

doi: 10.7541/2013.4

典型平原河网地区底栖动物生物 指数筛选及评价基准研究

陈小华^{1,2} 康丽娟¹ 孙从军¹ 杨青¹

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200203; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 2011年夏、秋季在上海市全境主要河流的83个断面进行大型底栖动物的采样, 共获取底栖动物20个分类单位(种), 其中软体动物、环节动物和节肢动物分别占50%、30%和20%。选取常见的28个生物指数分别进行计算, 并采用非参数统计检验方法筛选出8个敏感生物指数。通过记分法对8种敏感生物指数统一量纲后, 获得数值范围为8—40的综合生物指数, 运用四分法划分了判别河道水环境质量的生物基准: 32—40, 较好(Good); 24—31, 一般(Fair); 16—23, 污染(Poor); 8—15, 严重污染(Very poor)。9个断面未发现活体生物, 定为超严重污染(Super poor)。依照生物基准比较上海市41个代表性断面近5年主要水质理化指标, 基本反映出水质理化指标的空间差异性, 该综合生物指数及判别基准也可适用于评价平原河网地区的河道水质状况。

关键词: 大型底栖无脊椎动物; 生物指数; 生物基准; 水质生物学评价; 平原河网地区

中图分类号: Q145; Q179.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2013)02-0191-08

大型底栖动物是河流生态系统的重要组成部分, 具有活动范围相对固定、生命周期较长、生活习性相对稳定等特点, 对环境胁迫的响应比较敏感, 其群落结构可从不同侧面反应水质的好坏, 从而可以有效地指示水生态系统的健康状况^[1-3]。自从20世纪50年代以来, 大型底栖动物常被应用到水质生物学评价和水生态系统健康评价当中^[4-14]。基于底栖动物的水质评价方法开始由过去所采用的单一生物指数评价转向应用底栖动物的综合指数, 底栖动物水质生物学评价体系已经成为水质理化指标评价方法体系极其重要的补充^[15, 16]。

底栖动物群落具有很强的地域性, 所在地区的纬度、海拔、自然地貌、水文特征、土地利用类型、社会经济发展程度等均是决定河道大型底栖无脊椎动物群落结构的重要因素^[17]。平原河网水系^[12, 18]与山地河网水系^[14, 19, 20]的大型底栖动物群落结构特征差异很大, 随之能反映河流水质状况的底栖动物指标及数值差异也较大。上海市地处平原河网地区, 河道水流流速慢, 流程长、纵比降小, 河床淤积作用

较显著, 有机污染比较严重。本文以上海地区为例, 探讨适合平原河网的大型底栖动物生物指数的筛选方法及评价基准。

1 材料与方法

1.1 采集断面与采集时间

2011年7月至9月, 以上海市河道近5年的常规水质监测断面为参照, 在全市范围内选取了83个河段断面进行底栖动物调查, 布点兼顾空间均匀性和河道多样性特征, 涉及不同河道规模、周边土地利用类型、人口密度、污染程度、水流流态等, 每个区县范围内均有布点。现场采样过程中, 记录断面周边环境、河道生态环境、人类活动影响以及污染源等信息。

1.2 样品采集与分析

利用改良的 Peterson 采泥器(开口面积为 1/16 m²), 在每个断面进行底栖动物的采集, 每个断面采集 2—3 斗泥, 采集的底泥用 60 目分样筛(孔径约 0.5 mm)进行筛选, 将选出的生物样品放入标本瓶中,

收稿日期: 2012-08-06; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 上海市环境保护局青年专项基金(沪环科 2011-04)资助

通信作者: 陈小华(1978—), 男, 高级工程师; 主要研究方向为水污染治理与生态修复。E-mail: shoutfar@yahoo.com.cn

经 75%—80% 的酒精固定后带回实验室。底栖动物的固定和保存参考黄祥飞等的方法^[21], 底栖动物的物种鉴定和定量分析参考相关文献资料^[22—25]。

1.3 生物指数筛选流程与方法

候选生物指数的筛选主要参照马陶武等^[18]和 Stribling, *et al.*^[26]的方法, 采用两种非参数统计检验法对清洁样点和污染样点的生物指数值的分布情况进行比较。

(1) 底栖动物的耐污值和功能类群确定

所采集到的底栖动物样本的耐污值主要参考王建国等^[19]、王备新等^[20]、Bode, *et al.*^[27]的资料。功能摄食类群的划分主要参考 Morse, *et al.*^[28]、刘建康^[29]以及 Merritt 和 Cummins^[30]。

(2) 相对清洁断面和污染断面划分方法

依据马陶武等^[18]和王建国等^[19]的方法, 采用 Hilsenhoff 生物指数大致区分相对清洁断面和污染断面。计算公式: $HBI = \sum_{i=1}^S n_i t_i / N$ 。其中 t_i 为第 i 个分类单元(科或属)的耐污值, n_i 为第 i 个分类单元个体数, N 为总个体数, S 为种类数。将 HBI 小于或等于 6.50 的断面定为相对清洁断面; HBI 大于 6.51 的断面定为污染断面。

(3) 候选生物指数选取与计算方法

参照有关文献^[3, 20, 26]并结合本研究中底栖动物的采集情况, 选用常规的候选生物指数, 一般包括四大类: 丰富度指数、分类单元组成指数、耐受/敏感指数和功能摄食类群指数。生物指数的计算参考经典方法^[3, 25]。

(4) 敏感生物指数的筛选方法

敏感生物指数的筛选主要参照马陶武等^[18]和 Stribling, *et al.*^[26]推荐的方法。首先, 采用两种非参数统计检验法(Mann-Whitney U 法和 Kolmogorov-Smirnov 法)对相对清洁断面和污染断面的生物指数值的分布情况进行比较, 在两种统计检验中, 生物指数值在清洁样点和污染样点之间的差异均表现为显著时, 才入选为敏感生物指数。

(5) 综合生物指数计算与评价基准的确立

根据最终入选的若干个敏感生物指数在清洁样点中的频数分布统计和 5, 3, 1 记分法确立一个融合了所有敏感生物指数信息的综合生物指数, 并确定综合生物指数值的变化范围, 采用普遍适用的四分法将综合生物指数值划分为不同水质级别对应的判

别基准: 较好(Good)、一般(Fair)、污染(Poor) 和严重污染(Very poor)。无活体底栖动物出现的河道断面自动归为超严重污染断面(Super poor)。

2 结果

2.1 大型底栖动物物种组成

全市区域共 83 个断面获得大型底栖动物 20 种, 其中软体动物 10 种, 环节动物 6 种, 节肢动物 4 种, 分别占总物种数的 50%、30% 和 20%(表 1)。有 9 个断面未发现任何活体物种。出现频率最高的物种为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*), 达到 50.6%, 其次是梨形环棱螺(*Bellamya purificata*), 为 34.9%。

2.2 基于 Hilsenhoff 指数的相对清洁与污染断面划分

Hilsenhoff 生物指数(HBI)被普遍认为是比较可靠的生物指数^[22]。针对 74 个有活体底栖动物的河道断面计算 Hilsenhoff 指数, 数值范围为 4.3—10, 平均值 7.57, 中位数 7.40, 标准差 2.23。其中有 32 个断面的 HBI 值小于或等于 6.50, 确定为相对清洁断面; 有 42 个断面的 HBI 值大于 6.50, 定为污染断面。将基于 Hilsenhoff 指数划分出的相对清洁断面与污染断面之间的总体水质进行比较, 各类指标在两类断面各类指标之间上均显示显著性差异($P < 0.01$), 尤其是溶解氧、氨氮、总氮、总磷、 BOD_5 等指标(表 2)。

2.3 候选生物指数计算结果

用使用频率较高的 4 大类 25 个指数对结果进行分析, 各指数的计算数值范围、平均值和标准差差异较大(表 3)。其中 Shannon-Wiener 多样性等 22 个指数在 9 个没有底栖动物分布的断面不能计算出有效数据。物种均匀度指数、环节动物/软体动物以及软体动物/环节动物 3 个指数分别只得到 49、42 和 55 个有效数据。随着污染胁迫增强, 数值出现上升的指数有 8 个, 数值出现下降的指数有 20 个。

2.4 敏感生物指数的筛选及计算结果

利用两种非参数统计检验法—曼-惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U)法和 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov)法, 对所有生物指数在 32 个相对清洁断面和 42 个污染断面的分布情况进行比较, 显著性水平取 0.01。计算结果显示共有 15 个指数通过了两种显著性检验($P < 0.01$), 并依据 P 值从小到大排列(表 4)。

表 1 上海市河道大型底栖无脊椎动物的物种组成及出现频率
Tab. 1 Composition and occurring frequency of macro-benthos species

门 Phylum	纲 Class	科 Family	种 Species	出现频率 Occurrence frequency(%)
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	颤蚓科 Tubificidae	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	50.6
			苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	18.1
			中华颤蚓 <i>Rhyacodrilus sinicus</i>	25.3
	蛭纲 Hirudinea	水蛭科 Hirudinidae	水蛭 <i>Hirudo nipponia</i>	10.8
	多毛纲 Polychaeta	沙蚕科 Nereididae	日本刺沙蚕 <i>Neanthes japonica</i>	12.0
		齿吻沙蚕科 Nephtyidae	齿吻沙蚕 <i>Nephtys galbra</i>	1.2
	软体动物门 Mollusca	田螺科 Viviparidae	梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	34.9
			方形环棱螺 <i>B. quadrata</i>	1.2
			角形环棱螺 <i>B. angularis</i>	1.2
			铜锈环棱螺 <i>B. aeruginosa</i>	2.4
		豆螺科 Bithyniidae	大沼螺 <i>Parafossarula eximius</i>	1.2
		肋鳃科 Pleuroceridae	方格短沟鳃 <i>Semisulcospira cancellata</i>	1.2
	双壳纲 Bivalvia	蜆科 Corbiculidae	河蜆 <i>Corbicula fluminea</i>	14.5
			刻纹蜆 <i>C. largillierti</i>	1.2
		贻贝科 Mytilidae	湖沼股蛤 <i>Limnoperna lacustris(Martens)</i>	9.6
		珠蚌科 Unionidae	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	2.4
	节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Isecta	摇蚊幼虫 <i>Chironomidae Larvae</i>	15.7
	软甲纲 Malacostraca	螺赢蜚科 Corophiidae	大螯蜚 <i>Grandidierella</i> sp.	6.0
			螺赢蜚 <i>Corophium</i> sp.	1.2
		背尾水虱亚目 Anthuridea	背尾水虱 <i>Anthuroidea</i> sp.	2.4

表 2 相对清洁与污染断面的水质比较(mg/L)
Tab. 2 Water quality comparison between relatively clean sites and polluted sites

指标 Indicators	32 个相对清洁断面 32 clean sites		42 个污染断面 42 polluted sites	
	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation
酸碱度 pH	7.54	0.10	7.47	0.07
溶解氧 DO	4.74	1.62	3.33	1.44
高锰酸盐指数 COD _{Mn}	6.23	3.10	6.91	1.79
化学需氧量 COD _{Cr}	17.71	4.73	22.44	6.73
五日生化需氧量 BOD ₅	4.98	1.65	6.59	1.82
氨氮 NH ₃ -N	2.32	1.53	3.98	2.19
总磷 TP	0.27	0.11	0.45	0.17
石油类 Petroleum	0.05	0.02	0.11	0.13
总氮 TN	4.98	2.22	6.52	2.44

综合考虑各指标的有效性和各指标之间的信息重复性, 作以下进一步筛选: 物种均匀度指数、环节动物/软体动物以及软体动物/环节动物的有效断面个数分别只有 42、49 和 55 个, 实效性低, 不予考虑。科级水平生物指数的计算方法与结果与 Hilsenhoff 耐污指数基本相近, 优先选择使用频率更高的后者。上海河道中的刮食者基本为腹足纲动物, 因此刮食者%与腹足纲%这两个指标信息重复, 只要保

留分类更明确的腹足纲%。上海河道中的过滤收集者基本为瓣鳃纲动物, 过滤收集者%与瓣鳃纲%动物信息基本重复, 而且 55 个河道断面的瓣鳃纲密度为 0, 因此不考虑该两项指标。

最终确定保留 Hilsenhoff 耐污指数、Goodnight 修正指数、直接收集者%、软体动物%、腹足纲%、瓣鳃纲%、环节动物%、(甲壳动物+软体动物)分类单元数共 8 种敏感生物指数。

表 3 所有候选生物指数及计算结果
Tab. 3 Selection and calculation of all candidate biotic indices

类别 Category	编号 Number	生物指数 Metrics	数值范围 Range	对干扰的反应 Response to disturbance
群落多样性指数 Diversity of community	M1	总分类单元数 Total No. of Taxa	0—9	下降 Decreased
	M2	(甲壳动物+软体动物)分类单元数 No. of Mollusca & Crustacea Taxa	0—6	下降
	M3	Shannon-Weiner 多样性指数 Shannon-Weiner diversity index	0—0.71	下降
	M4	Margalef 多样性指数 Margalef's diversity index	0—1.11	下降
	M5	Simpson 多样性指数 Simpson's diversity index	0—0.78	下降
	M6	物种均匀度指数 Pielou evenness index	0.02—1	下降
	M7	单纯度指数 Simplicity index	0.23—1	下降
	M8	连续比较指数 Sequential Comparison Index	0—0.06	下降
分类单元 组成指数 Taxonomic Composition	M9	%摇蚊个体数 % Chironomidae	0—0.67	上升 Increased
	M10	%甲壳动物 % Mollusca	0—0.62	下降
	M11	%软体动物 % Crustacea	0—1	下降
	M12	%腹足纲 % Gastropoda	0—1	下降
	M13	%瓣鳃纲 % Pelecypoda	0—1	下降
	M14	%环节动物 % Annelid	0—1	上升
	M15	环节动物/软体动物 Ratio of Annelid/Crustacea	0—240.67	上升
	M16	软体动物/环节动物 Ratio of Crustacea/Annelid	0—31	下降
功能摄食类 群指数 Functional Feeding Group Index	M17	%刮食者 % Scrapers	0—1	下降
	M18	%捕食者 % Predators	0—1	下降
	M19	%直接收集者 % Collector-gathers	0—1	上升
	M20	%过滤收集者 % Collector-filterers	0—1	上升
	M21	%撕食者 % Shredder	0	下降
耐污性指数 Tolerance & Intolerance Index	M22	Hilsenhoff 生物指数 Hilsenhoff Biotic Index	4.3—10	上升
	M23	贝克生物指数 Beck Biotic Index	0—16	下降
	M24	科级水平生物指数 Family-level Biotic Index	6—10	上升
	M25	Goodnight 修正指数 Goodnight-Whitley Index	0—1	下降

表 4 相对敏感生物指数计算结果的两种非参数检验的渐近检验(双尾)*P* 值及其排序
Tab. 4 Non-parametric test of relatively clean sites and polluted sites based on different sensitive biological metrics

生物参数 Metrics	有效断面数** No. of effective sites**	K-S 检验 K-S test		Mann-Whitney U	
		<i>P</i> 值* <i>P</i> value*	排序 Rank	<i>P</i> 值* <i>P</i> value*	排序 Rank
M22	74	0	1	1.96E-13	3
M25	74	0	2	1.42E-13	1
M19	74	0	4	1.04E-10	5
M11	74	0	5	1.9E-10	6
M14	74	0	6	1.96E-10	7
M24	74	0	7	6.01E-13	4
M15	42	1.56E-08	8	4.03E-08	8
M17	74	1.50E-05	9	3.44E-05	10
M12	74	1.50E-05	10	3.44E-05	11
M16	55	1.47 E-04	11	0.000372	13
M2	74	2.15 E-04	12	2.86E-05	9
M20	74	3.99 E-03	13	0.000497	14
M13	74	3.99 E-03	14	0.000497	15
M6	49	6.56 E-03	15	0.000189	12

注: *指渐近检验(双尾)的 *P* 值, *P* 值越小说明清洁断面与污染断面计算的生物指数两个统计样本总体分布之间的差异性更有统计学意义; **指能计算出有效数据的断面数

Note: * refers to the Asymptotic Significance (2-sided) as the *P*-value determining whether there is significant difference between two groups of data from relatively clean sites and contaminated sites. Lower *P* value means the less likely the finding would occur by chance alone. ** refers to the number of sites where each biotic index can be calculated effectively

2.5 综合生物指数的计算及水质评价

计算 8 个敏感生物指数在 32 个相对清洁断面中的频数分布统计(表 5), 并采用 5, 3, 1 记分法, 利用简单叠加法获得融合了 8 种生物指数信息的综合生物指数。由于这 8 个敏感指数的最大得分为 5 分, 最小得分为 1 分, 所以综合生物指数值的可能范围是 8—40, 采用普遍适用的四分法, 将综合生物指数值划分为 4 个水质级别生物基准: 40—32, 较好(Good); 31—24, 一般(Fair); 23—16, 污染(Poor); 15—8, 严重污染(Very poor)。9 个无活体底栖动物的断面无法计

算综合生物指数, 定为超严重污染断面(Super poor)。

使用综合生物指数对所有 83 个采样断面进行评价, 其中 19 个断面为水环境较好, 9 个断面为水环境一般, 18 个断面水环境污染, 28 个断面为水环境严重污染, 另外 9 个未发现活体生物的污染断面为超严重污染。水环境较好的断面, 主要分布在黄浦江中上游、淀浦河中上游沿线以及崇明岛。水环境严重污染和超严重污染断面主要分布在黄浦江以西的中心城区和老工业区附近, 以及浦东新区人口密度较高的区域(图 1)。

表 5 八个敏感生物指数在相对清洁断面的频数分布统计和记分标准
Tab. 5 Frequency distribution statistics of 8 sensitive metrics in the clean sites and its scoring criteria

敏感性生物指数 Sensitive metrics	描述性统计 Statistical description					赋值 Scores			区分效率 Efficiency (%)
	最小值 Min	10%分位 10th percentile	中位数 Median	90%分位 90th percentile	最大值 Max	5	3	1	
M22	4.30	4.30	5.12	6.16	6.56	<5.12	5.12—6.16	>6.16	96.8
M25	0.73	0.91	1.00	1.00	1.00	1	0.91—1	<0.91	96.2
M19	0	0	0	0.49	1.00	0	0—0.49	>0.49	92.5
M11	0	0	1.00	1.00	1.00	1	0—1	0.00	75.7
M12	0	0	0.41	1.00	1.00	>0.41	0—0.41	0.00	68.9
M13	0	0	0.00	1.00	1.00	>0.004	0—0.004	0	68.9
M14	0	0	0	0.85	1.00	0	0—0.85	>0.85	87.9
M2	0	0.30	1.00	2.70	6.00	>1	1.0	0	73.1

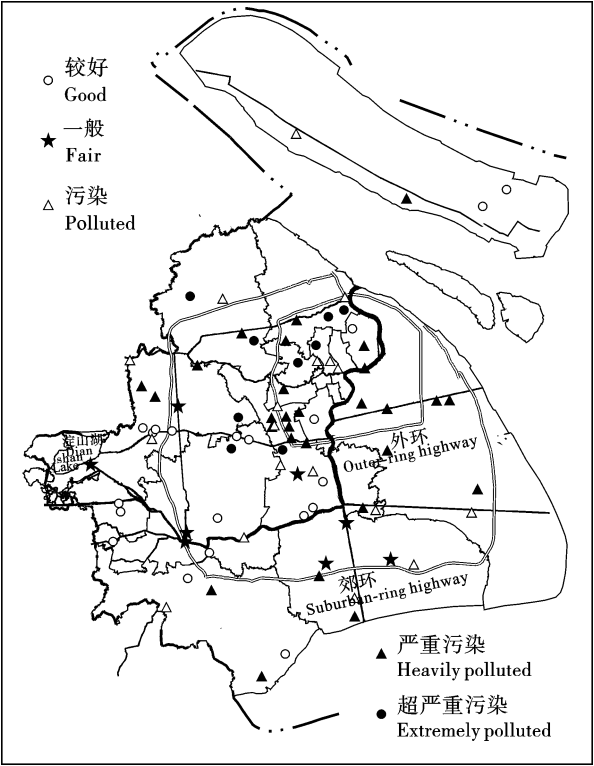


图 1 基于底栖动物综合生物指数的河道水质评价结果
Fig. 1 Water quality evaluation based on integrated biological index of benthic macroinvertebrate

3 讨论

水质理化指标测定仍是评价我国河流生态系统的水质状况或环境质量的最常用方法, 因为理化指标能比较直接精确地反映河道水质。但严格来说理化指标只代表采集水样那一刻的瞬时水质, 并不能直接或全面地反映水质与水生生物之间关系以及生态系统健康状况。而且反映一个断面的水质状况通常需要同时测定数十项理化指标, 费时费力, 成本较高^[3]。上海市河道水利工程日渐增多, 人为控制对河道生态系统的影响越来越大, 有些河道水质改善得益于定期开闸调水, 测定的某河段理化指标能否真实反映生态环境质量值得商榷。

从 20 世纪中叶起, 以大型底栖动物为主的水生生物监测逐渐成为国际上评价河流生态环境质量不可或缺的方法, 通过测定生物学参数和指标, 并构建这些指标与生物所在的水环境之间的定量关系(生物指数), 来评估水生态系统健康状况^[1, 3]。水生生物参数是更加综合性的参数, 一次监测可代表更长期(数月或数年)的河道环境状况。大型底栖动物相当于全天候的水环境“在线监测器”, 能真实反映河道的长期水质和生态系统状况。

然而水生生物监测也有自身的局限性,比如具有较强的地域性,底栖动物群落结构具有明显的区系特征,评价标准难以统一。因此,在构建生物评价基准时,仍需将生物学评价结果与理化指标数据进行比较以验证其准确度。为验证综合生物指数在上海地区的适用性,对全市主要河道近 5 年水质理化指标进行比对分析,共有 41 个同时有理化指标数据和计算综合生物指数的河道断面,按照综合生物指数的不同分类级别统计溶解氧、BOD₅、TP 以及

NH₃-N,结果显示综合指数的各分类基准所对应的 4 个水质指标均有明显的梯度变化,尤其是溶解氧和 BOD₅(图 2)。对不同分类基准对应的水质数据进行非参数检验(Jonckheere-Terpstra 检验),结果也显示 5 个生物基准对应的 DO、COD_{cr}、BOD₅、NH₃-N、TP、TN 均有显著性差异,双尾近似检验的 *P* 值均小于 0.01(表 6),说明确定的生物基准是有效可靠的,运用综合生物指数评价河道水质与传统的理化指标反映的水质状况基本一致。

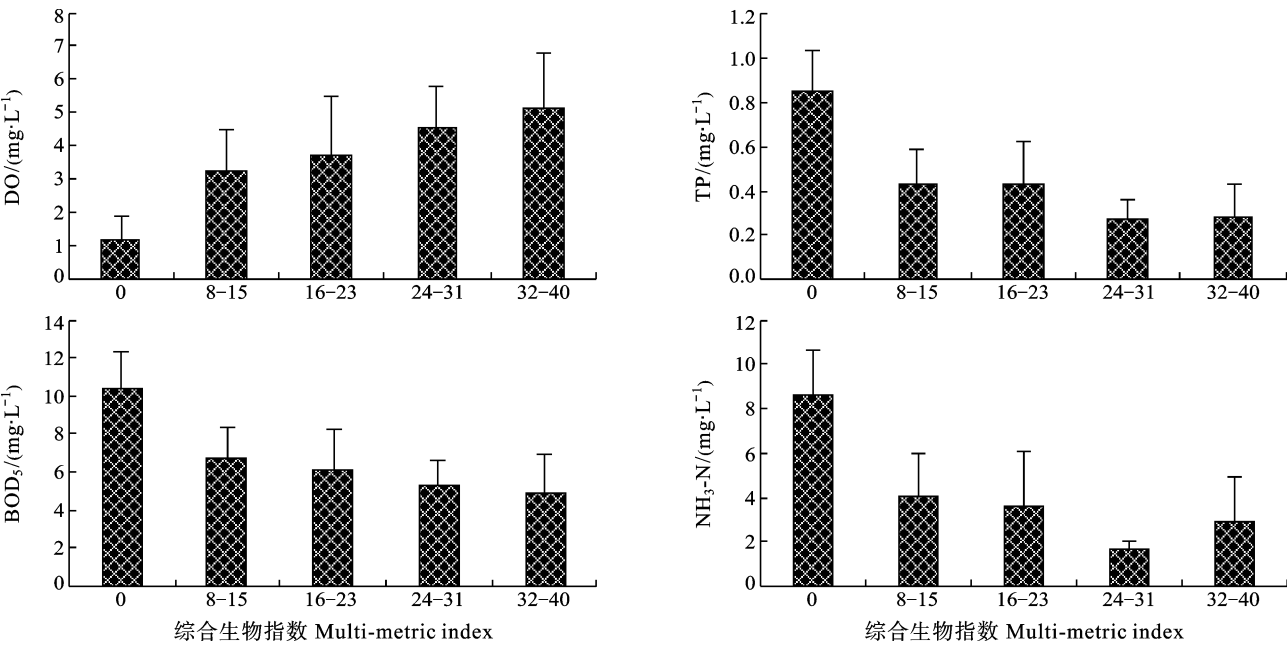


图 2 综合生物指数各分级所对应的河道断面水质的比较

Fig. 2 Comparison of water physiochemical characteristics using different criteria of integrated biological index of benthic macroinvertebrate

表 6 综合生物指数 5 类生物基准对应的水质数据 Jonckheere-Terpstra(J-T)检验
Tab. 6 Jonckheere-Terpstra test of water physiochemical data among different criteria of integrated biological index

统计量 Statistical value	水质指标 Water quality indicators					
	DO	COD _{cr}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN
观测的 J-T 值 Observed J-T Statistic	406	179	168	135	164	150
J-T 值的标准化值 Std. J-T Statistic	2.99	-2.47	-2.73	-3.52	-2.82	-3.16
双侧近似 P 值 Two-tailed P value	0.003	0.01	0.006	0.0004	0.005	0.001

本研究在筛选生物指数时选择的取样断面数比较充足,覆盖了上海市的绝大部分区域,同时利用底栖动物综合生物指数水质评价基准和利用同时期主要水质指标如溶解氧、生化需氧量、总磷、总氮等对上海河道水质的评价结果基本一致。因此,所建立的底栖动物综合生物指数水质评价基准适用于评价上海市河道水质和生态系统健康状况。

致谢:
感谢华东师范大学刘文亮博士对疑难物种提供科学鉴定。
参考文献:

[1] Wang B X, Yang L F. Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2001, 24(4): 107—111

- [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. 南京农业大学学报, 2001, 24(4): 107—111]
- [2] Dai J C, Ni J R. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2107—2111 [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. 生态环境, 2008, 17(6): 2107—2111]
- [3] He X B, Liu X Q, Cui Y D, *et al.* Macrozoobenthic community of different habitats in littoral of Lake Baikal [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(3): 516—522 [何雪宝, 刘学勤, 崔永德, 等. 贝加尔湖沿岸带不同生境底栖动物群落研究. 水生生物学报, 2011, 35(3): 516—522]
- [4] Angelo G S, Bazzanti M, Ruggiero A, *et al.* Determining subsampling effort for the development of a rapid bioassessment protocol using benthic macroinvertebrates in streams of southeastern Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 597: 109—123
- [5] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wade able Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish (2nd ed) [M]. EPAP841PB299P002. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D C. 1999, 1—10
- [6] Boonsatien B, Sangpradub N, Barbour M T, *et al.* An implementation plan for using biological indicators to improve assessment of water quality in Thailand [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 165: 205—215
- [7] Cristina T, Criado F G, Alaez C F. Towards a multimetric index for ecological assessment of mediterranean flatland ponds the use of macroinvertebrates as bioindicators [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 618: 109—123
- [8] Leticia M M. Effect of spates and land use on macroinvertebrate community in Neotropical Andean streams [J]. *Hydrobiologia*, 2010, 641: 85—95
- [9] Nabor M, Tomanov S, Oberdorff T. Initial development of a multi-metric index based on aquatic macroinvertebrates to assess streams condition in the Upper Isiboro-Sécre Basin, Bolivian Amazon [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 589: 107—116
- [10] Simone G V, Cortes RM V. Evaluating macroinvertebrate biological metrics for ecological assessment of streams in Northern Portugal [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 166: 201—221
- [11] Stephane M, Desrosiers M, Pinel 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: 35—50
- [12] Wang Q, Wang H J, Cui Y D. Community characteristics of the macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Donghu district, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(4): 739—746 [王琴, 王海军, 崔永德. 武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价. 水生生物学报, 2010, 34(4): 739—746]
- [13] Weigel B M, Henne L J, Martinez-Rvera L M. Macroinvertebrate-based Index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2002, 21(4): 686—700
- [14] Zhang F F, Zhang M, Liu Z G, *et al.* A health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Ganjiang River Basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(6): 963—971 [张方方, 张萌, 刘足根, 等. 基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价. 水生生物学报, 2011, 35(6): 963—971]
- [15] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-BBI) for rivers of the Tennessee Valley [J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(4): 768—785
- [16] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (B-IBI) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77: 311—333
- [17] Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z. Benthic Macroinvertebrate and Application in the Assessment of Stream Ecology [M]. Beijing: TsingHua University Press. 2010, 54—61 [段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社. 2010, 54—61]
- [18] Ma T W, Huang Q H, Wang H, *et al.* The selection of benthic macroinvertebrate based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1192—2000 [马陶武, 黄清辉, 王海, 等. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立. 生态学报, 2008, 28(3): 1192—2000]
- [19] Wang J G, Huang H B, Yang M X, *et al.* Tolerance values of benthic macroinvertebrates and bioassessment of water quality in the Lushan Nature Reserve [J]. *China Journal of the Application and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 279—284 [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. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 279—284]
- [20] Wang B X, Yang L F, Hu B J, *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 [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. 生态学报, 2005, 25(6): 1481—1490]
- [21] Huang X F. Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: Standards Press of China. 1999, 77—79 [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社. 1999, 77—79]
- [22] Dalian Institute of Aquaculture. Hydrobiology [M]. Beijing: Agricultural Press. 1982, 1—346 [大连水产学院. 淡水生物学. 北京: 农业出版社. 1982, 1—346]
- [23] Han M S, Shu Y F. Atlas of Fresh-water Biota in China [M]. Beijing: Ocean Press. 1995, 1—294 [韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社. 1995, 1—294]
- [24] Liu W L, He W S. The Benthic Macro-invertebrates in the

- Yangtze Estuary [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers. 2007, 1—203 [刘文亮, 何文珊. 长江河口大型底栖无脊椎动物. 上海: 上海科学技术出版社. 2007, 1—203]
- [25] Wei C D. Fauna Sinica (Crustacean in Zhejiang) [M]. Hangzhou: Zhejiang Scientific and Technical Press. 1991, 49—150 [魏崇德. 浙江动物志甲壳类, 杭州: 浙江科学技术出版社. 1991, 49—150]
- [26] Stribling J B, Jessup B K, White J S, *et al.* Chesapeake Bay and Watershed Programs (Monitoring and Non-tidal Assessment: Development of a Benthic Index of Biotic Integrity for Mary Land Streams), Report No. CBWP2MANTA2EA 29823 [R], Maryland Department of Natural Resources, Maryland. Annapolis, MD. 1998, 1—38
- [27] Bode R W, Novak M A, Abele L E, *et al.* Quality Assurance Work Plan for Biological Stream Monitoring in New York State [R]. NYS Department of Environmental Conservation, Albany, NY. 2002, 115
- [28] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality [M]. Nanjing: Hohai University Press. 1994, 1—570
- [29] Liu J K. Advanced Hydrobiology [M]. Beijing: Science Press. 1999, 241—259 [刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社. 1999, 241—259]
- [30] Merritt R W, Cummins K W. Trophic relations of macroinvertebrate. In: Hauer F R, Lam berti G A (Eds.), Methods in Stream Ecology [M]. San Diego: Academic Press. 1996, 453—474

DEVELOPMENT OF MULTI-METRIC INDEX BASED ON BENTHIC MACROINVERTEBRATES TO ASSESS RIVER ECOSYSTEM OF A TYPICAL PLAIN RIVER NETWORK IN CHINA

CHEN Xiao-Hua^{1,2}, KANG Li-Juan¹, SUN Cong-Jun¹ and YANG Qing¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200203, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Bioassessment of benthic macroinvertebrate-based multimetrics is a very effective approach to evaluate quality of river water. Benthic macroinvertebrate assemblages were sampled at 83 sites in Shanghai metropolitan area, a typical dense river network plain. A total of 20 taxa of the benthic macroinvertebrate were collected, including 50% of Mollusca, 30% of Arthropoda and 20% of Annelida. Among 74 sites with living samples, 32 relatively clean sites and 42 polluted sites were separated based on Hilsenhoff biotic index discriminatory criteria. A comprehensive evaluation using 28 widely-used metrics was carried out. Furthermore, 8 metrics were selected as the most sensitive ones based on non-parametric tests (i.e., Mann-Whitney U test and Kolmogorov-Smirnov test). By standard scoring method, eight sensitive metrics were unified and integrated into a multi-metric index on a scale ranging from 8 to 40 for bioassessment at each site. Biocriteria values for benthic macroinvertebrate were proposed by quartation, i.e., 8—15, very poor; 16—23, poor; 24—31, fair; and 32—40, good. Water quality of 9 sites with no living sample were marked as very poor. According to the biocriteria, 41 typical sites were divided into 5 groups. The past 5-year historical data of physico-chemical water quality indicators have significant difference among 5 group sites. Consequently, the discriminatory biocriteria are suitable for the assessment of the river water quality of the Shanghai City.

Key words: Benthic macroinvertebrates; Multi-metric index; Biocriteria; Bio-assessment; Plain river network