

长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性*

蔡永久^{1,2}, 姜加虎¹, 张路¹, 陈宇炜¹, 龚志军^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2007年10月至2008年4月,对长江中下游地区四种不同类型(草型、天然养殖、施肥养殖以及城市湖泊)的10个湖泊的大型底栖动物群落结构和多样性进行研究,并分析其与水体营养状态之间的关系. 研究表明,不同类型湖泊底栖动物的密度、生物量、多样性及特征种类均存在显著差异. 草型湖泊具有最高的生物量和多样性,但密度最低,其特征种类为腹足纲动物. 天然养殖湖泊生物量也较高,物种多样性处于中间水平,特征种类为河蚬、寡鳃齿吻沙蚕及苏氏尾鳃蚓. 施肥养殖湖泊和城市湖泊底栖动物密度较高,并呈现出最低的物种多样性,特征种类主要是耐污能力较强的颤蚓类和摇蚊科幼虫. 相关性分析表明湖泊营养状态指数与底栖动物密度呈显著正相关,而与生物量呈显著负相关,说明随着营养水平的增加,底栖动物群落逐渐被小个体的耐污种类所主导. Margalef丰富度指数及Pielou均匀度指数与营养状态指数亦呈显著负相关,反映目前长江中下游湖泊随营养水平增加底栖动物群落趋于简单化的演替趋势.

关键词: 长江中下游; 浅水湖泊; 底栖动物; 富营养化; 相似性分析

Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

CAI Yongjiu^{1,2}, JIANG Jiahui¹, ZHANG Lu¹, CHEN Yuwei¹ & GONG Zhijun¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Community structure and biodiversity of macrozoobenthos and their relationships with trophic state were investigated between November 2007 and April 2008 in 10 shallow lakes, including four types of macrophyte-dominated lakes, natural cultured lakes, artificial cultured lakes and urban lakes, in the middle and lower reaches of Yangtze River. Univariate and multivariate analysis showed that density, biomass, diversity and characteristic species differed significantly among the four type lakes. Macrophyte-dominated lakes had the highest biomass and biodiversity and the lowest density, and were characterized by gastropods. Natural cultured lakes are intermediate diverse communities and were characterized by *Corbicula fluminea*, *Nephtys oligobranchia* and *Branchiura sowerbyi*. Artificial cultured lakes and urban lakes presented the highest density and the lowest diversity and were dominated by pollution-tolerant species (e. g. tubificids and chironomids). Correlation analysis revealed that trophic state index (TSI) was correlated positively with the density, whereas associated inversely with biomass, which indicated that small-size pollution-tolerant species became more dominant with increasing of trophic state. Diversity indices of Margalef and Pielou showed significantly negative correlations with trophic state index, implying the simplification of macrozoobenthos communities with eutrophication in shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River.

Keywords: Middle and lower reaches of Yangtze River; shallow lakes; macrozoobenthos; eutrophication; analysis of similarity

大型底栖动物作为湖泊生态系统的重要组成部分,在多个方面起着重要的作用. 如改变沉积物的理化性质,促进营养元素的循环,担任食物网能量流动的重要组成部分^[1]. 另外由于底栖动物生活史较长,活动

* 科技部基础性工作专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”(2006FY110600)和国家自然科学基金项目(31070418)联合资助. 2010-05-31 收稿; 2010-09-20 收修改稿. 蔡永久,男,1985年生,博士研究生; E-mail: njcai1985@163.com.

** 通讯作者; E-mail: zjgong@niglas.ac.cn.

范围小,且对环境变化较为敏感,其种类组成和群落特征也常用于环境监测与评价^[2]. 近些年由于湖泊水环境的不断恶化,淡水动物多样性迅速降低,其灭绝速率可达陆地动物灭绝速率的5倍^[3],大型底栖动物作为其重要组成部分也受到了严重影响^[4].

长江中下游地区是我国淡水湖泊的主要分布区域,其占全国淡水湖泊总数的60%–70%,且绝大多数为浅水湖泊. 该地区是我国经济发展最快、人类活动最频繁的区域之一,因而也导致该区域湖泊水环境不断恶化,湖泊生态系统结构和功能不断退化,水生生物类群也受到严重影响^[5]. Fang等研究发现过去50年来长江中游地区湖泊水生植物、鸟类和鱼类多样性显著下降^[6]. 相对于其它水生生物类群而言,对该地区大型底栖动物群落结构及多样性的研究较少,且多为一个和少数几个湖泊. 如同云君等对比研究了草型和藻型两个湖泊大型底栖动物群落差异^[7],熊金林等研究了四个不同污染程度湖泊底栖动物群落结构^[8]. 本文依托“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”项目,选取该地区四种代表性湖泊——草型湖泊、天然养殖湖泊、施肥养殖湖泊和城市湖泊,比较研究不同类型湖泊底栖动物群落结构及多样性,并分析其与水体营养状态之间的关系,以期了解长江中下游地区典型湖泊底栖动物在人类活动影响下的群落结构特征和驱动因素,并为其合理利用及多样性保护提供科学依据.

表1 各研究湖泊物理参数

Tab. 1 Physical parameters of the studied lakes

| 湖泊 | 代码 | 省份 | 面积 (km ²) | 样点数 | 水深 (m)* |
|------|----|----|--------------------------|-----|------------|
| 洪湖 | HH | 湖北 | 344 | 3 | 1.0 |
| 赤湖 | CH | 江西 | 90 | 3 | 1.7 |
| 大冶湖 | DY | 湖北 | 69 | 3 | 0.9 |
| 军山湖 | JS | 江西 | 193 | 7 | 3.9 |
| 珠湖 | ZH | 江西 | 81 | 4 | 2.1 |
| 南北湖 | NB | 江西 | 25 | 3 | 3.7 |
| 陈家湖 | CJ | 江西 | 22 | 3 | 3.0 |
| 北民湖 | BM | 湖南 | 15 | 2 | 1.6 |
| 岳阳南湖 | YY | 湖南 | 12 | 2 | 5.3 |
| 武汉东湖 | WH | 湖北 | 34 | 3 | 3.5 |

* 水深为各采样点的平均水深.

1 研究方法

1.1 研究区域概况及采样点布设

本文共选取10个湖泊,代表该地区四种主要湖泊类型:草型湖泊(赤湖、大冶湖、洪湖)、天然养殖湖泊(珠湖、军山湖)、施肥养殖湖泊(南北湖、陈家湖、北民湖)及城市湖泊(岳阳南湖、武汉东湖). 这些湖泊均为典型浅水湖泊,其湖泊环境特征差异较大^[9]. 草型湖泊沉水植物丰富,水质较好,浮游植物生物量较低;天然养殖湖泊面积较大,且由于受流域来水影响,湖泊换水周期较短,其养殖方式为人放天养;施肥养殖湖泊面积较小,多由个体或公司经营,为追求产量在养殖过程投加肥料和饲料,水体营养状态较高;城市湖泊处于城市内部,长期受人类活动影响,湖泊换水周期长,水质较差. 根据湖泊面积大小,在各个湖泊敞水区分别布设2至7个采样点(表1). 样品采集时间为2007年10月和11月以及2008年4月.

1.2 大型底栖动物样品采集与鉴定

底栖动物定量采集用1/16m²改良彼得森采泥器,每个采样点采集1–2次. 采得泥样经60目尼龙筛洗净后,剩余物置于白磁盘中将底栖动物活体逐一挑出,样本用10%福尔马林溶液保存. 样品带回实验室鉴定至尽可能低的分类单元^[10–13],统计各个分类单元的数量,然后用滤纸吸去表面固定液,置于电子天平上称重,最终结果折算成单位面积的密度和生物量.

1.3 环境因子的测定

采集底栖动物样本时,同时现场测定环境指标并采集水化学分析水样. 透明度(SD)用赛氏盘测定,pH、水温、电导率及底层溶解氧(DO)于现场用YSI 6600 V2多参数水质监测仪测定. 采集水样冷冻保存带回实验室,氨氮(NH₄-N)、硝态氮(NO₃-N)、正磷酸盐磷(PO₄-P)用微量流动注射分析仪(Skalar-SA1000)测定,总悬浮颗粒物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl. a)及高锰酸盐指数(COD_m)的测定参考标准方法^[14]. 为评价不同类型湖泊营养状态,参照蔡庆华等^[15]提出的湖泊富营养化评价综合模型计算各点的营养状态指数(TSI),TSI计算公式为:

$$TSI = 0.540TSI(\text{Chl. a}) + 0.297TSI(\text{SD}) + 0.163TSI(\text{TP})$$

其中,TSI(Chl. a)、TSI(SD)、TSI(TP)按照Carlson提出的营养状态指数计算方法获得,计算公式分别为:

$$TSI(\text{Chl. a}) = 10 \times (6 - (2.04 - 0.68(\ln(\text{Chl. a}))) / \ln 2);$$

$$TSI(\text{SD}) = 10 \times (6 - \ln(\text{SD}) / \ln 2);$$

$$TSI(TP) = 10 \times (6 - \ln(48/TP)/\ln 2).$$

1.4 数据分析

运用常用的 Margalef、Shannon-Wiener 及 Pielou 多样性指数分析不同类型湖泊底栖动物多样性。由于不同类型湖泊样本量相差较大，且数据转换后仍不能满足方差分析的要求，故采用 Kruskal-Wallis 非参数检验比较各类型湖泊环境参数及底栖动物群落基本指标（密度、生物量及多样性）差异性，多重比较采用 Games-Howell 方法。运用 Pearson 相关分析检验底栖动物密度、生物量及多样性与水体营养状态指数之间的关系，相关分析时密度和生物量数据经过对数转换。

运用 Bray-Cutis 相似性指数分析不同类型湖泊底栖动物群落相似性，并利用相似性分析 (ANOSIM, Analysis of Similarities) 检验各类型湖泊底栖动物群落差异显著性，该分析给出一个统计量 R，其大小一般介于 0-1，值越大表明底栖动物群落差异越大，同时采用相似性百分比分析 (SIMPER, Similarity Percentages) 找出对各类型湖泊底栖动物特征种类，多元分析采用对数转换后的密度数据，分析软件用 PRIMER 5.0^[16]。

2 结果与分析

2.1 环境特征

表 2 为四种类型湖泊水体理化参数及营养状态评价，Kruskal-Wallis 非参数检验结果表明不同类型湖泊间各理化指标具有显著差异 (P < 0.003)。结合主成分分析 (PCA) 结果可以看出 (图 1)，城市湖泊和施肥养殖湖泊具有较高的营养水平 (如：Chl. a、TN、TP、TSS、PO₄-P)，而草型湖泊和天然养殖湖泊营养水平相对较低，且透明度和溶解氧较高。营养状态指数分析表明草型湖泊和天然养殖湖泊基本处于中-富营养水平，而城市湖泊和施肥养殖湖泊 TSI 指数值较高，已处于富营养或超富营养水平。

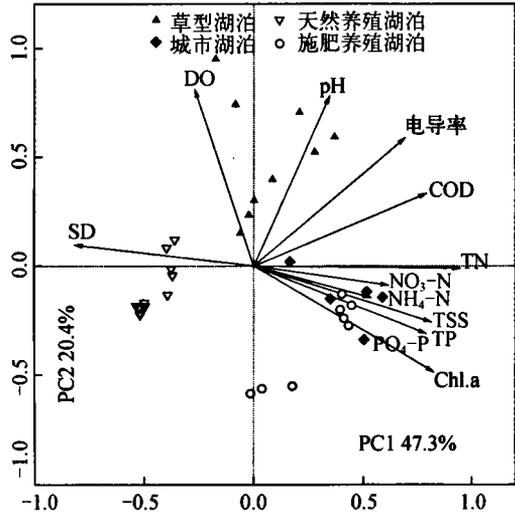


图 1 各研究湖泊理化因子主成分分析

Fig. 1 Principal components analysis of physicochemical parameters in the studied lakes

表 2 不同类型湖泊水体理化特征*

Tab. 2 Physicochemical characteristics of different type lakes

| 参数 | 草型湖泊 | 天然养殖湖泊 | 施肥养殖湖泊 | 城市湖泊 | P |
|--------------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| pH | 8.75(8.14-10.07) | 7.47(7.07-8.03) | 7.42(6.75-8.11) | 8.58(7.93-9.21) | <0.001 |
| 溶解氧(mg/L) | 10.2(7.49-15.18) | 8.3(8.05-8.73) | 7.46(6.64-8.45) | 6.99(5.69-7.52) | 0.001 |
| SD(m) | 0.93(0.35-1.8) | 1.51(1.2-2.0) | 0.36(0.25-0.5) | 0.58(0.35-0.9) | <0.001 |
| 电导率(μS/cm) | 377(214-705) | 72(61-90) | 166(78-243) | 330(317-352) | <0.001 |
| TSS(mg/L) | 10.52(2.2-23.5) | 3.36(1.6-5.4) | 36.27(28.8-50.4) | 11.3(6.0-15.5) | <0.001 |
| NO ₃ -N(mg/L) | 0.27(0-1.043) | 0.06(0-0.43) | 0.48(0.27-0.78) | 0.26(0.04-0.59) | 0.003 |
| NH ₄ -N(mg/L) | 0.09(0-0.21) | 0.04(0.03-0.09) | 0.12(0.04-0.3) | 0.32(0.13-0.57) | 0.002 |
| TN(mg/L) | 1.18(0.59-2.48) | 0.31(0.21-0.55) | 1.65(1.01-2.11) | 1.67(0.87-2.42) | <0.001 |
| PO ₄ -P(μg/L) | 5.79(1.13-19.95) | 1.5(0.80-2.80) | 14.12(3.07-25.87) | 51.37(6.62-80.21) | <0.001 |
| TP(μg/L) | 34.5(19.3-56.2) | 17.9(12.1-26.5) | 87.4(45.8-125.3) | 172.2(101.0-233.0) | <0.001 |
| COD _{Mn} (mg/L) | 5.36(3.96-6.67) | 2.8(2.26-3.61) | 4.9(3.28-6.39) | 5.85(5.00-7.17) | <0.001 |
| Chl. a(μg/L) | 5.77(1.76-12.72) | 2.9(2.06-4.39) | 45.47(30.19-57.23) | 31.07(6.08-50.31) | <0.001 |
| TSI | 52.6(46.4-59.5) | 45.6(43.3-48.4) | 69.9(67.2-72.4) | 65.34(57.2-70.0) | <0.001 |

*表中数值为各类型湖泊理化参数的平均值(范围)。

2.2 密度与生物量

在所调查湖泊敞水区共鉴定到底栖动物 31 种，其中寡毛类 5 种，软体动物双壳类 4 种，腹足类 9 种，摇蚊科幼虫 10 种，其他底栖动物 3 种，均为长江中下游湖泊习见种类。各湖泊底栖动物平均密度和生物量见表 3。

表 3 各湖泊底栖动物平均密度 (ind./m²) 和生物量 (g/m²) *
Tab. 3 Average density and biomass of macrozoobenthos in the studied lakes

| 底栖动物 | 洪湖 | 赤湖 | 大冶湖 | 军山湖 | 珠湖 | 南北湖 | 陈家湖 | 北民湖 | 岳阳南湖 | 武汉东湖 |
|--|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|------------|-----------|
| 寡毛类 | | | | | | | | | | |
| 霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Clapeède | 120/0.27 | 16/0.01 | 11/0.02 | 0/2.29 | 4/0.01 | 69/0.08 | | 140/0.34 | 7596/17.51 | 2315/5.58 |
| 巨毛水丝蚓 <i>L. grandisetosus</i> Nomura | | | | | | 117/0.11 | | 76/0.18 | | 11/0.02 |
| 苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i> Beddard | 90/1.78 | 16/0.17 | 27/0.23 | 32/0.47 | 12/0.1 | 29/0.28 | 80/2.42 | 272/4.05 | 428/9.74 | 21/1.47 |
| 中华河蚓 <i>Rhyacodrilus sinicus</i> (Chen) | | | 5/ <0.01 | | | 37/0.03 | | 184/0.18 | 972/0.47 | |
| 摇蚊幼虫 | | | | | | | | | | |
| 侧叶雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes lobiferus</i> (Say) | | | 5/0.02 | | | | | | | |
| 梯形多足摇蚊 <i>Polypedilum scabraenum</i> (Schränk) | | 11/0.01 | 5/ <0.01 | | | | | | | |
| 褐斑菱附摇蚊 <i>Clinotanypus sugiyamai</i> (Meigen) | 16/0.04 | | | 9/0.01 | 8/0.01 | 5/ <0.01 | 21/0.03 | 92/0.21 | 36/0.1 | 27/0.07 |
| 红裸须摇蚊 <i>Procladius akamusi</i> (Tokunaga) | 48/0.91 | | 384/4.93 | | | | 32/0.18 | 456/7.42 | 16/0.52 | 4155/61.1 |
| 花翅前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i> (Meigen) | | | | | 4/0.01 | 43/0.09 | 11/0.02 | 24/0.04 | 88/0.17 | 165/0.52 |
| 环足摇蚊属一种 <i>Cricotopus</i> sp. | 16/0.01 | | | | | | | | | |
| 小摇蚊属一种 <i>Microchironomus</i> sp. | | | 27/0.01 | | 4/ <0.01 | 115/0.13 | | 8/ <0.01 | 48/0.74 | 27/1.48 |
| 半折摇蚊群 <i>Chironomus semireductus</i> (Lenz) | 16/0.04 | | 117/0.38 | | | 61/0.15 | 1469/9.05 | | 280/3.95 | |
| 羽摇蚊群 <i>C. plumosus</i> (Lenz) | | | | | | | | | 292/2.61 | 112/0.44 |
| 中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i> Wang | | | | | | | | | | |
| 软体动物 | | | | | | | | | | |
| 河蚶 <i>Corbicula fluminea</i> (Müller) | | | | 126/114.8 | 48/128.6 | | 5/4.33 | | | 16/1.34 |
| 湖球蚶 <i>Sphaerium lacustre</i> (Müller) | | | | 2/0.65 | | | | | | |
| 淡水壳菜 <i>Limnoperna lacustris</i> (Martens) | | | | | | | | 8/31.39 | | |
| 剑状矛蚌 <i>Lanceolaria gladiola</i> (Heude) | | | | | | | | | | |
| 长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i> (Benson) | 160/16.61 | 27/2.65 | 272/40.47 | | | | | | | |
| 大肝圆扁螺 <i>Hipppeutis umbilicatis</i> (Benson) | 128/2.4 | 59/1.39 | | | | | | | | |
| 大沼螺 <i>Parafossarula eximius</i> (Frauenfeld) | | | | 2/2.7 | | | | | | |
| 耳河螺 <i>Rimularia auriculata</i> (Martens) | | | | 9/18.77 | | | | | | |
| 方格短沟鳃 <i>Semisulcospira cancellata</i> (Benson) | | | | | | | | 32/2.01 | | |
| 光滑洪口螺 <i>Stenothyra glabra</i> (A. Adams) | 32/36.47 | | | 4/0.03 | | | | | | |
| 铜锈环纹螺 <i>Bellamya aeruginosa</i> (Reeve) | 128/262.0 | 27/43.88 | 69/176.4 | 9/12.76 | | | | | | |
| 椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> (H. Adams) | 32/3.85 | 43/1.61 | | | | | | | | |
| 纹沼螺 <i>Parafossarula striatulus</i> (Benson) | 64/12 | 96/14.79 | 69/18.28 | | | | | | | |
| 其他 | | | | | | | | | | |
| 寡鬃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i> Southern | | | 5/0.02 | | | | | | | |
| 扁蛭科一种 <i>Glossiphoniidae</i> sp. | | | | | | | | | | |
| 印西头鳃虫 <i>Branchiodrilus hortensis</i> (Stephenson) | 16/0.02 | | | | | | | 8/0.07 | 252/0.87 | |
| 秀丽白虾 <i>Palaemon modestus</i> Heller | 16/0.82 | 5/0.18 | | | | | | | 96/0.14 | |

* 数值为各湖泊底栖动物密度和生物量的平均值 (密度/生物量)。

非参数检验结果表明不同类型湖泊底栖动物密度和生物量存在显著差异(图2, $P \leq 0.002$)。城市湖泊底栖动物密度显著高于其他三种类型湖泊,最高可达 14160 ind./m^2 ,而草型湖泊和天然养殖湖泊密度较低($112 - 1148 \text{ ind./m}^2$),施肥养殖湖泊底栖动物密度处于中等水平并显著高于草型和天然养殖湖泊。不同的是,生物量表现出相反的趋势,其高值出现在草型和天然养殖湖泊,并显著高于施肥养殖湖泊和城市湖泊(图2)。相关性分析结果表明营养状态指数与底栖动物密度呈显著正相关($r = 0.662, P < 0.001$),而与生物量呈显著负相关($r = -0.553, P = 0.001$)(图3)。

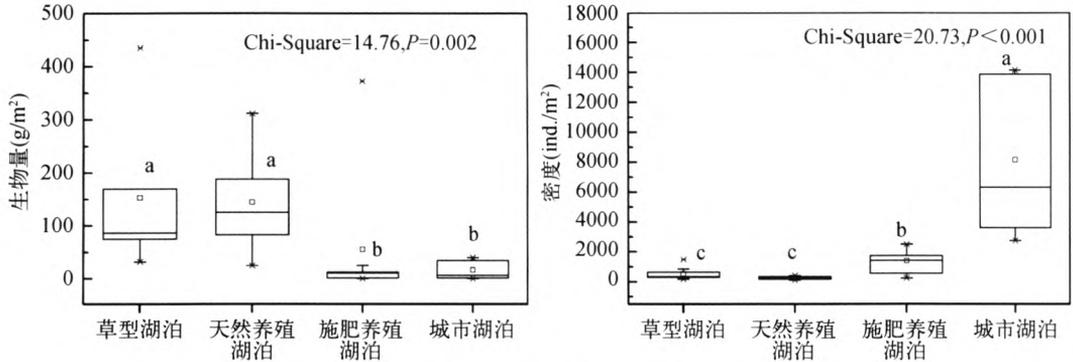


图2 不同类型湖泊大型底栖动物密度和生物量箱线

Fig. 2 Box-whisker plots of density and biomass of total macrozoobenthos in different type lakes

从不同类群底栖动物在总密度和总生物量所占比重可以看出,不同类型湖泊底栖动物优势类群存在较大差异(图4)。密度方面,草型湖泊主要优势种为腹足纲动物,天然养殖湖泊主要优势种为双壳类河蚌及其它类的寡鳃齿吻沙蚕,施肥养殖湖泊中摇蚊幼虫占据绝对优势。两个城市湖泊的优势类群呈现较大差异,武汉东湖主要以摇蚊幼虫为主,而在岳阳南湖被颤蚓类所主导。生物量方面,由于软体动物螺类和双壳类个体较大,其分别在草型湖泊和天然养殖湖泊占据绝对优势,而施肥养殖湖泊和城市湖泊生物量为摇蚊幼虫和颤蚓类所主导(图4)。

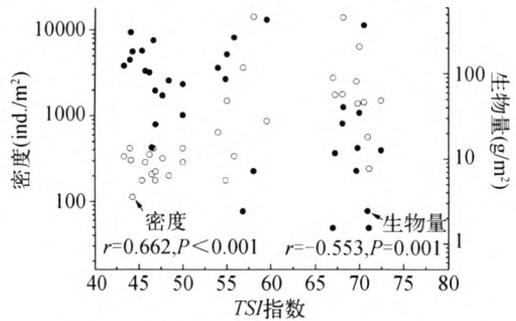


图3 底栖动物总密度和总生物量与营养状态指数相关性分析

Fig. 3 Relationships between trophic state index (TSI) and density and biomass of total macrozoobenthos

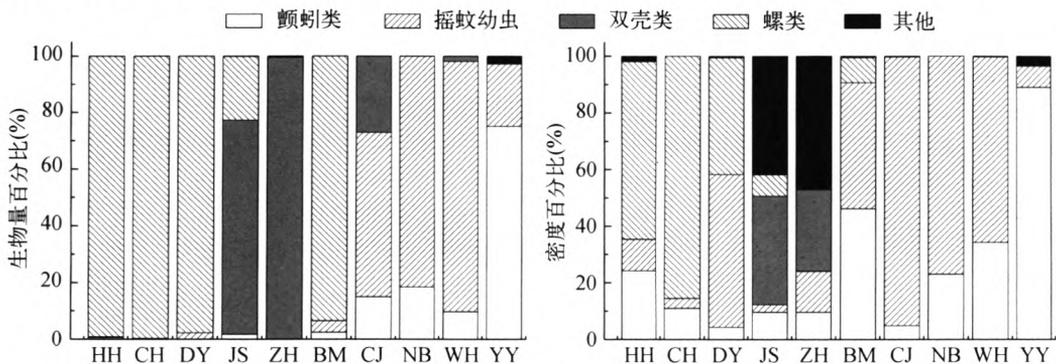


图4 四种常见类群大型底栖动物在总密度和总生物量中所占比重

Fig. 4 Relative abundance and biomass of the four common taxonomic groups in the 10 studied lakes

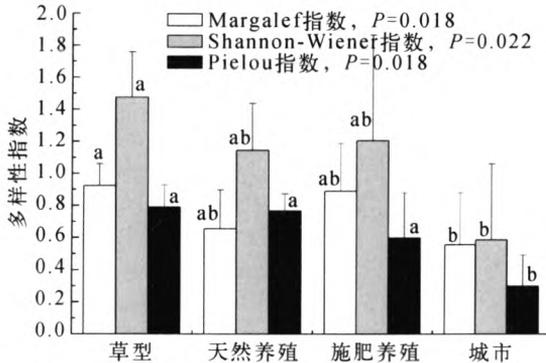


图5 不同类型湖泊底栖动物群落三种多样性指数

Fig. 5 Margalef, Shannon-Wiener and Pielou diversity indices of macrozoobenthic community in different type lakes

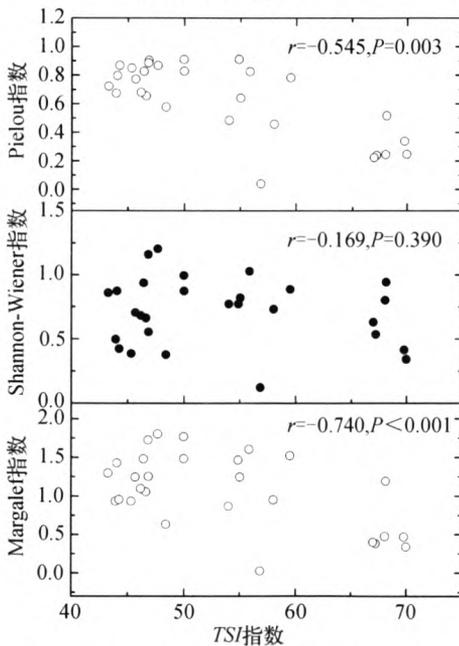


图6 三种底栖动物群落多样性指数与营养状态指数相关性分析(相关分析时去除了五个异常的采样点)

Fig. 6 Relationships between trophic state index (TSI) and Margalef, Shannon-Wiener and Pielou diversity indices

研究发现草型湖泊与其他类型湖泊底栖动物群落不相似性百分比较高,其特征种类主要为腹足纲动物,关于螺类与水生植物之间关系的研究较多,众多研究结果表明水生植物上生长的附着生物为螺类提供良好的食物资源,而水生植物本身由于营养质量较低很少被螺类摄食,同时螺类的牧食活动有效地去除了植物表面的附着生物覆盖层,从而更加有利于水生植物的生长^[17]. Thomas 综合前人及自己研究成果提出了螺-草互利理论(mutualistic theory)^[18],认为螺类、附生物及水生植物共同形成了一个互惠的子系统.本文中螺类在草型湖泊占据绝对优势,而在其他类型湖泊很少出现,进一步印证了螺-草的互惠关系.研究发现草型湖泊具有最高的多样性和均匀度,根据空间异质性理论^[19],环境异质性越高,其所具有的生物多样性就

2.3 底栖动物多样性

不同类型湖泊大型底栖动物群落 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数可以看出,三种多样性指数呈现出较为一致的变化趋势且在不同类型湖泊间具有显著差异(图5).总体而言,草型湖泊多样性最高,城市湖泊多样性最低,天然养殖和施肥养殖湖泊多样性处于中间水平,且二者间无显著差异(图5).相关分析表明 Margalef 丰富度指数及 Pielou 均匀度指数与营养状态指数呈显著负相关(图6).

2.4 不同类型湖泊底栖动物群落相似性分析

利用 Bray-Curtis 相似性指数计算各类型湖泊底栖动物群落相似性水平,结果表明不同类型湖泊底栖动物群落结构不相似性百分比较高(56.10% - 87.15%),多重比较结果表明不同类型湖泊底栖动物群落具有显著差异(除施肥养殖湖泊和城市湖泊之间),其显著性水平均低于 0.001(表4).

利用相似性百分比分析(SIMPER)找出各类型湖泊底栖动物群落特征种类(表5).结果表明不同类型湖泊特征种类差别较大,草型湖泊特征种主要为螺类及苏氏尾鳃蚓,天然养殖湖泊特征种类较少,分别为河蚬、寡鳃齿吻沙蚕和苏氏尾鳃蚓,施肥养殖湖泊和城市湖泊特征种类较为相似,其主要为寡毛颤蚓类及摇蚊科幼虫,但城市湖泊特征种类较少且密度较施肥养殖湖泊高.值得注意的是苏氏尾鳃蚓在四种类型湖泊均为特征种类,但密度在草型和天然养殖湖泊较施肥养殖和城市湖泊低很多.

3 讨论

3.1 不同类型湖泊底栖动物群落及生境特征分析

本文目的是比较研究长江中下游地区四种典型湖泊底栖动物群落结构特征.研究结果表明,不同类型湖泊底栖动物无论在密度、生物量、多样性及特征种类均存在较大差异.本文所选取的湖泊不仅在营养状态上存在较大差异,同时其他理化特征(如底质特征、生境异质性、换水周期)也差异较大,这些都可能在一定程度上影响底栖动物群落结构.

越高。草型湖泊生境的高度异质性不仅为大型底栖动物提供了更多栖息、摄食和繁殖的场所,同时其复杂的生境结构也为底栖动物躲避捕食者提供了良好条件,从而在一定程度上增加了其多样性和均匀度。

天然养殖湖泊特征种类较少,为河蚬、寡鳃齿吻沙蚕和苏氏尾鳃蚓。河蚬常为过滤收集者,主要滤食悬浮碎屑、细菌和浮游生物。调查时发现珠湖和军山湖沉积物颗粒较其他湖泊粗,这可能更有利于河蚬的生存。国内外关于底质类型对河蚬分布影响的研究较多,刘俊在研究湘江软体动物群落时发现河蚬在淤泥、泥沙、砾石、粗砂等底质中均能生存,但在砂质淤泥中丰度最高,而在粘土中数量最低^[20]。蔡永久等在研究太湖时发现河蚬丰度高值出现在粒径较粗的湖心开阔水域,而在淤泥底质、富营养化严重的梅梁湾密度较低^[21]。Schmidlin 和 Baur 在调查瑞士 Rhine 河时也发现河蚬最适于生活在砂质底质(粒径 0.063 - 2.0mm)^[22]。另一特征种寡鳃齿吻沙蚕,已有研究表明其喜生活于砂质软泥中^[23],通常属于河口和通江湖泊种类,珠湖和军山湖历史上都曾为鄱阳湖的一部分,由于围垦成湖历史较短,因此其物种组成仍具有通江湖泊的特征。

施肥养殖湖泊和城市湖泊底栖动物群落相似性较高(表 4),其特征种类均为颤蚓类和摇蚊科幼虫,按功能摄食类群分属于直接收集者。这两类湖泊由于人类活动的影响,其营养水平都较高,沉积物类型为淤泥,有机质含量较高,溶解氧却较低(表 2),这类环境可能更有利于直接收集者的生存繁殖,Anlauf 和 Moffitt 研究发现颤蚓类喜生活于淤泥及细颗粒的沉积物^[24],Rodriguez 等研究发现正颤蚓主要选择摄食粒径小于 63 μm 的有机颗粒物^[25]。相反,细粒径的沉积物反而阻碍了双壳类及螺类的摄食行为,从而降低其存活率^[26],本文中施肥养殖湖泊和城市湖泊底栖动物特征种的组成与此相符。对比还发现城市湖泊特征种类数量较施肥养殖湖泊少,但其密度却高很多,特别是霍雨水丝蚓和红裸须摇蚊。这两个种类是典型的富营养种类,在其它富营养湖泊密度也较高,如太湖超富营养湖区梅梁湾霍雨水丝蚓平均密度可达 7883ind./m²^[27],龚志军等^[28]在 2001 年调查武汉东湖时发现富营养最严重站点霍雨水丝蚓年均密度可达 3502ind./m²,熊金林等^[8]在研究工业污染严重的湖北省严西湖时发现红裸须摇蚊年均密度可高达 4200ind./m²,本研究中武汉东湖红裸须摇蚊平均密度也高达 4155ind./m²。值得注意的是虽均为富营养湖泊,两个城市湖泊优势类群差别较大,武汉东湖优势类群为摇蚊幼虫,而岳阳南湖为颤蚓类所主导,这可能与底层溶解氧含量有关,岳阳南湖水较深,底层溶解氧较低(平均值 6.59mg/L),这可能在一

定程度上进一步限制了耐低氧能力较差的摇蚊幼虫的生存,而耐受性更高的颤蚓类得以繁育。

表 4 不同类型湖泊大型底栖动物群落 Bray-Curtis 相似性分析

Tab. 4 Bray-Curtis similarity analysis of macrozoobenthic community in different type lakes

| 湖泊类型 | 草型 | 天然养殖 | 施肥养殖 | 城市 |
|------|--------|---------|---------|---------|
| 草型 | | 0.986 * | 0.815 * | 0.853 * |
| 天然养殖 | 87.41% | | 0.915 * | 0.964 * |
| 施肥养殖 | 79.73% | 80.24% | | 0.195† |
| 城市 | 82.41% | 87.15% | 56.10% | |

注:下方为不相似性百分比,上方为统计量 R, * (P < 0.001), † (P = 0.099)

表 5 不同类型湖泊底栖动物群落特征种类平均密度(ind./m²)及其对组内相似性贡献百分比(%)

Tab. 5 Mean density of characteristic species for different type lakes and their contributions to within group similarity

| 底栖动物 | 草型湖泊 | 天然养殖湖泊 | 施肥养殖湖泊 | 城市湖泊 |
|--------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 寡毛类 | | | | |
| 苏氏尾鳃蚓 | 24(10.51%) | 25(14.86%) | 109(23.84%) | 184(16.98%) |
| 霍雨水丝蚓 | | | 61(6.64%) | 4427(16.91%) |
| 摇蚊幼虫 | | | | |
| 半折摇蚊群 | | | 574(18.34%) | |
| 褐斑菱附摇蚊 | | | 33(9.92%) | 30(6.36%) |
| 小摇蚊属一种 | | | 45(4.31%) | |
| 花翅前突摇蚊 | | | 26(13.98%) | 134(15.49%) |
| 红裸须摇蚊 | | | 126(8.16%) | 2499(35.59%) |
| 中国长足摇蚊 | | | 254(9.04%) | |
| 软体动物 | | | | |
| 河蚬 | | 97(40.34%) | | |
| 铜锈环棱螺 | 46(15.55%) | | | |
| 长角涵螺 | 117(25.68%) | | | |
| 纹沼螺 | 62(26.12%) | | | |
| 椭圆萝卜螺 | 18(8.34%) | | | |
| 大脐圆扁螺 | 34(5.59%) | | | |
| 其他 | | | | |
| 寡鳃齿吻沙蚕 | | 117(36.04%) | | |
| 合计 | 302(91.79%) | 239(91.24%) | 1228(94.23%) | 7275(91.33%) |

3.2 水体营养状态与大型底栖动物群落的关系

相关分析结果表明水体营养状态与底栖动物密度呈显著正相关,而与生物量显著负相关,其原因是随着营养状态的不断增加,小个体的耐污种类(主要是寡毛类和摇蚊幼虫)数量不断增加,而耐污能力较差的软体动物数量不断减少,这也可以从不同类型湖泊的特征种类看出.这种结果与 Pearson 和 Rosenberg^[29]提出的预测模型一致,该模型认为随着有机负荷的不断增加,食碎屑的直接收集者数量将增加而滤食者数量呈减少趋势.

关于生态系统初级生产力与多样性的研究较多,并提出了中等生产力假说(intermediate productivity hypothesis)^[30],在水体生态系统中可理解为多样性最高值出现在中等营养水平,而在贫营养和超富营养水体中多样性却较低,且被许多研究结果所支持.如 Jeppesen 等在研究丹麦 71 个浅水湖泊时发现鱼类、浮游植物及浮叶植物多样性与总磷水平呈单峰关系^[31],Dodson 等在研究北美 33 个湖泊时也发现浮游植物、轮虫、枝角类、桡足类及水生植物与浮游初级生产力呈单峰关系^[32],Frouin 在研究沿海底栖动物群落时也发现多样性最高值出现在中等营养水平^[33].本文所研究湖泊均已达到中等营养水平以上,底栖动物多样性与营养状态呈显著负相关,反映目前长江中下游湖泊底栖动物群落随营养状态增加趋于简单化的演替趋势.

致谢:周方正帮助采集野外样品,徐徽、商景阁、邓建明等参与现场采样和环境指标测定,在此向他们表示衷心的感谢.

4 参考文献

- [1] Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [2] Beck MW, Hatch LK. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity. *Environmental Reviews*, 2009, 17: 21-44.
- [3] Ricciardi A, Rasmussen JB. Extinction rates of North American freshwater fauna. *Conservation Biology*, 1999, 13(5): 1220-1222.
- [4] Strayer DL. Challenges for freshwater invertebrate conservation. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(2): 271-287.
- [5] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 193-202.
- [6] Fang JY, Wang ZH, Zhao SQ et al. Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 369-377.
- [7] 闫云君, 李晓宇, 梁彦龄. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 176-182.
- [8] 熊金林, 梅兴国, 胡传林. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 160-168.
- [9] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 580.
- [10] 大连水产学院. 淡水生物学(上册分类学部分). 北京: 农业出版社, 1982: 346.
- [11] 刘月英, 张文珍, 王跃先等. 中国经济动物志·淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979: 134.
- [12] 王洪铸. 中国小蛭类研究——附中国南极长城站附近地区两新种. 北京: 高等教育出版社, 2002: 228.
- [13] Morse JC, Yang LF, Tian LX. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 570.
- [14] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编辑委员会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 784.
- [15] 蔡庆华, 刘建康, King L. 评价湖泊富营养化的一个综合模型. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1674-1678.
- [16] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 58-64.
- [17] Brönmark C. Interactions between epiphytes, macrophytes and freshwater snails: a review. *Journal of Molluscan Studies*, 1989, 55(2): 299-311.
- [18] Thomas JD. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 125-178.
- [19] Tews J, Brose U, Grimm V et al. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of

- keystone structures. *Journal of Biogeography*, 2004, **31**(1): 79-92.
- [20] 刘俊. 湘江软体动物多样性研究[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2006.
- [21] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局(2006-2007年). *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 713-719.
- [22] Schmidlin S, Baur B. Distribution and substrate preference of the invasive clam *Corbicula fluminea* in the river Rhine in the region of Basel (Switzerland, Germany, France). *Aquatic Sciences*, 2007, **69**(1): 153-161.
- [23] 王金宝, 李新正, 王洪法等. 胶州湾多毛类环节动物数量分布与环境因子的关系. *应用与环境生物学报*, 2006, **12**(6): 798-803.
- [24] Anlauf KJ, Moffitt CM. Models of stream habitat characteristics associated with tubificid populations in an intermountain watershed. *Hydrobiologia*, 2008, **603**(1): 147-158.
- [25] Rodriguez P, Martinez-Madrid M, Arrate JA *et al.* Selective feeding by the aquatic oligochaete *Tubifex tubifex* (Tubificidae, Clitellata). *Hydrobiologia*, 2001, **463**(1): 133-140.
- [26] Donohue I, Irvine K. Effects of sediment particle size composition on survivorship of benthic invertebrates from Lake Tanganyika, Africa. *Archiv für Hydrobiologie*, 2003, **157**(1): 131-144.
- [27] 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. *生物多样性*, 2010, **18**(1): 50-59.
- [28] 龚志军, 谢平, 唐汇涓等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. *水生生物学报*, 2001, **25**(3): 210-216.
- [29] Pearson TH, Rosenberg R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1978, **16**: 229-311.
- [30] Kondoh M. Unifying the relationships of species richness to productivity and disturbance. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2001, **268**: 269-271.
- [31] Jeppesen E, Jensen JP, Søndergaard M *et al.* Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 2000, **45**(2): 201-218.
- [32] Dodson SI, Arnott SE, Cottingham KL. The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology*, 2000, **81**(10): 2662-2679.
- [33] Frouin P. Effects of anthropogenic disturbances of tropical soft-bottom benthic communities. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **194**: 39-53.