

文章编号: 1674-5566(2023)04-0763-10

DOI:10.12024/jsou.20200603079

基于大型底栖无脊椎动物生物完整性指数的苏州市水体生态健康评价

王秀云¹, 韩政¹, 谭梦¹, 郑海粟¹, 陈嗣威¹, 张晟曼¹, 彭自然¹,
邵留¹, 陈立婧², 管卫兵¹, 何培民¹, 何文辉¹

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要:为促进城市水体的管理和保护,针对苏州市的 23 个河道断面开展大型底栖无脊椎动物群落调查。在此基础上通过对备选指标的分布范围、判别能力和相关性分析筛选出适宜城市水体生态健康评价的核心指标。再利用比值法计算各核心指标值并累加求和得到各样点的大型底栖无脊椎动物生物完整性指数值(Benthic macroinvertebrate index of biotic integrity, BIBI)。结果显示:苏州市城区和参照点共发现大型无脊椎底栖动物 22 种,隶属于 3 门 6 纲 9 目 14 科。经过指标筛选,得出适宜评价苏州的 BIBI 指数由以下 6 个指标组成,分别是总分类单元数、节肢动物分类单元数、Shannon-Wiener 多样性指数、广布种百分比、昆虫纲个体百分比、耐污类群个体百分比。经计算 BIBI 的最佳期望值为 4.01,即 BIBI 值 ≥ 4.01 为健康,3.01~4.01 为良好,2.01~3.01 为一般,1.01~2.01 为较差,<1.01 为极差(区间范围为左闭右开,且 BIBI ≥ 0)。根据 BIBI 结果,苏州市各断面水体生态健康程度参差不齐,处于一般和良好的位点多于健康的,不同季节各点的健康状况是不同的。通过 BIBI 与各水质因子的相关分析,证明运用 BIBI 能很好地评价城市水体生态健康状况,对城市水体生态健康评价具有科学的指导意义。

关键词:底栖无脊椎动物;生物完整性指数;健康评价;苏州

中图分类号: X 522 **文献标志码:** A

河流生态系统对人类的发展有非常重要的作用。首先,为人类提供足够的食物、工农业及生活用水和诸多的服务功能^[1-3];其次,河流生态系统还是生物圈物质循环的主要通道之一,很多营养盐及污染物在河流中得以迁移和降解^[1-2]。从 20 世纪 30 年代开始,人们的环境意识觉醒,开始重视河流健康问题^[2]。当下,运用生物完整性评价河流生态系统的健康状况,突破了过去以单一化学指标或单一的生物指数来评价水环境质量的局限性,从生态系统的角度更好地反映河流健康状况,该方法已成为河流生态系统管理的重要方法^[4]。生物完整性是生物群落具有维持自身平衡、保持结构完整性和适应环境变化的能力,包括一个地区天然栖息地中的该群落所有种类组成、多样性和功能结构特征,是自身生存状态的体现,也是对生物生存环境质量的一种反映^[5]。生物完整性指数是指当受到人类活动或

者自然灾害的干扰后,生物的结构功能和生境产生了一系列的变化,利用对环境变化敏感的生物参数对生态系统进行综合评价的一种评价方法^[6-8]。该指数评价方法主要是从生态系统中某一生物类群的组成、结构和功能等多方面来反映生态系统的健康状况,筛选并构建对环境干扰最敏感的生物参数并通过定量描述生物特性与非生物因子的关系^[1,9]来实现的。该方法最早是由 KARR 等^[1]提出用来研究鱼类的完整性的,之后逐渐发展为对大型底栖无脊椎动物的生物完整性^[10-12](BIBI)等的研究,并广泛应用于对河流生态健康状况的评价。该方法对维护河流生态系统的健康、可持续管理和利用具有重要意义^[1]。目前,我国生物完整性研究尚处于起步阶段,最初多以底栖无脊椎动物为监测对象^[10],后广泛应用于鱼类、浮游植物、水生植物等来评价河流或湖泊生态系统健康^[10-20]。大型底栖无脊椎动物作为水生生态系统中最重要的定居动物代表之一,

收稿日期: 2020-06-11 修回日期: 2022-01-14

基金项目: 苏州区域水质提升与水生态安全保障技术及综合示范项目(2017ZX07205003-003-R07)

作者简介: 王秀云(1994—),女,硕士研究生,研究方向为水生态健康。E-mail:2268518408@qq.com

通信作者: 郑海粟, E-mail:hszheng@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

在物质循环和能量流动方面具有不可替代的作用,且在很大程度上能够反映整个水生态系统的健康程度^[18-19]。因其生活空间相对固定,且对环境变化的耐受及敏感度不同,底栖动物可作为河流生态系统健康指示生物^[10]。通常污染严重的水生态系统,其底栖动物群落结构往往相对简单,生态功能会部分丧失^[20]。所以本研究采用大型底栖无脊椎动物生物完整性指数对苏州市的城市水体生态健康进行评价,可为苏州市城市水体生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况和采样点设置

苏州市地处 119°55'E~121°20'E,30°47'N~32°02'N,位于江苏省东南部,是我国著名的水网地区,地处长江和太湖流域下游,是太湖流域的一部分,属于亚热带季风海洋性气候。境内湖荡密布,河港交错,河湖串联,构成一个完整的河网湖荡系统。

根据苏州市区水系及特点并结合实地考察,在研究区域内共设置了 23 个采样断面(图 1)。于 2017 年 11 月至 2018 年 11 月采集样品,每 2 个月采集 1 次,每次采样时间安排在连续晴天、水位较稳定的采集日。

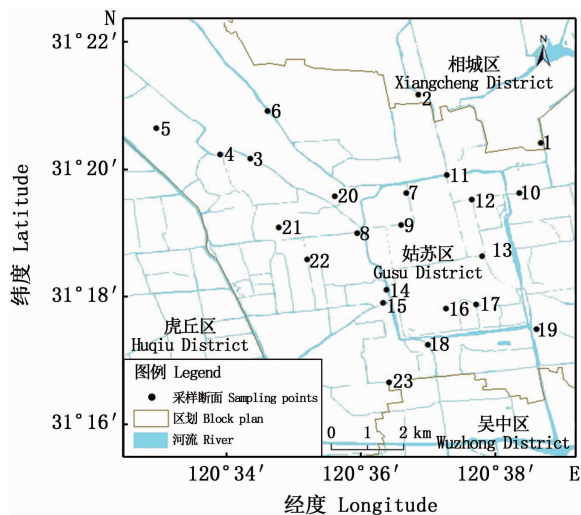


图 1 采样断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling section

1.2 水体理化因子和河底底质的测定

水体理化因子采用现场测定和实验室分析的方法,水样采集自水面下 0.5 m,其中,温度、电

导率、pH、溶解氧、ORP 采用哈希手提式多参数水质分析仪进行现场测定,透明度用塞氏圆盘现场测定。在各样点采集 2 个平行水样(各 1 L),置于保温箱中低温保存(4 ℃),于 48 h 内带回实验室进行样品的水质指标测定。总磷(TP)的测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989),总氮(TN)的测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法(GB 118934—1989),NH₃-N 的测定采用纳氏试剂分光光度法(HJ535—2009),具体参照文献[21],底质中 TP 采用消解-钼锑抗分光光度法,沉积物中铜采用石墨炉原子吸收法测量,河底沉积物总磷分析使用标准物质(GBW07309, GSD-9)。

1.3 底栖动物的采集与鉴定方法

底栖动物包括寡毛类、软体动物、水生昆虫等类群,采用彼得森采泥器在每个点采集 2 次,然后用 40 目的过滤网清洗,将残余物装入 500 mL 的塑料瓶中,并加入体积分数为 10%的甲醛溶液覆盖整个残余物。在实验室将底栖动物从白磁盘中挑出后保存在体积分数为 8%的甲醛溶液中,鉴定种类、计数并称量样品湿质量,换算成单位面积(m²)的个体数及生物量。

1.4 构建 BIBI 的方法

首先确定参照点和受损点,通过文献阅读并结合监测数据选取适合的备选指标,然后通过对比备选指标的分布范围、判别能力和相关性分析筛选出适宜城市水体生态健康评价的核心指标,再利用比值法计算各核心指标值并累加求和得到各样点的大型底栖无脊椎动物生物完整性指数值(BIBI),得出评价标准,并对苏州市河道进行生态健康评价。

2 结果

2.1 水质监测与底栖动物监测结果

2.1.1 水质及沉积物监测结果

经过为期 1 年的水质 TN、TP 及其他水质和沉积物监测,发现研究区域的氮磷全年均处于较高水平,水质较差,尤其是氮含量在水体中全年都是国家地表水劣 V 类水质。另外,绝大多数水体浑浊灰绿,悬浮物多,透明度低。根据对沉积物中总磷的监测,苏州市沉积物中 TP 值远低于长江流域沉积物中总磷含量,但其 Cu²⁺ 含量普遍高于长江流域的 Cu²⁺ 含量,对大型底栖无脊椎动

物的物种组成、分布及生物量会有一定的影响^[22]。

2.1.2 底栖动物检测结果

本研究在苏州市城区的 23 个断面进行底栖动物的样品采集,基本可以代表苏州市城区的整体特征。结果表明,苏州市城区 23 个断面和华东地区同纬度的 5 个参照点共发现大型无脊椎底栖动物 22 种,隶属于 3 门 6 纲 9 目 14 科。节肢动物 6 种,隶属于 2 纲,其中甲壳纲 2 种、昆虫纲 4 种;软体动物 11 种,隶属于 2 纲,其中腹足纲 10 种、瓣鳃纲 1 种;环节动物 5 种,其中寡毛纲 3 种、蛭纲 2 种,具体分类情况见表 1。2017 年 11 月鉴定出底栖动物

7 种,其中寡毛类 2 种、软体动物 4 种、甲壳类 1 种;2018 年 1 月鉴定出底栖动物 11 种,其中寡毛类 3 种、软体动物 5 种、蛭类 2 种、摇蚊 1 种;2018 年 3 月鉴定出底栖动物 11 种,其中寡毛类 3 种、软体动物 7 种、摇蚊 1 种;2018 年 5 月鉴定出底栖动物 8 种,其中寡毛类 2 种、软体类 5 种、摇蚊幼虫 1 种;2018 年 7 月鉴定出底栖动物 8 种,其中寡毛类 3 种、软体类 5 种;2018 年 9 月鉴定出梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*)、方形环棱螺 (*Bellamya quadrata*)、铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、扁玉螺 (*Glossaulax didyma*) 等 4 种。各季节梨形环棱螺占比均最高,为全年优势种群。

表 1 底栖动物分类

Tab. 1 Classification of benthic animals

编号 Number	门 Phylum	纲 Class	物种名 Species name
1	环节动物门 Annelida	蛭纲 Clitellata	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiurs sourbyi</i>
2			霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
3		寡毛纲 Oligochaeta	克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedeianus</i>
4			宽身舌蛭 <i>Whitmania pigra</i>
5			八目石蛭 <i>Whitmania pigra Whitman</i>
6	软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	方格短钩蝾 <i>Semisulcospira cancellata</i>
7			梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>
8			方形环棱螺 <i>Bellamya quadrata</i>
9			铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>
10			扁玉螺 <i>Glossaulax didyma</i>
11			纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>
12			白旋螺 <i>Cyraulax albusHutton</i>
13			中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>
14			展开琥珀螺 <i>Succinea evolutaMartens</i>
15			尖口圆扁螺 <i>Hippetit cantori</i>
16			瓣鳃纲 Lamellibranchia
17	节肢动物门 Arthropoda	甲壳纲 Crustacea	秀丽白虾 <i>Siberian prawn</i>
18			青虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>
19		昆虫纲 Insecta	平铗枝角摇蚊 <i>Cladopelma edwardsi</i>
20			中国长足摇蚊 <i>Tanyus chinensis</i>
21			摇蚊幼虫 <i>Chironomid</i>
22			螺科 <i>Ceratopogonidae</i>

2.2 BIBI 指标体系的建立

2.2.1 参照点的设置

目前生物完整性指数评价体系对于参照点的确定尚未有较为统一的标准,国内外研究^[23-24]中通常选择未受到人类活动干扰或者人类活动干扰相对轻微的监测点作为参照点。然而在我国,除了自然保护区核心区尚存在未受人类活动干扰的溪流外,其他均已受到不同程度人类生产活动的影响,因此,只能选择相对受干扰最小的

作为参照点^[25]。采用华东地区与苏州城区河道同纬度,但不同经度的长江中下游受人为影响小的城镇河道的 5 个断面作为参照点,且参照点为国家一级水源地上游河流。该地水质 TN、TP 均为国家地表水标准 I ~ II 类水,清澈透明,河岸稳固,周围生态完整。

2.2.2 备选指标

通过参考相关文献以及从分析数据的可获取性程度出发,参考国内外大型底栖生物完整性

指数研究实例^[10,18-20],并结合苏州市的地理环境、气候特征及水生态监测基础数据进行分析筛选。选取物种丰富度、种类个体数量比例、营养

结构和耐污性等4个方面17个对干扰反应较敏感的指标作为生态健康评价的备选指标(表2)。

表2 BIBI 备选指标

Tab.2 Alternative indicators for BIBI

属性 Attributes	指标序号 Number	备选指标 Alternative indicators	对干扰反应 Reaction of interference
物种丰富度 Species richness	B ₁	总分类单元数/种	减小
	B ₂	环节动物分类单元数/种	减小
	B ₃	软体动物分类单元数/种	减小
	B ₄	节肢动物分类单元数/种	减小
	B ₅	Shannon-Wiener 多样性指数	减小
种类个体数量比例 Number of individuals	B ₆	广布种百分比/%	减小
	B ₇	优势分类单元个体百分比/%	增大
	B ₈	寡毛纲个体百分比/%	增大
	B ₉	蛭纲个体百分比/%	减小
	B ₁₀	腹足纲个体百分比/%	减小
	B ₁₁	瓣鳃纲个体百分比/%	减小
	B ₁₂	甲壳纲个体百分比/%	减小
营养结构 Nutritional structure	B ₁₃	昆虫纲个体百分比/%	增大
	B ₁₄	滤食者个体百分比/%	增大
	B ₁₅	黏附者个体百分比/%	减小
耐污性 Stain resistance	B ₁₆	捕食者个体百分比/%	减小
	B ₁₇	耐污类群个体百分比/%	增大

注:广布种通过查阅底栖动物相关文献和书籍,根据其分布范围确定是不是广布种;优势分类单元个体百分比指先计算出各断面的优势种,然后根据各采样断面的优势种个体数与该断面总个体数的比值 $\times 100\%$ 得出的值。

Notes: Widespread species by consulting related literature and books of benthic animals, it is determined whether it is a widespread species according to its distribution range; The percentage of dominant taxon individuals refers to first calculating the dominant species of each section, and then according to the ratio of the number of dominant species individuals in each sampled section to the total number of individuals in the section $\times 100\%$.

2.2.3 指标筛选

通过对17个备选指标的计算(表3),并未发现数值及分布范围异常的指标,故17个备选指标全部可进行判别能力筛选。

使用Anaconda 3软件做出箱体图,利用箱体图得到各指标的范围及中位数(表4),然后剔除异常指标^[26-27],具体方法:对比观测点与参照点的箱型图,若箱体不重叠,则四分位距离(Interquartile range, IQ)=3;若双方中位数都在对方箱体范围之外,则IQ=2;若仅一个中位数在对方箱体范围内,则IQ=1;若双方中位数都在对方箱体范围内,则IQ=0。只有IQ ≥ 2 的指标才能进行下一轮的Pearson相关性检验筛选,以检验各参数所反映信息的独立性。最终剩余的7个

指标,即B₁、B₄、B₅、B₆、B₁₀、B₁₃、B₁₇进入相关性检验。

运用SPSS 24对备选指标进行Pearson相关性分析,采用BARBOUR等^[26]的标准。候选指数间的相关系数 $|r| \geq 0.75$,则表明两指数间包含的信息有较多的重叠,只选择其中一个即可说明问题,可去除包含信息量较少的一个;对于 $|r| < 0.75$ 的候选指数则可直接参与生物评价。

由表5可见,B₁、B₄、B₅、B₁₃直接保留,因为B₁₀和B₆、B₁₇有较强相关性,所以删除B₁₀,最终确定入选指标为6个:B₁总分类单元数、B₄节肢动物分类单元数、B₅Shannon-Wiener多样性指数、B₆广布种百分比、B₁₃昆虫纲个体百分比和B₁₇耐污类群个体百分比。

表 3 备选生物指标的数值在各样点的分布情况

Tab. 3 Distribution of the values of candidate biological indicators at each sample point

指标 Indicators	平均值 Mean	标准差 Std	最大值 Max	最小值 Min	极差 Ptp
B ₁	3. 219 512	1. 538 327	7	1	6
B ₂	0. 902 439	0. 849 817	3	0	3
B ₃	1. 878 049	1. 272 507	5	0	5
B ₄	0. 390 244	0. 579 236	2	0	2
B ₅	1. 631 786	3. 173 651	18. 858 73	0	18. 858 73
B ₆	43. 966 570	36. 600 780	100	0	100
B ₇	93. 214 370	13. 262 210	100	40	60
B ₈	17. 908 830	24. 043 580	100	0	100
B ₉	0. 447 154	1. 983 140	10	0	10
B ₁₀	58. 652 640	34. 815 770	100	0	100
B ₁₁	1. 628 602	5. 670 106	33. 333 33	0	33. 333 33
B ₁₂	14. 504 070	33. 091 410	100	0	100
B ₁₃	6. 775 953	18. 582 480	76. 923 08	0	76. 923 08
B ₁₄	1. 628 602	5. 670 106	33. 333 33	0	33. 333 33
B ₁₅	0. 355 691	1. 587 449	8. 333 333	0	8. 333 333
B ₁₆	95. 576 680	16. 179 790	100	0	100
B ₁₇	78. 477 880	34. 642 150	100	0	100

表 4 观测点与参照点的各指标范围和四分位距离

Tab. 4 Indicators range of observation points or reference points and IQ range

指标 Indicators	观测点的指标范围 Indicators range of observation points	参照点的指标范围 Indicators range of reference points	IQ
B ₁	1~7(3. 11)	1~5(4. 5)	2
B ₂	0~3(0. 94)	0~1(1)	1
B ₃	0~5(1. 89)	1. 5~3(2)	1
B ₄	0~1(0. 26)	0~2(1)	3
B ₅	0~2. 07(0. 96)	0~2. 2(1. 33)	2
B ₆	0~100(33. 3)	70~100(79. 29)	3
B ₇	76. 9~100(100)	97. 05~100(100)	1
B ₈	0~50(11. 11)	0~13. 33(4. 87)	1
B ₉	0	0	0
B ₁₀	0~100(66. 67)	0~90(29. 61)	3
B ₁₁	0	0~13. 33(0)	0
B ₁₂	0	0~25(0)	0
B ₁₃	0	1~76. 92(45. 24)	3
B ₁₄	0	0~13. 33(0)	0
B ₁₅	0	0	0
B ₁₆	100	86. 67~100(100)	0
B ₁₇	88. 89~100(100)	0~100(42. 03)	3

注:括号内的数为排除异值的中位数,IQ ≥ 2 的指标入选。

Notes: The numbers in parentheses are the medians excluding outliers, indicators with IQ ≥ 2 were selected.

2. 2. 4 健康评价标准的确定

首先,要统一各指标的量纲。统一评价量纲的方法是对生物指标进行计分,目的是便于在同一标准下对不同河道进行评价。统一评价量纲的方法有 3 分法、4 分法^[17]和比值法^[27]等。有研究^[10]表明,比值法的准确率高于 3 分法和 4 分法,因此,本研究使用比值法来统一量纲。比值法是根据 95%分位数(指标随外界干扰增加指数

值下降)或者 5%分位数(指标随外界变化而变大)的值作为最佳期望值^[28]。随干扰强度增加指数值上升的指标见计算公式(1),随干扰强度增加指数值下降的指标见计算公式(2),然后计算出各点的 BIBI 值,BIBI 的计算方法见公式(3)。根据所筛选指标对干扰的响应,使用不同的公式计算各指标分值(表 6)。

表 5 指标相关性分析结果
Tab. 5 Index correlation analysis results

指标 Indicators	B ₁	B ₄	B ₅	B ₆	B ₁₀	B ₁₃	B ₁₇
B ₁	1						
B ₄	0.15	1					
B ₅	0.532**	0.108	1				
B ₆	-0.318*	0.372*	-0.204	1			
B ₁₀	0.288	-0.472**	0.185	-0.768**	1		
B ₁₃	0.322*	0.673**	0.016	0.268	-0.257	1	
B ₁₇	0.319*	-0.704**	0.182	-0.620**	0.763**	-0.350*	1

注: ** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。
Notes: ** At the 0.01 level (two-tailed), the correlation is significant. * At the 0.05 level (two-tailed), the correlation is significant.

表 6 各指标比值法计算公式
Tab. 6 Calculation formula of each index ratio method

指标 Indicators	计算公式 Calculation formula	95%分位数 95% quantile	5%分位数 5% quantile	最大值 Max
B ₁	B ₁ /5	5	1	7
B ₄	B ₄ /1	1	0	2
B ₅	B ₅ /2.20	2.20	0	18.86
B ₆	B ₆ /100	100	0	100
B ₁₃	(76.92-B ₁₃)/(76.92-0)	57.14	0	76.92
B ₁₇	(100-B ₁₇)/(100-0)	100	0	100

注:若 B_i 标准化值>1,则 B_i 记为 1,即 B_i 值在 0~1 之间。
Notes: If the standardized value of B_i>1, then B_i is recorded as 1, that is, the value of B_i is between 0 and 1.

$$B_i = (B_{\max} - B) / (B_{\max} - B_{5\%}) \quad (1)$$

$$B_i = B / B_{95\%} \quad (2)$$

$$BIBI = \sum_{i=1}^n B_i \quad (3)$$

式中: B_i 为各参数指标值; B_{max} 为该指标的最大值; B 为该指标观测值; B_{5%} 为该指标的 5% 分位数; B_{95%} 为该指标的 95% 分位数。

以参照点 BIBI 分布的 25% 分位数作为健康阈值。BIBI 的值大于该阈值的点位为健康等级; 对小于 25% 分位数的分布范围进行四等分, 分别代表良好、一般、较差和极差等级, 来确定苏州市 BIBI 的评价标准。具体分级标准见表 7。

表 7 大型底栖无脊椎动物完整性指数评级标准
Tab. 7 Criteria for integrity index of large benthic invertebrates

BIBI 值 BIBI value	等级 Level	赋分 Score
≥4.01	健康	5
3.01~4.01	良好	4
2.01~3.01	一般	3
1.01~2.01	较差	2
<1.01	极差	1

注: 区间范围为左闭右开, 且 BIBI 值 ≥ 0。
Notes: The interval range is left closed and right open, and BIBI value ≥ 0.

2.3 健康评价结果与水质相关性分析

依据 BIBI 指数评价(图 2), 发现各断面在不同的季节评价结果是不一样的。2017 年 11 月(秋季)仅 1 个断面为健康, 值为 4.20, 2 个断面良好, 值分别为 3.31 和 3.96, 3 个断面一般, 值为 2.14、2.67 和 2.68, 1 个较差, 值为 1.89; 2018 年 1 月(冬季), 3 个断面为一般, 值为 2.73、2.44 和 2.38, 2 个断面良好, 值为 3.11 和 3.13; 2018 年 5 月(春季)1 个健康断面, 值为 4.20, 3 个良好断面, 值分别为 3.87、3.95 和 3.31, 4 个一般断面, 值分别为 2.10、2.14、2.17 和 2.30, 2 个较差断面, 值为 1.66 和 1.87; 2018 年 7 月(夏季)1 个良好断面, 值为 3.04, 2 个一般断面, 值为 2.02 和 2.93; 2018 年 9 月(秋季)仅 1 个断面为良好, 值为 2.49, 其余断面均为较差, 2018 年 11 月(秋季)仅 1 个断面为健康, 值为 2.48, 其余均为一般和较差。在采集到底栖动物的断面里, BIBI 的值大多数分布在一般水平, 综合评价苏州市 BIBI 的值为 3.16, 生态健康状态为一般水平。

由表 8 相关性分析结果可发现, BIBI 的值与环境因子具有相关性, BIBI 与 TN、TP、TDS、pH、水温、电导率之间有负相关性, BIBI 与 DO 和透明

度呈正相关性,与 BIBI 相关性最高的前 3 位环境因子分别为 TDS、电导率、TN。这一结论与许多相关研究^[22,29-31]具有一致性,也证明了 BIBI 指数

值能够反映水体生态健康状况,对城市水体生态健康评价有一定的指导意义。

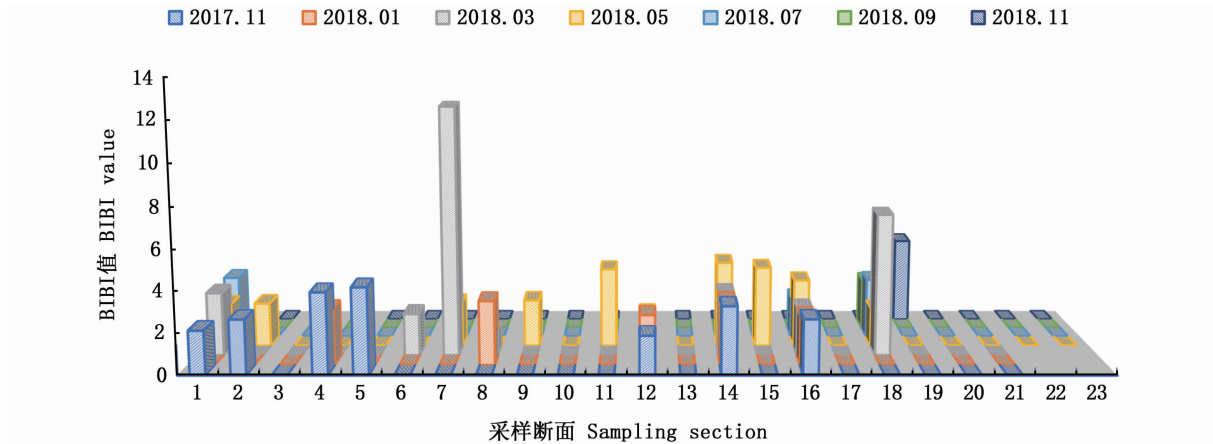


图 2 BIBI 评价结果

Fig. 2 BIBI evaluation results

表 8 BIBI 值与各水质相关性分析结果

Tab. 8 Correlation analysis results of BIBI value and water quality

指标	BIBI	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	DO/ (mg/L)	TDS/ (mg/L)	pH	水温 WT/°C	透明度 TS/cm	电导率 EC Indicators/ (μ S/cm)
BIBI	1								
TN	-0.209	1							
TP	-0.181	0.740**	1						
DO	0.180	-0.160	-0.248	1					
TDS	-0.289	0.550**	0.479**	-0.466**	1				
pH	-0.155	0.338*	0.185	0.044	0.425**	1			
WT	-0.015	-0.250	-0.005	-0.400**	0.041	-0.499**	1		
TS	0.088	-0.193	-0.141	0.127	-0.540**	-0.338*	0.032	1	
EC	-0.244	0.462**	0.458**	-0.591**	0.930**	0.264	0.355*	-0.465**	1

注: ** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

Notes: ** At 0.01 level (two-tailed), the correlation is significant; * At the 0.05 level (two-tailed), the correlation is significant.

3 讨论

通过上述结果可以了解到,苏州整体水生态处于不健康(一般和较差)的状态,只有部分断面处于健康或良好状态。其主要是由水质和沉积物导致的^[31],在水样采集及检测中,可以看出水体透明度较低且水体呈墨绿色,水下植被不能获取用于光合作用足够的光线,植物表面覆盖颗粒物,生长缓慢,导致水体净化能力低。氮磷质量浓度较高尤其是氮质量浓度处于富营养状态,夏季水华发生的风险很高,过高的氮质量浓度不利于水生生物的生长,部分断面的 DO 质量浓度

极低(大部分都在 6.5~8.5 mg/L),所有断面的 pH 均大于 7,所以水体为偏碱性,且部分断面的沉积物呈黑色同时伴有异味(沉积物中有机质过多,缺氧),与水生态健康和较差、极差的断面一一对应,并在各指标中呈不同的正负相关。由于苏州城区河道处于人口稠密区域之中,面源污染对河流影响的可能性比较大,且所有河道均经过人为改造,为石砌的直立驳岸,水生态系统构建困难,水体自净恢复能力差,从而导致了目前苏州水生态现状。另一方面由于苏州城区河道均承担雨季抗洪排涝职责,故均有水闸调整水体流速,通过采样时对水流的初步测定可知水流流速

并不稳定,泄洪时河道水流流速快,实测最高可达到 1.58 m/s,而非泄洪时期部分河道的水流流速低于 0.10 m/s,这样的流速变化对水生态可能会造成破坏性影响,在大型底栖无脊椎动物方面,会影响底栖生物的固着和繁衍,也是导致大型底栖无脊椎动物在苏州城区各河道中分布不均的主要原因。综上所述,基于大型底栖无脊椎动物能有效地对苏州城区河道生态健康进行评价。

本研究通过对苏州市的河道大型底栖无脊椎动物进行监测,建立了适合苏州市河道水生态的 BIBI 指标体系,并确立了评价标准,对其进行了健康评价。评价的结果与水质监测结果有一定的相关性,可以反映城市水体的健康状况,证明了 BIBI 评价体系在城市水体生态健康研究中的可行性。然而,城市水体健康的评价是一个长期的需求并且是一个长期的过程,城市河流受周围人类活动的影响巨大,故需要持续的监测和研究,以健全并丰富 BIBI 指数在城市水体生态健康的研究及应用。

参考文献:

- [1] KARR J R, CHU E W. Sustaining living rivers [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422(1/3): 1-14.
- [2] 王东胜,谭红武. 人类活动对河流生态系统的影响[J]. *科学技术与工程*, 2004, 4(4): 299-302.
WANG D S, TAN H W. The human being's activities' impact on the riverine ecosystem [J]. *Science Technology and Engineering*, 2004, 4(4): 299-302.
- [3] 杨希,陈兴伟,方艺辉,等. 基于分段-综合评价法的闽江下游河道健康评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 148-155.
YANG X, CHEN X W, FANG Y H, et al. Health evaluation of the Minjiang River lower reaches based on the segmented-comprehensive evaluation method [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 148-155.
- [4] 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 X D, LIU Z G, ZHANG Y. 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.
- [5] 黄亮亮,吴志强,蒋科,等. 东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(7): 1280-1289.
HUANG L L, WU Z Q, JIANG K, et al. Development and application of IBI based on fish to assess the river's health in the East Tiaoxi River [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(7): 1280-1289.
- [6] KING R S, RICHARDSON C J. Integrating bioassessment and ecological risk assessment: an approach to developing numerical water-quality criteria [J]. *Environmental Management*, 2003, 31(6): 795-809.
- [7] WHITTIER T R, HUGHES R M, STODDARD J L, et al. A structured approach for developing indices of biotic integrity: three examples from streams and rivers in the western USA [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2007, 136(3): 718-735.
- [8] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康评价在城市河流管理中的应用[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(3): 359-363.
WU A N, YANG K, CHE Y, et al. Application of river health assessment for urban river management [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3): 359-363.
- [9] KARR J R, CHU E W. Ecological integrity: Reclaiming lost connections[M]//WESTRA L, LEMONS J. *Perspectives on Ecological Integrity*. Dordrecht: Springer, 1995: 34-48.
- [10] 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 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.
- [11] 刘麟菲,徐宗学,殷旭旺,等. 基于鱼类和底栖动物生物完整性指数的济南市水体健康评价[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(8): 1384-1394.
LIU L F, XU Z X, YIN X W, et al. Assessment of the water quality in Jinan city by using both fish and benthic-macroinvertebrate index of biotic integrity [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(8): 1384-1394.
- [12] 马思琦,杨柏贺,王汨,等. 基于底栖动物生物完整性指数 B-IBI 的济南地区水体健康评价[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(11): 107-111.
MA S Q, YANG B H, WANG M, et al. Evaluation of water health in Jinan area based on benthos integrity biological index (B-IBI) [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2019, 16(11): 107-111.
- [13] 闵文武. 辽河流域着生藻类群落结构及水生态健康评价[D]. 大连:大连海洋大学,2015.
MIN W W. The periphytic algae community structure and stream ecosystem health assessment in Liao River Basin, China [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015.
- [14] 沈强,俞建军,陈晖,等. 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(2): 26-31.
SHEN Q, YU J J, CHEN H, et al. Planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for water source assessment [J]. *Journal of*

- Hydroecology, 2012, 33(2): 26-31.
- [15] WILLIAMS M, LONGSTAFF B, BUCHANAN C, et al. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59(1/3): 14-25.
- [16] 黎明民, 骆鑫, 付家想, 等. 基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 113-121.
- LI M M, LUO X, FU J X, et al. Study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for marine ecosystem health: a case of Beibu Gulf [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(6): 113-121.
- [17] 谢楚芳, 舒潼, 刘毅, 等. 以植被生物完整性评价梁子湖湖滨湿地生态系统健康[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1387-1394.
- XIE C F, SHU T, LIU Y, et al. Health assessment of riparian wetland ecosystem of lake Liangzihu by vegetation index of biological integrity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1387-1394.
- [18] 殷旭旺, 李庆南, 朱美桦, 等. 渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4784-4796.
- YIN X W, LI Q N, ZHU M H, et al. Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River Basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4784-4796.
- [19] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 919-927.
- ZHANG Y, XU C B, MA X P, et al. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 919-927.
- [20] 丛明. 赣江流域底栖动物生态学研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- CONG M. The ecological research on the zoobenthos in Ganjiang River Basin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [22] 陈爱华, 张学辉, 宋端阳. 底栖动物对重金属生物有效性的研究进展[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线[2005-11-11]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200511-169>.
- CHEN A H, ZHANG X H, SONG D Y. Research progress on the bioavailability of benthic animals to heavy metals [EB/OL]. Beijing: China Science Paper Online [2005-11-11]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200511-169>.
- [23] BLOCKSOM K A, KURTENBACH J P, KLEMM D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, 77(3): 311-333.
- [24] 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.
- [25] MORLEY S A, KARR J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin [J]. Conservation Biology, 2002, 16(6): 1498-1509.
- [26] 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.
- [27] 栗晓燕, 于鲁冀, 吕晓燕, 等. 基于B-IBI评价淮河流域(河南段)河流生态健康[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2213-2220.
- LI X Y, YU L J, LYU X Y, et al. Health assessment of aquatic ecosystem in Huai River Basin (Henan section) based on B-IBI [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 2213-2220.
- [28] 王振钟, 李艳华, 庞家平, 等. 底栖生物完整性指数在清水河流域健康评价中的应用[J]. 中国水运, 2013, 13(7): 131-133.
- WANG Z Z, LI Y H, PANG J P, et al. Application of benthic integrity index in the health assessment of Qingshui River Basin [J]. China Water Transport, 2013, 13(7): 131-133.
- [29] PALLER M H, SPECHT W L, DYER S A. Effects of stream size on taxa richness and other commonly used benthic bioassessment metrics [J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1): 309-316.
- [30] 杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等. 基于B-IBI指数的温榆河生态健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3313-3322.
- YANG L, LI Y H, WANG J C, et al. The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3313-3322.
- [31] 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 等. 环境因子对底栖动物生命活动的影响[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2005, 24(3): 253-257, 280.
- WANG Y D, XIONG B X, CHEN C B, et al. The effect of environment factors on life activity of zoobenthos [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2005, 24(3): 253-257, 280.

Evaluation of the ecological health of Suzhou Water based on the biological integrity index of large benthic invertebrates

WANG Xiuyun¹, HAN Zheng¹, TAN Meng¹, ZHENG Haisu¹, CHEN Siwei¹, ZHANG Shengman¹, PENG Ziran¹, SHAO Liu¹, CHEN Lijing², GUAN Weibing¹, HE Peimin¹, HE Wenhui¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to promote the management and protection of urban water bodies, a survey of large benthic invertebrate communities was carried out on 23 river sections in Suzhou. On this basis, the core indicators suitable for urban water ecological health assessment were selected by analyzing the distribution range, discrimination ability and correlation of the candidate indicators. The ratio method was used to calculate the core index values, and the macrobenthic invertebrate biological integrity index value (Benthic Macroinvertebrate Index of Biotic Integrity, BIBI value) were obtained by accumulating and summing. The results show that 22 species of macrobenthic invertebrates were found in the Suzhou urban water and reference points, belonging to 3 phyla, 6 classes, 9 orders and 14 families. After screening, the BIBI that was suitable for evaluation of Suzhou was composed of the following 6 indicators: the total number of taxons, the number of arthropod taxa, the Shannon-Wiener diversity index, the percentage of widespread species, the percentage of individuals in the class of insects, and the percentage of individuals in pollution-tolerant groups. The optimal expected value of the calculated BIBI value is 4.01, even the BIBI value ≥ 4.01 is healthy, 3.01–4.01 is good, 2.01–3.01 is fair, 1.01–2.01 is poor, and <1.01 is extremely poor (the interval range is left closed and right open, and BIBI value ≥ 0). According to the results of BIBI, the ecological health of the water in Suzhou was uneven. There were more fair and good sites than healthy; the health status of each point in different seasons is different. The correlation analysis between BIBI and various water quality factors proves that BIBI can be used to evaluate the ecological health of urban water and has scientific guiding significance for the evaluation of urban water ecological health.

Key words: benthic invertebrate; biological integrity index; health assessment; Suzhou