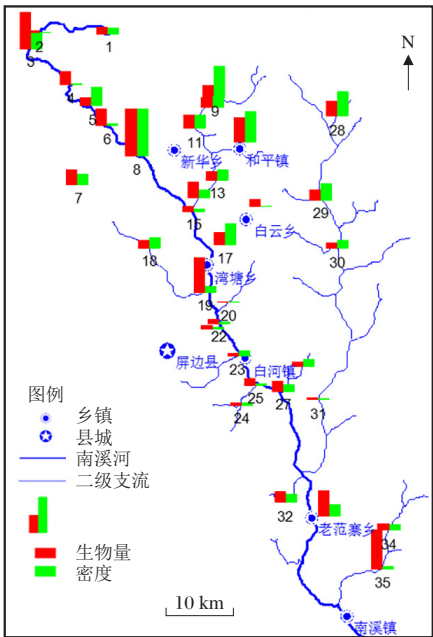


图2 南溪河各样点大型底栖无脊椎动物相对生物量及密度
Fig.2 Relative biomass and density of benthic macroinvertebrates at each sampling site in Nanxi River

表4 南溪河大型底栖无脊椎动物组成占比 %

类群	个体数量占比%		物种数占比%	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
水生昆虫 Aquatic insects	89.27	95.90	76.80	84.31
蜉蝣目 Ephemeroptera	49.15	46.82	13.60	17.65
毛翅目 Trichoptera	19.97	18.38	20.00	33.33
双翅目 Diptera	11.64	24.45	13.60	11.11
蜻蜓目 Odonata	3.13	1.84	12.00	9.80
鞘翅目 Coleoptera	2.42	1.54	12.00	3.27
软体动物 Mollusks	9.49	3.31	17.6	11.11
环节动物 Annelids	1.04	0.50	4.80	3.26
扁形动物 Flatworms	0.05	0.17	0.8	0.65

在各样点上,无论是物种数还是个体数量都呈现出枯水期大于丰水期的趋势。丰水期各样点的平均物种数为(12.5±1.1)种,极显著低于枯水期(16.2±1.3)种($t=-3.348,df=32,P=0.002$)(图3a);丰水期的平均个体数量(122±23)个,也低于枯水期(163±23)个(图3b)。

2.2.2 生物量和密度的季节变化 丰水期样点上大型底栖无脊椎动物的平均生物量要高于枯水期(表5),

但统计学上差异不显著($t=1.877, df=34, P=0.069$)。最大生物量出现在 35 号样点, 主要以软体动物为主, 枯水期最大生物量在 33 号样点, 以纹石蛾科幼虫为主。

丰水期平均密度略小于枯水期($t=-0.623, df=34, P=0.538$)(表 5)。丰水期南溪河底栖动物最大密度在 12 号样点, 以蜉蝣目四节蜉科、双翅目蚋科、毛翅目纹石蛾科为主。枯水期密度最大的样点为 9 号, 以蜉蝣目四节蜉科、双翅目蚋科物种为主。

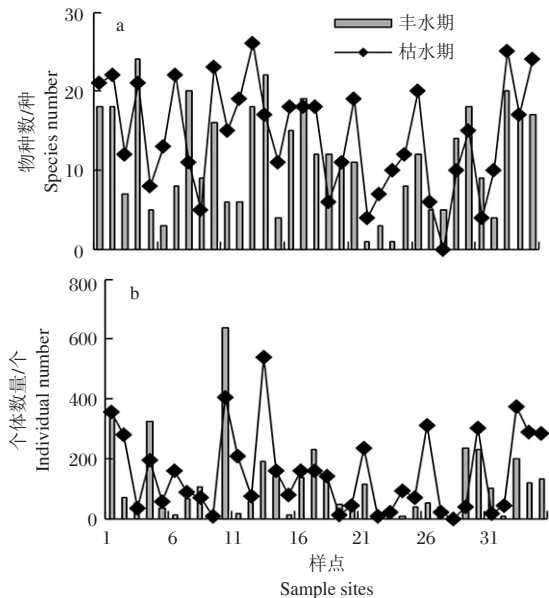


图3 南溪河大型无脊椎动物物种数(a)和个体数量(b)
Fig.3 Species number (a) and individual number (b) of benthic macroinvertebrate at each sampling site in Nanxi River

表5 南溪河大型无脊椎动物平均生物量和平均密度
Tab.5 Average biomass and density of benthic macroinvertebrate during different periods of Nanxi River

参数	丰水期	枯水期
生物量/g·m ⁻²	5.71 ± 1.12(0.2~25.4)	3.23 ± 0.66(0~16.0)
密度/个·m ⁻²	307 ± 54 (1~1 307)	347 ± 71 (0~1 665)

2.2.3 优势物种 根据 Berger-Parker 优势度指数(Y)计算所得的南溪河大型底栖无脊椎动物的优势种共 5 种, 优势度由高到低依次(表 6)为: 四节蜉科一种(Baetidae sp.)、纹石蛾属一种(Hydropsyche sp.)、蚋科一种(Simuliidae sp.)、亚非蜉属一种(Afromurus sp.)、扁蜉属一种(Heptagenia sp.)。丰水期和枯水期南溪河大型底栖无脊椎动物中优势度最高的均为四节蜉一种(Baetidae sp.)、纹石蛾属一种(Hydropsyche sp.)、蚋科一种(Simuliidae sp.)和亚非蜉属一种(Afromurus sp.)。

表6 南溪河大型底栖无脊椎动物优势种及优势度
Tab.6 Dominant benthic macroinvertebrate species and their dominance in Nanxi River

优势种	优势度(Y)		
	丰水期	枯水期	整体
1. 四节蜉科 Baetidae sp.	0.19	0.21	0.23
2. 纹石蛾属 Hydropsyche sp.	0.10	0.08	0.12
3. 蚋科 Simuliidae sp.	0.02	0.07	0.06
4. 亚非蜉属 Afromurus sp.	0.02	0.02	0.03
5. 扁蜉属 Heptagenia sp.		0.02	0.02

2.2.4 多样性指数的季节变化 对不同时期大型底栖动物的多样性指数 t 检验显示, 丰水期的 Margalef 丰富度指数 D_{Ma} ($t=-2.881, df=32, P=0.007$) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 H' ($t=-2.143, df=32, P=0.040$) 显著低于枯水期(表 7); 但 Simpson 优势度指数 D ($t=-1.632, df=32, P=0.112$), 以及 Pielou 均匀度指数 ($t=0.151, df=32, P=0.881$) 未表现出显著的季节性差异。

表7 南溪河大型底栖动物多样性指数
Tab.7 Benthic macroinvertebrate diversity indices in Nanxi River

多样性指数	丰水期	枯水期
D_{Ma}	2.53 ± 0.18 (0.39~4.43)	3.11 ± 0.21 (0.56~6.15)
H'	2.48 ± 0.12 (0.78~3.67)	2.78 ± 0.12 (0.92~4.25)
D	0.74 ± 0.02 (0.33~0.91)	0.78 ± 0.02 (0.46~0.94)
J	0.74 ± 0.02 (0.39~0.94)	0.74 ± 0.02 (0.51~0.96)

2.3 环境因子对大型底栖无脊椎动物群落的影响
2.3.1 海拔 对不同海拔梯度上的物种数、平均密度、生物量以及多样性指数进行单因素方差分析, 海拔对大型底栖无脊椎动物物种数($F_{3,31}=4.422, P=0.011$)、密度($F_{3,31}=5.379, P=0.004$)和生物多样性指数 D_{Ma} ($F_{3,31}=3.111, P=0.040$) 具有显著影响, 但对生物量影响不显著($F_{3,31}=0.920, P=0.443$)。大型底栖动物的物种数、密度以及 D_{Ma} 指数均随着海拔的升高而增加, 在海拔 1 000~1 500 m 达到最高, 而后降低(表 8)。
2.3.2 干扰因素 干扰强度显著影响大型底栖无脊椎动物的物种数($F_{3,31}=7.466, P=0.001$)、密度($F_{3,31}=3.569, P=0.025$)和生物多样性指数($D_{Ma}, F_{3,31}=6.451, P=0.002; H', F_{3,31}=3.151, P=0.039$), 但对生物量的影响不显著($F_{3,31}=2.286, P=0.098$)(表 9)。受到重度干扰的调查点上, 大型底栖动物物种数、密度、 D_{Ma} 以及 H' 指数均显著均低于其他干扰生境。除重度干扰外的其他干扰强度下, 物种数($F_{2,22}=0.054, P=0.948$)、密度

($F_{2,22}=0.091, P=0.914$)和生物量($F_{2,22}=0.622, P=0.546$)没有显著差异。

2.3.3 河流生境因素 河流底质对大型底栖无脊椎动物的影响分析见表 10。淤泥底质显著降低了物种数($F_{3,31}=2.960, P=0.047$)和生物多样性指数($D_{Ma}, F_{3,31}=4.275, P=0.013$; $D, F_{3,31}=4.862, P=0.007$; $H', F_{3,31}=$

6.494, $P=0.002$),但并不影响动物的密度($F_{3,31}=0.087, P=0.500$)和生物量($F_{3,31}=0.336, P=0.799$)。砾石基质生境中大型底栖无脊椎动物的物种数量及其多样性指数最高,淤泥质生境最低。河流水深和河道宽度对大型底栖无脊椎动物的物种数、密度、生物量以及多样性指数均没有表现出显著的影响($P>0.05$)。

表 8 海拔对南溪河大型底栖无脊椎动物影响的 ANOVA 分析和多重比较
Tab.8 ANOVA analysis and multiple comparisons of the effects of elevation on benthic macroinvertebrates in Nanxi River

海拔/m	样点数/个	物种数/个	密度/个·m ⁻²	生物量/g·m ⁻²	D_{Ma}	D	H'	J
<500	11	18.1±1.8 ^b	139±22 ^b	4.02±1.29	3.61±0.33 ^b	0.82±0.02	3.08±0.11	0.75±0.02
501~1 000	8	24.4±3.7 ^{ab}	275±55 ^b	3.27±0.92	4.33±0.46 ^{ab}	0.86±0.01	3.31±0.19	0.76±0.03
1 001~1 500	9	33.1±2.6 ^a	622±145 ^a	6.16±1.32	5.3±0.35 ^a	0.84±0.02	3.44±0.13	0.69±0.03
1 501~2 000	7	20.6±5.3 ^b	302±116 ^b	4.39±1.44	3.61±0.77 ^b	0.75±0.06	2.78±0.41	0.73±0.05

注:a、b:组间差异标识。
Note:superscripts a, b indicate significant differences between groups.

表 9 不同干扰水平下大型底栖无脊椎动物群落指标的 ANOVA 分析和多重比较

Tab.9 ANOVA analysis and multiple comparisons of benthic macroinvertebrate community indices under disturbance of different degrees

干扰程度	样点数/个	物种数/个	密度/个·m ⁻²	生物量/g·m ⁻²	D_{Ma}	D	H'	J
原始状态	6	28.0±4.2 ^a	377±109 ^a	5.12±1.66	4.77±0.63 ^a	0.78±0.06	3.25±0.32 ^a	0.69±0.05
恢复期	5	27.2±4.2 ^a	457±155 ^a	3.68±1.26	4.81±0.47 ^a	0.85±0.03	3.35±0.14 ^a	0.72±0.05
轻度干扰	14	28.8±2.5 ^a	437±98 ^a	6.03±1.18	4.79±0.34 ^a	0.84±0.01	3.40±0.12 ^a	0.71±0.02
重度干扰	10	12.9±1.9 ^b	77±16 ^b	2.29±0.57	2.78±0.31 ^b	0.79±0.03	2.69±0.22 ^b	0.80±0.03

注: a、b:组间差异标识。
Note:superscripts a, b indicate significant differences between groups.

表 10 河流基质对大型底栖无脊椎动物群落特征影响的 ANOVA 分析和多重比较

Tab.10 Effects of river substrate on community characteristics of benthic macroinvertebrates

基质	样点数/个	物种数/个	密度/个·m ⁻²	生物量/g·m ⁻²	D_{Ma}	D	H'	J
岩石	16	23.9±2.8 ^{ab}	385±100	4.77±1.16	4.29±0.33 ^a	0.85±0.01 ^a	3.25±0.10 ^b	0.75±0.02
卵石	9	26.7±3.1 ^a	344±87	4.82±1.20	4.61±0.44 ^a	0.82±0.02 ^a	3.26±0.15 ^b	0.70±0.02
砾石	3	34.7±3.5 ^a	355±20	4.89±1.82	5.80±0.62 ^a	0.91±0.01 ^a	3.98±0.14 ^a	0.78±0.03
淤泥	7	15.6±3.7 ^b	160±85	3.15±0.72	2.86±0.50 ^b	0.72±0.06 ^b	2.50±0.32 ^c	0.72±0.05

注: a、b、c:组间差异标识。
Note:superscripts a, b indicate significant differences between groups.

3 讨论

3.1 南溪河大型底栖动物群落结构及多样性

南溪河大型底栖无脊椎动物共记录到 208 种,与在本省横断山区其他已调查过的河流,如泸沽湖入湖溪流记录到 58(属)种(陈亚男等,2018)、怒江云南段记录到 31 种(李斌等,2013)、滇西北香格里拉岗曲河为 61 种(朱迪等,2009)相比,南溪河的大型底栖无脊椎动物物种较为丰富。这可能与南溪河水系所处的独特地理位置有关。南溪河流域在地

理上与东南亚关系密切,在动物区系组成上也与东洋界联系紧密。该区域生物地理区系古老而特殊(杨宇明等,2008),热带物种沿河谷向北延伸,横断山的区系成分则沿山脊向南扩散。元江流域具有丰富的物种,主要以暖水及急流型类群为主,如纹石蛾、长角石蛾、鳞石蛾、原石蛾科种类等,动物区系中东洋界分布的种类占据大部分,构成云南毛翅目昆虫区系的主体,特有种也比较多,如云南的毛翅目昆虫在国内仅分布于西南、华南区的种类高达 73.8%(桂富荣和杨莲芳,2000)。这样的独特的地理

位置也为其他水生昆虫提供了丰富的栖息地,为大型底栖无脊椎动物的多样化奠定了基础。

云南的山脉河流,大多是由西北向东南呈扇形展开,山体海拔高差悬殊。南溪河流域最低海拔仅 76.4 m,位于河口县的南溪河元江汇入口,最高海拔 2 991.2 m,海拔高差造就了该地区典型的“立体气候”特征。夏季,东南海洋暖湿气流沿河谷向内陆扩散,形成“焚风”效应,山谷腹地呈现出具有北热带特征的干热气候,河谷地带生长着连续的热带雨林,而山体中上部则发育着良好的常绿阔叶林。流域内繁茂的植被,丰富的水系及温湿的气候有利于动物区系的发育和动物的进化,为水生大型无脊椎动物的多样化创造了条件。与其他河流(丛明,2010;陈义永等,2018;余飞等,2012)不同,南溪河大型底栖无脊椎动物的优势类群是水生昆虫,而不是软体动物,表明南溪河河流生境为水生昆虫提供了良好的生存条件。 D_{Ma} 和 H' 等生物多样性指数在各样点呈现出一致的变化趋势,且多个样点具有较高的指数值,显示南溪河整体底栖动物多样性水平是比较高的。

3.2 南溪河大型底栖无脊椎动物的季节性变化

南溪河丰、枯水期大型底栖无脊椎动物的群落结构和优势物种组成较为相似,物种以水生昆虫为主,特别是蜉蝣目和毛翅目等昆虫。不同水期的生物多样性指数也没有表现出显著差异,反映出该流域底栖动物的群落结构和分布在时间上保持着相对稳定性,这可能与大型底栖无脊椎动物生命周期长,栖息地环境相对稳定有关(王璐等,2018)。2次采样中,枯水期采集到的物种数和密度均高于丰水期,可能归因于枯水期水流相较于丰水期更平缓,同时由于河流流量的减少,底栖动物的栖息面积缩小,分布更集中,故而采集到的物种及个体数量相对更丰富。

生物量上,丰水期大型底栖动物生物量要高于枯水期。生物量与个体大小和数量密切相关,虽然丰水期(8月)南溪河大型底栖动物的密度要低于枯水期,但丰水期动物的体型普遍较枯水期(11月)大,丰水期大多数群可能已临近羽化或者发育成熟,个体体型及体重达到最大,而枯水期为繁殖后幼体的生长期,数量虽大,但个体体型小,因而生物量也较低。

3.3 环境因子的影响

南溪河水系丰富的大型底栖无脊椎动物在一定程度上反映西南地区(和秋菊等,2012)诸多河流的自然属性和生物多样性现状(桂富荣和杨莲芳,2000)。南溪河主要底栖类群为水生昆虫和软体动物,群落结构与国内多条健康状况良好的河流基本相似(刘娟

娟,2020;徐丹丹等,2019)。其物种数量庞大,表明南溪河整体健康状况良好。然而一些生境破坏严重,如上游建水闸、河道翻新、山体落石堆积至河内等,这些区域大型底栖动物的物种和个体数量都非常低,如南溪河中游干流 4 号样点。生物量最低的 13 号样点,枯水期河道完全干涸,未采集到标本。

对环境因子的分析表明,海拔、基质和干扰均对南溪河大型底栖无脊椎动物的多样性具有显著的影响。大型底栖动物的物种数、个体数和多样性指数均随海拔的上升而升高,1 500~2 000 m 后又呈下降趋势。大型底栖动物多样性在海拔 1 000~1 500 m 区域最高,可能与南溪河流域海拔 1 000~1 500 m 区域地形起伏较大,河道坡降较大有关。淤泥底质的河流,其大型底栖无脊椎动物多样性显著低于岩石或砾石底质河流,这可能与淤泥底质河床容易扰动,无法为底栖动物提供稳定的栖息环境有关(段学花等,2007)。在干扰方面,重度干扰显著的降低了大型底栖动物的多样性,然而随着时间的流逝,生境得到恢复后,大型底栖无脊椎动物能够很快得到恢复。因而,对于大型底栖无脊椎动物而言,稳定的环境在维持动物的多样性上起着极为重要的作用。

志谢:感谢南京师范大学周长发老师、马振兴博士,南开大学王新华、林晓龙老师,以及南京农业大学王备新、孙长海等老师协助鉴定部分标本并提供相关资料。课题组王儒晓、郝希阳、何豪、谢东、陈建南等同学参加了部分野外采集工作。

参考文献

- 陈亚男,刘允,李晓明,等,2018. 云南高原湖泊泸沽湖入湖溪流底栖动物多样性研究与河流健康状况评估[J]. 环境保护, 46(22): 48-52.
- 陈义永,高养春,彭衡,等,2018. 松花江流域大型底栖动物群落结构与水质评价[J]. 生物安全学报, 27(2): 95-104.
- 丛明,2010. 赣江流域底栖动物生态学研究[D]. 南昌:南昌大学.
- 段学花,王兆印,程东升,2007. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性[J]. 生态学报, 27(4): 1664-1672.
- 龚成,池仕运,夏纬,等,2021. 天鹅洲长江段底栖动物的群落结构与季节变化[J]. 水生态学杂志, 42(1): 66-74.
- 桂富荣,杨莲芳,2000. 云南毛翅目昆虫区系研究[J]. 昆虫分类学报, 22(3): 212-222.
- 和秋菊,易传辉,杨宇明,等,2012. 云南高原水生昆虫研究概况[J]. 西南农业学报, 25(1): 314-317.
- 胡茵,王儒晓,杜诗雨,等,2020. 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化[J]. 生物多样性, 28(12):

- 1558-1569.
- 黄明雨, 2020. 云南洱海大型底栖动物群落结构研究进展[J]. 绿色科技, (16): 152-154.
- 李斌, 岳兴建, 耿相昌, 等, 2013. 怒江云南段大型底栖无脊椎动物群落结构与水质生物评价[J]. 四川动物, 32(1): 23-28.
- 李超, 王爱花, 惠晓梅, 等, 2020. 漳河山西段鱼类和大型底栖动物群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 41(6): 122-132.
- 李晋鹏, 董世魁, 彭明春, 2018. 澜沧江梯级水坝库区大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 环境科学学报, 38(7): 2931-2940.
- 刘娟娟, 2020. 黑河流域底栖动物群落结构及其对环境因子的响应[D]. 兰州: 兰州理工大学.
- 税玉民, 武素功, 王应祥, 等, 2018. 云南大围山国家级自然保护区综合科学研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 宋聃, 霍堂斌, 王秋实, 等, 2020. 红旗河夏季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 水产学杂志, 3(33): 42-49.
- 王丽珍, 刘永定, 陈亮, 等, 2007. 滇池底栖无脊椎动物群落结构及水质评价[J]. 水生生物学报, 4(31): 590-593.
- 王璐, 杨海军, 李昆, 等, 2018. 长白山源头溪流底栖动物群落结构季节动态[J]. 生态学报, 38(13): 4834-4842.
- 徐丹丹, 彭敏锐, 王江丽, 等, 2019. 藻渡河大型底栖动物群落结构与功能摄食类群[J]. 淡水渔业, 49(4): 50-55.
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系[J]. 生态学杂志, 8(4): 13-15.
- 杨宇明, 田坤, 和世钧, 2008. 中国文山国家级自然保护区科学考察研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 余飞, 丁国际, 郑乐平, 等, 2012. 赣江上游流域丰水期大型底栖动物群落的分布特征[J]. 上海大学学报(自然科学版), 18(4): 419-424.
- 朱迪, 郑海涛, 常剑波, 2009. 香格里拉岗曲河大型底栖动物群落和水质的快速生物评价[J]. 水生态学杂志, 30(2): 56-66.
- Allan J D, Castillo M M, 2007. Stream ecology: Structure and function of running waters[M]. Netherlands: Springer.
- Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B, 2010. 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.
- Barman B, 2014. The Importance of Aquatic Insect as Biomonitor of Freshwater Ecosystem[J]. International Journal of Environment and Natural Sciences, 1: 82-85.
- Covich A P, Palmer M A, Crowl T A, 1999. The Role of Benthic Invertebrate Species in Freshwater Ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. BioScience, 49(2): 119-127.
- Doretto A, Piano E, Fenoglio S, et al, 2021. Beta-diversity and stressor specific index reveal patterns of macroinvertebrate community response to sediment flushing[J]. Ecological Indicators, 122: 107256.
- Jiang X M, Pan B Z, Jiang W X, et al, 2021. The role of environmental conditions, climatic factors and spatial processes in driving multiple facets of stream macroinvertebrate beta diversity in a climatically heterogeneous mountain region[J]. Ecological Indicators, 124: 107407.
- Katano I, Negishi J N, Minagawa T, et al, 2021. Effects of sediment replenishment on riverbed environments and macroinvertebrate assemblages downstream of a dam[J]. Scientific Reports, 11(1): 7525.
- Mandaville S M, 2002. Chapter II Freshwater Benthic Ecology[M]. Halifax, Canada: Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax.
- Pacini N, Marchant R, Yule C M, 2018. Aquatic Macroinvertebrates[M]// Hughes J M R. Freshwater Ecology and Conservation: Approaches and Techniques. New York: Oxford University Press: 240-256.
- Vidotto-Magnoni A P, Carvalho E D, 2009. Aquatic insects as the main food resource of fish the community in a Neotropical reservoir[J]. Neotropical Ichthyology, 7: 701-708.

(责任编辑 郑金秀)

Community Structure and Seasonal Variation of Benthic Macroinvertebrates in Nanxi River

WEI Jian-fu¹, JING Kai¹, WANG Yan-hui¹, SUN Hong-ying²

(1. Engineering Research Center of Sustainable Development and Utilization of Biomass Energy, Ministry of Education, School of Life Sciences, Key Lab of Yunnan Province for Biomass Energy and Environmental Biotechnology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R. China;

2. Jiangsu Key Laboratory for Biodiversity and Biotechnology, College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R. China)

Abstract : In this study, we explored the community structure and seasonal dynamics of benthic macroinvertebrates in Nanxi River and analyzed the influence of environmental factors on the community, aiming to provide scientific evidence for the conservation and management of biodiversity in the river basin. The study was based on a survey of benthic macroinvertebrates at 35 sampling sites in Nanxi River, Yunnan Province in August (flood season) and November (dry season) 2020, focusing on the species composition, number of individuals and spatial distribution. Environmental factors were investigated synchronously, including elevation, river width, water depth, substrate type and human disturbance. A total of more than 9 421 specimens were collected during the investigation, including 208 species that belonged to 73 families, 7 classes and 4 phyla. The dominant group of benthic macroinvertebrates was aquatic insects (171 species, 82.2%), followed by mollusks (28 species, 13.5%). Among the aquatic insects, Ephemeroptera, Diptera, Trichoptera and Odonata were the dominant taxa. The diversity indices of benthic macroinvertebrates at most sampling sites were high, indicating high benthic macroinvertebrate biodiversity in Nanxi River. The species composition and individual numbers of benthic macroinvertebrates were dominated by aquatic insects in both high and low water periods. Species number, number of individuals and benthic macroinvertebrate density were significantly lower in the high water period (125 species, 4 026 ind, 307 ind/m²) than in low water period (153 species, 5 395 ind, 347 ind/m²), but biomass in the flood season (5.71 g/m²) was significantly higher than in the dry season (3.23 g/m²). The dominant species were Baetidae sp., *Hydropsyche* sp., Simuliidae sp., *Afromurus* sp. and *Heptagenia* sp., among which the first four species were dominant both in high and low water periods. The diversity of benthic macroinvertebrates in the Nanxi River was affected by elevation, substrate and human disturbance intensity and the highest diversity occurred in the river section in the elevation range of 1 000–1 500m. The diversity and density of benthic macroinvertebrates were significantly degraded when the substrate was heavily silted and by severe disturbances due to human activities.

Key words: Nanxi River; benthic macroinvertebrates; community structure; diversity