

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.018

珠江重要河流底栖动物水质生物学评价

王旭涛¹, 谢昭², 刘威¹, 徐盛²

(1. 珠江水资源保护科学研究所, 广东 广州 510611; 2. 南京农业大学昆虫系, 江苏 南京 210095)

摘要:2011年和2012年调查了珠江流域66个样点的底栖动物和水化学指标,利用2011年北江11个样点和郁江17个样点的底栖动物群落和水化学指标,采用主成分分析法获得综合环境因子(主成分1和主成分2)。分析36个候选底栖动物参数与环境因子间的相关性,结合参数的分布范围,确定适于珠江流域开展河流生态系统生物学质量评价的3个底栖动物参数:双翅目百分比、刮食者百分比和BI指数,进而构建了珠江流域河流生物学质量评价的综合生物指数及评价等级(清洁、轻度污染、中度污染和重度污染)。66个样点的综合生物指数评价结果显示,珠江流域河流生物学质量以轻度至中度污染为主,占80.3%,清洁占13.6%,重度污染占有6%。研究表明,在珠江流域应用底栖动物开展中大型河流水质生物学评价具有良好的应用前景。

关键词:大型底栖无脊椎动物;综合生物指数;生物学评价;珠江

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)03-0094-05

Bioassessment of water quality using benthic macroinvertebrates in major rivers of Pearl River Basin

WANG Xutao¹, XIE Zhao², LIU Wei¹, XU Sheng²

(1. Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, Guangzhou 510611, China;

2. Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Benthic macroinvertebrates and hydrochemical indices were collected from 66 sampling sites in the Pearl River Basin in the years 2011 and 2012. The benthic macroinvertebrate communities and hydrochemical indices from 11 sites of the Beijiang River and 17 sites of the Yujiang River in the year 2011 were investigated, and the integrated environmental factors (PC1 and PC2) were obtained through principle analysis. Based on analysis of the correlation between 36 candidate parameters and the environmental factors, and the distribution of the parameters, three indices applicable to bioassessment of the river ecosystem in the Pearl River Basin were determined, including the percentage of diptera taxa, the percentage of scrapers, and the biotic index (BI). Then, the integrated biotic index was determined and the grading scales were classified into non-pollution, slight pollution, moderate pollution, and heavy pollution categories. The assessment of integrated biotic indices from 66 sampling sites shows that the biological conditions of 80.3% of the rivers had the status of slight to moderate pollution, 13.6% of the rivers had the status of non-pollution, and 6% of the rivers had the status of heavy pollution in the Pearl River Basin. This study demonstrates the applicability of bioassessment of water quality in medium-and large-sized rivers of the Pearl River Basin using benthic macroinvertebrates.

Key words: benthic macroinvertebrate; integrated biotic index; bioassessment; Pearl River

水质生物评价自1902年德国科学家 Kolkwita 和 Marsson 首次应用至今,历经了100多年的发展,提出了许多成功的水质生物学评价参数^[1]。大型底栖动物因其生活周期长、行动缓慢、分布广泛、个

体较大、易于采集和识别、对环境变化敏感等特点,已成为水质生物学评价中应用最广泛的类群^[2]。自20世纪70年代以来,北美和欧洲已广泛应用大型底栖动物群落结构对河流水质进行评价^[3-6]。国

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001021, 201301047)

作者简介:王旭涛(1981—),男,工程师,硕士,主要从事水生态调查与评价研究。E-mail: awuhu@126.com

内虽然也有相关方面的研究^[7-11],但相比国外而言,比较欠缺。

总体而言,水质生物学评价方法一般分为变量分析法 (variate method) 和度量分析法 (metric method)。变量分析法主要从生态学角度考虑,通过建立预测模型来进行水质生物学评价。此类方法的理论基础是:在参照条件下,生物群落结果相似。该方法在英国和澳大利亚使用较为广泛,如英国的 BEAST 模型和澳大利亚的 AusRivAS 模型^[3,12-13]。相比变量分析法,度量分析法具有计算简单、评价直观、易于被相关环保部门接受等特点。此类方法的基础是选取合适的生物参数,但一般情况下,单一的生物指数只能反映生物群落结构及功能的单个方面,不能进行全面而准确的评价。因此,自 20 世纪 90 年代初北美国家开始使用多个生物参数综合评价水质^[3-4,12,14]后,国内也出现了一些相应研究^[15-16]。多度量指数评价方法中的生物参数筛选,一般采用参照组和干扰组进行对比和判别分析。此方法虽已发展得较为成熟,但仍然有一定的限制,如有些人为干扰严重的流域难以找到充足的参照样点。为此,笔者尝试通过结合受损河流水体理化指标和底栖动物群落,以生物参数对环境因子的响应为依据,筛选出合适的生物指数,进而针对研究区域进行水质生物学评价。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

珠江是我国境内第 3 大河流,是西江、北江、东江和珠江三角洲诸河的总称,干流全长 2 129 km,流域面积 35.5 万 km²。珠江流域地处亚热带,年平均温度在 14~22℃,年平均降雨量 1 200~2 200 mm,降雨量分布呈由东向西逐步减少的特点,且降雨年内分配不均,地区分布差异和年际变化较大。

1.2 生物数据采集

2011 年 10 月对北江的 11 个样点和郁江的 17 个样点进行大型底栖无脊椎动物采集,2012 年 3 月对北江的 13 个样点、东江的 16 个样点、桂江的 9 个样点进行大型底栖无脊椎动物采集。在 100 m 长的采集河段,用 D 形网(40 目,直径 0.3 m)采集 5 个小样方,总采集面积约为 1.5 m²。小样方数的分配依据采集河段内各种小生境(水草区、静水区、流水区等)出现的比例合理分配。采集的样本在野外用 40 目钢筛筛选,并用 10% 的福尔马林溶液固定后带回实验室。室内鉴定时,根据鉴定资料尽可能鉴定至属,区分到种。

1.3 水体理化指标测定

DO、电导率和 pH 值用多参数水质分析仪 HANNA (HI98129) 现场测定; TP、NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、磷酸盐、硅酸盐、氯化物、COD_{Mn} 等指标是将水样野外冷藏带回实验室内测定,所有指标的测定都按照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》进行。

1.4 数据分析

参照相关参考文献,计算了 36 个对干扰反应比较敏感的、涵盖了底栖动物群落组成与结构丰度、多度、取食功能团和多样性指数等底栖动物参数(表 1)。对 11 个水体理化指标进行 Spearman 秩相关分析,剔除显著相关(|r|>0.70, p<0.05)的冗余参数。对筛选后剩余指标进行主成分分析,得到主成分 1 和主成分 2。将 36 个底栖动物参数和环境因子(主成分 1 和主成分 2 得分)进行 Spearman 秩相关分析,得到能与环境因子较好响应的底栖动物参数。最后通过得到的底栖动物参数对样点进行生物评价。其中,Spearman 秩相关分析在 SPSS 20.0 中进行,PCA 分析在 PRIMER v 6.0 中进行。因为仅 2011 年 10 月北江和郁江的 28 个样点具有完整的理化参数,所以本文采用 2011 年 10 月北江和郁江的 28 个样点的数据来建立底栖动物综合指数和水质评价等级,进而对珠江流域 66 个样点进行水质生物学评价,评估珠江流域河流生态系统的生物学质量现状。

表 1 36 个候选底栖动物参数

代码	名称	代码	名称	代码	名称
M1	总分类单元数	M13	蜉蝣目百分比	M25	优势单元百分比
M2	EPT 分类单元数	M14	毛翅目百分比	M26	前 2 位优势单元百分比
M3	蜉蝣目分类单元数	M15	双翅目百分比	M27	前 3 位优势单元百分比
M4	毛翅目分类单元数	M16	鞘翅目百分比	M28	前 5 位优势单元百分比
M5	甲壳纲分类单元数	M17	摇蚊科在双翅目中比例	M29	EPT 百分比
M6	软体动物分类单元数	M18	大蚊科在双翅目中比例	M30	敏感类群百分比
M7	鞘翅目分类单元数	M19	水生昆虫分类单元数	M31	耐污类群百分比
M8	蜻蜓目分类单元数	M20	捕食者百分比	M32	中性类群百分比
M9	双翅目分类单元数	M21	撕食者百分比	M33	BI 指数
M10	总物种数	M22	集食者百分比	M34	多样性指数
M11	寡毛纲百分比	M23	滤食者百分比	M35	优势度指数
M12	软体动百分比	M24	刮食者百分比	M36	均匀度指数

2 结果与分析

2.1 水体化学组成

用于构建底栖动物综合指数的 28 个样点的水

体化学特征见表 2。根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,28 个采样点的 DO 质量浓度在 I 类到Ⅳ类水之间;NH₃-N 质量浓度均在 I 类水到 V 类水之间;TP 质量浓度均为Ⅱ类或Ⅲ类水;COD_{Mn} 质量浓度均在 I 类到Ⅲ类水之间。

表 2 28 个采样点 11 个水体化学指标的最大值、最小值、平均值

项目	pH	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{DO})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{亚硝氮})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{硅酸盐})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{磷酸盐})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^-)$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{硝氮})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
最大值	8.24	420	8.90	1.78	0.16	18.30	0.12	0.14	4.80	12.30	3.51
最小值	7.20	104	4.67	0.00	0.01	2.62	0.02	0.03	0.90	0.94	0.44
平均值	7.80	241	7.06	0.32	0.05	8.51	0.05	0.07	2.08	6.84	1.61

2.2 底栖动物群落组成

2011 年 10 月北江和郁江 28 个样点共获得 54 个大型底栖无脊椎动物分类单元,其中昆虫纲 19 个分类单元,包括鞘翅目 3 个,蜻蜓目 6 个,蜉蝣目 6 个,毛翅目 1 个,双翅目 3 个;甲壳纲 4 个;软体动物 24 个;环节动物门 6 个,包括蛭纲 3 个,多毛纲 1 个,寡毛纲 2 个和扁形动物门 1 个。

2.3 底栖动物综合指数构建

根据对 11 个水体理化指标进行的 Spearman 相关性分析结果,剔除磷酸盐 ($|r| > 0.70, p < 0.05$)。对剩余的 10 个指标进行主成分分析,结果表明,第 1、2 主成分能解释环境变异的 71.3%,可以很好代表研究区域的环境干扰因子。其中第 1 主成分(PC1)可以解释总变异的 44.9%,从排序图(图 1)可以看出,PC1 与硅酸盐呈显著正相关,与电导率和 NO₃⁻-N 呈显著负相关;第 2 主成分(PC2)可以解释总变异的 26.3%,从排序图上可以看出,PC2 与氯化物、COD_{Mn}呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关。

考虑生物参数尽可能涵盖底栖动物群落信息,结合生物参数值的分布范围和环境指示性,剔除 M12 和 M31,最终确定 M15 双翅目百分比、M24 刮食者百分比和 M33BI 指数作为珠江流域河流生物质量评价的综合指数构成指数。

2.4 综合指数的计算及评价等级

采用 Karr 等提出的 5、3、1 生物指数记分法统一双翅目百分比、刮食者百分比和 BI 指数的评价量纲^[16](表 3)。其中双翅目百分比和 BI 指数值随干扰的增强而增加,以小于 20% 分位数计为 5,大于 80% 分位数计为 1,介于 20% ~ 80% 之间计为 3;刮食者百分比则随干扰增强而减小,以大于 80% 分位数计为 5,小于 20% 分位数计为 1,介于 20% ~ 80% 之间计为 3。分值越大,表示环境质量越好。累加上述 3 个指数的分值,即为综合指数的分值,最高为 15,最低为 3。采用四分法确定综合指数评价水质的 4 个等级:清洁(13 ~ 15)、轻度污染(10 ~ 12)、中等污染(7 ~ 9)和重度污染(3 ~ 6)。

表 3 3 个生物指数的分值计算方法

生物指数	频数分布		得分		
	20% 分位数	80% 分位数	5	3	1
双翅目百分比	0.23	0.88	<0.23	0.23 ~ 0.88	>0.88
刮食者百分比	0.03	0.44	>0.44	0.03 ~ 0.44	<0.03
BI 指数	5.39	7.79	<5.39	5.39 ~ 7.79	>7.79

2.5 珠江流域河流生态系统生物学质量评价

应用本文构建的综合指数及评价等级,并以霍堂宾等^[17]提出的群落多样性水质评价的方法与结果作为参照对比,对珠江流域河流生态系统的生物学质量进行综合评价,评价结果分别见表 4 和表 5。北江 11 个采样点和郁江 17 个采样点的综合指数评价结果表明,北江水体生物学质量以轻度和中度污染为主,占 63.6%;清洁的只有 1 个样点;重度污染样点 3 个,占 27.3%。郁江水体生物学质量要好于北江,没有重度污染样点,清洁样点也只有 1 个;轻度污染样点 5 个,占 29.41%;中度污染样点 11 个,占 64.71%。香农多样性指数的评价结果表明,北江的生物学质量同样以轻度至中度污染为主,占

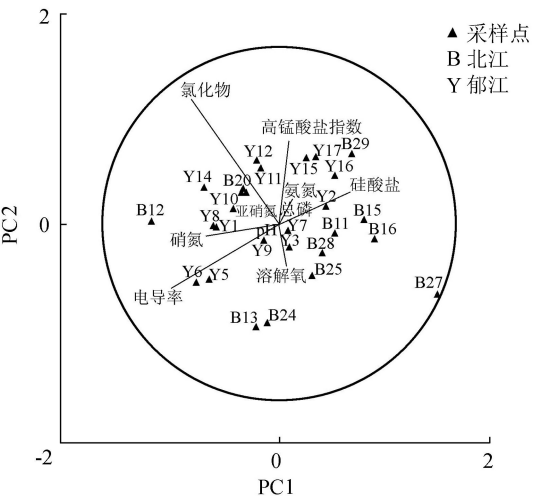


图 1 28 个采样点水化学指标的主成分排序

将 36 个生物参数和环境因子进行 spearman 相关性分析,得到 5 个生物参数与环境干扰呈显著相关,这 5 个生物参数分别是 M12 软体动物百分比、M15 双翅目百分比、M24 刮食者百分比、M31 耐污类群百分比和 M33BI 指数。其中 M12 与 M24 显著相关($r = 0.89$), M31 与 M33 显著相关($r = 0.93$)。

表 4 2011 年北江和郁江 28 个点位综合生物指数和香浓多样性指数水质生物学评价结果

点位	综合指数评价		香浓多样性指数评价		点位	综合指数评价		香浓多样性指数评价	
	指数	水体生物学质量	指数	水体生物学质量		指数	水体生物学质量	指数	水体生物学质量
B11	9	中度污染	2.97	轻度污染	Y4	9	中度污染	2.30	轻度污染
B12	11	轻度污染	2.94	轻度污染	Y5	15	清洁	1.99	中度污染
B13	13	清洁	2.38	轻度污染	Y6	9	中度污染	2.89	轻度污染
B15	5	重度污染	0.32	重度污染	Y7	9	中度污染	3.01	清洁
B16	5	重度污染	1.87	中度污染	Y8	9	中度污染	1.33	中度污染
B20	9	中度污染	2.29	轻度污染	Y9	9	中度污染	2.55	轻度污染
B24	7	中度污染	0.46	重度污染	Y10	11	轻度污染	1.56	中度污染
B25	9	中度污染	2.24	轻度污染	Y11	11	轻度污染	1.53	中度污染
B27	7	中度污染	1.53	中度污染	Y12	11	轻度污染	1.69	中度污染
B28	3	重度污染	0.26	重度污染	Y13	11	轻度污染	2.00	轻度污染
B29	7	中度污染	1.45	中度污染	Y14	7	中度污染	1.77	中度污染
Y1	9	中度污染	1.85	中度污染	Y15	7	中度污染	2.13	轻度污染
Y2	9	中度污染	2.10	轻度污染	Y16	9	中度污染	2.21	轻度污染
Y3	11	轻度污染	0.00	重度污染	Y17	9	中度污染	1.45	中度污染

注:B 为北江,Y 为郁江。

表 5 2012 年北江、东江、桂江 38 个点位综合指数和香农多样性指数水质生物学评价结果

点位	综合指数评价		香浓多样性指数评价		点位	综合指数评价		香浓多样性指数评价	
	指数	水体生物学质量	指数	水体生物学质量		指数	水体生物学质量	指数	水体生物学质量
B11	7	中度污染	0.28	重度污染	D9	13	清洁	3.23	清洁
B12	7	中度污染	2.15	轻度污染	D10	9	中度污染	1.70	中度污染
B13	11	轻度污染	2.85	轻度污染	D11	11	轻度污染	2.39	轻度污染
B17	9	中度污染	1.30	中度污染	D12	13	清洁	1.56	中度污染
B18	11	轻度污染	2.77	轻度污染	D14	11	轻度污染	2.25	轻度污染
B20	13	清洁	2.45	轻度污染	D15	9	中度污染	1.86	中度污染
B21	13	清洁	1.26	中度污染	D16	11	轻度污染	2.90	轻度污染
B24	7	中度污染	1.54	中度污染	D17	11	轻度污染	1.98	中度污染
B25	7	中度污染	0.28	重度污染	D19	7	中度污染	1.60	中度污染
B27	13	清洁	3.20	清洁	D24	5	重度污染	1.46	中度污染
B28	9	中度污染	2.50	轻度污染	G8	11	轻度污染	1.49	中度污染
B29	11	轻度污染	2.91	轻度污染	G9	11	轻度污染	0.10	重度污染
B31	11	轻度污染	1.96	中度污染	G10	8	中度污染	3.04	清洁
D2	9	中度污染	1.91	中度污染	G11	15	清洁	1.99	中度污染
D3	9	中度污染	2.19	轻度污染	G12	11	轻度污染	2.33	轻度污染
D4	11	轻度污染	3.95	清洁	G14	13	清洁	2.15	轻度污染
D5	9	中度污染	2.27	轻度污染	G15	9	中度污染	2.15	轻度污染
D6	11	轻度污染	2.97	轻度污染	G16	11	轻度污染	2.62	轻度污染
D7	11	轻度污染	2.81	轻度污染	G17	11	轻度污染	3.15	清洁

注:B 为北江,D 为东江,G 为桂江。

72.7%,重度污染样点也为 3 个,占 27.3%。郁江的生物学质量也好于北江,其清洁样点 1 个;轻度污染样点 7 个,占 41.2%;中度污染样点 8 个,占 47.15%;重度污染样点仅 1 个。

2012 年北江、东江和桂江的 38 个点位综合指数评价结果表明,北江水体生物学质量较好,清洁样点和轻度污染样点共 7 个(其中清洁样点 3 个),占 53.8%;中度污染样点 6 个,占 46.2%;没有重度污染样点。东江水体生物学质量以清洁和轻度污染为主,共 9 个样点,占 56.3%;中度污染样点 6 个,占 37.5%;重度污染样点仅为 1 个。桂江水体生物学质量也以清洁和轻度污染为主,共同 7 个样点,占 77.8%;中度污染样点仅 2 个,无重度污染样点。多

样性指数的评价结果表明,北江水体生物学质量同样以清洁—轻度污染为主,共 7 个样点;中度污染和重度污染样点分别为 4 个和 2 个。东江和桂江的多样性指数评价结果总体上与综合指数评价结果相同,仅在具体样点的等级上面存在一些差异。

综上所述,珠江流域水体的生物学质量以轻度和中度污染为主,清洁和重度污染的比例都比较少。从综合指数的评价结果看,66 个样点中,轻度和中度污染样点共 53 个,占 80.3%;清洁样点 9 个,占 13.6%;重度污染样点 4 个,占 6%。从多样性评价结果看,轻度和中度污染样点同样为 53 个,占 80.3%;清洁样点和重度污染样点分别为 6 个和 7 个,分别占 9.1%和 11.1%。

3 讨 论

水体生物学质量是评价水生态系统健康状况的主要评价指标之一。底栖动物作为最常用的水生态健康评价的指示生物,已广泛应用于各类水体的生物学质量评价。但从水体类型看,主要是应用于可涉水溪流和湖泊,应用于不可涉水河流的研究与实践都非常少,而本文研究的水体以不可涉水河流为主。通常不可涉水河流与可涉水河流除了水深差异外,在底质组成和水流速度等物理栖息生境方面也存在明显差异,同样,底栖动物群落组成与结构也有较明显不同。另外,可涉水河流一般都位于流域的中下游,受人类活动干扰的影响也较大,基本上没有合适的参照样点,即受人类活动干扰极小的样点很少存在。在这种情况下,如何科学构建一个可靠的底栖动物综合指数,是水生态健康评价目前面临的一个重要挑战。

笔者通过分析生物参数与环境因子的响应关系,结合生物参数的分布范围和指示性,最终确定了双翅目百分比、刮食者百分比和 BI 指数作为珠江流域河流生物质量评价的综合指数的构成指数。与通常的溪流底栖动物综合指数的构成指数 6 个以上相比,至少少了一半。分析这种结果出现的可能原因有:①大河底栖动物种类和数量相对溪流要少得多,且目前采用的底栖动物采样方法可能不是十分适合大河,导致采样时偶然性的影响比较大;②大河普遍已受到人类活动干扰且干扰程度较重,底栖动物群落以中等耐污物种为主且较单一,导致很多生物参数与环境关系的响应不显著;③由于影响底栖动物群落组成与结构的物理和化学因子很多,限于可用数据量的局限性,本文只用了部分水体化学属性,仅能代表影响底栖动物群落组成与结构的部分干扰因子。

虽然本文只用 3 个底栖动物参数来构成适合珠江流域开展河流生物学质量评价的综合指数,但是从实践的结果看,本文所建立的综合评价指数还是较好地反映了珠江流域目前水体生物质量现状,即总体上处于轻度至中度污染水平,与单独用香农多样性指数评价结果在总体趋势上是一致的,但在具体点位的健康等级上仍存在较大差异,如 2011 年的评价结果中,综合指数评价结果中 3 个重度污染点与多样性指数评价的 4 个重度污染点,仅一个吻合;综合指数评价结果中 2 个清洁点为 B13 和 Y5,但多样性指数评价结果的清洁点为 Y7。只有 10 个采样点位两种评价方法结果一致。2012 年的 38 个采样点中综合指数评价结果为 7 个清洁点,1 个重度污染点;多样性指数评价结果有 5 个清洁点,3 个重度

污染点。其中 18 个点位两种评价方法结果一致。比较两种评价结果存在差异的点位,表明通过流域综合评价指数评价的结果要优于单独通过香农多样性指数评价的结果,如 2011 年的 B24、Y10、Y11 及 2012 年的 B11、B25、D12、G9 等点位,这些点位的物种种类较少,但是以耐污能力较差的清洁种为主,这种状况下香农多样性指数较低,但综合指数较高;而对于 2011 年的 B16、Y7 以及 2012 年的 D4、G10 等点位,虽然物种种类较多,但是以耐污能力较高的耐污种为主,这种状况下香农多样性指数较高,而综合指数较低,因此这两种状况下综合性指数的评价结果均更为合理。

参考文献:

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

[2] BONADA N, PRAT N, RESH V H, et al. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches [J]. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51: 495-523.

[3] BARBOUR M T, GERRITSEN J, GRIFFITH G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.

[4] MAXTED J R, BARBOUR M T, GERRITSEN J, et al. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, 19 (1): 128-144.

[5] BEREZINA N A. Water quality estimation in the Kotorosl' River Basin based on zoobenthos composition [J]. *Water Resources*, 2000, 27(6): 654-662.

[6] MORENO P, CALLISTO M. Benthic macroinvertebrates in the watershed of an urban reservoir in Southeastern Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 560(1): 311-321.

[7] 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))

[8] 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 (7): 2281-2287. (GENG Shiwei, QU Xiaodong, ZHANG Yuan, et al. Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. *Environment Science*, 2012 (7): 2281-2287. (in Chinese))

(下转第 136 页)

- treatment countermeasure [J]. China Water Transport, 2008(2):117-118. (in Chinese))
- [9] 陈玉培,王伟,孙卫静. 引黄入冀补淀工程局部输水线路分析比选[J]. 河南科学, 2014(8):1534-1537. (CHEN Yupei, WANG Wei, SUN Weijing. Analysis and comparison of the partial water conveyance lines of the water supply project of Baiyangdian River in Hebei by introducing water from Yellow River[J]. Henan Science, 2014(8):1534-1537. (in Chinese))
- [10] 冯谦诚,王文杰,李岍. 河北水务集团推进引黄入冀补淀前期工作 力争工程早日开工建设[J]. 河北水利, 2014(9):18-33. (FENG Qiancheng, WANG Wenjie, LI Qiao. Hebei water group promote the Yellow River into the Baiyangdian River prophase work strive for engineering construction as soon as possible [J]. Hebei Water Resources, 2014(9):18-33. (in Chinese))
- [11] 卢双宝. 引黄入冀补淀工程建设的必要性[J]. 河北水利, 2012(9):25-26. (LU Shuangbao. The necessity of the Yellow River into the fill Ji Lake project construction [J]. Hebei Water Resources, 2012(9):25-26. (in Chinese))
- [12] 张婷,刘静玲,王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因素评价与分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2):261-267. (ZHANG Ting, LIU Jingling, WANG Xuemei. Causal
- analysis of the spatial temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(2):261-267. (in Chinese))
- [13] 孙建峰. 对南水北调东线工程几个重要问题的认识[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(1):1-3. (SUN Jianfeng. Several problems knowledge of East Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2002, 21(1):1-3. (in Chinese))
- [14] 王卫红,田世民,孟志华,等. 小浪底水库运用前后黄河下游河道河型变化及成因分析[J]. 泥沙研究, 2012(1):23-31. (WANG Weihong, TIAN Shimin, MENG Zhihua, et al. Evolution processes of river pattern in Lower Yellow River after commissioning of Xiaolangdi Reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2012(1):23-31. (in Chinese))
- [15] 赵晓晖,侯越,张建江. 引黄补淀管理工作相关问题[J]. 水科学与工程技术, 2013(增刊1):72-74. (ZHAO Xiaohui, HOU Yue, ZHANG Jianjiang. Issues of the Yellow River to Baiyangdian Lake diversion project management [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2013(sup1):72-74. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-06-04 编辑:徐 娟)

(上接第98页)

- [9] 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))
- [10] 蔡琨,张杰,徐兆安,等. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1):74-82. (CAI Kun, ZHANG Jie, XU Zhao'an, et al. Application of a benthic index of biotic integrity for the ecosystem health assessment of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1):74-82. (in Chinese))
- [11] 吴东浩,汪军涛,张咏,等. 连云港主要河流大型底栖无脊椎动物水质生物评价[J]. 环境监测管理与技术, 2010(1):29-32. (WU Donghao, WANG Juntao, ZHANG Yong, et al. River water bioassessment with benthic macroinvertebrate in Lianyungang, Jiangsu Province [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010(1):29-32. (in Chinese))
- [12] RESH V H, NORRIS R H, BARBOUR M T. Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using benthic macroinvertebrates[J]. Australian Journal of Ecology, 1995, 20(1):108-121.
- [13] 王备新,杨莲芳. 大型底栖无脊椎动物水质快速生物评价的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2001(4):107-111. (WANG Beixin, YANG Lianfang. Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001(4):107-111. (in Chinese))
- [14] REYNOLDSON T B, NORRIS R H, RESH V H, et al. The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1997, 16(16):833-852.
- [15] 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))
- [16] 戴纪翠,倪晋仁. 底栖动物在水生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 Environment, 2008, 17(6):2107-2111. (in Chinese))
- [17] 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))
- (收稿日期:2015-05-20 编辑:彭桃英)