

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20160606001

李娣, 李旭文, 牛志春, 等. 江苏省不同营养状况湖泊底栖动物群落结构与多样性比较[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 163-172

Li D, Li X W, Niu Z C, et al. A comparative study on macrobenthic community structure and diversity in different trophic status lakes of Jiangsu Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(1): 163-172 (in Chinese)

江苏省不同营养状况湖泊底栖动物群落结构与多样性比较

李娣^{1,2}, 李旭文², 牛志春², 张军毅³, 徐东炯⁴, 李继影⁵, 陈明⁶, 陈志芳⁷, 曹毅⁸, 李朝⁹, 卜伟¹⁰, 于红霞^{1,*}

1. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046

2. 江苏省环境监测中心, 南京 210036

3. 无锡市环境监测中心站, 无锡 214000

4. 常州市环境监测中心, 常州 213001

5. 苏州市环境监测中心, 苏州 215004

6. 南京市环境监测中心站, 南京 210013

7. 扬州市环境监测中心站, 扬州 225007

8. 宿迁市环境监测中心站, 宿迁 223800

9. 徐州市环境监测中心站, 徐州 221006

10. 泰州市环境监测中心站, 泰州 225300

收稿日期: 2016-06-06 录用日期: 2016-08-30

摘要: 为了解江苏省湖泊底栖动物群落结构和多样性并研究其对水环境质量变化的响应, 于 2012 年春秋两季对江苏省 16 个湖泊 51 个采样点湖泊底栖动物群落结构与多样性以及湖泊综合营养状态指数进行调查, 分析水质指标与底栖动物指数间 Pearson 相关关系。结果表明, 江苏省 16 个湖泊营养状态指数范围为 35.5~66.4, 其中约 81.2% 的湖泊处于轻度-中度富营养状态, 表明水质从好到中度污染; 湖泊底栖动物优势种为寡毛类的霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*), 优势度为 13.0%; 香浓多样性指数(Shannon-Wiener diversity index)范围为 0.00~2.20, 级别范围由极贫乏到较丰富状态, 表明水质污染程度从重度到轻度污染。从全省尺度看, 水质评价结果与生物学(香浓多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Biotic Index (BI) 指数)评价结果存在一定差异。与历史数据相比, 江苏省湖泊底栖动物清洁敏感物种减少甚至消失, 总体群落结构趋于小型化。16 个湖泊水体总氮和总磷与底栖动物密度呈显著负相关, 而综合营养状态指数与底栖动物指数(香浓多样性指数、Pielou 均匀度指数和 BI 指数)间关系不显著。上述研究结果表明综合营养状态指数无法完全客观反映湖泊水生态环境健康状况, 因此需要综合水质、水文、水生生物、生境状况等因素发展新的评价指标体系。

关键词: 江苏省; 富营养化; 底栖动物; 多样性

文章编号: 1673-5897(2017)1-163-10 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

A Comparative Study on Macrobenthic Community Structure and Diversity in Different Trophic Status Lakes of Jiangsu Province

Li Di^{1,2}, Li Xuwen², Niu Zhichun², Zhang Junyi³, Xu Dongjiong⁴, Li Jiying⁵, Chen Ming⁶, Chen

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07502001-005); 江苏省太湖水环境综合治理科研课题(TH2014207)

作者简介: 李娣(1983-), 女, 高级工程师, 研究方向为环境科学、生态学, E-mail: springli1229@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: yuhx@nju.edu.cn

Zhifang⁷, Cao Yi⁸, Li Zhao⁹, Bu Wei¹⁰, Yu Hongxia^{1,*}

1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China

2. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China

3. Wuxi Environmental Monitoring Center, Wuxi 214000, China

4. Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou 213001, China

5. Suzhou Environmental Monitoring Center, Suzhou 215004, China

6. Nanjing Environmental Monitoring Center, Nanjing 210013, China

7. Yangzhou Environmental Monitoring Center, Yangzhou 225007, China

8. Suqian Environmental Monitoring Center, Suqian 223800, China

9. Xuzhou Environmental Monitoring Center, Xuzhou 221006, China

10. Taizhou Environmental Monitoring Center, Taizhou 225300, China

Received 6 June 2016 accepted 30 August 2016

Abstract: Lake eutrophication has resulted in loss of biodiversity and degradation of ecosystem function. To investigate the structure of the benthic macroinvertebrate community and explore their responses to changes of water quality, samples were collected at 51 sites in 16 lakes of Jiangsu Province in Spring and Autumn of 2012. The relationships between water environmental variables and benthic macroinvertebrate indicators were examined using Pearson correlation analysis. The results showed that STSI of the 16 lakes ranged from 35.5 to 66.4. 81.2% were nearly eutrophic or super-eutrophic. The benthic macroinvertebrate communities were dominated by *Limnodrilus hoffmeisteri* of oligochaetes with a dominance value of 13.0%. The Shannon diversity index ranged from 0.00 to 2.20, which suggested that the benthic macroinvertebrate community diversity in 16 lakes of Jiangsu Province was from quite deficient to rich status. Compared to historical data, sensitive taxa of macroinvertebrate communities decreased or even disappeared; the dominance of small size taxa increased greatly. Total density of benthic macroinvertebrate animals was significantly negatively correlated with total nitrogen and total phosphorus. However, no significant correlations were detected between trophic index and benthic macroinvertebrate indices. Our results suggested that synthesized trophic state index can't reflect the ecological health of benthic community. Therefore, a new evaluation system should be established according to water quality, hydrology, aquatic organisms, habitats and other factors in the future.

Keywords: Jiangsu Province; eutrophication; benthic macroinvertebrate community; diversity

湖泊作为水生态系统不可缺失的部分,具有储存净化水资源、为动物提供栖息场所、运输以及灌溉等重要服务功能^[1]。底栖动物是水生态系统重要的组成部分,参与物质循环和能量流动,迁移能力弱,其物种组成、群落结构与多样性在一定程度上可以指示生态环境质量^[2]。随着经济发展和人口的快速增长,底栖动物正面临巨大的环境压力,其生物多样性降低,最终引发水生态功能退化。因此,了解和掌握环境变化和底栖动物多样性改变之间的关系对环境管理和保护具有重要的意义。目前对底栖动物的研究主要集中在河流、海洋、河口^[3-6],很少关注湖泊^[7-8]。20 世纪中期国外已经发展了基于底栖动物的河流快速评价方法,我们仅从建国后才开始底栖

动物方面的研究,主要是形态分类学研究^[9]。

江苏省是我国经济最发达省份之一,湖泊富营养化程度日趋严重,水质恶化,生态功能严重退化,水生生物多样性下降^[10]。如太湖的主要功能为饮用水源、旅游和航运,而随着湖泊水体富营养化程度的加剧,太湖部分湖区原有的生态功能退化,已然成为蓝藻水华频发的重灾区,也是我国长期重点治理湖泊之一。洪泽湖起到防洪、灌溉等作用,然而随着淮河流域污染物的排放,洪泽湖营养化程度处于轻度富营养水平。石臼湖和溧湖已经从 1990 年代初的中营养水平发展为中度富营养化水平。云龙湖、莫愁湖、玄武湖和瘦西湖等城市湖泊,因城市污染的排放,湖泊底泥污染负荷高,水体质量恶化,生态功能

退化。因此,本研究调查江苏省 16 个湖泊 51 个点位底栖动物群落结构和水环境综合营养状况,分析底栖动物多样性指数与水环境参数间的关系,探索水环境压力对底栖动物群落的潜在影响,从而为水生生物多样性的保护、湖泊资源的合理利用与环境管理提供科学依据。

1 材料与方法 (Materials and method)

1.1 研究区域

选取江苏省 16 个湖泊(太湖 10 个、洪泽湖 9 个、高邮湖 2 个、石臼湖 1 个、溇湖 4 个、宝应湖 1 个、阳澄湖 7 个、邵伯湖 1 个、长荡湖 1 个、固城湖 1 个、溱湖 5 个、金牛湖 1 个、云龙湖 4 个、玄武湖 4 个、莫愁湖 1 个和瘦西湖 1 个),共 51 个采样点位,进行底栖动物样品和水质样品的采集与分析(图 1)。江苏省 16 个湖泊总面积为 6 100.96 km²,占江苏省湖泊总面积的 89.0%。其中太湖为我国第三大湖,江苏省第一大湖,其水域面积为 2 338 km²,洪泽湖为我国第四大湖,江苏省第二大湖,其总面积为 2 069 km²,高邮湖为我国第六大湖,江苏省第三大湖,面积为 780 km²,石臼湖面积约为 208 km²,溇湖

面积为 164 km²,宝应湖面积为 140 km²,阳澄湖面积为 120 km²,邵伯湖面积为 98 km²,长荡湖面积为 85 km²,固城湖面积为 39 km²,溱湖面积为 26 km²,金牛湖面积为 23.5 km²,云龙湖面积为 5.8 km²,玄武湖面积为 3.78 km²,莫愁湖面积为 0.58 km²,瘦西湖面积为 0.3 km²。

1.2 样品采集

1.2.1 水质样品

分别于 2012 年春季和秋季进行样品采集,用玻璃瓶采集表层水下 0.5 m 深处的水质样品。根据《水和废水监测分析方法》第四版^[1],将水温(WT)、pH 和溶解氧(DO)用 YSI(型号:6600V2,美国)现场分析,透明度用塞氏盘(型号:SD20,国产)进行现场分析。另外,用于高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)和叶绿素 a(Chl a)测定的水质样品分别用采样瓶采集,并在 0~4 °C 保存,12 h 内带回实验室分析。

1.2.2 底栖动物群落样品

水质样品采集后,用采样面积为 1/16 m² 的 Peterson 采泥器进行底栖动物群落样品的采集;每个采样点每次采集 3 个平行样;每次抓得的样品都要现场用 40 目尼龙筛进行仔细地清洗和筛分,并将

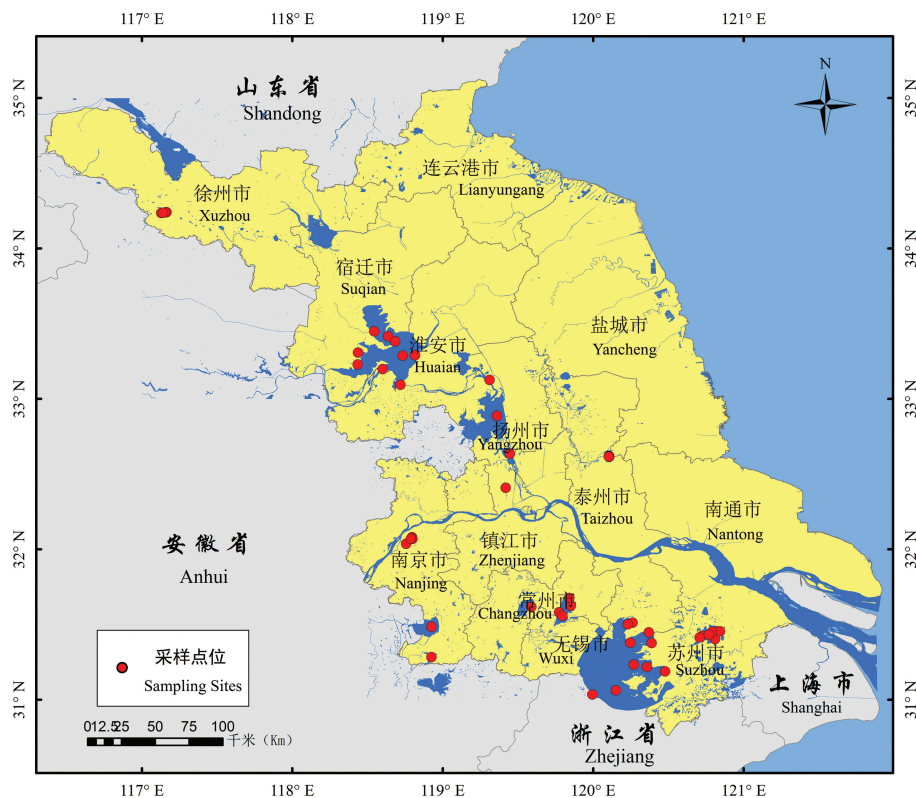


图 1 江苏省 16 个湖泊底栖动物采样点位

Fig. 1 Distributions of sampling sites across sixteen lakes in Jiangsu Province

用 70% 的酒精保存剩余物,带回实验室^[11]。

1.3 分析程序

1.3.1 环境变量

WT、pH、DO 和透明度进行现场测定并记录, COD_{Mn} 采用高锰酸盐指数法测定 (GB 11892—1989), TP 的分析方法采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893—1989), TN 分析方法采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894—1989), Chl *a* 比色法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)(2002 年)。湖泊水质综合营养状态指数 (synthesized trophic state index, STSI) 用透明度、COD_{Mn}、TP、TN 和 Chl *a* 通过方程(1)进行计算^[12]。

$$STSI = TSI(\text{ed} \sum_{j=1}^m W_j \times TSI_j) \quad (1)$$

水质和综合营养状态指数 (STSI) 间的关系见表 1。

1.3.2 底栖动物群落

底栖动物样品在实验室内仔细清洗,然后置于白色解剖盘中挑选出底栖动物样本。软体动物肉眼观察,寡毛类与摇蚊类制片用显微镜放大到 400 倍观察,其他类物种用解剖镜观察,所有物种均鉴定至尽可能低的分类单元^[13-15],并计数,用以计算每个底栖动物样品的群落密度、优势种优势度、物种数(S),并用 PRIMER 6.1.10 计算底栖动物指数:香浓多样性指数 (Shannon-Wiener index) H' 和 Pielou 均匀度指数 (J)^[16-17],根据物种分类单元的耐污值计算 BI (Biotic Index) 指数^[18]。底栖动物学水质评价标准如表 2、表 3 和表 4 所示。

1.4 数据处理

用 K-S 检验判定数据的统计学意义, $P < 0.05$ 表示数据统计学上具有显著意义。用 Pearson 相关性分析环境变量与底栖动物指数间关系^[19-21]。这些分析均在 SPSS 19.0 软件 (Chicago, Illinois, America) 中进行。

2 结果 (Results)

2.1 底栖动物群落

江苏省 16 个湖泊 51 个采样点共采集到 86 种底栖动物物种 (表 5), 主要包括软体动物 23 种、水生昆虫 32 种 (摇蚊类 29 种, 其他类 3 种)、寡毛类 21 种、多毛类 3 种、蛭类 3 种和甲壳动物 4 种, 底栖动物平均密度为 $590 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$, 优势种为体积较小的寡毛类的霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*), 优势度为 13.0%。

表 1 湖泊水质与综合营养状态指数间关系

Table 1 Synthesized trophic state index (STSI), trophic state, and lake water quality

STSI	营养状态 Trophic state	水质 Water quality
0 < STSI ≤ 30	贫营养 Oligotrophication	非常好 Excellent
30 < STSI ≤ 50	中营养 Mesotrophication	好 Good
50 < STSI ≤ 60	轻度富营养 Eutrophication	轻度污染 Polluted
60 < STSI ≤ 70	中度富营养 Supereutrophication	中度污染 Super polluted
70 < STSI ≤ 100	重度富营养 Hypereutrophication	重度污染 Hyper polluted

表 2 香浓多样性指数分级评价标准

Table 2 Grading criteria of Shannon-Wiener index

Shannon-Wiener (H')	多样性评价级别 Grading criteria	水质 Water quality
$H' > 3$	丰富 Abundant	清洁 Good
$2 < H' \leq 3$	较丰富 Good	轻度污染 Polluted
$1 < H' \leq 2$	一般 Medium	中度污染 Super polluted
$0 < H' \leq 1$	贫乏 Poor	重度污染 Hyper polluted
$H' = 0$	极贫乏 Extremely poor	重度污染 Hyper polluted

表 3 Pielou 均匀度指数分级评价标准

Table 3 Grading criteria of Pielou evenness index

Pielou evenness index (J)	多样性评价级别 Grading criteria	水质 Water quality
$J > 0.8$	均匀 Evenness	清洁 Good
$0.5 < J \leq 0.8$	较均匀 Good	轻度污染 Polluted
$0.3 < J \leq 0.5$	一般 Medium	中度污染 Super polluted
$J \leq 0.3$	差 Poor	重度污染 Hyper polluted

表 4 生物指数 (BI 指数) 分级评价标准

Table 4 Grading criteria of Biotic Index (BI)

Biotic Index (BI)	湖泊水质 Water quality of lakes
< 5.4	极清洁 Excellent
5.4 < BI ≤ 6.4	清洁 Good
6.4 < BI ≤ 7.5	中等 Medium
7.5 < BI ≤ 8.5	一般 Fair
> 8.5	差 Bad

表 5 江苏省 16 个湖泊底栖动物名录 (出现率为物种出现次数/总观测次数)
Table 5 Directories of benthic macroinvertebrates of sixteen lakes in Jiangsu Province
(Occurrence/% : occurrence of taxa/ observation frequency)

物种 Taxa	出现率/% Occurrence/%	物种 Taxa	出现率/% Occurrence/%
甲壳类(Crustacea)		三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i>	
米虾属某种	<i>Caridina</i> sp. 3	闪蛰	<i>Corbicula nitens</i> 1
短腕白虾	<i>Palaemon annandalei</i> 2	具角无齿蚌	<i>Anodonta angula</i> 2
钩虾属某种	<i>Gammarus</i> sp. 6	铜锈环棱螺	<i>Bellamyia aeruginosa</i> 34
栉水虱属某种	<i>Asellus</i> sp. 1	圆顶珠蚌	<i>Unio douglasiae</i> 2
蛭类(Hirudinea)		中华淡水蛭	<i>Novaculina chinensis</i> 6
医蛭	<i>Hirudo</i> sp. 1	中华圆田螺	<i>Cipangopaludine cathayensis</i> 9
泽蛭属某种	<i>Helobdella</i> sp. 3	梨型环棱螺	<i>Bellamyia parificata</i> 20
宽体金线蛭	<i>Whitmania pigra</i> 1	中国圆田螺	<i>Cipangopaludine chinensis</i> 14
多毛类(Polychaeta)		长角涵螺	<i>Alocinma longicornis</i> 3
日本沙蚕	<i>Nereis japonica</i> 1	白旋螺	<i>Cyraulius albus</i> Hutto 2
齿吻沙蚕属某种	<i>Nephtys</i> sp. 6	椭圆背角无齿蚌	<i>Anodonta woodiana elliptica</i> 1
多毛纲某种	<i>Polychaeta</i> sp. 4	摇蚊类(Chironomidae)	
寡毛类(Oligochaeta)		前突摇蚊属某种	<i>Procladius</i> sp. 11
中华颤蚓	<i>Tubifex sinicus</i> 1	强壮二叉摇蚊	<i>Dicrotendipes nervosus</i> 1
中华河蚓	<i>Rhyacodrilus sinicus</i> 8	绒铗长足摇蚊	<i>Tanypus vilipennis</i> 8
霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> 64	软铗小摇蚊	<i>Microchironomus tener</i> 1
夹杂带丝蚓	<i>Lumbriculus variegatum</i> 3	弯铗摇蚊属某种	<i>Cryptotendipes</i> sp. 4
巨毛水丝蚓	<i>Limnodrilus grandisetosus</i> 11	小摇蚊属某种 1	<i>Microchironomus</i> sp1. 4
克拉泊水丝蚓	<i>Limnodrilus claparedianus</i> 30	小摇蚊属某种 2	<i>Microchironomus</i> sp2. 3
奥特开水丝蚓	<i>Lumbriculus udekemianus</i> 9	小摇蚊属某种 3	<i>Microchironomus</i> sp3. 4
豹行仙女虫	<i>Nais pardalis</i> 2	花纹前突摇蚊	<i>Procladius choreus</i> 6
参差仙女虫	<i>Nais variabilis</i> 2	红裸须摇蚊	<i>Propillocerus akamusi</i> 5
颤蚓属某种 1	<i>Tubifex</i> sp1. 2	摇蚊属某种 1	<i>Chironomus</i> sp1. 5
颤蚓属某种 2	<i>Tubifex</i> sp2. 1	摇蚊属某种 2	<i>Chironomus</i> sp2. 1
水丝蚓属某种	<i>Limnodrilus</i> sp. 21	隐摇蚊属某种	<i>Cryptochironomus</i> sp. 7
苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i> 67	羽摇蚊	<i>Tendipes plumosus</i> 7
透清毛腹虫	<i>Chaetogaster diaphanus</i> 2	长跗摇蚊属某种	<i>Tanytarsus</i> sp. 1
淡水单孔蚓	<i>Monopylephorus limosus</i> 4	长足摇蚊属某种	<i>Tanypus</i> sp. 13
钝缘尾盘虫	<i>Dero obtuse</i> 1	多巴小摇蚊	<i>Microchironomus tabarui</i> 1
螺旋虫属某种	<i>Spirorbis</i> sp. 2	中国长足摇蚊	<i>Tanypus chinensis</i> 1
多毛管水蚓	<i>Aulodrilus pluriseta</i> 2	多足摇蚊属某种	<i>Polypedilum</i> sp. 1
管水蚓属某种	<i>Aulodrilus</i> sp. 1	福氏弯铗摇蚊	<i>Cryptotendipes fridmanae</i> 1
皮氏管水蚓	<i>Aulodrilus pigueti</i> 1	苍白摇蚊	<i>Chironomus pallidivittatus</i> 1
指鳃尾盘虫	<i>Dero digitata</i> 5	刺铗长足摇蚊	<i>Tanypus punctipennis</i> 14
软体动物(Mollusca)		粗腹摇蚊属某种	<i>Pelopia</i> sp. 8
方格短沟蜷	<i>Sernisulcospira cancellata</i> 13	大粗腹摇蚊属某种	<i>Macropelopia</i> sp. 5
方形环棱螺	<i>Bellamyia quadrmia</i> 7	菱跗摇蚊属某种	<i>Clinotanypus</i> sp. 1
背角无齿蚌	<i>Anodonta woodiana</i> 1	罗甘小突摇蚊	<i>Micropsetra logana</i> 7
背瘤丽蚌	<i>Lamprotula leai</i> 1	裸须摇蚊属某种	<i>Propillocerus</i> sp. 2
河蚬	<i>Corbicula fluminea</i> 29	德永雕翅摇蚊	<i>Glyptotendipes tokunagai</i> 1
黑龙江短沟蜷	<i>Sernisulcospira amurensis</i> 2	雕翅摇蚊属某种	<i>Glyptotendipes</i> sp. 4
湖沼股蛤	<i>Limnoperna lacustris</i> 14	其他类(Others)	
扭蚌	<i>Arconaia lanceolata</i> 1	螺属某种	<i>Ceratopogonidae</i> sp. 1
萝卜螺属某种	<i>Radix</i> sp. 2	箭蛭属某种	<i>Gomphus</i> sp. 2
螺狮	<i>Margarya melanioides</i> 9	水蛭属某种	<i>Nymphulinae</i> sp. 1
刻纹蚬	<i>Corbicula largillierti</i> 15	/	/

江苏省 16 个调查湖泊底栖动物群落香浓多样性指数均值如表 6 所示。根据香浓多样性指数水质评价级别标准(表 2),太湖、溇湖、宝应湖、金牛湖和瘦西湖等 5 个湖泊底栖动物多样性处于贫乏状态,水质重度污染,其余 11 个湖泊底栖动物多样性处于一般状态,水质中度污染。根据 Pielou 均匀度指数水质评价级别标准(表 3),洪泽湖、高邮湖、石臼湖、阳澄湖、云龙湖和莫愁湖等 6 个湖泊均匀度处于均匀状态,水质清洁,其他 10 个湖泊处于较均匀状态,水质轻度污染。根据 BI 指数水质评价级别标准(表

4),洪泽湖、高邮湖、宝应湖、邵伯湖、长荡湖、固城湖、溱湖、玄武湖和瘦西湖共 9 个湖泊水质中等,太湖、石臼湖、阳澄湖、金牛湖、云龙湖共 5 个湖泊水质一般,溇湖和莫愁湖 2 个湖泊水质差。

2.2 环境变量

本研究中,江苏省 16 个湖泊综合营养状态指数分布情况见表 6。52 个采样点中湖泊综合营养状态指数最高值为 66.4,位于莫愁湖湖心测点;最低值为 34.9,位于金牛湖湖心。根据湖泊综合营养状态指数分级标准,阳澄湖、固城湖和金牛湖等 3 个湖泊综

表 6 江苏省湖泊底栖动物群落指数与营养化指数结果表

Table 6 Macrobenthic indicators and synthesized trophic state index (STSI) of the lakes in Jiangsu Province

序号 No.	湖泊名称 Lake	香浓多样性指数 Shannon-Wiener index H'	Pielou 均匀度指数 J	生物指数 BI	综合营养化指数 STSI
1	太湖 Taihu Lake	0.96(0.00~1.52)	0.78(0.00~0.98)	8.2(6.6~10)	51.3(35.7~63.9)
2	洪泽湖 Hongze Lake	1.70(1.40~2.20)	0.89(0.77~0.98)	6.3(5.6~7.4)	59.5(55.8~62.6)
3	高邮湖 Gaoyou Lake	1.08(0.95~1.20)	0.93(0.86~1.00)	6.6(6.4~6.9)	55.8(49.6~61.5)
4	石臼湖 Shijiu Lake	1.21(1.15~1.28)	0.88(0.83~0.92)	7.5(6.2~8.8)	51.0(50.2~51.8)
5	溇湖 Hegu Lake	0.98(0.67~1.28)	0.68(0.10~0.96)	8.5(6.5~9.5)	60.4(56.6~63.0)
6	宝应湖 Baoying Lake	0.99(0.85~1.14)	0.62(0.61~0.63)	6.6(6.6~6.7)	50.9(45.5~56.4)
7	阳澄湖 Yangcheng Lake	1.22(0.00~1.90)	0.81(0.00~1.00)	7.9(5.5~9.5)	48.0(41.2~53.0)
8	邵伯湖 Shaobo Lake	0.77(0.71~0.83)	6.8(6.8~6.8)	55.4(50.5~60.2)	
9	长荡湖 Changdang Lake	1.51(1.20~1.82)	0.72(0.61~0.83)	7.2(6.6~7.8)	52.2(48.9~55.5)
10	固城湖 Gucheng Lake	1.42(1.37~1.47)	0.76(0.75~0.76)	7.2(6.8~7.5)	46.8(45.3~48.3)
11	溱湖 Qinhu Lake	1.26(0.75~1.67)	0.66(0.46~0.75)	7.4(5.1~8.4)	57.3(54.1~61.9)
12	金牛湖 Jinniu Lake	0.98(0.87~1.08)	0.66(0.54~0.78)	7.9(7.2~8.7)	37.0(35.5~38.4)
13	云龙湖 Yunlong Lake	1.92(1.61~2.11)	0.86(0.73~0.94)	8.1(6.8~9.3)	53.7(51.1~56.6)
14	玄武湖 Xuanwu Lake	1.60(1.26~2.05)	0.71(0.57~0.89)	6.9(5.9~7.9)	53.1(47.1~56.5)
15	莫愁湖 Mochou Lake	1.84(1.48~2.20)	0.82(0.67~0.96)	8.5(8.1~8.9)	61.4(56.5~66.4)
16	瘦西湖 Shouxi Lake	0.56(0.50~0.63)	0.68(0.46~0.91)	6.5(6.3~6.8)	61.5(61.4~61.5)

表 7 江苏省湖泊底栖动物指数与环境变量 Pearson 相关关系 ($n=102$)

Table 7 Pearson correlation coefficients ($n=102$) between macrobenthic indicators and environmental variables of the lakes in Jiangsu Province

	密度 Density	物种数(S) Species (S)	香浓多样性指数 H'	Pielou 均匀度指数 J	生物指数 BI
水温 Water temperature	-0.086	0.075	0.101	0.092	0.087
pH	0.188	0.154	0.222	0.122	0.063
溶解氧 Dissolved oxygen	0.020	-0.106	0.101	0.223*	-0.078
透明度 Transparency	-0.109	-0.169	-0.134	0.000	0.169
叶绿素 a Chl a	0.113	0.063	-0.066	-0.068	0.067
高锰酸盐指数 COD _{Mn}	0.072	0.094	0.167	0.167	-0.158
总磷 TP	-0.234*	-0.072	-0.022	0.064	-0.250
总氮 TN	-0.247*	-0.106	-0.112	-0.013	0.037
综合营养化指数 STSI	-0.052	0.109	0.090	0.073	-0.190

注: * 为 $P<0.05$, 即呈显著相关。

Note: * $P<0.05$ was used as the threshold for statistical significance.

合营养化状态处于中营养,水质好;太湖、洪泽湖、高邮湖、宝应湖、邵伯湖、长荡湖、溱湖、云龙湖和玄武湖等10个湖泊处于轻度富营养,水质轻度污染;溧湖、莫愁湖和瘦西湖等3个湖泊综合营养化状态处于中度富营养水平,水质中度污染。

2.3 环境变量与底栖动物指数间关系

江苏省16个湖泊环境变量与底栖动物多样性指数以及BI指数间相关关系如表7所示。

3 讨论 (Discussion)

江苏省湖泊底栖动物群落结构与多样性均发生了巨大的变化,底栖动物体积较大的软体动物在减少,体积较小的寡毛类在增加。1950年代,中国科学院动物研究所对太湖五里湖水生生物进行了3年的研究,发现五里湖底栖动物物种多样性非常丰富^[22],那时沉水植物几乎满布太湖湖底^[23],太湖河蚬较为丰富,依赖水草生存的甲壳动物钩虾较为密集^[24]。1960年代,研究者发现太湖水质整体处于贫营养水质,总无机氮浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25]。朱松泉等^[26]报道了1987年—1990年洪泽湖共发现底栖动物物种75种,其中体积较大的底栖动物软体动物25属共43种,节肢动物25属25种,环节动物3纲共7种。1970年代,研究发现洪泽湖水生植被丰富^[27],那时洪泽湖水体中氨氮浓度均值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,无机氮浓度均值为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28]。1991年—1994年,溧湖共发现底栖动物47种,软体动物在底栖动物群落中占明显的优势,体积较大的瓣鳃类种类和数量都较多,水生植被丰富,适于在水草中生活的蜉蝣、蜻蜓、龙虱等水生昆虫容易被发现^[29],当时溧湖水质营养化处于中营养水平^[30]。本研究综合营养状态指数均高于早期研究者观测值(表5)、底栖动物优势种为寡毛类体积与早期软体动物类相比较小,这表明环境污染导致湖泊富营养化,从而导致水生生物群落结构的小型化以及多样性的下降,这与杨桂山等^[31]研究结论一致。

尽管如此,本研究中湖泊综合营养状态指数与底栖动物多样性指数和BI指数间无显著相关关系(表5),水质营养状况评价结果与底栖动物指数评价结果存在一定的差异。湖泊水生生物的生境条件(水生植被、水文条件等)的改变一定程度上对水生生物群落结构与多样性产生较大的影响。秦伯强等^[32]研究证实湖泊营养化更多的是生物学或者生态学上的概念,单纯地用湖泊营养化程度无法完全真实地反映湖泊实际生态环境状况。本研究中,瘦西

湖营养状态指数最高,为61.5,底栖动物香浓多样性指数最低,处于重污染;溧湖营养化指数60.4,底栖动物香浓多样性指数小于1,处于重污染。研究湖北4个不同营养水平湖泊中大型底栖动物群落结构发现,底栖动物物种多样性与湖泊营养化程度呈负相关^[33],蔡永久等^[34]也发现了长江中下游地区10个湖泊营养化状态指数与底栖动物Pielou均匀度指数呈显著负相关。然而本研究发现莫愁湖综合营养状态指数最高61.4,底栖动物香浓多样性指数也较高,为1.84,莫愁湖大面积生长着水生植物,如挺水植物和湿生植物^[35]。通常,水生植被能够为底栖动物群落提供较为丰富的生境来生存繁衍,同时附着在水生植被上的底栖植物对底栖动物群落和鱼类也有一定保护作用^[36]。洪泽湖营养化指数59.5,底栖动物多样性较高,仅次于莫愁湖,洪泽湖也没有出现大规模蓝藻水华暴发现象。这可能是因为洪泽湖的水力停留时间较短,只有35 d,主导风向与水流流向一致。另外,水力停留时间较长的成子湖湖区有大量的水草生长,对蓝藻水华具有一定的抑制作用^[37]。李大命等^[38]对洪泽湖野生河蚬(*Corbicula fluminea*)线粒体CO I基因序列的遗传多样性进行评价,发现洪泽湖河蚬(*C. fluminea*)种群具有较高的遗传多样性水平。这一定程度上说明水体富营养化对洪泽湖优势种群河蚬(*C. fluminea*)的影响较小。金牛湖湖泊综合营养化水平最低,处于中营养,水质好,但底栖动物多样性低,处于贫乏状态。金牛湖湖水最深,最深处有20 m,采样点水深7 m左右,不利于底栖动物群落的生长^[39-40]。太湖营养化指数51.3,底栖动物多样性指数小于1,这可能与太湖大部分湖区生境条件差有密切关系。研究者发现目前太湖水生植被仅出现在东太湖和贡湖湾东南部区域,西部沿岸及其他湖区的水生植物已经大面积消亡^[41-42]。蔡永久等^[43]研究发现水生植被的消失,不利于底栖动物的生长。

一般认为,人口的增长和经济的发展使得湖泊富营养化程度加剧,造成蓝藻水华,水质恶化,导致水生生物多样性下降,群落结构趋于简单化,生态系统稳定性降低,最终导致湖泊生态系统功能退化^[32,44-45]。1950年代—1960年代,江苏省湖泊水生植被非常丰富,那时区域经济以农业和渔业为主,随着渔业发展,1970年代初太湖西部水生植被渐渐稀少^[22,46-47]。阮仁宗等^[48]利用多年遥感影像数据,围垦养殖也是导致洪泽湖西岸临淮镇附近湖泊变化的主

要原因之一。1990 年代初, 太湖水生植被丰富, 水草覆盖率可达 87.5%, 围网养殖很少^[29,49-50]。另外, 国外已有大量报道显示湖泊水体富营养化也会导致沉水植物的消亡^[51-52]。

江苏省 16 个湖泊营养化指数范围为 35.5 ~ 66.4, 其中大多处于轻度-中度富营养状态; 湖泊底栖动物群落香浓多样性指数范围为 0.00~2.20, 多样性评价级别处于极贫乏-较丰富状态。与历史数据相比, 江苏省湖泊底栖动物群落结构朝小型化方向发展。另外, 16 个湖泊综合营养状态指数与其底栖动物指数无直接关联, 影响湖泊底栖动物群落结构与多样性的因素众多, 如水生植被、水文条件等生境状况也是不容忽视的因素。湖泊综合营养状态指数无法完全反映湖泊水生态健康状况, 因此有必要构建江苏省湖泊水生态健康评价指标体系。

通讯作者简介: 于红霞(1963—), 女, 环境科学博士, 教授, 主要研究方向环境化学, 发表学术论文百余篇。

参考文献 (References) :

- [1] Johnson N, Revenga C, Echeverria J. Ecology. Managing water for people and nature [J]. Science, 2001, 292: 1071-1072
- [2] Harrel R C, Smith S T. Macrobenthic community structure before, during, and after implementation of the Clean Water Act in the Neches River estuary (Texas) [J]. Hydrobiologia, 2002, 474(1): 213-222
- [3] Pour F A, Shokri M R, Abtahi B. Visitor impact on rocky shore communities of Qeshm Island, the Persian Gulf, Iran [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 1859-1871
- [4] Veríssimo H, Neto J M, Teixeira H, et al. Ability of benthic indicators to assess ecological quality in estuaries following management [J]. Ecological Indicators, 2012, 19: 130-143
- [5] Mandal S, Harkantra S N. Changes in the soft-bottom macrobenthic diversity and community structure from the ports of Mumbai, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 653-672
- [6] Pereira P, Carvalho S, Pereoria F, et al. Environmental quality assessment combining sediment metal levels, biomarkers and macrobenthic communities: Application to the Óbidos coastal lagoon (Portugal) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184: 7141-7151
- [7] Faupel M, Ristau K, Traunsperger W. The functional response of a freshwater benthic community to cadmium pollution [J]. Environmental Pollution, 2012, 162: 104-109
- [8] 李利强, 王丑明, 张屹, 等. 洞庭湖大型底栖动物与表层沉积物重金属研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 286-291
Li L Q, Wang C M, Zhang Y, et al. Study of macrozoobenthos and heavy metals of surface sediment in Dongting Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 286-291 (in Chinese)
- [9] 沈嘉瑞. 云南两种端足类(甲壳动物)的研究报告[J]. 动物学报, 1954, 6(1): 15-22
- [10] 张利民, 夏明芳, 王春, 等. 江苏省 12 大湖泊水环境现状与污染控制建议[J]. 环境监测管理和技术, 2008, 20(2): 46-50
Zhang L M, Xia M F, Wang C, et al. Water environment status of the 12 largest lakes of Jiangsu Province and corresponding suggestions on the pollution control measures [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2008, 20(2): 46-50 (in Chinese)
- [11] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 104, 209, 710-715
- [12] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 234-244
- [13] 梁彦龄, 王洪铸. 环节动物门[M]// 尹文英等著. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 476-486
- [14] 陈德牛, 张国庆. 软体动物门[M]// 尹文英等著. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 487-501
- [15] 陈义. 中国动物图谱环节动物[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 19-22, 32-33, 48-49
- [16] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 117
- [17] Pielou E C. Shannon's formula as a measure of specific diversity: Its use and misuse [J]. The American Naturalist, 1996, 100: 463-465
- [18] 秦春燕. 长江三角洲淡水底栖动物耐污值修订和 BI 指数水质评价分级研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 47
Qin C Y. Quantitative tolerance values for common stream benthic macroinvertebrate in Yangtze River Delta, China and a study on water quality bioassessment using Biotic Index (BI)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 47 (in Chinese)
- [19] Pfeifer D, Baumer H P, Dekker D, et al. Statistical tools for monitoring benthic communities [J]. Senckenbergiana Maritima, 1998, 29: 63-76
- [20] Peeters E T H M, Gylstra R, Vos J H. Benthic macroinvertebrate community structure in relation to food and envi-

- ronmental variables [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 519: 103-115
- [21] Hosmani S P. Application of benthic diatom community in lake water quality monitoring [J]. *Online International Interdisciplinary Research Journal*, 2012, II: 21-34
- [22] 沈嘉瑞, 戴爱云. 江苏无锡五里湖的桡足类 I [J]. *动物学报*, 1962, 14(1): 99-118
- [23] 堵南山, 赖伟, 邓雪怀. 太湖枝角类季节变化的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1964, 6(2): 193-204
Du N S, Lai W, Deng X H. Preliminary studies on the seasonal variations of Cladocera in Lake Tai-Hu [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(2): 193-204 (in Chinese)
- [24] 郭杨. 五里湖调查工作报告[J]. *科学通报*, 1951, 10: 1103-1106
- [25] 张运林, 秦伯强. 太湖水体富营养化的演变及研究进展[J]. *上海环境科学*, 2001, 20(6): 263-265
Zhang Y L, Qin B Q. Study prospect and evolution of eutrophication in Lake Taihu [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001, 20(6): 263-265 (in Chinese)
- [26] 朱松泉, 窦鸿身. 洪泽湖水资源和水生生物资源[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993: 35-40
- [27] 许同和. 掌握大型湖泊中心渔场的几个重要因素[J]. *淡水渔业*, 1973(7): 1-2
- [28] 宋秋声. 洪泽湖水环境质量分析及污染控制[J]. *环境科学*, 1987, 8(1): 55-60
- [29] 余宁. 漏湖底栖动物生态分布及变动趋势的研究[C]//朱成德, 王玉纲, 余宁. 漏湖渔业高产模式及生态渔业研究论文集. 北京: 中国农业出版社, 1996: 149-155
- [30] 范成新. 漏湖水土界面氮磷物质交换及内源负荷量研究[C]// 湖泊渔业高产模式及生态渔业研究论文集. 北京: 中国农业出版社, 1996: 20-22
- [31] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799-810
Yang G S, Ma R H, Zhang L, et al. Lake status major problem and protection strategy in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 799-810 (in Chinese)
- [32] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. *科学通报*, 2013, 58(10): 855-864
- [33] 熊金林. 不同营养水平湖泊浮游生物和底栖动物群落多样性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 73-74
Xiong J L. Studies on community structure of plankton and zoobenthos in lakes of different trophic levels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 73-74 (in Chinese)
- [34] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 811-819
Cai Y J, Jiang J H, Zhang L, et al. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(6): 811-819 (in Chinese)
- [35] 陈元刚, 薛琼. 城市富营养化湖泊水生植物调查研究[J]. *科技资讯*, 2015, 14: 121-122
- [36] Tews J, Brose U, Grimm V, et al. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures [J]. *Journal of Biogeography*, 2004, 31: 79-92
- [37] 揣小明. 我国湖泊富营养化和营养物磷基准与控制标准研究[D]. 南京: 南京大学, 2011: 38-39
Chuai X M. Study on lake eutrophication as well as the criteria and control standard for phosphorus in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011: 38-39 (in Chinese)
- [38] 李大命, 张彤晴, 唐晟凯, 等. 洪泽湖野生河蚬(*Corbicula fluminea*)线粒体 CO I 基因序列的遗传多样性分析[J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(5): 81-86
Li D M, Zhang T Q, Tang S K, et al. Genetic diversity of wild *Corbicula fluminea* population in the Hongze Lake analyzed by mitochondrial DNA CO I gene sequence [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(5): 81-86 (in Chinese)
- [39] 查玉婷, 胡忠军, 刘其根, 等. 千岛湖大型底栖动物对营养盐和水深的响应[C]. 2010 年中国水产学会学术年会论文集, 西安: 中国水产学会, 2011
- [40] 张敬怀. 珠江口及邻近海域大型底栖动物多样性随盐度、水深的变化趋势[J]. *生物多样性*, 2014, 22(3): 302-310
Zhang J H. The variation of biodiversity of microbenthic fauna with salinity and water depth near the Pearl Estuary of the northern South China Sea [J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(3): 302-310 (in Chinese)
- [41] 李继影, 孙艳, 侍昊, 等. 太湖水草监管体系构建初步研究[J]. *环境监测与预警*, 2014(5): 54-56
Li J Y, Sun Y, Shi H, et al. Primary research on systems for controlling and monitoring Taihu aquatic plants [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2014(5): 54-56 (in Chinese)
- [42] 赵凯, 李振国, 魏宏农, 等. 太湖贡湖湾水生植被分布现状(2012 年)[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(3): 421-428
Zhao K, Li Z G, Wei H N, et al. The distribution of aquatic vegetation in Gonghu Bay, Lake Taihu, 2012 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(3): 421-428 (in Chinese)
- [43] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *生物多样性*, 2012, 18(1): 50-59
Cai Y J, Gong Z J, Qin B Q. Community structure and di-

- versity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China [J]. *Biodiversity Science*, 2012, 18(1): 50-59 (in Chinese)
- [44] 王浩, 郭重庆, 陈晓田, 等. 湖泊流域水环境污染治理的创新思路与关键对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 13
- [45] 周笑白, 张宁红, 张咏, 等. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 272-279
Zhou X B, Zhang N H, Zhang Y, et al. Preliminary study on the relationship between the water quality and the aquatic biological health status of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 272-279 (in Chinese)
- [46] 庞连顺. 南京及其郊区的蛭类[J]. *动物学杂志*, 1959(5): 220-223
- [47] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖综合调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 51-54
- [48] 阮仁宗, 夏双, 陈远, 等. 1979-2006 年洪泽湖西岸临淮镇附件湖泊变化研究[J]. *湿地科学*, 2012, 10(3): 344-349
Ruan R Z, Xia S, Chen Y, et al. Change of lake nearby Linhuai Town in west bank of Hongze Lake during 1979-2006 [J]. *Wetland Science*, 2012, 10(3): 344-349 (in Chinese)
- [49] 陶花, 潘继征, 沈耀良, 等. 溧湖沉水植物概况及退化原因分析[J]. *环境科技*, 2010, 23: 64-68
Tao H, Pan J Z, Shen Y L, et al. Overview and degradation reasons of submerged macrophytes of Gehu Lake [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23: 64-68 (in Chinese)
- [50] 李爱权, 宋晓兰. 溧湖富营养化进程及其综合整治对策研究[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38: 85-92
Li A Q, Song X L. Eutrophication status of Gehu Lake and comprehensive control countermeasures [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38: 85-92 (in Chinese)
- [51] Moss B. Further studies on the palaeolimnology and changes in phosphorus budget of Barton Broad, Norfolk [J]. *Freshwater Biology*, 1980, 10: 261-279
- [52] Sand-Jensen K, Riis T, Vestergaard O, et al. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the last 100 years [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88: 1030-1040 ◆