

# 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用

沈 强<sup>1</sup>, 俞建军<sup>2</sup>, 陈 晖<sup>2</sup>, 胡菊香<sup>1</sup>, 陈明秀<sup>1</sup>, 郑金秀<sup>1</sup>, 李 聃<sup>1</sup>, 张俊芳<sup>1</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;

2. 浙江省水资源管理中心, 浙江 杭州 310009)

**摘要:**2009年9月和2010年8月依次对浙江省4座大中型水库水源地的浮游生物现状进行了调查,采用浮游生物完整性指数(P-IBI)评价方法对数据进行统计分析。经过对22个备选参数的筛选,构建了以藻类密度、藻类平均体重、藻类生物多样性指数、浮游动物/浮游植物、潜在产毒藻类丰度、不可食藻类密度比为入选参数的浮游生物完整性评价体系;进一步利用该评价体系对4座水库的水生态健康程度进行分级评价。结果表明,4座水库的P-IBI评价分值依次为1.216、5.157、3.304和3.542;P-IBI等级依次为差、优、良、良。评价结果能够较好地反映浙江省水源地的富营养化、藻类水华风险程度等水生态健康状况。

**关键词:**浮游生物完整性指数;水源地;水质评价

**中图分类号:**X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2012)02-0026-06

浙江省由于特定地域位置,供水水源地多以水库为主。据调查,2007年浙江省现有集中式城乡饮用水源地765个,供水人口3323万人,年供水量40.6亿 $m^3$ ;其中,水库型水源地392个,占全省城乡饮用水源地总数的51%,供水人口2049万人,占供水总人口的62%,年供水量25亿 $m^3$ ,占供水总量的67%。近年来,经济的高速发展已给环境带来了严重污染,极大地制约了经济的可持续发展。根据2009年对69个重要水库型水源地进行营养化状况调查,浙江省已无贫营养水库,中营养水库占85.5%,轻度富营养水库占10.1%,中度富营养水库占4.4%(周芬等,2009)。近10年,浙江省水库营养化程度明显加重,水源地的水质安全问题日益突出。

随着对水源地安全问题认识的深入,急需寻求一种可全面反映水源地水质安全状况的评价方法。然而,目前国内水源地水质的评价集中于水体理化性状和微生物指标,以水质理化指标监测为主,较少考虑到水源地的生态系统健康。自20世纪70年代末以来,国内外越来越多的学者趋向于从生态系统健康角度建立评价体系,生物完整性指数(IBM)是目

前水生态系统研究中应用最广泛的指标之一,可定量描述人类干扰与生物特性之间的关系,且该指数对干扰反应敏感(Ode et al, 2005)。IBM最初的研究对象为鱼类(Karr, 1981),目前已包括底栖动物(Kerans & Karr, 1994; Karr & Rossano, 2001; Griffith et al, 2005)、浮游生物(Wu et al, 2012; Lacouture et al, 2006; Kane et al, 2009);此外, Karr(1999)研究表明,生物完整评价方法完全适用于淡水生态系统健康评价领域。本研究基于上述水质评价的发展趋势,通过构建浮游生物完整性的评价方法,将国内外水质评价研究中的IBM体系首次应用到浙江省水库水源地的水质评价中,旨在为水质评价提供新的思路和研究方向。

## 1 材料方法

### 1.1 研究区域

选择浙江省已受到保护的4座大中型供水水库(以A、B、C、D编号)为研究对象,水库距供水城市距离不超过100 km,坝址以上集水面积200~3400 $km^2$ ,总库容 $1.4 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 m^3$ ,水库功能均以防洪、供水为主,兼顾农田灌溉和发电。水库的基本情况见表1。

### 1.2 采样点设置

2009年9月和2010年8月分别对研究区域内4座水库的水生态现状进行野外调查。水库A、B、C分别设置库尾、库中和坝前3个采样点,水库D的库尾至坝前依次设置库尾1、库尾2、库中1、库中2、坝前1和坝前2共6个采样点。

收稿日期:2012-02-14

基金项目:浙江省科技厅项目(2010C33080);浙江省水利厅科技计划重点项目(RB1005);水利部公益性行业科研专项(200901055-03)。

作者简介:沈强,1975年生,男,博士,主要从事藻类学与环境科学研究工作。E-mail:shenqiang2005@gmail.com

### 1.3 样品采集和处理

浮游植物定性样品用25号浮游生物网捞取。定量样品用水生5L型采水器采集0.5m和4.0m处水样,混合后取1L。水样用鲁哥氏液固定,定量样品沉淀48h以上,再浓缩至30mL。

表1 4座供水水库的基本情况

Tab.1 Basic characteristics of the four reservoirs

水库编号	建成年份	集水面积/ km <sup>2</sup>	总库容/ 万m <sup>3</sup>	正常库容/ 万m <sup>3</sup>	年供水量/ 万m <sup>3</sup>	设计年供水量/ 万m <sup>3</sup>
A	1996	254	30 250	15 900	ND	ND
B	2001	254	16 840	14 500	11 200	14 000
C	1997	3 407	1 453	1 100	ND	4 600
D	2001	460	23 500	18 500	21 900	27 600

注:ND表示无调查数据。

Note: ND — No Data.

原生动物和轮虫的定性样品用13号浮游生物网捞取,枝角类、桡足类取水样10L,用25号浮游生物网过滤。定量样品的处理方法同浮游植物。

### 1.4 浮游生物样品鉴定

藻类样品鉴定依据胡鸿钧和魏印心(2006);藻类计数采用浮游生物计数框行格法计数(章宗涉和黄祥飞,1991)。每一样品取样和计数至少2次,误

差范围 $\pm 15\%$ 。浮游植物生物量的计算参照Kane(2004)和章宗涉和黄祥飞(1991)。

原生动物、轮虫鉴定依据沈蕴芬等(1990)和沈蕴芬(1999)以及王家楫(1961)。原生动物计数采用0.1mL计数框,轮虫、枝角类和桡足类动物采用1mL计数框。每样品计数2片,取平均值(沈蕴芬等,1990);枝角类和桡足类的鉴定、计数与生物量计算参照章宗涉和黄祥飞(1991)。

### 1.5 数据处理和评价指标筛选

1.5.1 参照点选择 根据浙江省水源地水库的现状调查,研究区域内水库B建库时间较短,同时水质较稳定,水体营养化程度水平低,因此本研究采用水库B作为参照水库。

1.5.2 备选参数 从文献检索以及分析数据的可获取性程度出发,参考国外浮游生物完整性指数研究实例(Lacouture et al, 2006; Kane et al, 2009; Williams et al, 2009);并结合浙江省水库的地理环境、气候特征及水生态监测基础数据进行分析筛选。本研究选取种类结构等22个浮游生物指标作为生态评价的备选参数。

候选参数含义详细说明见表2。

表2 22个候选参数含义详细说明

Tab.2 The 22 candidate metrics selected for ecological assessment

参数类型	参数名称	参数含义
物种丰富度参数	藻类种类数	浮游藻类的总种类数目
	浮游动物种类数	浮游动物的总种类数目
	原生动物种类数	浮游动物中原生动物的种类数目
	轮虫种类数	浮游动物中轮虫的种类数目
	枝角类、桡足类种类数	浮游动物中枝角类、桡足类的种类数目
	藻类生物多样性指数	浮游藻类的Shannon-Wiener指数
	藻类密度	浮游藻类的细胞密度
	原生动物密度	浮游动物中原生动物密度
	轮虫密度	浮游动物中轮虫密度
	枝角类、桡足类密度	浮游动物中枝角类、桡足类密度
群落结构组成参数	浮游动物密度	浮游动物的总密度
	蓝藻丰度	蓝藻密度与总藻类密度比
	硅藻商	中心壳目硅藻种数/羽状壳目硅藻种数
群落营养结构参数	水华藻类丰度	浙江淡水水体常见水华藻类(微囊藻、束丝藻、鱼腥藻、曲壳藻)与总藻类密度比
	潜在产毒藻类丰度	浙江淡水水体中能产生藻类毒素的藻类(微囊藻、束丝藻、鱼腥藻)与总藻类密度比
	枝角桡足类/浮游动物密度比	枝角类、桡足类与总浮游动物的密度比
	枝角桡足类/浮游动物生物量比	枝角类、桡足类与总浮游动物生物量比
	不可食藻类密度比	难被浮游动物摄食的藻类占总藻类密度比
	浮游动物/浮游植物密度比	浮游动物与浮游植物的密度比
	浮游动物/浮游植物生物量比	浮游动物/浮游植物的生物量比
	藻类平均体重	单个浮游藻类的平均体重
	浮游动物平均体重	单个浮游动物的平均体重

1.5.3 指标筛选 候选参数判别能力分析按照Barbour(1996)的方法,通过比较参照点和受损点各个候选参数箱体IQ的重叠程度,初步筛选出识别能

力强的指标。筛选后的指标进一步进行Person相关性分析,以检验各参数所反映信息的独立性。冗余度分析参照Maxted(2000)的标准。

1.5.4 入选参数量纲统一和评价分级标准 通过计算各入选参数 95% 或 5% 的分位值作为最佳期望值,采用比值法进行各参数量纲的统一。基于浮游生物的生态评价指数 (P-IBI) 为各入选参数的分值相加。评价分级标准以所有样点 P-IBI 值分布的 95% 分位值作为最佳期望值,将低于该值的分布范围进行三等分,靠近 95% 分位值的一等分代表被测样点的健康状态为优,其余二等分依次代表良和差。上述数据处理与相关分析通过 SPSS 19.0 软件完成。

## 2 结果

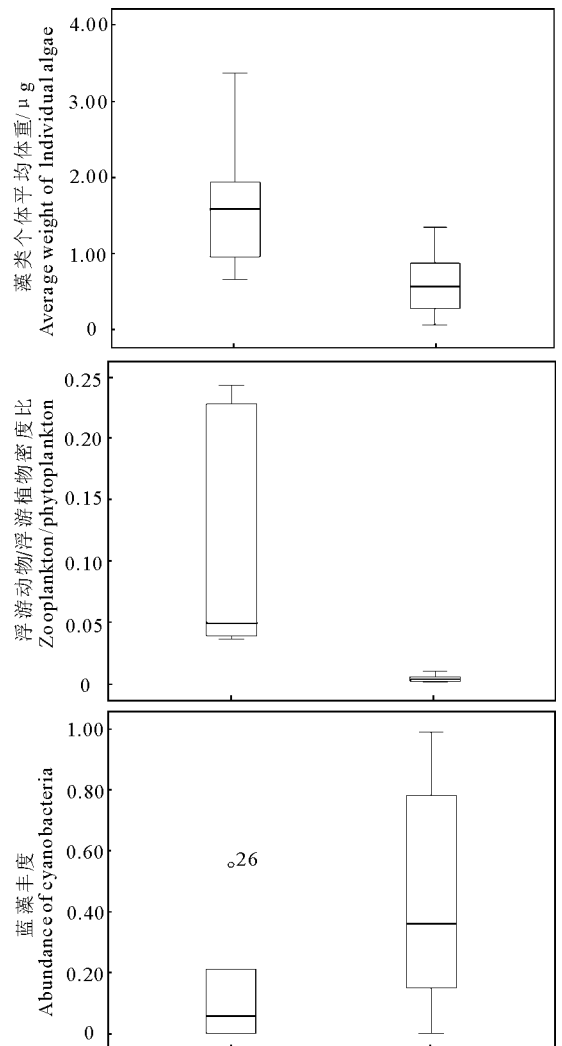
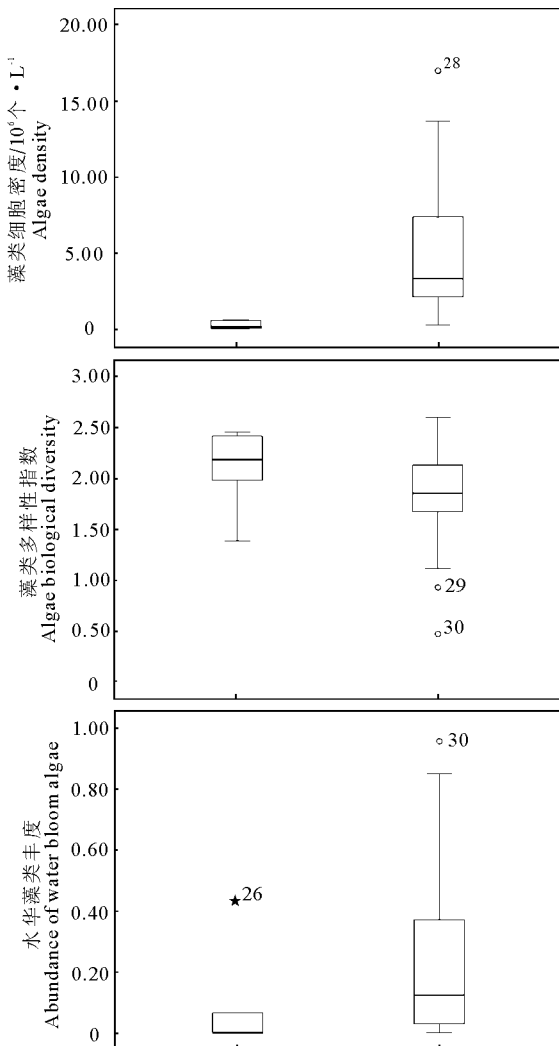
### 2.1 浮游生物评价体系的建立

通过对候选指标的判别能力分析,初步筛选出 8 个区分能力较强的候选参数。依次为藻类密度、藻类平均体重、藻类生物多样性指数、浮游动物/浮游植物密度比、水华藻类丰度、蓝藻丰度、潜在产毒

藻类丰度以及不可食藻类密度比(图 1)。

进一步的冗余度分析表明,水华藻类丰度和潜在产毒藻类丰度高度相关,相关性系数  $|r|=0.996$ ; 蓝藻丰度和不可食藻类占总藻类的密度比高度相关,  $|r|=0.912$ 。根据目前的研究,我国淡水水体中水华藻类大多能产生藻类毒素,此毒素已成为浙江饮用水源中分布最广、具有较高非致癌风险的污染物(宋立荣等,2001;王伟琴等,2010);因此在水源地评价中,藻类产毒能力参数更值得高度关注。不可捕食的藻类密度比例参数可直接反映浮游动物受到的胁迫程度,据此将水华藻类丰度和蓝藻丰度参数剔除。经过冗余度分析后,确定入选浮游生物评价体系的参数见表 3。

通过参数量纲统一计算以及 P-IBI 分值的最佳期望值计算,研究区域内所有样点 P-IBI 值分布的 95% 分位值为 5.61,确定 P-IBI 的具体分级标准见表 4。



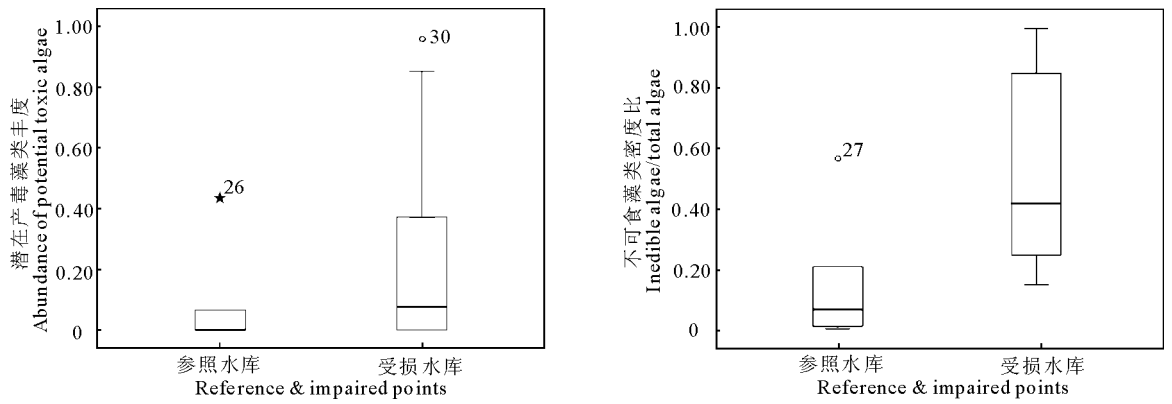


图1 8个候选参数在参照点和受损点的箱线图比较

Fig. 1 Box plot graphs of 8 candidate metrics between reference points and impaired points

表3 浮游生物评价体系入选参数

Tab. 3 The selected metrics for plankton evaluation model

编号	参数名称	参数含义	对压力的响应
1	藻类密度	藻类的细胞密度	增加
2	藻类平均体重	单个浮游藻类的平均体重	下降
3	藻类生物多样性指数	浮游藻类的 Shannon-Wiener 指数	下降
4	浮游动物/浮游植物	浮游动物与浮游植物的密度比	下降
5	潜在产毒藻类	潜在产毒藻类占藻类的密度比	增加
6	不可食藻类密度比	难被浮游动物摄食藻类占总藻类密度比	增加

2.2 评价结果

依据上述建立的浮游生物完整性评价分级标准,对研究区域内各调查站点的 P-IBI 分值进行赋分,在此基础上对 4 座水库的水生态健康程度给予最终评价。根据 P-IBI 的评价结果,水库 A、B、C、D 的 P-IBI 评价分值依次为 1. 216、5. 157、3. 304 和

3. 542;水生态健康等级依次为差、优、良、良(表 5)。

表4 浙江省饮用水源地浮游生物完整性评价分级标准

Tab. 4 Evaluation standard of P-IBI for water source assessment in Zhejiang Province

P-IBI 分值范围	0.00 ~ 1.87	1.87 ~ 3.74	3.74 ~ 5.61
水生态系统健康程度	差	良	优

表5 浙江水库各调查样点 P-IBI 计算及评价结果

Tab. 5 P-IBI scores for the sampling sites of the reservoirs in Zhejiang Province

水库编号	位置	藻类密度	藻类平均体重	藻类多样性	浮游动物/浮游植物	潜在产毒藻类/%	可食藻类密度/%	P-IBI 分值	P-IBI 总分	水生态健康评价
A	坝前	0.000	0.054	0.439	0.003	0.943	0.123	1.561	1.216	差
	库中	0.924	0.086	0.367	0.038	0.112	0.073	1.599		
	库尾	0.265	0.031	0.186	0.008	0.000	0.000	0.489		
B	坝前	0.999	1.000	0.777	1.000	1.000	0.996	5.772	5.157	优
	库中	1.000	0.680	0.881	0.972	1.000	0.951	5.484		
	库尾	0.997	0.521	0.546	0.152	1.000	1.000	4.216		
C	坝前	0.984	0.142	0.847	0.042	1.000	0.450	3.465	3.304	良
	库中	0.939	0.040	0.597	0.014	0.900	0.145	2.635		
	库尾	0.987	0.249	1.000	0.039	1.000	0.538	3.812		
D	坝前 1	0.904	0.266	0.736	0.006	1.000	0.857	3.770	3.542	良
	坝前 2	0.880	0.159	0.815	0.006	0.674	0.620	3.155		
	库中 1	0.821	0.212	0.836	0.010	0.972	0.825	3.676		
	库中 2	0.801	0.165	0.790	0.003	0.697	0.579	3.034		
	库尾 1	0.811	0.347	0.836	0.012	1.000	0.667	3.673		
	库尾 2	0.853	0.364	0.983	0.027	0.890	0.826	3.943		

### 3 讨论

#### 3.1 P-IBI 评价与浮游生物群落结构的相关性

浮游植物在水生态系统中占据重要地位。浮游生物往往具有生长周期短、对环境变化响应迅速的特点,因此浮游生物群落演变规律与湖泊富营养化进程、水质变化关系密切,能直接或间接地反映着湖泊水质的状况及其发展趋势。

依据 P-IBI 的评价结果,4 座水库中,水库 A 的 P-IBI 评价结果为差,库尾处尤其严重,P-IBI 总分为 1.216(表 5)。对照 2010 年 8 月 4 座水库的浮游生物采样调查的结果,水库 A 藻类密度过大、水华藻类优势度较高造成(库尾藻类密度高达  $1.696 \times 10^7$  个/L)。浮游植物以具产毒能力的不定微囊藻、水华束丝藻和固氮鱼腥藻等蓝藻居多,近年来有蓝藻水华发生,给供水安全造成隐患;另一方面,藻类群落结构的空间差异性明显,库尾处以硅藻为主(优势度 61.3%),库中以甲藻为主(优势度 41.3%),而到坝前则以蓝藻占优(优势度 70.1%),蓝藻种类主要为具产毒能力的水华微囊藻、水华束丝藻为主;这种藻类种群结构的变化,反映了从库尾-库中-坝前的水浮游生物群落的演变规律,同时表明水库 A 蓝藻水华发生风险相对较高。

水库 B 的 P-IBI 评价结果为优。对照采样调查发现,水库 B 藻类以绿藻为主,其次是硅藻和甲藻;生物量统计则以甲藻生物量最大,其次是绿藻、硅藻和隐藻。蓝藻无论在密度和生物量上均不占优势,表明其水生态健康状况较好,无蓝藻水华发生的风险。

水库 C 的 P-IBI 评价结果为良。对照采样调查结果,浮游植物的丰度以蓝藻占优(优势种为美丽隐球藻、微小平裂藻),其次为绿藻和硅藻。而生物量以硅藻为主,其次是绿藻、甲藻和隐藻。虽然蓝藻丰度较高,但由于能形成蓝藻水华的微囊藻、鱼腥藻等无论在丰度和生物量上均不占优势,因此暂无蓝藻水华发生的风险。以上采样调查结果与 P-IBI 评价结果较为一致。

水库 D 的浮游植物以硅藻和隐藻等相对供水无害的藻类为主,优势藻类为链状曲壳藻。P-IBI 评价结果为良。

以上 P-IBI 的评价结果较全面地反映了不同水库的浮游生物群落结构的组成规律,较好地反映了水生态健康状况和藻类水华风险程度。因此,P-IBI 评价体系能准确反映水体中浮游生物群落结构与功

能变化,进而能准确预测水质状况的发展趋势,具有常规水质分析方法无可比拟的优势。

#### 3.2 P-IBI 评价与水质状况

根据周芬等(2009)对研究区域的 4 座水库的水质调查(表 6),P-IBI 评价的分级结果和依据 I、II 类水质达标率的分级结果有类型的规律,水质等级以水库 B、D 较好,而水库 A、C 的水质较差,该结果也反映了 P-IBI 评价结果具有较高的可靠性。

表 6 4 座水库的水质评价结果

Tab. 6 Water quality evaluation results of the four reservoirs

水库 编号	营养状 态指数	I、II 类水质 达标率/%	III 类水质达 标率/%	水质总达 标率/%
A	31	60	92	84
B	33	92	100	98
C	29	50	92	82
D	40	79	94	90

综上所述,依据 P-IBI 评价体系得到的结果,能够较好地反映浙江省水源地的富营养化、藻类水华风险程度等水生态健康状况。P-IBI 评价方法在水源地水质评价中具有很好的应用推广价值。

#### 参考文献

- 胡鸿钧,魏印心. 2006. 中国淡水藻类 - 系统、分类及生态 [M]. 北京:科学出版社.
- 沈蕴芬,章宗涉,龚循矩,等. 1990. 微型生物监测新技术 [M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- 沈蕴芬. 1999. 原生动物学 [M]. 北京:科学出版社.
- 宋立荣,雷腊梅,潘卉,等. 2001. 我国有毒蓝藻水华和毒素研究 [A]. 刘永定. 中国藻类学研究 [C]. 武汉:武汉出版社:243 - 253.
- 王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京:科学出版社.
- 王伟琴,金永堂,吴斌,等. 2010. 水源水中微囊藻毒素的遗传毒性与健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 30(4):468 - 476.
- 章宗涉,黄祥飞. 1991. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京:科学出版社.
- 周芬,卢晓燕,王磊,等. 2009. 浙江省百库水源安全保障工程实施方案 [R]. 杭州:浙江省水利水电勘测设计院.
- Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. 1996. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 15(2):185 - 211.
- Griffith M B, Hill B H, McCormick F H, et al. 2005. Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams [J]. Ecological Indicators, 5(2):117 - 136.

- Kane D D, Gordon S I, Munawar M, et al. 2009. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health [J]. *Ecological Indicators*, 9 (6): 1234 – 1247.
- Kane D D. 2004. The development of a planktonic index of biotic integrity for Lake Erie [D]. Columbus: The Ohio State University.
- Karr J R, Chu E W. 1999. Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring [M]. Washington D C: Island Press.
- Karr J R, Rossano E M. 2001. Applying public health lessons to protect river health [J]. *Ecology and Civil Engineering*, 4 (1): 3 – 18.
- Karr J R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 6 (6): 21 – 27.
- Kerans B L, Karr J R. 1994. A Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) for Rivers of the Tennessee Valley [J]. *Ecological Applications*, 4: 768 – 785.
- Lacouture R V, Johnson J M, Buchanan C, et al. 2006. Phytoplankton index of biotic integrity for Chesapeake Bay and its tidal tributaries [J]. *Estuaries and Coasts*, 29 (4): 598 – 616.
- Maxted J R, Barbour M T, Gerritsen J, et al. 2000. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 19 (1): 128 – 144.
- Ode P R, Rehn A C, May J T. 2005. A quantitative tool for assessing the ecological condition of streams in southern coastal California [J]. *Environmental Management*, 35: 493 – 504.
- Williams M, Longstaff B, Buchanan C, et al. 2009. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 59 (1 – 3): 14 – 25.
- Wu N, Schmalz B, Fohrer N. 2012. Development and testing of a phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) for a German lowland river [J]. *Ecological Indicators*, 13 (1): 158 – 167.

(责任编辑 万月华)

## Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI) for Water Source Assessment

SHEN Qiang<sup>1</sup>, YU Jian-jun<sup>2</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, HU Ju-xiang<sup>1</sup>, CHEN Ming-xiu<sup>1</sup>,  
ZHEN Jin-xiu<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, ZHANG Jun-fang<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P. R. China;  
2. Water Resources Management Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, P. R. China)

**Abstract:** Investigation study on plankton population was conducted during 2009 and 2010, and the data were analyzed with an evaluation method of Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI). According to the research data, an evaluation model of P-IBI composed of 6 metrics was established. Furthermore, ecological health statuses of four reservoirs were also evaluated. Results showed that the P-IBI scores of four reservoirs were 1.216, 5.157, 3.304 and 3.542 respectively; the health statuses were poor, excellent, good and good correspondingly. Results also indicated that the P-IBI evaluation system can reflect the health status of aquatic ecosystem of water resources in Zhejiang Province.

**Key words:** Planktonic Index of Biotic Integrity; water source; water quality assessment