

# 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

马陶武<sup>1,2</sup>, 黄清辉<sup>3</sup>, 王海<sup>2</sup>, 王子健<sup>2,\*</sup>, 王春霞<sup>2</sup>, 黄圣彪<sup>2</sup>

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**对太湖 8 个区域共 60 样点进行底栖大型无脊椎动物采样, 共获得底栖动物 24 种, 其中软体动物 14 种, 节肢动物 5 种, 甲壳动物 5 种。根据 Hilsenhoff 生物指数确定了 15 个相对清洁的样点和 45 个污染样点, 然后进行 21 种生物指数的综合评估, 结果表明, 总分类单元数、(甲壳动物 + 软体动物) 分类单元数、% (甲壳动物 + 软体动物)、% 腹足纲、Goodnight-Whitley 指数、Hilsenhoff 生物指数和 % 直接收集者等 7 个底栖动物生物指数可以用作判别太湖水质的敏感生物指数。通过 5, 3, 1 记分法对 6 种生物指数统一量纲后, 获得变化范围为 7~35 的综合生物指数, 运用四分法划分了太湖水质判别的生物基准: 7~14 很差, 15~21 差, 22~28 一般, 29~35 好, 并对 60 个样点进行重新记分, 获得了太湖水质的基本生态分区现状, 太湖的东南区属水质较好的区域, 而西北区属水质较差的区域。该水质生物基准基本适合评价太湖不同区域的水质状况。

**关键词:**底栖大型无脊椎动物; 生物指数; 水质生物评价; 记分标准; 生物基准; 太湖  
文章编号: 1000-0933(2008)03-1191-09 中图分类号: Q178, Q958 文献标识码: A

## The selection of benthic macroinvertebrate-based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake

MA Tao-Wu<sup>1,2</sup>, HUANG Qing-Hui<sup>3</sup>, WANG Hai<sup>2</sup>, WANG Zi-Jian<sup>2,\*</sup>, WANG Chun-Xia<sup>2</sup>, HUANG Sheng-Biao<sup>2</sup>

1 College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China

2 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1192 ~ 1200.

**Abstract:** To develop benthic macroinvertebrate-based multimetrics for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake, benthic macroinvertebrate assemblages were sampled at 60 sites in 8 subareas of Taihu Lake. A total of 24 species of the benthos were collected: 14 species of Mollusca, 5 species of Arthropoda and 5 species of Annelida. Based on Hilsenhoff biotic index discriminatory criteria, 15 sites were considered relatively clean while the remaining 45 sites were polluted. A comprehensive evaluation of the metrics was carried out. The results showed that 7 metrics (i. e., total number of taxa, the

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(40590390;20677021);吉首大学学科发展基金资助项目(S200405)

**收稿日期:**2007-06-08; **修订日期:**2007-12-29

**作者简介:**马陶武(1968~),男,湖南慈利人,博士,副教授,主要从事环境生物学和水生态毒理学研究. E-mail: mtw922@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzj@cees.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40590390; 20677021) and Science Foundation of Jishou University (No. S200405)

**Received date:** 2007-06-08; **Accepted date:** 2007-12-29

**Biography:** MA Tao-Wu, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in environmental biology and ecotoxicology. E-mail: mtw922@163.com

number of Mollusca & Crustacea taxa, % Mollusca & Crustacea, % Gastropoda, Goodnight-Whitley index, Hilsenhoff biotic index and % Collector-gathers) were sensitive. A score of 5, 3 or 1 was assigned to every metric for standardization of the metrics, and a multimetric on a scale ranging from 7 to 35 for bioassessment was developed for each site by addition of its 7 metrics. Four levels of discriminatory biocriteria for water quality were eventually proposed by quartation: 7–14, very poor; 15–21, poor; 22–28, fair; and 29–35, good. The re-scored results from the 60 sites showed that the water quality of southeastern Taihu Lake was relatively good, whereas that of northwestern Taihu Lake was relatively poor. Basically, the discriminatory biocriteria are suitable for the assessment of the water quality of Taihu Lake.

**Key Words:** benthic macroinvertebrates; metrics; bioassessment of water quality; scoring criteria; biocriteria; Taihu Lake

底栖大型无脊椎动物是湖泊生态系统的重要组成生物,它们对外界胁迫的响应比较敏感,其在湖泊、水库等水体中的丰富度、群落组成结构、耐污类群和敏感类群的比例以及不同功能摄食类群的结构特征等都可以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。美国、加拿大等环保部门已经广泛采用底栖大型无脊椎动物进行水质的生物学评价,并且制定了多个基于底栖动物的水质评价标准方法<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,人们开始由过去所采用的单一生物指数评价转向利用多种生物指数进行水质的综合评价,并结合水体的理化指标建立不同水体的底栖动物生物完整性指数<sup>[2~4]</sup>。我国自 20 世纪 80 年代以来开始进行这方面的研究<sup>[5~8]</sup>,近年来,王备新等<sup>[9~12]</sup>先后进行了南京紫金山小水体水质生物评价生物指数的筛选,建立了河流生物指数评价秦淮河水质的标准,探讨了我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值,进而进行了通过建立底栖动物完整性指数来评价安徽黄山地区溪流生态系统健康评价的研究。王建国等<sup>[13]</sup>核定了庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值。这些工作为进一步开展我国各种淡水水体水质生物学评价和水生态系统健康评价奠定了一定的基础。

太湖是为我国五大淡水湖泊之一,随着经济的飞速发展,太湖的水污染不断加剧,太湖生态系统的健康状况不容乐观<sup>[14, 15]</sup>,特别是环太湖区域饮用水源的安全受到极大的挑战。但至今未有关于太湖水质生物学评价的基础数据和评价指标方法的报道,不利于评价工作的进一步开展。本研究通过对太湖底栖动物的不同分类群和不同生态类群的分析比较,以初步获得适用于太湖水质生物评价的底栖大型无脊椎动物生物指数,确立水质评价的生物基准。

## 1 研究方法

### 1.1 样品采集与处理

本研究的采样区域除了五里湖之外的全太湖 8 个区域,即西部沿岸带、竺山湖、梅梁湾、贡湖、东部沿岸带、东太湖、南部沿岸带和湖心区。样品采集点采用全球定位系统(GPS)定位。于 2004 年 5 月在 60 个采样点采用 Peterson 采泥器(1/16m<sup>2</sup>)采集底栖动物(图 1),其中西部沿岸带 17 个(S01~S17),竺山湖 2 个(S18~S19),梅梁湾 15 个(S20~S34),贡湖 3 个(S35~S37),东部沿岸带 2 个(S38~S39),东太湖 8 个(S40~S47),南部沿岸带 9 个(S48~S56),湖心区 4 个(S57~S60)。所采底泥经 60 目筛网淘洗后,在白磁盘中挑出底栖动物,保存于 70%酒精中。将样本带回实验室进行鉴定并分类计数。所获底栖动物标本大部分鉴定到种,少数鉴定到属,详细记录每个分类单元(属或种)的数目,最后换算成每平方米的个体数目。

### 1.2 底栖动物耐污值和功能摄食类群的确定

所收集到的底栖动物样本的耐污值主要参考王建国等<sup>[13]</sup>和王备新等<sup>[11]</sup>的资料。功能摄食类群的划分主要参考 Morse 等<sup>[16]</sup>和刘建康<sup>[17]</sup>的资料。

### 1.3 清洁样点和污染样点的区分

根据 Hilsenhoff 生物指数(HBI)划分水质级别的标准<sup>[13]</sup>:清洁为 0~5.75;轻度污染为 5.76~6.5;污染为 6.51~7.25;严重污染为 7.26~10,将 HBI 小于或等于 6.5 的样点定为相对清洁样点;HBI 大于 6.51 的样点

定为污染样点。

1.4 候选生物指数的选择、计算与数据处理

参照有关文献并结合本研究中底栖动物的采集情况,所选用的候选生物指数包括四大类共 21 个 ( $M_1 \sim M_{21}$ ), 这些生物指数的计算根据 Barbour 等<sup>[18]</sup> 和 Stribling 等<sup>[19]</sup> 的方法(表 1)。生物指数筛选中的统计分析均在 SPSS13.0 中进行。

1.5 候选生物指数的筛选方法

候选生物指数的筛选主要参照 Stribling 等<sup>[19]</sup> 的方法,首先,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,具体而言,在两类样点中,中位数的差异采用 Mann-Whitney U 法检验,分布特征的差异采用 Kolmogorov-Smirnov 法进行检验,显著性水平取 0.01。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,才作进一步分析。然后,对经过初步筛选的生物指数计算其在清洁样点的频数分布:最小值、10%分位数、50%分位数、90%分位数和最大值,并采用 5, 3, 1 记分法对全部样点的生物指数进行记分以统一量纲,对于生物指数值随污染胁迫增加而降低的指数(称为正向

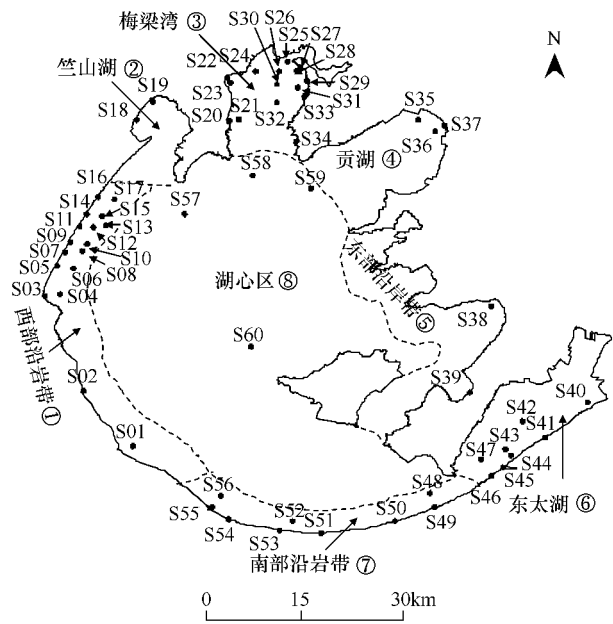


图 1 太湖 60 个采样点分布示意图

Fig. 1 Sampling sites in Taihu Lake

- ① Western coastal area; ② Zhushanhu Lake; ③ Meiliang Bay; ④ Gonghu Lake; ⑤ Eastern coastal area; ⑥ Eastern Taihu Lake; ⑦ Southern coastal area; ⑧ Central lake area

表 1 候选生物指数

Table 1 Candidate biotic metrics

类别 Category	生物指数及编号 Metrics and Serial Number	对污染胁迫的反应 Response to stress
丰富度指数 Richness	$M_1$ : 总丰富度 Total Species Abundance	降低 Decrease
	$M_2$ : 总分类单元数 Total No. of Taxa	降低
	$M_3$ : 摇蚊科分类单元数 No. of Chironomidae Taxa	升高 Increase
	$M_4$ : (甲壳动物 + 软体动物)分类单元数 No. of Mollusca & Crustacea Taxa	降低
分类单元组成指数 Taxonomic Composition	$M_5$ : % 摇蚊个体数 % Chironomidae	升高
	$M_6$ : % (甲壳动物 + 软体动物) % Mollusca & Crustacea	降低
	$M_7$ : % 腹足纲 % Gastropoda	降低
	$M_8$ : % 瓣鳃纲 % Pelecypoda	降低
	$M_9$ : % 蜆属 % Corbicula	升高
	$M_{10}$ : Shannon-Wiener 物种多样性指数 Shannon-Wiener Species Diversity Index	降低
	$M_{11}$ : Goodnight-Whitley 指数 Goodnight-Whitley Index	升高
耐受/敏感指数 Tolerance & Intolerance Index	$M_{12}$ : 敏感类群分类单元数 No. of Intolerant Taxa	降低
	$M_{13}$ : % 敏感类群 % Intolerant Taxa	降低
	$M_{14}$ : % 优势分类单元 % Dominant Taxon	升高
	$M_{15}$ : Hilsenhoff 生物指数 Hilsenhoff Biotic Index (HBI)	升高
	$M_{16}$ : 贝克生物指数 Beck's Biotic Index	降低
功能摄食类群指数 Functional Feeding Group Index	$M_{17}$ : % 刮食者 % Scrapers	降低
	$M_{18}$ : % 捕食者 % Predators	降低
	$M_{19}$ : % 直接收集者 % Collector-gathers	升高
	$M_{20}$ : % 过滤收集者 % Collector-filterers	升高
	$M_{21}$ : % 撕食者 % Shredder	降低

指数),高于 50%分位值的生物指数记 5 分,在 10%分位值和 50%分位值(也包括这两个值)之间的生物指数记 3 分,低于 10%分位值的生物指数记 1 分;对于生物指数值随污染胁迫增加而增加的指数(称为反向指数),则低于 50%分位值的生物指数记 5 分,在 50%分位值和 90%分位值(也包括这两个值)之间的生物指数记 3 分,高于 90%分位值的生物指数记 1 分。最后根据这些记分值进行生物指数对污染胁迫的敏感性检测,如果生物指数的得分为 3 或 5 分,则认为开始所确定的清洁样点的区分是正确的,如果生物指数的得分为 1 分,则认为开始所确定的污染样点的区分是正确的;反之,则开始的样点区分是错误的。然后计算生物指数区分清洁样点与污染样点的效率,区分效率即被正确区分的样点的百分比。如果区分效率在 60 以上,则考虑保留该生物指数,除此之外,还适当结合生物指数的使用情况、指数的代表性和其它情况(如指数所反映信息的重复性)加以考虑。

## 2 结果与分析

### 2.1 底栖动物物种组成

对太湖 8 个区域共 60 个样点的取样调查共获得底栖动物 24 种,其中软体动物 14 种,节肢动物 5 种,甲壳动物 5 种,分别占总物种数的 58.33%、20.83% 和 20.83%,底栖动物种类组成情况见表 2。

表 2 太湖 60 个采样点底栖动物物种组成

Table 2 Species composition of benthos in 60 sampling sites of Taihu Lake

门 Phylum	纲 Class	种 Species
软体动物 Mollusca	瓣鳃纲 Lamellibranchia	蛭蚌 <i>Solenia</i> sp.
		湖球蚬 <i>Sphaerium lacustre</i>
		河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>
		扭蚌 <i>Arconaia lanceolata</i>
	腹足纲 Gastropoda	淡水壳菜 <i>Limnoperna lacustris</i>
		方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i>
		铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>
		梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>
		螺蛳 <i>Margaria melanooides</i>
		黑龙江短沟蜷 <i>Semisuleospira amurensis</i>
		方格短沟蜷 <i>Semisuleospira cancellata</i>
		纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>
		长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>
		耳萝卜螺 <i>Radix auriculararia</i>
节肢动物 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	摇蚊幼虫 <i>Chironomus</i> sp.
		长足摇蚊 <i>Tanytus</i> sp.
		长跗摇蚊幼虫 <i>Tanytarsus</i> sp.
		秀丽白虾 <i>Palaemon modestus</i>
		中华米虾 <i>Caridia denticulata sinensis</i>
环节动物 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	管水蚓 <i>Aulodrilus</i> sp.
		霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
		带丝蚓 <i>Lumbriculus</i> sp.
	多毛纲 Polychaeta	齿吻沙蚕 <i>Nephtys</i> sp.
		蛭纲 Hirudinea

### 2.2 生物指数的评估

根据 Hilsenhoff 生物指数(HBI)划分水质级别的标准,初步确定 S13、S19、S35、S36、S37、S38、S39、S40、S41、S42、S43、S44、S46、S48 和 S49 共 15 个样点为水质相对清洁的样点。其余 45 个样点为污染样点。基于这种区分,在所评估的 21 个生物指数中,有 10 个通过了两种显著性检验( $p < 0.01$ )(表 3),其中,丰富度指数

表3 候选生物指数的评估

Table 3 Evaluation of individual candidate metrics

生物指数 Metrics	M-W <sup>①</sup> 检验( <i>p</i> ) M-W test ( <i>p</i> )	K-S <sup>②</sup> 检验( <i>p</i> ) K-S test ( <i>p</i> )	区分效率 CE <sup>③</sup>	保留或排除 Included or excluded	保留或排除的原因 Reason for including or excluding the metric
丰富度指数 <sup>④</sup>					
M <sub>1</sub>	0.007 *	0.015		排除 Excluded	未通过
两种显著性检验 <sup>⑤</sup>					
M <sub>2</sub>	<0.001 *	0.003 *	55	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
M <sub>3</sub>	0.010 *	0.081		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>4</sub>	<0.001 *	<0.001 *	85	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
分类单元组成指数 <sup>⑤</sup>					
M <sub>5</sub>	0.006 *	0.023		排除 Excluded	未通过
两种显著性检验 <sup>⑥</sup>					
M <sub>6</sub>	<0.001 *	<0.001 *	82	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
M <sub>7</sub>	<0.001 *	<0.001 *	82	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
M <sub>8</sub>	0.535	0.400		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>9</sub>	0.394	0.635		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>10</sub>	<0.001 *	<0.001 *	53	排除 Excluded	较低的区分效率 <sup>⑦</sup>
M <sub>11</sub>	0.003 *	0.003 *	72	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
耐受/敏感指数 <sup>⑥</sup>					
M <sub>12</sub>	0.086	0.999		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>13</sub>	0.082	0.988		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>14</sub>	0.185	0.055		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>15</sub>	<0.001 *	<0.001 *	100	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
M <sub>16</sub>	<0.001 *	0.002 *	55	排除 Excluded	较低的区分效率 <sup>⑦</sup>
功能摄食类群指数 <sup>⑦</sup>					
M <sub>17</sub>	<0.001 *	<0.001 *	82	排除 Excluded	体现的种类与 M <sub>7</sub> 重叠 <sup>⑩</sup>
M <sub>18</sub>	0.032	0.164		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>19</sub>	<0.001 *	<0.001 *	75	保留 Included	通过两种检验,广泛使用 <sup>⑥</sup>
M <sub>20</sub>	0.377	0.036		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>
M <sub>21</sub>	0.984	1.000		排除 Excluded	未通过两种显著性检验 <sup>⑥</sup>

① M-W: Mann-Whitney U; ② K-S: Kolmogorov-Smirnov; ③ CE: Classification Efficiency; ④ Richness; ⑤ Taxonomic Composition; ⑥ Tolerance & Intolerance Index; ⑦ Functional Feeding Group Index; ⑧ Did not pass both significance tests; ⑨ Pass both significance tests and universally applied; ⑩ Low classification efficiency; ⑪ Overlapped with M<sub>7</sub>

有 M<sub>2</sub> (总分类单元数) 和 M<sub>4</sub> ((甲壳动物 + 软体动物) 分类单元数); 分类单元组成指数有 M<sub>6</sub> (% (甲壳动物 + 软体动物))、M<sub>7</sub> (% 腹足纲)、M<sub>10</sub> (Shannon-Wiener 物种多样性指数) 和 M<sub>11</sub> (Goodnight-Whitley 指数); 敏感/耐受指数有 M<sub>15</sub> (Hilsenhoff 生物指数) 和 M<sub>16</sub> (贝克生物指数); 功能摄食类群指数有 M<sub>17</sub> (% 刮食者) 和 M<sub>19</sub> (% 直接收集者)。在以上生物指数中, 7 个指数区分清洁与污染样点的效率在 70% 以上, 其中 M<sub>15</sub> 的区分效率为 100%, 这是因为样点的初步区分是基于该指数, 它不仅包含种类丰富度信息, 而且包含了耐污值信息, 在文献中使用广泛, 因此作为首选指数应该没有问题。M<sub>2</sub> 和 M<sub>10</sub> 的区分效率较低, 分别只有 55% 和 53%, 但考虑到前者稍高, 而且该指数是使用广泛, 决定予以保留, 而 M<sub>10</sub> 则被排除。另外从所采集到的底栖动物种类来看, M<sub>17</sub> 体现的底栖动物种类与 M<sub>7</sub> 完全重叠 (即所发现的刮食者中只有腹足类), 因此排除 M<sub>17</sub>。最终入选的生物指数包括 7 个: M<sub>2</sub> (总分类单元数)、M<sub>4</sub> ((甲壳动物 + 软体动物) 分类单元数)、M<sub>6</sub> (% (甲壳动物 + 软体动物))、M<sub>7</sub> (% 腹足纲)、M<sub>11</sub> (Goodnight-Whitley 指数)、M<sub>15</sub> (Hilsenhoff 生物指数)、M<sub>19</sub> (% 直接收集者)。

### 2.3 底栖动物综合生物指数水质评价基准的确立

7 个最终入选生物指数的频数分布统计和记分标准见表 4。根据每个生物指数值在清洁样点中的频数分

布统计和 5, 3, 1 记分法即可确立融合了 7 种生物指数信息的综合生物指数, 由于这 7 个指数的最大得分为 5 分, 最小得分为 1 分, 所以综合生物指数值的可能范围是 7 ~ 35, 可以采用普遍适用的四分位法, 将综合生物指数值划分为 4 个水质级别生物基准: 7 ~ 14, 很差 (very poor); 15 ~ 21, 差 (poor); 22 ~ 28, 一般 (fair); 29 ~ 35, 好 (good)。

表 4 终选生物指数在清洁样点的频数分布统计和记分标准

Table 4 Frequency distribution statistics of the final metrics in the clean sites and its scoring criteria

生物指数 Metrics	统计 Statistic					记分 Score		
	最小值 Minimum	10% 分位数 10th Percentile	50% 分位数 50th Percentile	90% 分位数 90th Percentile	最大值 Maximum	5	3	1
M <sub>2</sub>	2	2	5	7	8	>5	2~5	<2
M <sub>4</sub>	2	2	5	6	6	>5	2~5	<2
M <sub>6</sub>	74.42	97.60	100.00	100.00	100.00	100	97.60~100	<97.60
M <sub>7</sub>	0	48.33	93.33	100.0	100.0	>93.33	48.33~93.33	<48.33
M <sub>11</sub>	0	0	0	2.40	6.98	0	0~2.40	>2.40
M <sub>15</sub>	3.38	4.46	5.88	6.17	6.52	<5.88	5.88~6.17	>6.17
M <sub>19</sub>	0	0	0	4.40	23.26	0	0~4.40	>4.40

## 2.4 太湖 8 个区域水质综合评价

根据所确定的水质级别生物基准重新对 60 个样点进行综合记分, 并统计 8 个区域水质为“一般”及以上级别 (综合指数  $\geq 22$ ) 的样点百分比 (表 5), 结果显示, 太湖的东南区属水质相对较好的区域, 而西北区和湖心区属水质较差的区域。在所测 60 个样点中, 水质较好的样点比例只有 33.33%, 说明太湖受到了普遍的污染。

表 5 太湖各地理分区中水质为一般及以上级别的样点百分比

Table 5 The percentage of sample sites with fair and above level of water quality in the geographic region of Taihu Lake

地理分区 Geographic region	西部沿岸带 <sup>①</sup>	竺山湖 <sup>②</sup>	梅梁湾 <sup>③</sup>	贡湖 <sup>④</sup>	东部沿岸带 <sup>⑤</sup>	东太湖 <sup>⑥</sup>	南部沿岸带 <sup>⑦</sup>	湖心区 <sup>⑧</sup>
总样点数 Total number of sampling sites	17	2	15	3	2	8	9	4
百分比 Percentage	0	0	13	100	100	75	78	0

① Western coastal area; ② Zhushanhu Lake; ③ Meiliang Bay; ④ Gonghu Lake; ⑤ Eastern coastal area; ⑥ Eastern Taihu Lake; ⑦ Southern coastal area; ⑧ Central lake area

## 3 讨论

### 3.1 候选生物指数的选择

本文在确定候选生物指数时主要是依据有关指数的使用情况和本次底栖动物的采集情况, 以避免盲目地过多选择生物指数而带来徒劳的计算与分析。通常在确定溪流、河流等流动水体的水质评价生物指数时, 候选指数一般有 5 类<sup>[19]</sup>, 包括丰富度指数、分类单元组成指数、敏感/耐受指数、功能摄食类群指数和生境倾向指数。这里只选前四类生物指数, 生境倾向指数 (穴居者、攀爬者、流水生活者、爬行者和游泳者的百分比) 没有作为候选生物指数。这主要是基于不同水体生境特征差异的考虑, 湖泊属于非流动水体, 其底质基本上具有同一性, 底栖动物的生境倾向性单一, 而溪流或海洋生境等异质性较高, 底栖动物的生境倾向性相对多样化。在其它研究中<sup>[9,10,19]</sup> 普遍采用的 EPT 指数 (3 个对污染敏感的水生昆虫分类群蜉蝣目 Ephemeroptera、绩翅目 Plecoptera 和毛翅目 Trichoptera 的总数目) 也没有作为候选生物指数, 主要是由于采样中没有发现这 3 个类别, 这也说明太湖受到了普遍的污染胁迫。

### 3.2 清洁样点和污染点的区分

由于我国水体污染的普遍存在, 在相同生态区域内寻找真正的无污染样点几乎是不可能的, 因此本文对

清洁样点和污染点的区分只是相对的。在区分的方法上,通常有 3 种方法,即采用 Shannon-Wiener 物种多样性指数<sup>[5, 10]</sup>、Hilsenhoff 生物指数<sup>[13]</sup>和理化指标<sup>[19, 20]</sup>。其中采用理化指标划分比较准确,但所需的参考理化指标比较多,计算和分析比较相对复杂。Shannon-Wiener 物种多样性指数虽然计算比较简单,区分准确度不高,往往由于采样点面积的局限容易误判。而 Hilsenhoff 生物指数由于结合每个种类的耐污值,相对比较准确,而且计算也不复杂,因此本文根据已有的合适耐污值资料来计算 Hilsenhoff 生物指数,从而对清洁样点和污染样点进行区分。从所区分出的 15 个清洁样点来看,其中 9 个样点分布在东太湖区域,2 个样点分布在东部沿岸带,这与实际情况是基本相符的<sup>[15, 21]</sup>,具有较高的可信度。

### 3.3 底栖动物综合生物指数水质评价基准的准确性

比较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总磷、总氮、生化需氧量、化学需氧量和叶绿素 a 等(表 6)对太湖各湖区水质的评价结果,发现两者对太湖大部分区域的评价结果是一致的,这些区域主要包括西北部的西部沿岸带、竺山湖、梅梁湾和东南部的东部沿岸带、东太湖、南部沿岸带等 6 个区域。但两者对贡湖和湖心区的评价结果出现明显不符现象(表 5 和表 6),利用底栖动物综合生物指数对贡湖和湖心区的评价结果分别为良好和差,而利用主要水质指标的评价结果则分别为Ⅳ类水(较差)和Ⅲ类水(良),其原因可能与两者的取样点数目偏少和两者的取样点并不完全重叠有关,两种评价在贡湖和湖心区的取样点数目分别均只为 3 个和 4 个,相对偏少;本研究在贡湖的取样点主要位于岸线区的小河和望亭(S35、S36 和 S37),这些位点主要为出水区域,水质相对较好,所采集到的底栖生物主要是一些污染敏感种类如腹足类,王艳红等<sup>[22]</sup>报道的贡湖取样点在沙墩港、渔业村和大贡山,其中沙墩港和渔业村位点附近基本上为居民密集区,大贡山位点则靠近湖心区,水污染可能比较严重。本研究在湖心区的取样点中,有 3 个靠近污染比较严重的竺山湖和梅梁湾区域(图 1),而后者的取样点(焦山、乌龟山、平台山和 14 号标)则相对集中于湖心<sup>[22]</sup>。所以由于取样点的差异,两种评价的结果可能均没有反映贡湖和湖心区的实际整体水质状况。在竺山湖和东部沿岸带,虽然只有 2 个取样点,由于两种评价的取样点位置基本吻合,所以水质评价结果基本一致。胡志新等<sup>[15]</sup>采用湖泊生态系统健康的系统能、系统能结构、生态缓冲容量和湖泊营养状态指数的研究结果显示,2003 年太湖生态系统健康呈现由东南部湖区向西北部湖区递减的趋势,本研究所得到的全太湖水质评价结果也基本符合这种变化趋势。总体上来说,由于在筛选生物指数时选择的取样点数目比较充足,覆盖了全太湖的大部分区域,同时利用这种方法对全太湖的水质评价结果也与其他人的研究结果基本一致,因此,本研究所建立的底栖动物综合生物指数水质评价基准基本适于评价太湖不同区域的水质状况。但在利用底栖动物综合生物指数水质评价基准评价太湖各区域的水质时,合理布局取样点并保持足够的取样点数目是取得符合实际的太湖各区域水质评价结果的关键。

表 6 2004 年 4 月太湖主要水质参数统计结果<sup>[22, 23]</sup>

Table 6 The result of main water quality parameters of Taihu Lake in April of 2004

地理分区 Geographic region	总磷 TP (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	生化需氧量 BOD <sub>5</sub> (mg/L)	化学需氧量 COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	叶绿素 a Chl-a (μg/L)	水质级别 Level of water quality
西部沿岸带 <sup>①</sup>	0.09	4.40	2.74	6.65	26.10	Ⅲ
竺山湖 <sup>②</sup>	0.15	7.73	5.10	9.10	40.70	V
梅梁湾 <sup>③</sup>	0.17	11.2	6.10	11.7	60.25	V
贡湖 <sup>④</sup>	0.12	5.45	3.65	7.38	40.70	Ⅳ
东部沿岸带 <sup>⑤</sup>	0.07	3.22	2.36	5.79	20.50	Ⅲ
东太湖 <sup>⑥</sup>	0.08	1.32	1.91	5.05	13.30	Ⅲ
南部沿岸带 <sup>⑥</sup>	0.09	2.17	1.49	5.34	16.95	Ⅲ
湖心区 <sup>⑦</sup>	0.09	3.54	2.74	6.65	28.35	Ⅲ

① Western coastal area; ② Zhushanhu Lake; ③ Meiliang Bay; ④ Gonghu Lake; ⑤ Eastern coastal area; ⑥ Eastern Taihu Lake; ⑦ Southern coastal area; ⑧ Central lake area

#### 4 结语

基于太湖 60 个样点的底栖动物采样数据,结合文献资料选取 21 种候选生物指数并采用非参数统计检验法对其进行筛选,最终获得 7 个判别太湖水质的较为敏感的底栖动物生物指数,提出了一个由 4 级区分标准构成的综合生物指数,基本适于评价太湖不同区域的水质分异状况,应用该指数的水质判别结果显示太湖水质状况普遍较差。

#### References:

- [ 1 ] Wang B X, Yang L F. Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macroinvertebrates. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2001, 24(4): 107—111.
- [ 2 ] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*, 1994, 4(4): 768—785.
- [ 3 ] 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. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77: 311—333.
- [ 4 ] Weigel B M, Henne L J, Marti nez-Rivera L M. Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *Journal of the North American Benthological Society*, 2002, 21(4): 686—700.
- [ 5 ] Huang Y Y, Teng D X, Zhao Z X. Monitoring Jiyunhe estuary pollution by use of macro-invertebrate community and diversity index. *Sinozoologia*, 1982, 2: 133—146.
- [ 6 ] Ren S Z. Investigation on macroinvertebrate community and water quality in streams in Beijing area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, 11(1): 31—46.
- [ 7 ] Dai Y Z, Tang S Y, Zhang J B. The distribution of zoobenthos species and bioassessment of water quality in Dongting Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 277—282.
- [ 8 ] Wu H J, Cui B, Lu J, *et al.* A community structure of benthos and ecological assessment of water quality of shallow lakes in Wuhan. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 33(10): 96—98.
- [ 9 ] Wang B X, Lu S, Yang L F. A study on the selection of metrics in water quality bioassessment—A case study on small water bodies in Zijinshan Mountain Nanjing City. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2003, 26(4): 46—50.
- [ 10 ] Wang B X, Yang L F. Bioassessment of Qinhuai River using a river biological index. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2082—2091.
- [ 11 ] Wang B X, Yang L F. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2768—2775.
- [ 12 ] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1481—1490.
- [ 13 ] 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. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 279—284.
- [ 14 ] Chen L Q, Liu Y, Yang Z F, *et al.* Ecological succession and sustainable development in Taihu Lake. *Journal of Eastchina Normal University (Natural Science)*, 2003, (4): 99—106.
- [ 15 ] Hu Z X, Hu W P, Gu X H, *et al.* Assessment of ecosystem health in Lake Taihu. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(3): 256—262.
- [ 16 ] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994. 1—570.
- [ 17 ] Liu J K. *Advanced Hydrobiology*. Beijing: Science Press, 1999. 241—259.
- [ 18 ] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15: 185—211.
- [ 19 ] 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 Maryland streams. Report No. CBWP-MANTA-EA-98-3, Maryland Department of Natural Resources, Maryland. Annapolis, MD. 1998, 1—38.
- [ 20 ] Roth N E, Southerland M T, Chaillou J C, *et al.* Maryland biological stream survey: Ecological status of non-tidal streams in six basins sampled in 1995. Report No. CBWP-MANTA-EA-97-2. Maryland Department of Natural Resources, Annapolis, MD. , 1997. 1—39.
- [ 21 ] Shi J H. Status quo of environmental quality in east Taihu Lake. *Journal of Lake Science*, 1994, 6(2): 166—170.
- [ 22 ] Wang Y H, Zhang P, Deng Z D. Spatial distribution of water quality parameters in Spring in Taihu lake estimated by Kriging interpolation. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2006, 7(2): 175—180.



[23] [Http://www.tba.gov.cn/wqinform.asp](http://www.tba.gov.cn/wqinform.asp).

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [5] 黄玉瑶, 滕德兴, 赵忠宪. 应用大型无脊椎动物群落结构特征及其多样性指数监测蓟运河污染. 动物学集刊, 1982, 2: 133 ~ 146.
- [6] 任淑智. 北京地区河流中大型底栖无脊椎动物与水质关系的研究. 环境科学学报, 1991, 11(1): 31 ~ 46.
- [7] 戴友芝, 唐受印, 张建波. 洞庭湖底栖动物种类分布及水质生物评价. 生态学报, 2000, 20(2): 277 ~ 282.
- [8] 邬红娟, 崔博, 吕晋, 等. 武汉湖泊底栖动物群落结构及水质生态评价. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 96 ~ 98.
- [9] 王备新, 陆爽, 杨莲芳. 水质生物评价指数筛选——以南京紫金山地区小水体为例. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 46 ~ 50.
- [10] 王备新, 杨莲芳. 用河流生物指数评价秦淮河上游水质的研究. 生态学报, 2003, 23(10): 2082 ~ 2091.
- [11] 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. 生态学报, 2004, 24(12): 2768 ~ 2775.
- [12] 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. 2005, 生态学报, 25(6): 1481 ~ 1490.
- [13] 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.
- [14] 陈立侨, 刘影, 杨再福, 等. 太湖生态系统的演变与可持续发展. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, (4): 99 ~ 106.
- [15] 胡志新, 胡维平, 谷孝鸿, 等. 太湖湖泊生态系统健康评价. 湖泊科学, 2005, 17(3): 256 ~ 262.
- [17] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999. 241 ~ 259.
- [21] 石建华. 东太湖的环境质量现状调查评价. 湖泊科学, 1994, 6(2): 166 ~ 170.
- [22] 王艳红, 张平, 邓正栋. 太湖春季水质参数空间格局分布的克里格内插估计. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, 7(2): 175 ~ 180.