

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.04.013

北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价

曹 然¹, 黎征武¹, 毛建忠², 盛 萧¹, 王旭涛³, 邓培雁¹

(1. 华南师范大学化学与环境学院, 广东 广州 510631; 2. 云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106;

3. 珠江流域水环境监测中心, 广东 广州 510611)

摘要:对北江25个采样点的大型底栖无脊椎动物进行采样调查,并根据大型底栖无脊椎动物的群落结构特征对水质进行生物评价。研究中共采集到大型底栖无脊椎动物46属,分别隶属于15目31科,其中水生昆虫30属,占65.22%;软体动物8属,占17.39%;环节动物6属,占13.04%;甲壳动物2属,占4.35%。出现频率最高的3个种属分别为多足摇蚊属(*Polypedilum*)、巴蛭属(*Barbronia*)以及苏氏尾鳃蚓(*Branchiurasonerbyi*)。应用Shannon-Wiener多样性指数、Margalef多样性指数、Pielou均匀度指数、生物学污染指数BPI(biotic pollution index)、BI(biotic index)、FBI(family biotic index)、Goodnight-Whitley修正指数(GBI)7种生物指数对北江水质进行综合评价。结果表明:与20世纪80年代的评价结果相比,北江的大型底栖无脊椎动物在种类和数量等多方面均发生了较大的变化,生物多样性减少,耐污种所占比例增加,水质理化参数恶化;7种生物指数的评价结果存在一定的差异,部分指数之间存在较高的相关性,FBI指数和BPI指数的准确性和科学性更强,适用于北江水质的生物评价。在25个采样点中,6个采样点水质综合评价等级为较差或极差,16个采样点水质评价等级为一般,3个采样点水质等级为良好,整体水质属于一般的水平。人类活动对河流的水质状况造成了一定的影响。从水质生物学的角度衡量,北江水质整体呈现下降趋势。

关键词:大型底栖无脊椎动物;群落结构特征;生物评价;水质;北江

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)04-0080-08

Benthic macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality of Beijiang River

CAO Ran¹, LI Zhengwu¹, MAO Jianzhong², SHENG Xiao¹, WANG Xutao³, DENG Peiyan¹

(1. School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China;

3. Pearl River Water Environment Monitoring Center, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Water quality bioassessment was conducted based on the community structure of benthic macroinvertebrates investigated at 25 sampling sites in the Beijiang River. In this study, 46 genera of macroinvertebrates belonging to 31 families and 15 orders were identified, among which aquatic insects (30 genera), mollusks (eight genera), annelids (six genera), and crustaceans (two genera) accounted for 65.22%, 17.39%, 13.04%, and 4.35% of the total, respectively. *Polypedilum*, *Barbronia*, and *Branchiura sowerbyi* were the dominant species among all the benthic macroinvertebrates. The Shannon-Wiener index, Margalef index, Pielou index, biotic pollution index (BPI), biotic index (BI), family biotic index (FBI), and Goodnight-Whitley modified index (GBI) were used to comprehensively evaluate the water quality of the Beijiang River. The results show that the variety and the number of macroinvertebrates during the study period had changed remarkably compared with those in the 1980s. The biodiversity had decreased, the proportion of pollution-tolerant species had

基金项目:广东省水利科技创新项目(2014-16)

作者简介:曹然(1993—),男,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail: ryan.cao@foxmail.com

通信作者:邓培雁,教授,博士。E-mail: dpy213@126.com

increased, and the water quality had deteriorated according to physical and chemical parameters. The evaluation results of the seven biological indices showed a certain difference. Some of the indices had significant correlations between each other. The BPI and FBI indices were more adaptable to the water quality bioassessment of the Beijiang River due to their accuracy and rationality. The water quality was at low or extremely low levels at six sites, at moderate levels at 16 sites, and at high levels at three sites, indicating that the water quality at all the 25 sites was at a moderate level on the whole. Human activities had some influence on the water quality of the river. The overall water quality of the Beijiang River showed a downward trend based on water quality bioassessment.

Key words: benthic macroinvertebrates; community structure features; biological assessment; water quality; Beijiang River

近年来,生物评价法已成为河流健康评估中常用的一种重要方法^[1]。大型底栖无脊椎动物长期生活在河流底部,是河流生态系统的重要组成成分,具有生活周期长、迁移能力弱、地区性强等特点^[2]。其对河流水质的变化十分敏感^[3],因此,以大型底栖无脊椎动物为基础开发的生物评价指数能够更加准确地反映河流生态系统的健康状况。

欧美发达国家在河流生物评价方面的研究开展较早,现已提出数十种基于大型底栖无脊椎动物的评价指数用于河流水质评价^[4-5],其评价结果的科学性也已得到广泛认可。而我国在此方面的研究处于起步阶段,在实际应用中仍以国外成熟指数为基础开展评价工作。目前国内外使用较为广泛的指数有BMWP (biological monitoring working party)^[6]、ASPT (average score per taxon)^[7]、B-IBI (benthic index of biological integrity)^[8]、BI (biotic index)^[9]、FBI (family biotic index)^[10]、MMI (multimetric macroinvertebrate index)^[11]、BPI (biotic pollution index)^[12]、Shannon-Wiener 多样性指数^[13]、Margalef 多样性指数^[14]、Simpson 多样性指数^[15]、Pielou 均匀度指数^[16]以及 Goodnight-Whitley 修正指数 (GBI)^[17]。不同指数的使用条件和适用范围都有所不同,在进行河流水质评价时,应根据实际情况对不同方法进行比较,并选择合适的指数,以保证评价结果准确可靠^[18]。

目前针对北江水质评价的研究较匮乏,难以对北江水质及污染状况做出合理评价。苏炳之等^[19]曾在 1985 年采用大型底栖无脊椎动物指数对北江进行水质评价,但年代久远,评价选用的指数数量较少,评价结果可信度不足。笔者基于北江的大型底栖无脊椎动物调查数据和水质数据,分析比较 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 多样性指数、Pielou 均匀度指数、BPI、BI、FBI、GBI 7 种指数在北江水质评价中的实际应用效果,探究北江大型底栖无脊椎动物群落结构的变化情况和空间分布特征,以期为北江的水质监测提供科学可靠的生物评价结果,从而深入了解北江河流生态系统的健康状况。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况与采样点

北江发源于江西省信丰县石碣大茅山,地跨江西、广东两省,是珠江流域的第二大水系。北江属亚热带季风型气候,季风影响显著,阳光充足,热量丰富。集水面积 52 068 km²,干流全长 573 km,一级支流包括墨江、锦江、武江、南水、潏江、连江、潞江、滨江和绥江等。基于北江各段地形地貌及污染源分布状况,共设 25 个采样点,覆盖北江干流及所有一级支流,采样点分布见图 1。

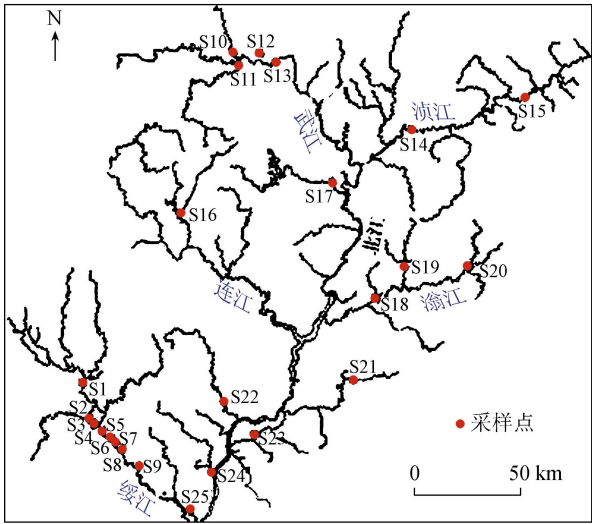


图 1 北江采样点分布示意图

1.2 样品的采集、处理与分析

采样在枯水期进行,样品采集参照国际通用的采样方法,在每个采样点水深小于 1.5 m、长度 100 m 的采样区域内,选用直径 0.3 m、孔径 500 μm 的 D 型尼龙纱网以扫网法采集大型底栖无脊椎动物样品,共采集长度为 10 m,总面积为 3 m² 的样方。采样时,按样点内各种小生存环境(水草、静水区、流水区及底质)出现比例分配小样方数^[20]。将 D 型网采集到的底泥样本倒入水桶,轻轻搅动使底栖动物与底泥分离,过 300 μm 孔径筛网,重复上述步骤至水桶中目测无底栖动物存在,再将筛得的底质样本

倒入装清水的白瓷盘仔细挑拣。采集到的大型底栖无脊椎动物样品装入广口瓶中,加体积分数为 8% 的甲醛溶液固定保存后带回实验室镜检计数。室内鉴定时,大部分物种鉴定至科或属,少数根据相关资料鉴定至属或种。

同时采集河流水样,依据《水和废水监测分析方法(第 4 版)》^[21],现场使用便携式多参数水质测量仪(YSI)测定水温、pH 值、DO、BOD、COD_{Mn}、TN、NH₃-N、TP 8 项水质理化指标。

1.3 水质生物评价方法

Shannon-Wiener 多样性指数^[22]、Margalef 多样性指数^[23]、Pielou 均匀度指数^[16]、BPI^[24]、BI^[25]、FBI^[26]、GBI^[17]的计算公式分别为

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

$$d_M = \frac{S - 1}{\ln N} \tag{2}$$

$$J = \frac{- \sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i}{\log_2 S} \tag{3}$$

$$I_{BP} = \frac{\lg(N_1 + 2)}{\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)} \tag{4}$$

$$I_B = \frac{\sum_{i=1}^N N_i t_i}{N} \tag{5}$$

$$I_{FB} = \frac{\sum_{j=1}^N n_j t_j}{N} \tag{6}$$

$$I_{GB} = \frac{N - N_{oil}}{N} \tag{7}$$

式中: H 为 Shannon-Wiener 多样性指数值; d_M 为 Margalef 多样性指数值; J 为 Pielou 均匀度指数值; I_{BP} 为 BPI 值; I_B 为 BI 值; I_{FB} 为 FBI 值; I_{GB} 为 GBI 值; N 是样本总个体数; N_i 为物种 i 的个体数; P_i 为物种 i 的个体数占样本总个体数的比例; S 为物种丰富度; N_1 为寡毛纲、蛭纲和摇蚊科个体总数; N_2 为多毛纲、甲壳纲及除摇蚊科以外的其他水生昆虫的个体总数; N_3 为软体动物门个体总数; t_i 是物种 i 的耐污值; n_j 是科 j 的个体数; N_{oil} 为样本中寡毛纲个体总数。

1.4 评价分级标准

结合已有研究成果^[15,18,27],7 种大型底栖无脊椎动物指数评价水质的分级标准见表 1。

1.5 统计分析

7 种大型底栖无脊椎动物评价指标的正态性检验利用 K-S 检验,其评价指标均符合正态分布,故采用 Pearson 相关性分析方法对指数间的相关性进行

分析评价。所有分析方法均利用 SPSS 19.0 软件操作完成。

表 1 生物评价指标等级划分标准

生物评价指数	极佳(Ⅰ)	良好(Ⅱ)	一般(Ⅲ)	较差(Ⅳ)	极差(Ⅴ)
H	>3.50	2.51~3.50	2.01~2.50	1.01~2.00	0.01~1.00
d_M	>3.50	2.51~3.50	2.01~2.50	1.01~2.00	0.01~1.00
J	>0.81	0.61~0.80	0.41~0.60	0.21~0.40	0.01~0.20
I_{BP}	<0.10	0.10~0.50	0.51~1.50	1.51~5.00	>5.00
I_B	0.01~3.50	3.51~5.50	5.51~6.50	6.51~8.50	8.51~10.00
I_{FB}	0.01~3.75	3.76~5.00	5.01~5.75	5.76~7.25	7.26~10.00
I_{GB}	0.81~1.00	0.61~0.80	0.41~0.60	0.21~0.40	0.01~0.20

2 结果与分析

2.1 大型底栖无脊椎动物群落结构与分布

2.1.1 物种组成

调查中采集到的底栖动物共 15 目 31 科 46 属,分别隶属于节肢动物门的昆虫纲和甲壳纲、软体动物门的腹足纲和瓣鳃纲以及环节动物门的蛭纲和寡毛纲。其中,水生昆虫共 6 目 17 科 30 属,占物种总数的 65.22%;软体动物共 4 目 8 科 8 属,占物种总数的 17.39%;环节动物 3 目 4 科 6 属,占物种总数的 13.04%;甲壳动物 2 目 2 科 2 属,占物种总数的 4.35%。25 个采样点中,出现频率最高的 3 个种属分别为多足摇蚊属(*Polypedilum*)、巴蛭属(*Barbronia*)以及苏氏尾鳃蚓(*Branchiurusowerbyi*)。

2.1.2 群落结构

在物种组成方面,各采样点的种群结构特征也不尽相同。将所有物种归为水生昆虫、环节动物、软体动物和甲壳动物 4 大类,北江各采样点的大型底栖无脊椎动物群落结构分布见图 2。其中,以水生昆虫为主的采样点可达 15 个,以环节动物为主的采样点有 8 个。由此可以看出,水生昆虫和环节动物为北江底栖动物群落结构中的主要组成部分。

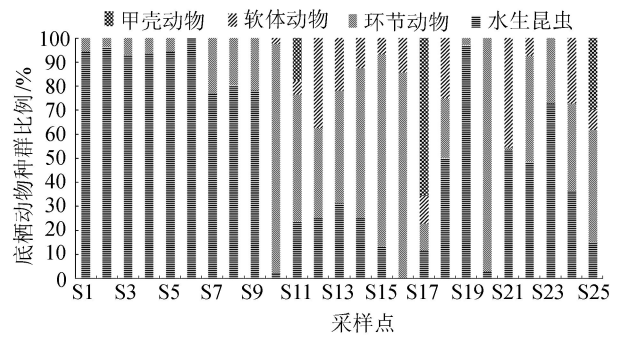


图 2 各采样点大型底栖无脊椎动物群落结构分布

2.1.3 数量变化

由调查结果可以看出,各采样点的大型底栖无

脊椎动物个体总数存在较大的差异。在 25 个采样点中,S10 采样点采集到的大型底栖无脊椎动物数量最多,达到 601 只,其次是 S21 采样点的 367 只,其余采样点的大型底栖无脊椎动物数量均在 200 只以下,最少的是 S23、S24 采样点,仅有 11 只。整体来看,大型底栖无脊椎动物的个体总数从 S1 至 S25 采样点呈现逐渐减少的趋势,具体分布见图 3。

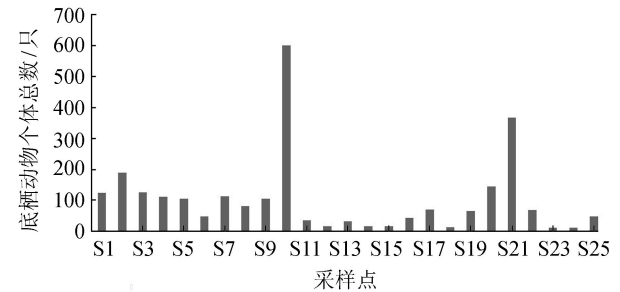


图 3 各采样点大型底栖无脊椎动物个体总数分布

2.1.4 物种丰富度

北江各采样点物种丰富度的分布见图 4。所有采样点的平均物种丰富度为 7 种,最大值出现在 S21 采样点,为 17 种,最小值出现在 S15、S16、S24 3 个采样点,物种丰富度仅为 3 种。

2.2 水质生物评价

各采样点水质生物评价结果见表 2。根据 7 种大型底栖无脊椎动物指数的评价结果,可以得到北

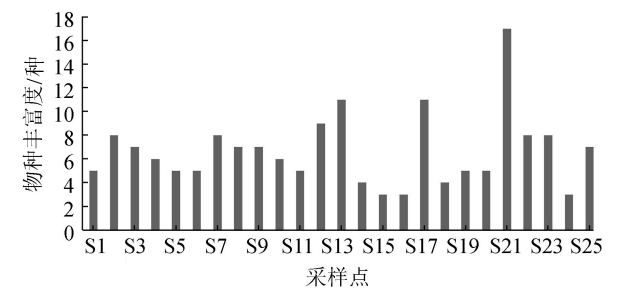


图 4 各采样点底栖动物物种丰富度分布

江的水质属于一般的水平。25 个采样点中水质等级为极差有 2 个,水质等级为较差有 4 个,水质评价等级为一般的采样点有 16 个,水质等级为良好的采样点有 3 个,没有水质极佳的采样点。

2.3 水质理化指标

水质理化指标能够反映河流水质的瞬时状态。对北江的水质理化指标进行分析,根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》对其进行评价。可以看出,DO、BOD、COD_{Mn} 3 个理化指标满足 I 类水质标准,而 TP、NH₃-N、TN 3 个指标分别满足 II 类、III 类和 V 类水质标准,表明北江水体已受到氮、磷污染的影响。综合各个指标的评价结果来看,北江水质基本满足 III 类水质标准。北江各水质理化指标统计值见表 3。

表 2 北江各采样点水质生物评价结果

采样点	<i>H</i>	<i>d_M</i>	<i>J</i>	<i>I_{BP}</i>	<i>I_B</i>	<i>I_{FB}</i>	<i>I_{GB}</i>	综合评价
S1	0.93 (V)	0.83 (V)	0.40 (IV)	1.81 (IV)	4.82 (II)	5.50 (III)	1.00 (I)	一般
S2	0.90 (V)	1.34 (IV)	0.30 (IV)	1.40 (III)	4.67 (II)	5.37 (III)	0.98 (I)	一般
S3	0.78 (V)	1.24 (IV)	0.28 (IV)	1.82 (IV)	4.73 (II)	5.44 (III)	0.99 (I)	一般
S4	0.98 (V)	1.06 (IV)	0.38 (IV)	2.26 (IV)	4.87 (II)	5.54 (III)	0.98 (I)	一般
S5	0.93 (V)	0.86 (V)	0.40 (IV)	1.87 (IV)	4.79 (II)	5.47 (III)	1.00 (I)	一般
S6	1.37 (IV)	1.03 (IV)	0.59 (III)	1.09 (III)	4.70 (II)	5.26 (III)	1.00 (I)	一般
S7	2.42 (III)	1.48 (IV)	0.81 (I)	0.92 (III)	5.64 (III)	5.77 (IV)	1.00 (I)	一般
S8	2.23 (III)	1.37 (IV)	0.79 (II)	0.93 (III)	5.46 (II)	5.61 (III)	1.00 (I)	一般
S9	2.27 (III)	1.29 (IV)	0.81 (I)	0.96 (III)	5.59 (III)	5.73 (III)	1.00 (I)	一般
S10	0.60 (V)	0.78 (V)	0.23 (IV)	1.84 (IV)	7.74 (IV)	9.71 (V)	0.04 (V)	极差
S11	2.15 (III)	1.13 (IV)	0.93 (I)	0.96 (III)	6.63 (IV)	7.35 (V)	0.47 (III)	一般
S12	2.85 (II)	2.89 (II)	0.90 (I)	0.60 (III)	6.06 (III)	6.62 (IV)	0.69 (II)	一般
S13	2.85 (II)	2.89 (II)	0.82 (I)	0.71 (III)	6.44 (III)	7.20 (IV)	0.59 (III)	一般
S14	1.50 (IV)	1.08 (IV)	0.75 (II)	1.33 (III)	6.83 (IV)	8.20 (V)	0.38 (IV)	较差
S15	0.91 (V)	0.74 (V)	0.57 (III)	1.55 (IV)	7.31 (IV)	8.95 (V)	0.20 (V)	较差
S16	0.86 (V)	0.54 (V)	0.54 (III)	1.31 (III)	7.77 (IV)	9.31 (V)	0.14 (V)	较差
S17	2.16 (III)	2.35 (II)	0.62 (II)	0.36 (II)	5.35 (II)	5.37 (III)	0.90 (I)	良好
S18	1.73 (IV)	1.21 (IV)	0.87 (I)	1.04 (III)	6.61 (IV)	6.61 (IV)	0.83 (I)	一般
S19	1.45 (IV)	0.96 (V)	0.62 (II)	1.08 (III)	5.29 (II)	5.41 (III)	0.97 (I)	一般
S20	0.28 (V)	0.80 (V)	0.12 (V)	1.99 (IV)	7.67 (IV)	9.59 (V)	0.03 (V)	极差
S21	3.15 (II)	2.71 (II)	0.77 (II)	0.41 (II)	4.67 (II)	4.86 (II)	1.00 (I)	良好
S22	2.50 (III)	1.66 (IV)	0.83 (I)	1.37 (III)	6.61 (IV)	7.01 (IV)	0.56 (III)	一般
S23	2.91 (II)	2.92 (II)	0.97 (I)	0.54 (III)	5.02 (II)	5.70 (III)	0.82 (I)	良好
S24	1.57 (IV)	0.83 (V)	0.99 (I)	1.00 (III)	7.15 (IV)	7.15 (IV)	0.64 (II)	一般
S25	1.96 (IV)	1.56 (IV)	0.70 (II)	0.74 (III)	7.60 (IV)	7.48 (V)	0.53 (III)	较差
平均值	1.69 (IV)	1.42 (IV)	0.64 (II)	1.20 (III)	6.00 (III)	6.64 (IV)	0.71 (II)	一般

表3 北江水质理化指标统计值 mg/L

类别	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{BOD})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
最大值	8.90	1.30	2.70	2.04	3.95	0.13
最小值	6.00	0.61	1.30	0.12	0.51	0.03
平均值	8.07	0.90	1.83	0.58	1.77	0.05
标准差	0.74	0.17	0.37	0.60	1.04	0.03

2.4 不同生物评价指数比较

所选的7种大型底栖无脊椎动物指数对北江水质的生物评价结果分布情况见图5。虽然部分指数的评价结果分布存在相似之处,如BI和FBI等,但大部分指数的评价结果总体上仍有较大差异,对河流整体水质的评价结果也不尽相同。如Shannon-Wiener指数的评价结果中占比重最大的等级为极差,Margalef指数的评价结果中占比重最大的等级为较差,FBI和BPI的评价结果中占比重最大的等级为一般,BI的评价结果中占比重最大的等级为良好,而Pielou均匀度指数和GBI的评价结果中占比重最大的等级为极佳。

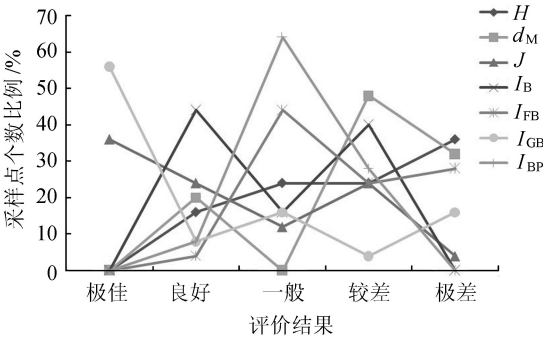


图5 不同生物评价指数评价结果分布

对7个指数分别成对进行Pearson相关性分析,以定量描述不同指数间评价结果的相关性,分析结果见表4。其中,BI、FBI、GBI之间具有极高的相关性,Shannon-Wiener指数、Margalef指数、Pielou均匀度指数和BPI之间也均具有较高的相关性。除此之外,7个指数之间无其他显著相关性。

表4 各生物评价指数之间的Pearson相关系数

指数	H	d_M	J	I_{BP}	I_B	I_{FB}	I_{GB}
H	1.000						
d_M	0.831 **	1.000					
J	0.832 **	0.488 *	1.000				
I_{BP}	-0.848 **	-0.716 **	-0.770 **	1.000			
I_B	-0.182	-0.281	0.065	0.062	1.000		
I_{FB}	-0.372	-0.354	-0.177	0.278	0.933 **	1.000	
I_{GB}	0.320	0.267	0.171	-0.225	-0.905 **	-0.985 **	1.000

注: **为 $p < 0.01$; *为 $p < 0.05$; 相关系数大于0.4表示两者具有显著相关性。

在BI、FBI、GBI 3个指数中,GBI与BI和FBI呈显著负相关,而BI和FBI均以物种的耐污值为基础进行计算,总体呈显著正相关。在Shannon-Wiener指数、Margalef指数、Pielou均匀度指数和BPI 4个

指数中,BPI与其他3个指数呈显著负相关,而Shannon-Wiener指数与Margalef指数和Pielou均匀度指数之间则具有较高的正相关性,Margalef指数和Pielou均匀度指数也呈显著正相关,但相关性相对较弱。

3 讨论

大型底栖无脊椎动物在种类、数量等方面的变化是河流生态健康状况的重要指标,其群落结构能够反映出人类活动对环境造成的负面影响^[28]。北江的底栖动物以水生昆虫为主要类群,软体动物也占据较高的比例。摇蚊科、颤蚓科以及蛭纲的底栖动物出现频率较高,在大部分采样点均有出现。摇蚊科和颤蚓科的物种均为典型的耐污种,对有机污染有较强的耐受能力,这表明北江各采样点均已受到不同程度的污染。在物种多样性方面,北江的平均物种丰富度仅为7种,处于一个较低的水平,体现出北江的河流生态系统的稳定性较差,容易受到人类活动和环境变化的干扰。苏炳之等^[19,29]曾在20世纪80年代对北江底栖动物群落结构进行调查,并对北江水质做了初步评价,他们在北江的7个采样点共采集到底栖动物73属85种,其中河蚬、淡水壳菜、日本沼虾、中华圆田螺等物种为优势种,评价结果显示,当时的北江已经受到了一定程度的污染,并对底栖动物的群落结构造成了影响。相比之下,笔者采集到的物种类别有所减少,物种多样性水平降低,颤蚓、摇蚊等耐污种所占的比例增加,表明北江受到有机污染的影响加剧,北江水质呈现不断下降的趋势。

综合比较其他学者在东江^[12]、秦淮河^[20]、松花江^[15]、上海世博园后滩湿地^[30]、湖北省大型湖泊^[31]等国内多个地区各类水体的相关研究成果,可以发现,不同地区的底栖动物群落结构与水体水质之间的响应关系也存在诸多相似之处。不同种属的底栖动物对各种污染物的耐受能力和敏感程度均不相同,特定种群在数量、类别方面的变化及出现频率的差异与水质等级之间联系密切。在各类水体中,水生昆虫在种类和数量上优势明显,但多数昆虫纲生物对水质优劣的指示作用并不显著,仅以摇蚊科生物作为各类污染水体中的优势类群,对有机污染有较强的指示性。以寡毛纲为代表的软体动物虽然在底栖动物群落结构中仅占据很小的比例,但该类群的底栖动物耐污性强,常常成为污染水体的优势物种。在对湖北省大型湖泊底栖动物群落结构的相关研究中发现,软体动物作为优势物种经常出现在面积较大的湖泊中,且物种类别丰富,而摇蚊幼虫和寡

毛纲生物则多为小型湖泊的优势种,其物种数也相对较少^[31]。分析表明,水体有机污染加剧对河流、湖泊的生态系统结构会造成影响,水体 DO、有机物浓度等指标也会发生相应改变^[32],这使得水体中的优势生物类群逐渐向寡毛纲、摇蚊科等适应能力更强的物种转变,物种多样性水平也大幅降低。因此,进行水质评价时,在使用水质理化指标和生物评价指数的基础上,可以同时参考底栖动物的群落结构组成和物种丰富度进行分析,能够帮助研究者对各类水体的水质状况有更加全面、科学的认知。

通过不同水质理化指标对北江水质进行评价的结果表明,北江水质已受到氮、磷污染的影响,出现了水体富营养化的现象。从水质等级的评定结果来看,生物评价指数和水质理化指标对北江水质的评价结果基本一致。比较而言,两种方法在本质上仍存在着一定的差异。水质理化指标在水质评价中的应用已较为成熟,其评价结果精确度高,易于量化,可以通过建立统一的水质评价标准对不同水体的水质进行比较和管理^[33]。但水质理化指标具有较强的随机性,一次采样仅能代表该时段的瞬时水质,其评价结果的代表性和科学性需要进一步验证。生物评价注重水质对水生生物和河流生态系统的影响,能够体现污染物在较长时段内对河流水质的累积影响,评价结果更为准确和科学。而生物评价也存在一定的不足,其评价结果更倾向于定性描述水质状况,难以给出定量分析。因此,在实际应用中,可将两种方法结合使用,优势互补,能够提高评价结果的科学性和可靠性,系统、全面地评价河流水质状况。

采用大型底栖无脊椎动物评价指数评价河流水质时,选用的指数不同,得到的评价结果往往存在一定的差异。笔者选择了7种国内外常用的生物评价指数分别对北江水质进行评价,综合评价结果认为北江的水质属于一般的水平。根据各个指数的单一评价结果也可以看出,北江的物种多样性水平较低,耐污种在底栖动物群落中占据一定优势。该结果与通过底栖动物群落结构的变化特征推断得到的水质等级基本一致。

由于生物评价指数构建的基础依据和计算原理不同,所选用的7种指数得到的水质评价结果存在一定程度上的不同。由相关性分析可以看出,Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数以群落结构和物种丰富度为依据进行计算,3个指数之间具有较高的相关性,其评价结果主要反映的是河流生态系统在物种多样性方面的好坏程度,并未考虑不同物种耐污能力、敏感性的差异以及群落结构中耐污种和清洁种的比例变

化,对水质的变化没有直观的反映,在实际应用中应与其他类别的生物指数相结合,综合评价河流水质及健康状况。BI 和 FBI 之间具有极高的相关性,2个指数以底栖动物对河流污染状况的耐受程度为依据进行计算,同时考虑了物种多样性和不同生物耐污能力的差异,对河流水质的评价更为准确和科学。且相比 BI 而言,FBI 对物种类别的划分更加细致,其评价结果与真实水平也更为接近,可信度相对较高。GBI 的计算主要考虑寡毛纲生物的物种分布,而在北江的底栖动物群落中,水生昆虫在种类上和数量上均占据着较大优势,由于北江部分河段的生境不适合寡毛纲生物的生存,寡毛纲生物的分布受到一定影响,在多个采样点分布极少或未曾出现,因此 GBI 的评价结果也受到一定影响,准确性存在一定偏差。BPI 则综合考虑了不同物种的影响,同时对物种类别和耐污能力均予以考量,评价结果的准确性也得到了提高。总体来看,FBI 和 BPI 更加适用于北江的水质生物评价。

利用大型底栖无脊椎动物指数进行水质生物评价也有其局限性。BI、FBI 等在计算时使用物种耐污值作为依据,但我国在物种耐污值方面的研究长期处于落后的水平,对于局部地区耐污值的研究仅见王备新等^[34]对我国东部地区、王建国等^[35]对庐山地区、邢树威等^[36]对辽宁地区、赵瑞等^[37]对辽河流域等相关研究工作,针对其他江河流域进行水质生物评价时需要参考国内外其他地区相关研究的耐污值数据。由于地理位置和生活环境的不同以及人类活动的影响,物种耐污值在不同地区之间均存在一定差异,这会对河流水质生物评价的最终结果造成很大的影响,评价结果的准确性也需要进一步验证。

4 结 论

对北江的25个采样点的大型底栖无脊椎动物的生物评价的结果表明,北江水质整体水平一般,物种多样性水平相对较低,底栖动物以多足摇蚊属、巴蛭属以及苏氏尾鳃蚓为主。Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 多样性指数、Pielou 均匀度指数、BPI、BI、FBI、GBI 7种生物评价指数中,FBI 和 BPI 的准确性和科学性更强,适用于北江水质的生物评价。与20世纪80年代的评价结果相比,耐污种所占的比例增加,北江的水质整体呈现下降趋势。

参考文献:

[1] CAO Y, HAWKINS C P. The comparability of bioassessments: a review of conceptual and methodological issues[J]. Freshwater Science, 2011, 30(3): 680-701.

- [2] 王宏伟,昌艳萍,张磊,等. 拒马河原生动物和底栖动物初步调查及水质分析[J]. 动物学杂志,2006,41(4): 77-82. (WANG Hongwei,CHANG Yanping,ZHANG Lei, et al. Primary survey on protozoa and benthos and assessment of water quality in Juma River[J]. Chinese Journal of Zoology,2006,41(4): 77-82. (in Chinese))
- [3] 程曦,李小平,陈小华. 苏州河水质和底栖动物群落1996—2006年的时空变化[J]. 生态学报,2009,29(6): 3278-3287. (CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua. An assessment of long-term changes in water quality and benthos community of Suzhou Creek (1996—2006)[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(6): 3278-3287. (in Chinese))
- [4] MOYA N, TOMAMOVA S, OBERDORFF T. Initial development of a multi-metric index based on aquatic macroinvertebrates to assess streams condition in the Upper Isiboro-Sécure Basin, Bolivian Amazon [J]. Hydrobiologia,2007,589(1): 107-116.
- [5] MASSON S, DESROSIERS M, PINEL-ALLOUL B, et al. Relating macroinvertebrate community structure to environmental characteristics and sediment contamination at the scale of the St. Lawrence River[J]. Hydrobiologia, 2010,647(1): 35-50.
- [6] WALLEY W J, HAWKWS H A. A computer-based reappraisal of the biological monitoring working party scores using data from the 1990 river quality survey of England and Wales[J]. Water Research, 1996,30(9): 2086-2094.
- [7] VARNOSFADERANY M N, EBRAHIMI E, MIRGHAFARY N, et al. Biological assessment of the Zayandeh Rud River, Iran, using benthic macroinvertebrates [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters,2010,40(3): 226-232.
- [8] KERANS B L, KARR J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley[J]. Ecological Applications,1994,4(4): 768-785.
- [9] CHUTTER F M. An empirical biotic index of the quality of water in south African streams and rivers [J]. Water Research,1972,6(1): 19-30.
- [10] HILSENHOFF W L. An improved biotic index of organic stream pollution[J]. Great Lakes Entomologist,1987,20(1): 31-39.
- [11] CHEN K, HUGHES R M, XU S, et al. Evaluating performance of macroinvertebrate-based adjusted and unadjusted multi-metric indices (MMI) using multi-season and multi-year samples[J]. Ecological Indicators, 2014,36(1): 142-151.
- [12] 王博,刘全儒,周云龙,等. 东江干流底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 水生态学杂志,2011,32(5): 43-49. (WANG Bo, LIU Quanru, ZHOU Yunlong, et al. The community structure of zoobenthos and bioassessment of water quality of the Dongjiang River [J]. Journal of Hydroecology,2011,32(5): 43-49. (in Chinese))
- [13] 张楠,孟伟,张远,等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. 环境科学研究,2009,22(2): 162-170. (ZHANG Nan, MENG Wei, ZHANG Yuan, et al. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2009,22(2): 162-170. (in Chinese))
- [14] 丁建华,杨威,金显文,等. 赣江下游流域大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学,2012,24(4): 593-599. (DING Jianhua, YANG Wei, JIN Xianwen, et al. Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in lower reaches of Ganjiang River[J]. Journal of Lake Sciences,2012,24(4): 593-599. (in Chinese))
- [15] 霍堂斌,刘曼红,姜作发,等. 松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 应用生态学报,2012,23(1): 247-254. (HUO Tangbin, LIU Manhong, JIANG Zuofa, et al. Macrobenthos community structure of macrobenthos and bioassessment of water quality in main stream of Songhua River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(1): 247-254. (in Chinese))
- [16] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology,1966,13(1): 131-144.
- [17] 王备新,陆爽,杨莲芳,等. 水质生物评价指数筛选:以南京紫金山地区小水体为例[J]. 南京农业大学学报,2003,26(4): 46-50. (WANG Beixin, LU Shuang, YANG Lianfang, et al. A study on the selection of metrics in water quality bioassessment; a case study on small water bodies in Zijinshan Mountain Nanjing City[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2003,26(4): 46-50. (in Chinese))
- [18] 黄旭蕾,李天宏,蒋晓辉. 基于大型底栖无脊椎动物指数的黄河水质评价研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51(3): 553-561. (HUANG Xulei, LI Tianhong, JIANG Xiaohui. Assessing water quality of the Yellow River with benthic macro-invertebrate indices[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015,51(3): 553-561. (in Chinese))
- [19] 苏炳之,李鸥. 利用大型底栖动物评价北江水质的研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),1985(1): 96-101. (SU Bingzhi, LI Ou. Water quality bioassessment of Beijiang River based on benthic macro-invertebrates[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition),1985(1): 96-101. (in Chinese))
- [20] 吴东浩,刘伟,赵煜,等. 秦淮河上游水体大型底栖无脊椎动物群落结构及水质生物评价[J]. 环境监测管理技术,2010,22(5): 19-22. (WU Donghao, LIU Wei, ZHAO Yu, et al. Macroinvertebrate community structure and bioassessment of upstream Qinhuai River [J]. The

- Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010, 22(5): 19-22. (in Chinese))
- [21] 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[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [22] SHANNON C E, WEAVER W, WIENER N. The mathematical theory of communication [M]. Chicago: University of Illinois Press, 1949.
- [23] 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 等. 天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3952-3958. (MA Xiujian, SHEN Jianzhong, WANG Teng, et al. Macrozoobenthos community structure and water quality evaluation of Tian'e Zhou oxbows [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3952-3958. (in Chinese))
- [24] 刘录三, 李中宇, 孟伟, 等. 松花江下游底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 81-86. (LIU Lusan, LI Zhongyu, MENG Wei, et al. The community structure of zoobenthos and bioassessment of water quality in the lower reaches of the Songhua River [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 81-86. (in Chinese))
- [25] 王备新, 杨莲芳. 我国底栖动物 BI 指数水质生物评价标准的初步建立[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(5): 43. (WANG Beixin, YANG Lianfang. Preliminary establishment of criterion of bioassessment using biotic index in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2003, 5(5): 43. (in Chinese))
- [26] HENNE L J, SCHNEIDER D W, MARTINEZ L M. Rapid assessment of organic pollution in a west-central Mexican River using a family-level biotic index [J]. Journal of Environmental Planning & Management, 2002, 45(5): 613-632.
- [27] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2281-2287. (GENG Shiwei, QU Xiaodong, ZHANG Yuan, et al. Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2281-2287. (in Chinese))
- [28] LÜCKE J D, JOHNSON R K. Detection of ecological change in stream macroinvertebrate assemblages using single metric, multimetric or multivariate approaches[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(4): 659-669.
- [29] 苏炳之, 黎伟新, 赖泽兴. 珠江水系(广东江段)底栖动物调查[J]. 动物学杂志, 1989, 24(3): 15-19. (SU Bingzhi, LI Weixin, LAI Zexing. Survey of zoobenthos in Zhujiang River (Guangdong) [J]. Chinese Journal of Zoology, 1989, 24(3): 15-19. (in Chinese))
- [30] 胡忠军, 王思卿, 张饮江, 等. 上海世博园后滩湿地底栖动物群落特征与水质评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(4): 1080-1088. (HU Zhongjun, WANG Siqing, ZHANG Yinjiang, et al. Community characteristics of macrozoobenthos in Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai, China and their application on bio-assessment of water quality [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(4): 1080-1088. (in Chinese))
- [31] 胡成龙, 姜加虎, 陈宇炜, 等. 湖北省湖泊大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 129-138. (HU Chenglong, JIANG Jiahu, CHEN Yuwei, et al. Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality of shallow lakes in Hubei Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 129-138. (in Chinese))
- [32] HEISLER J, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 3-13.
- [33] 陈小华, 杨青, 赵振, 等. 基于大型底栖无脊椎动物群落的上海市河道水质生物学评价[J]. 动物学杂志, 2013, 48(2): 220-231. (CHEN Xiaohua, YANG Qing, ZHAO Zhen, et al. Evaluation on river water quality based on the river substrate macro-invertebrate in Shanghai, China [J]. Chinese Journal of Zoology, 2013, 48(2): 220-231. (in Chinese))
- [34] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775. (WANG Beixin, YANG Lianfang. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2768-2775. (in Chinese))
- [35] 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[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 279-284. (WANG Jianguo, HUANG Huibai, YANG Mingxu, et al. Tolerance values of benthic macroinvertebrates and bioassessment of water quality in the Lushan nature reserve [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2003, 9(3): 279-284. (in Chinese))
- [36] 邢树威, 王俊才, 丁振军, 等. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值及水质评价[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 29-33. (XING Shuwei, WANG Juncai, DING Zhenjun, et al. Large benthonic invertebrates' tolerance values and water quality evaluation in Liaoning Province [J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(3): 29-33. (in Chinese))
- [37] 赵瑞, 高欣, 丁森, 等. 辽河流域大型底栖动物耐污值[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4797-4809. (ZHAO Rui, GAO Xin, DING Sen, et al. Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4797-4809. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-09-10 编辑: 王芳)