

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.015

基于 5 种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价

盛 萧¹,毛建忠²,曹 然¹,黎征武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 510006;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:基于 24 个采样点的大型底栖动物监测数据,Goodnight-Whitley 修正指数(GBI 指数)、average score per taxon(ASPT)指数、family biotic index(FBI)指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 benthic index of biotic integrity(B-IBI)指数 5 种不同的生物评价指数,对东江流域的主要干支流进行河流生态健康评价,并研究不同生物评价指数在东江的适用性。结果表明,东江流域的整体健康状态处于中等水平,河流上游水质多达到“良好”,中游水质多为“一般”,下游水质则为“较差”或“极差”。分析了不同指数对不同类型人类干扰活动的响应,结果表明,除 ASPT 指数外,其余 4 种指数在不同程度上均能较显著地反映人类干扰的影响。其中,GBI 指数对磷污染指示作用最佳;FBI 指数对 NO₂⁻-N 的污染指示最好;Shannon-Wiener 多样性指数对有机污染有较好的指示作用,并与电导率呈显著的负相关关系;B-IBI 指数与 DO 呈现显著的正相关,并能很好地指示 NH₄⁺-N 污染。利用不同的生物评价指数对东江进行综合评价,不仅能较为可靠地反映东江流域水质的整体状况,而且能指示不同人类干扰活动对东江河流生态系统的影响。

关键词:大型底栖动物;生物评价指数;河流生态健康评价;东江

中图分类号:Q958.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)01-0075-08

River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates

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

(1. School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;
2. Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China;
3. Pearl River Water Environment Monitoring Center, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Based on the monitoring data for macroinvertebrates from 24 sampling sites, five indices including the Goodnight-Whitley modified index (GBI), the average score per taxon (ASPT) index, the family biotic index (FBI), the Shannon-Wiener index, and the benthic index of biotic integrity (B-IBI) were used to assess the health status of the main stream and tributaries of the Dongjiang River Basin. The applicability of the indices to the basin was studied. The results show that the overall health status of the Dongjiang River Basin was at a middle level but varied in different parts of the basin: the upper basin had a healthy status, the central part had a moderately healthy status, and the lower part had an unhealthy or extremely unhealthy status. Analysis of the responses of different indices to various types of human activities shows that all the indices, excluding the ASPT index, can reflect the influence of human activities to various degrees. Of the indices, the GBI index was a good indicator of phosphorus contamination, the FBI index was a good indicator of nitrite nitrogen contamination, the Shannon-Wiener index could indicate organic pollution well while it had a significantly negative correlation with conductivity, and the B-IBI index had a strongly positive correlation with dissolved oxygen, being a good indicator to ammonia contamination. In conclusion, the comprehensive assessment of the Dongjiang River Basin with different biological indices can not

基金项目:广东省水利科技创新项目(2014-16)
作者简介:盛萧(1990—),女,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail:winterlilies@163.com
通信作者:邓培雁,教授。E-mail:dpy213@126.com

only reflect the whole condition of the basin reliably, but also indicate the effect of different types of human activities on the river ecosystem of the basin.

Key words: macroinvertebrate; biological index; river health assessment; Dongjiang River

河流作为环境介质和营养物质的载体,为水生生物提供栖息场所^[1]。当河流受到干扰时,会使河流生态系统的结构和功能发生变化,最终使河流健康受损。藻类、浮游动物、鱼类及大型底栖动物等最常被用来监测和评价河流健康状况^[2]。大型底栖动物因种类繁多、分布广泛、易于辨认、能综合反映物理、化学、生物等多种生态胁迫对水环境的累积效应等特点^[3],在河流健康评估中广泛应用,并取得了良好的效果。

水质生物学评价是指通过对水体中水生生物的调查或直接检测来评价水体的生物学质量^[4]。德国科学家 Kolkwitz 于 1902 年首次提出并应用生物评价指示河流有机污染后,许多学者逐渐认识到生物评价在水质的评价与管理中的不可替代性,并开始进行大量的研究^[5]。其中,基于大型底栖动物评价指数的发展较为迅速,应用较多,这些指数主要包括:①单一生物指数^[6],依据指示物种存在的数量来定性判断,如 Goodnight-Whitley 指数、Chandler 计分系统、family biotic index (FBI) 指数等;②生物多样性指数^[7],通过定量采样,运用统计学分析方法来建立,如 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 多样性指数等;③生物完整性指数^[8],又称多度量生物指数,由 Karr^[8] 于 1981 年提出,通过多种生物指数综合反映水体的生物学状况,从而评估河流水质。

Goodnight 指数是最早的基于大型底栖无脊椎动物的指数,Wright 等于 1933 年通过计算寡毛类的密度来反映水体污染程度,并在此基础上发展了 Goodnight 指数和 Goodnight-Whitley 修正指数 (GBI 指数)^[5]。average score per taxon (ASPT) 指数是在 biological monitoring working party (BMWP) 指数的基础上发展而来,考虑到不同类群的耐污值可能会受总物种数的影响,Armitage 等^[9]提出了 ASPT 指数,以降低总类群中出现的偶见种对评价结果的影响,该指数在应用过程中仅要求将底栖动物鉴定到科,既减少了工作量,又减少了鉴定错误所带来的误差。FBI 指数由美国学者 Hilsenhoff^[10]于 1988 年提出,为降低物种鉴定的难度和节省时间,实现河流健康的快速评价,他在其所建立的 Hilsenhoff biological index (HBI) 指数的基础上,提出了 FBI 指数,有效地推动了 biological index (BI) 指数在美国的广泛应用。

生物多样性指数是目前常用作水质生物学评价的一种指数,主要是通过群落中各物种的组成状况

来反映水体污染对群落造成的影响,从而划分水质级别^[11],由于其在评价过程中存在的局限性,一般不单独用作水质评价。主要包括 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielous 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数 4 种指数,而在国际上使用较多的是 Shannon-Wiener 多样性指数。

benthic index of biotic integrity (B-IBI) 指数^[12]是在一系列参数中选择能够反映水环境中大型底栖动物的种类组成、营养关系、丰度和生长状况的生物参数,相对于 BI 指数,能够传达较多的河流生态完整性的信息。该方法在国外已得到较为广泛的应用。在国内,杨莲芳等^[13]于 1992 年首次将 B-IBI 指数引进,随后,王备新等^[14-15]应用 B-IBI 指数分别评价了安徽黄山溪流和香溪河的河流健康状况。

东江是珠江的 3 大水系之一,水资源丰富,是广东省诸多城市的主要生产和生活水源,同时担负着香港地区的用水供需任务。然而近年来,随着东江流域周边城市的经济快速发展,各种工业在东江沿岸相继落户,对东江的水环境造成巨大威胁^[16]。因此,本研究选用不同类型的大型底栖动物评价指数对东江进行评价,并进行对比,根据评价结果综合分析不同生物评价指数在东江河流生态健康评估中的适用性,以期以东江流域综合管理策略的制定与实践提供理论基础和科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况及采样点分布

东江发源于江西省寻乌县,向西南流入广东境内,经龙川、惠州、东莞等县市流入珠江,在狮子洋出虎门入海,干流全长 562 km,流域面积达 35 340 km²。东江流域属中亚热带季风气候,多年平均气温为 20.4℃,多年平均降雨量 1 750 mm^[17]。全流域共设置 24 个采样点,包括干流及其所有一级支流,采样点分布见图 1。

1.2 样品的采集、处理与分析

采样安排在枯水期,分多组,于 3 日内完成采样。利用直径 30 cm、孔径 500 μm 的尼龙纱 D 形网采集大型底栖动物样品。每个采样点在 100 m 长的范围内(水深小于 1.5 m),采集长度为 3 ~ 10 m,面积为 0.9 ~ 3.0 m²。每个样点采集 3 个平行样,以减少误差。将 D 形网所采底泥倒入水桶,用水柔和搅动桶内底质,用孔径为 300 μm 的筛网过滤,重复多

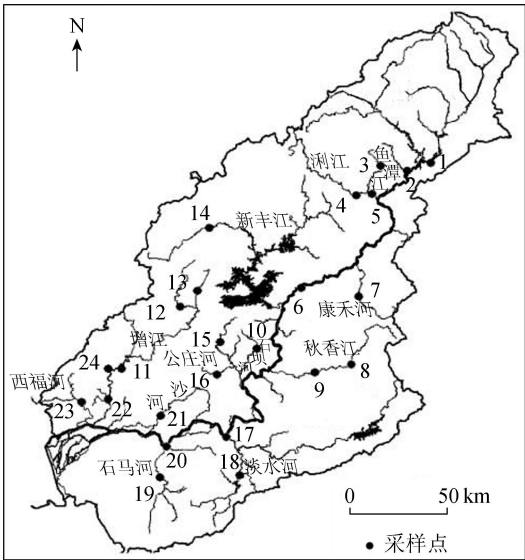


图1 东江采样点分布示意图

干流样点:1—南农村,2—车田水,6—柏埔河,17—宝华寺,20—宝湖农场。支流样点:鱼潭江 3—三多村;湟江 4—林寨镇,5—东水镇;康禾河 7—若坝大桥;秋香江 8—瓦溪镇,9—凤安镇;石坝河 10—石坝桥;公庄河 15—公庄镇;赤水河 16—柏塘镇;新丰江 14—新丰县福水破;增江 11—正果大桥,12—黄竹沥村,13—隔水桥,22—雁塔大桥,24—庙潭大桥;淡水河 18—三和镇;石马河 19—东莞雍景花园;沙河 21—龙华桥;西福河 23—神岗桥(I)

次,直至目测无大型底栖动物漂浮,再将底质倒入白瓷盘中进行仔细挑拣。随后装入广口瓶中,用 70% 乙醇固定保存,带回实验室作进一步分拣。在体视显微镜下鉴定、分类,将每个样点采集的大型底栖动物按不同种类准确地统计个体数^[18]。种类鉴定大部分至科或属,少数鉴定到种^[19]。

1.3 水样采集与理化指标测定

同步采集水样,参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[20]。用便携式多参数水质测量仪(YSI)在现场测定样点 pH 值、电导率 σ 、DO、BOD、 COD_{Mn} 、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 Cl^- 等 12 项水质指标。

1.4 评价方法

本文选用了大型底栖动物单一生物指数中的 GBI、ASPT 和 FBI 指数,生物多样性指数 Shannon-Wiener 指数,生物完整性指数 B-IBI 指数来比较不同指数对东江健康评估的区别。GBI、ASPT、FBI 和 Shannon-Wiener 多样性指数计算方法^[21]如下:

$$I_{\text{GBI}} = \frac{N - N_{\text{oil}}}{N} \quad (1)$$

$$I_{\text{ASPT}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n} \quad (2)$$

$$I_{\text{FBI}} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i m_i}{N} \quad (3)$$

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

$$P_i = \frac{N_i}{N} \quad (4)$$

其中: I_{GBI} 为 GBI 指数值; I_{ASPT} 为 ASPT 指数值; I_{FBI} 为 FBI 指数值; H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数值; N 为样品中大型底栖动物个体总数; N_{oil} 为样品中寡毛类个体总数; t_i 是每个类群的敏感值; n 为总的科级分类单元数; g_i 是大型底栖动物第 i 个科级分类单元的个体数; m_i 是科级分类单元 i 的耐污值; N_i 为第 i 个物种的个体数; S 为总种类数。

该区域 B-IBI 指数值($I_{\text{B-IBI}}$)的计算参见相关研究^[22]。其中,参照点和受损点主要根据水质等级、底质类型、栖境复杂性、土地利用状况等来确定,候选参数主要是依据东江采样的实际情况选取了 30 个分属 4 种类型(包括群落结构与功能、功能摄食类群、干扰耐受和栖境)的生物参数。然后通过分布范围检验、敏感性分析及相关性分析对参数进行逐步筛选,最终选取了 6 个参数(包括总分类单元、EPT 分类单元、EPT 相对丰度、前 3 位优势分类单元相对丰度、刮食者相对丰度和集食者相对丰度)组成 B-IBI 指数。5 种类型的大型底栖动物生物评价指数健康等级的最终划分标准^[23]见表 2。

表2 生物评价指数等级划分标准

水质等级 划分	GBI	ASPT	FBI	Shannon- Wiener	B-IBI
健康(I)	0.8~1.0	>4.0	0~3.75	>3	>3.87
良好(II)	0.6~0.8	3.5~4.0	3.75~5.00	2~3	2.90~3.87
一般(III)	0.4~0.6	3.0~3.5	5.00~5.75	1~2	1.93~2.90
较差(IV)	0.2~0.4	2.0~3.0	5.75~7.25	0.5~1	0.97~1.93
极差(V)	0~0.2	0~2.0	7.25~10.00	0~0.5	0~0.97

1.5 统计分析

大型底栖动物的数据处理利用软件 EXCEL2010 进行,不同生物评价指数的正态分布检验、相关性分析及与环境因子间的线性回归分析均利用软件 SPSS19.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同生物评价指数对东江的水质评估

利用 5 种生物评价指数综合分析东江水质状况,评价结果见表 3。结果表明,对于 24 个样点中的具体样点,根据不同生物评价指数所评价出的水质等级不完全相同。其中,部分样点,5 种生物指数的评价结果相近,如干流中的样点 6、支流中的样点 9 等;然而有不少样点,5 种指数的评价等级相差甚远,以支流中的样点 15 为例,FBI 和 B-IBI 指数都将其评为水质“较差”,而 GBI、ASPT 和 Shannon-Wiener 多样性指数则分别将其评价为“健康”、“极

表 3 不同生物评价指数对东江水质的评价结果

干/支流	样点	GBI		ASPT		FBI		Shannon-Wiener		B-IBI	
		指数值	评价等级	指数值	评价等级	指数值	评价等级	指数值	评价等级	指数值	评价等级
干 流	1	0.74	Ⅱ	5.61	I	4.68	Ⅱ	2.00	Ⅱ	2.40	Ⅲ
干 流	2	0.60	Ⅲ	2.66	Ⅳ	5.23	Ⅲ	1.33	Ⅲ	1.47	Ⅳ
干 流	6	0.98	I	6.75	I	1.34	I	2.00	Ⅱ	6.45	I
干 流	17	0.36	Ⅳ	1.14	V	6.59	Ⅳ	1.37	Ⅲ	2.02	Ⅲ
干 流	20	0.71	Ⅱ	3.09	Ⅲ	4.99	Ⅲ	1.18	Ⅲ	1.21	Ⅳ
鱼潭江	3	0.95	I	2.91	Ⅳ	4.47	Ⅱ	1.51	Ⅲ	3.83	Ⅱ
浏 江	4	0.86	I	7.79	I	3.98	Ⅱ	2.63	Ⅱ	4.10	I
浏 江	5	0.44	Ⅲ	1.47	V	5.54	Ⅲ	1.47	Ⅲ	2.83	Ⅲ
康禾河	7	0.83	I	5.65	I	2.98	I	1.69	Ⅲ	3.97	I
秋香江	8	1.00	I	3.59	Ⅱ	3.84	Ⅱ	1.45	Ⅲ	2.90	Ⅱ
秋香江	9	0.96	I	7.09	I	3.37	I	2.24	Ⅱ	3.19	Ⅱ
石坝河	10	0.35	Ⅳ	3.50	Ⅲ	5.80	Ⅳ	1.14	Ⅲ	1.20	Ⅳ
公庄河	15	0.89	I	1.59	V	6.15	Ⅳ	1.01	Ⅲ	1.62	Ⅳ
赤水河	16	0.91	I	5.70	I	2.98	I	1.77	Ⅲ	2.13	Ⅲ
新丰江	14	0.52	Ⅲ	4.13	I	5.62	Ⅲ	1.83	Ⅲ	1.93	Ⅲ
增 江	11	0.52	Ⅲ	1.44	V	6.58	Ⅳ	1.51	Ⅲ	1.17	Ⅳ
增 江	12	1.00	I	2.76	Ⅳ	2.96	I	0.82	Ⅳ	7.24	I
增 江	13	0.32	Ⅳ	3.81	Ⅱ	6.31	Ⅳ	1.23	Ⅲ	2.23	Ⅲ
增 江	22	1.00	I	1.33	V	5.24	Ⅲ	0.39	V	1.58	Ⅳ
增 江	24	0.98	I	1.51	V	6.00	Ⅳ	0.48	V	0.88	V
淡水河	18	0.01	V	4.70	I	7.59	V	0.01	V	0.13	V
石马河	19	0.98	I	2.56	Ⅳ	5.65	Ⅲ	0.94	Ⅳ	0.88	V
沙 河	21	0.76	Ⅱ	1.32	V	6.17	Ⅳ	0.85	Ⅳ	1.22	Ⅳ
西福河	23	0.97	I	2.86	Ⅳ	5.09	Ⅲ	1.67	Ⅲ	2.22	Ⅲ

差”和“一般”,由此可见,仅依靠单一的生物评价指数,难以准确地表征和反映东江流域内具体监测样点的健康状况。

综合 5 种指数的评价结果,从整体上来看,在东江流域,干流水质上游相比下游较好,上游样点除样点 2(车田水)的 ASPT 指数和 B-IBI 指数评价为水质“较差”外,其余样点评价结果都好于“一般”等级,调查显示,样点 2 周边的人类活动较强,这可能是造成其水质差的一个因素。支流中,水质相对较好的为鱼潭江、浏江、康禾河、秋香江、增江上游河段;水质一般的为新丰江、增江中游段、西福河;而水质较差为沙河、公庄河;水质极差即受到严重污染的为淡水河、石马河、增江下游河段。总体而言,东江流域上游河段的水质优于下游,河流水质整体处于中等状态。

图 2 为东江流域不同生物评价指数结果分布情

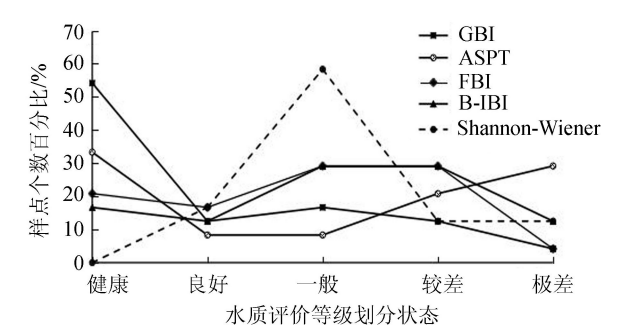


图 2 不同生物评价指数结果分布

况,由图 2 可见,5 种生物评价指数的健康评价等级在总体上存在较大差异。利用 GBI 指数评价河流健康等级的结果相对偏高,全流域中达到“健康”的样点数占总样点数的 54.2%,其次为“一般”,占 16.7%;ASPT 指数评价的“健康”样点占总样点数的 33.3%,其次为“极差”,占 29.2%,ASPT 指数表现的趋势与 GBI 指数较为相似,唯一的区别是,ASPT 指数在最后表现为上升,GBI 指数则呈现下降;FBI 指数和 B-IBI 指数的曲线趋势则表现极其相似,均呈现为先下降,后上升,再下降的趋势,达到“一般”和“较差”的样点数均占总样点数的 29.2%,其次为“健康”,分别占 20.8% 和 16.7%。与以上 4 种方法评价结果不尽相同的是 Shannon-Wiener 多样性指数,其在总体上呈现为倒 U 型,其中,水质等级达到“一般”的样点数为最多,占 58.3%,无达到“健康”的样点,其他评价等级的样点数百分比几乎持平(12.5% ~ 16.7%)。总体而言,B-IBI 指数的评价结果在各评价等级间的比例最为平均(12.5% ~ 29.2%),而其他指数在各等级间的比例则有较大的起伏。

2.2 不同生物评价指数的相关性

对 5 种生物评价指数进行 K-S 检验,由表 4 可知,5 种评价指数均符合正态分布,故采用 Pearson 相关性分析来探讨不同评价指数间的相关性(表 5)。结果表明,除 GBI 指数与 ASPT 指数、Shannon -

特征值	GBI	ASPT	FBI	Shannon-Wiener	B-IBI
均值	0.735	3.540	4.965	1.360	2.450
标准差	0.280	1.997	1.476	0.603	1.699
Z 值	0.854	0.641	0.646	0.338	0.874
渐进显著性	0.459	0.806	0.798	1.000	0.430

指数	GBI	ASPT	FBI	Shannon-Wiener	B-IBI
GBI	1				
ASPT	0.121	1			
FBI	-0.651 **	-0.622 *	1		
Shannon-Wiener	0.237	0.650 **	-0.560 **	1	
B-IBI	0.435 *	0.420 *	-0.806 **	0.438 *	1

注: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$ 。

Wiener 多样性指数无显著的相关性外,其他指数之间均达到显著相关($|r|$ 为 0.420 ~ 0.806, $P < 0.05$)。其中,FBI 指数与 GBI 指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 B-IBI 指数达到极显著相关($|r|$ 为 0.560 ~ 0.806, $P < 0.01$),ASPT 指数与 Shannon-Wiener 多样性指数也达到了极显著相关($r = 0.650$, $P < 0.01$)。5 种生物评价指数相互之间,以 FBI 指数与 B-IBI 指数

的相关性为最高($r = -0.806$),其次为 FBI 指数与 GBI 指数($r = -0.651$)。FBI 指数与 ASPT 指数也有较高的相关关系($r = -0.622$),由于 ASPT 指数是基于大型底栖动物的敏感值计算得出,而 FBI 指数是基于耐污值,故此 2 种生物评价指数呈现负相关关系。

2.3 不同生物评价指数与环境因子的关系

除 ASPT 指数外,GBI 指数、FBI 指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 B-IBI 指数在不同程度上均可以较显著地反映人类活动对流域水质的影响,并表现出较高的线性拟合度及不同的曲线回归关系。然而,多数水化指标(包括 pH 值、 NO_3^- -N、TN、TP、COD、 Cl^- 等)与这 4 种生物评价指数间无显著的线性相关关系。由图 3 可知,GBI 指数与 PO_4^{3-} -P、FBI 指数与 NO_2^- -N、Shannon-Wiener 多样性指数与 BOD、B-IBI 指数与 DO 之间有极显著的相关关系($P < 0.01$)。此外,FBI 指数和 B-IBI 指数均与 NH_4^+ -N 有显著的相关关系,以 B-IBI 指数的指示作用为最好($R^2 = 0.441$),Shannon-Wiener 多样性指数和 B-IBI 指数均与电导率表现出较高的相关关系,以 Shannon-

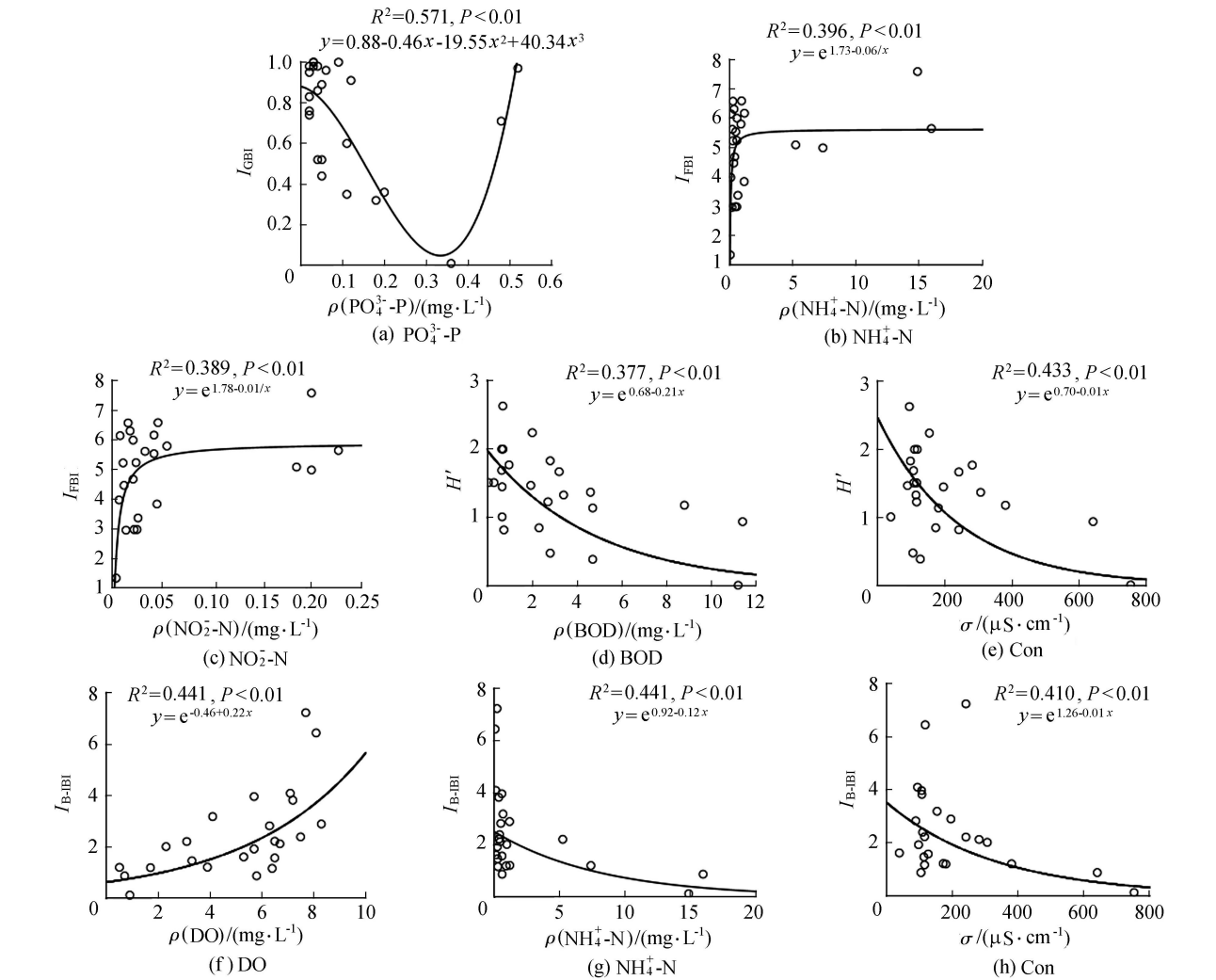


图3 不同生物评价指数与环境因子的回归分析

Wiener 多样性指数的指示作用为最佳($R^2=0.433$)。

3 讨 论

3.1 不同生物评价指数的比较

对于干流,5 种指数的评价结果差异不大,除靠近源头的样点 2 外,干流中上游河段的水质总体较好,下游河段较差。这与王兆印等^[24]的研究结果一致,其从东江上游到河口选取 12 个样点进行底栖动物调查,发现东江流域底栖动物生物多样性在上游和中游保持在较高水平,而到下游则迅速降低到 0。

而对于支流,则呈现不同程度的差异。GBI 指数的评价结果表明,东江的大多数支流,其下游河段的水质相对上游较好,这与其他指数评价结果相反。以增江段为例,样点 13 属于增江上游,其水质 GBI 评价结果为“较差”,而在对该区域的实际调查时,此样点周边的栖境较为复杂,植被多样性较高,水体透明度高,由此说明,仅将寡毛类个体数存在的比例用来评价河流水质状况,其精确性有所限制。王博等^[25]在对东江干流的 43 个点位进行底栖动物调查,并结合多种指数对东江水质进行评价时,发现 GBI 指数的评价结果较适合东江的实际情况,但从本文的研究结果来看,该指数并不完全适用于东江支流的评价,也即不能完全反映东江水质的整体实际情况。对于样点 3、5 和 18,ASPT 指数的评价结果与其他 4 种指数相差较大,表现为相反的情况;对于样点 12,Shannon-Wiener 指数与 ASPT 指数评价结果一致,而其他 3 种指数评价一致,造成这一系列差异的原因可能是多种因素的综合影响。

总体而言,5 种指数对东江支流的评价结果在总体上一致:东江上游支流的水质相对下游较好。其中,除 GBI 外,其他指数的评价结果表明增江上游水质较下游好。何琦等^[26]对东江支流增江进行底栖硅藻的采样调查,发现敏感种在增江的上游出现频率较高,表明增江中上游河段水质较清洁,而位于下游河段的 2 采样点,以耐污种占优势,表明增江下游河段污染严重。由此可见,需结合多种生物指数对东江河流水质进行综合评价,才能提高评价结果的可靠性。

从对东江河流样点的评估等级结果可知,5 种生物指数也呈现一定的差异。造成所有这一系列差异的主要原因可能有:①不同的评价指数存在自身的局限性,如 Patrick^[27]认为多样性指数作出的水质评判结果相当模糊,因为不同的水体污染类型对物种多样性的影响程度不一致。房英春等^[28]认为多样性指数评价中没考虑生物体本身耐污性的差异,尤其是耐污种的敏感问题,可能会造成比实际值偏

高的水质评价结果。②底栖动物的敏感值和耐污值的确定不明确,我国在对基于耐污值和敏感值的指数计算时主要是参照国外和国内的相关研究,尽管目前王备新等^[29]建立了一套适用我国华东地区底栖动物的耐污值,但是否适用于其他区域尚待考证。③不同生物评价标准中等级范围的划分对结果也会造成一定的影响。如 B-IBI 指数最终的评价标准具有一定的主观性,研究者在对该指数的构建过程中,如何确定参照点和候选参数,以及最终使用何种方法计算综合参数都可能会对评价结果产生影响。

3.2 不同生物评价指数在东江的适用性

河流的健康状况因地理位置、地貌特征、栖境、生物状况、污染类型等多种因素的综合作用存在差异,因此在选取不同生物评价指数评价河流健康状况时应慎重考虑生物评价指数在该河流中的适用性。

本文研究了 5 种生物评价指数与环境因子之间的关系,以探讨它们在东江的适用性。结果表明,除 ASPT 指数外,其他 4 种不同的生物评价指数对不同的人类活动干扰表现出不同的响应趋势。在许多研究中,通常认为氮磷是导致水体富营养化的重要因素^[30]。本研究的结果表明 GBI 指数与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有较好的相关关系,当 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度小于 0.35 mg/L 时,GBI 指数随 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度的增加而下降,而当大于 0.35 mg/L 时,则随其质量浓度的增加呈现上升的趋势。GBI 指数表示除寡毛类外的底栖动物在总样品中所占的比例,反映的是底栖动物的结构变化,而 Bourassa 等^[31]认为河流的无脊椎动物群落结构变化与磷含量有关。由此表明,GBI 指数对磷污染的水体有较好的指示作用。FBI 指数与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有较显著的正相关关系,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度小于 1.0 mg/L, FBI 指数随 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度增加急剧上升,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度大于 1.0 mg/L 时,出现拐点,其上升趋势趋于平缓;而 B-IBI 指数则与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈现较显著的负相关关系,并且 B-IBI 指数值随 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的增加呈现曲线下下降的趋势。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度小于 1.0 mg/L 属Ⅲ类水,反映了当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度下降到Ⅲ类水时,对 FBI 指数的影响减弱,而对 B-IBI 指数仍有一定的影响,由此表明,B-IBI 指数对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染的指示作用最佳。除此之外,FBI 指数与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈现显著的正相关关系。综上所述在富营养化的水体中,可以结合 GBI 指数、FBI 指数和 B-IBI 指数对其进行综合评价。

BOD 和 DO 均是与耗氧相关的水化指标。BOD 一般可用来表征有机污染的情况,多样性指数可用

来反映水体有机污染对群落结构造成的影响^[21],当水体受到有机污染、无机还原性物质污染时,DO 的质量浓度就会降低^[32]。在本研究中,Shannon-Wiener 多样性指数与 BOD 呈现较显著的负相关关系;B-IBI 指数与 DO 呈现出明显的正相关关系,随着 DO 质量浓度的增加,B-IBI 指数呈现上升的趋势。由此可见,Shannon-Wiener 多样性指数和 B-IBI 指数对水体中的有机污染有较好的指示作用。

电导率表征水体中溶解的总离子量,可综合反映流域内土地利用对河流生态系统的影响,通常电导率越高,人类活动对河流的干扰作用越大^[33]。渠晓东等^[22]在运用标准化方法筛选参照点构建 B-IBI 指数时,发现 B-IBI 指数与电导率存在显著的对数曲线关系,随着电导率的升高,B-IBI 值逐渐下降,电导率高于 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 后,B-IBI 指数维持在一个较低的水平。本研究也有一致的结果,B-IBI 指数与电导率存在显著的负相关关系,不同的是 B-IBI 值在电导率达到 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 后才缓慢下降,这可能与在 B-IBI 指数构建时研究者所选用的方法不同而产生的差异相关。同时,本研究中发现 Shannon-Wiener 多样性指数与电导率也有显著的负相关关系,因此,可认为这 2 种指数能够反映土地利用对东江流域水质的影响。

4 结 论

选取 GBI、ASPT、FBI、Shannon-Wiener 多样性和 B-IBI 指数对东江流域的主要干支流进行综合评价,结果表明:

a. 东江流域的整体健康状态处于中等水平,河流上游水质多达到“良好”,中游水质多为“一般”,下游水质则为“较差”或“极差”。

b. 5 种生物评价指数大部分都具有显著的相关性,其中,FBI 指数与其他 4 种指数都达到了显著水平。但由于多种因素的综合影响,不同指数对各样点的评价等级存在一定差异。

c. 除 ASPT 指数外,GBI、FBI、Shannon-Wiener 多样性和 B-IBI 指数在不同程度上均能较显著地反映人类干扰对东江的影响。其中,GBI 指数对磷污染指示作用最佳;FBI 指数对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 污染指示最好;Shannon-Wiener 多样性指数对有机污染有较好的指示作用,并与电导率呈显著的负相关关系;B-IBI 指数与 DO 呈现显著的正相关,并能很好地指示 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染。

参考文献:

[1] 张晶,董哲仁,孙东亚,等. 基于主导生态功能分区的

河流健康评价全指标体系[J]. 水利学报, 2010, 41 (8): 883-892. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Complete river health assessment index system based on eco-regional method according to dominant ecological functions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 883-892. (in Chinese))

[2] 戴纪翠,倪晋仁. 底栖动物在水生态系统健康评价中的作用分析[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2107-2111. (DAI Jicui, NI Jinren. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment[J]. Ecology and Ecosystem, 2008, 17(6): 2107-2111. (in Chinese))

[3] AURA C M, RABUBU P O, HERRMANN J. A preliminary macroinvertebrate index of biotic integrity for bioassessment of the Kipkaren and Sosiani Rivers, Nzoia River Basin, Kenya[J]. Lake and Reservoirs: Research and Management, 2010, 15(2): 119-128.

[4] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.

[5] HERING D, MOOG O, SANDIN L, et al. Overview and application of the AQEM assessment system [J]. Hydrobiologia, 2004, 516(1): 1-20.

[6] 李镇,张岩,袁建平,等. 大型底栖无脊椎动物在河流健康评价中的发展趋势[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 96-101. (LI Zhen, ZHANG Yan, YUAN Jianping, et al. Review of the role of benthic macroinvertebrates as indicators on river health assessment[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 96-101. (in Chinese))

[7] NAQINEZHADA A, HAMZEH B, ATTARB F. Vegetation-Environment relationships in the Alder Wood Communities of Caspian Lowlands, N. Iran (toward an ecological classification) Flora [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2008, 203 (7): 567-577.

[8] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.

[9] ARMITAGE P D, MOSS D, WRIGT J F, et al. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites [J]. Water Research, 1983, 17(3): 333-347.

[10] HILSENHOFF W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1988, 7(1): 65-68.

[11] 吴东浩,王备新,张咏,等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 129-134. (WU Donghao, WANG Beixin, ZHANG Yong, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(2): 129-134. (in Chinese))

- [12] KERANS B L, KARR J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley[J]. Ecological Application, 1994, 11(4): 768-785.
- [13] 杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 等. 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价[J]. 生态学报, 1992, 12(1): 8-15. (YANG Lianfang, LI Youwen, QI Daoguang, et al. Community structure of aquatic insect and biomonitoring of water quality in Jiuhuahe river [J]. Acta Ecologica Sinica, 1992, 12(1): 8-15. (in Chinese))
- [14] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1481-1490. (WANG Beixin, YANG Lianfang, HU Benjin, et al. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using benthic-index of biotic integrity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1481-1490. (in Chinese))
- [15] 渠晓东. 香溪河大型底栖动物时空动态、生物完整性及小水电站的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究院, 2006.
- [16] 邓培雁, 张婉, 王旭涛, 等. 水质对东江流域附生硅藻群落的影响研究[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1-13. (DENG Peiyan, ZHANG Wan, WANG Xutao, et al. The effects of water quality on epilithic diatoms communities of Dongjiang river basin[J]. Acta Ecological Sinica, 2015, 35(6): 1-13. (in Chinese))
- [17] 邓培雁, 雷远达, 刘威, 等. 七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5014-5024. (DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang Basin [J]. Acta Ecological Sinica, 2012, 32(16): 5014-5024. (in Chinese))
- [18] 孟伟, 张远, 梁渠东, 等. 河流生态调查技术方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 112-119.
- [19] TACHET H, RICHOUX P, BOURNAUD M, 等. 淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学[M]. 刘威, 王旭涛, 黄少峰, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [20] 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]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [21] LI Li, ZHENG Binghui, LIU Lusan. Biomonitoring and bioindicators used for river ecosystems: definitions, approaches and trends [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2(1): 1510-1524.
- [22] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4661-4672. (QU Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the benthic-index of biotic integrity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4661-4672. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 王兆印, 程东升, 段学花, 等. 东江河流生态评价及其修复方略[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1228-1235. (WANG Zhaoyin, CHENG Dongsheng, DUAN Xuehua, et al. Assessment of ecological system in East River and corresponding ecological restoration strategies[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1228-1235. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 何琦, 韦桂峰, 刘静, 等. 增江底栖硅藻种类多样性及分布特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 245-253. (HE Qi, WEI Guifeng, LIU Jing, et al. Species diversity and spatial distribution of benthic diatom in Zeng River, Guangdong Province, southern China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2011, 19(3): 245-253. (in Chinese))
- [27] PATRICK R. Use of algae, especially diatoms, in the assessment of water quality[M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1973: 76-95.
- [28] 房英春, 田春, 肖友红. 苏子河浮游藻类多样性与水质的生物评价[J]. 水利渔业, 2007, 27(1): 57-58. (FANG Yingchun, TIAN Chun, XIAO Youhong. The diversity of planktonic algae and bioassessment of water quality in Suzi River[J]. Reservoir Fisheries, 2007, 27(1): 57-58. (in Chinese))
- [29] 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))
- [30] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [31] BOURASSA N, MORIN A. Relationships between size structure of invertebrate assemblages and trophic and substrate composition in streams[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1995, 14(3): 393-403.
- [32] 奚旦立, 孙裕生. 环境监测[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [33] WELCH E B, JACOBY J M, MAY C W. River Ecology and Management [M]. New York: Springer-Verlag, 1998.

(收稿日期: 2016-04-18 编辑: 王 芳)