

苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价*

邹伟^{1,2}, 李太民³, 刘利³, 蔡永久¹, 许浩^{1,2}, 彭凯^{1,2}, 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: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 江苏省骆马湖水利工程管理处, 宿迁 223800)

摘要: 2014年1—12月, 对苏北骆马湖水质和大型底栖动物进行了逐月调查. 根据湖区的生境特征将骆马湖划分为3个区域: 采砂区域、植被区域和其他区域. 对比分析不同区域水质参数和底栖动物群落结构, 并利用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、综合营养状态指数和生物学指数对水质进行评价. 结果表明, 采砂区域的水深显著高于植被区域, 而透明度显著低于另外两个区域; 采砂区域的总氮、总磷、硝态氮和正磷酸盐浓度均显著高于植被区域, 生物多样性显著低于另外两个区域. 骆马湖内共采集到大型底栖动物41种, 其中环节动物8种, 软体动物15种, 节肢动物18种. 铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、长角涵螺(*Alocinma longicornis*)是现阶段的优势种. 10个监测点底栖动物的年均密度和年均生物量分别为 77.19 ± 43.59 ind./m²和 37.62 ± 28.31 g/m², 呈现出较高的空间异质性. 生物量较密度空间差异更大, 生物量在湖泊四周的监测点较高, 而在湖心开阔水域较低. 水质评价结果表明骆马湖水质处于中营养状态, 总体属于中度污染, 作为南水北调东线工程重要的调蓄湖泊以及饮用水源地和水产养殖基地, 加强水环境保护不容懈怠.

关键词: 骆马湖; 大型底栖动物; 群落结构; 采砂; 水质评价

Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu Province, China

ZOU Wei^{1,2}, LI Taimin³, LIU Li³, CAI Yongjiu¹, XU Hao^{1,2}, PENG Kai^{1,2} & GONG Zhijun^{1**}

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

(3: Luoyun Management Division, Suqian 223800, P.R.China)

Abstract: Physiochemical conditions and macrozoobenthos in Lake Luoma were investigated monthly in 2014. The lake was divided into three regions of the sand mining, the vegetation and the others according to its habitat conditions. Physiochemical parameters and macrozoobenthic community structure were compared among the three regions. Water quality was evaluated based on the surface water environmental quality standard (GB 3838—2002), comprehensive trophic level index and biological indices. The depth of sand mining area was significantly higher than that in the vegetation area, while the transparency was much lower than the other two regions. The concentrations of total nitrogen, total phosphorus, nitrate and phosphate in the sand mining area were significantly higher than those in the vegetation area, while the biodiversity indices of macrozoobenthos were significantly lower than the other two regions. A total of 41 taxa were identified, including 8 species of Annelida, 15 species of Mollusca and 18 species of Arthropoda. *Bellamya aeruginosa*, *Branchiura sowerbyi*, *Limnodrilus hoffmeister* and *Alocinma longicornis* dominated the community with high abundance and biomass. The annual average density and biomass of macrozoobenthos were 77.19 ± 43.59 ind./m² and 37.62 ± 28.31 g/m², respectively. Higher spatial heterogeneity was observed for the mean biomass than the mean density. The relative high

* 江苏省水利科技项目(2015043)、国家自然科学基金项目(41671110, 31670466)和科技基础性工作专项(2013FY111800)联合资助. 2016-05-13 收稿; 2016-10-09 收修改稿. 邹伟(1991~), 男, 硕士研究生; E-mail: 870816289zw@sina.com.

** 通信作者; E-mail: zjgong@niglas.ac.cn.

mean biomass values were found in the littoral sampling sites while the relative low values in offshore sampling sites. It showed that the lake was moderately polluted at a mesotrophic level. As an important water source and aquaculture site, more attention should be paid on water environment protection in Lake Luoma.

Keywords: Lake Luoma; macrozoobenthos; community structure; sand mining; water quality assessment

大型底栖动物一般指个体大于 500 μm , 生活史的全部或大部分时间生活在水体底部的无脊椎动物, 主要包括节肢动物(水生昆虫、大型甲壳动物)、软体动物和环节动物等。大型底栖动物是淡水湖泊生态系统的重要组成部分, 是鱼类的天然饵料, 并且在物质循环和能量流动中都具有重要作用^[1]。此外, 大型底栖动物生命周期相对较长, 迁移能力较弱, 易于采集和鉴定, 且不同物种对环境变化的敏感性差异较大, 群落结构往往会随着水质的变化而改变, 因此被广泛应用于生物监测和水质评价^[2-4]。

骆马湖位于江苏省北部(34°00'~34°14'N, 118°04'~118°18'E), 面积为 290 km^2 , 容积为 $9.18 \times 10^8 \text{ m}^3$, 汇水面积约 1300 km^2 , 是淮河流域第 3 大淡水湖泊、江苏省第 4 大淡水湖泊, 为宿迁、徐州两市共辖^[5]。骆马湖北面通过运河与山东南四湖相连, 南与洪泽湖相连, 继而与长江水系相通, 入湖河流主要有沂河水系, 南四湖水系和邳苍地区共 40 多条支流; 出流有 3 处, 一经嶧山闸入新沂河, 一经皂河闸入中运河, 一经杨河滩闸入六塘河。骆马湖属典型的过水性湖泊, 具有供水、防洪、排涝、灌溉、养殖、航运及旅游等多种功能; 更为重要的是, 骆马湖作为南水北调东线工程重要的调蓄湖泊和输水通道, 在调水过程中, 其水质状况、生态环境健康水平直接关系到调水的成效^[6-8]。历史上骆马湖生态环境保持着良好的状态, 然而随着近几十年来社会经济的发展, 湖泊环境遭到较大的干扰, 如近 10 年来大规模采砂活动, 对骆马湖的生态环境造成极大影响, 湖泊健康有恶化趋势。因此, 有必要对骆马湖生态环境开展长期监测。过去对骆马湖水生态有少量的研究, 但多集中于水生高等植物和浮游生物方面以及少量的底栖动物资源型调查工作或单从理化参数方面阐述水质情况, 且时间尺度相对较短, 有限的研究仅集中于骆马湖局部区域, 不足以完全反映湖泊的实际情况^[9-14]。为此, 本研究于 2014 年 1—12 月对骆马湖的大型底栖动物和水质进行为期一年的监测, 旨在阐明骆马湖底栖动物群落结构特征和水质状况, 以期对骆马湖生态环境保护与管理提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

根据骆马湖的形态特征、水产养殖、采砂和水生植被分布等设置 10 个监测点(图 1)。采样时间为 2014 年 1—12 月, 每月 1 次。大型底栖动物样品的采集使用 1/20 m^2 改良彼得森采泥器, 每个监测点采集 3 次。泥样经 60 目尼龙筛洗净后, 在白瓷盘中逐一将底栖动物拣出。标本用 7% 福尔马林溶液保存, 绝大部分物种鉴定到种, 少数种类鉴定至属或更高的分类单元^[15-17], 鉴定后进行计数和称重并换算成每平方米的密度和生物量。

利用 YSI 6600 V2 型多参数水质监测仪现场测定水温(WT)、pH 值、浊度(NTU)、溶解氧(DO)浓度、电导率(Cond)等指标。水深(WD)和透明度(SD)分别利用 Speedtech 测深仪和塞氏盘现场测定。用 5 L 的采水器采集表层、中层和底层水样, 并现场混匀后取 5 L 水样冷藏带回实验室分析水质指标, 包括总氮(TN)、溶解态总氮(TDN)、硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、总磷(TP)、溶解态总磷(TDP)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl.a)浓度。TN 和 TDN 浓度采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NO_3^- -N 浓度采用酚二磺酸分光光度法测定, NO_2^- -N 浓度采用对氨基苯磺酰胺-萘乙二胺分光光度法测定, NH_4^+ -N 浓度采用纳氏试剂比色法测定, TP 和 TDP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定, COD_{Mn} 浓度采用高锰酸盐滴定法测定, PO_4^{3-} -P 浓度采用磷钼蓝分光光度法测定, Chl.a 浓度采用热乙醇萃取分光光度法测定^[18]。

1.2 数据分析

1.2.1 水环境与大型底栖动物群落特征 根据生境特征将骆马湖 10 个监测点分为 3 个区域, 监测点 S2 为主采砂区, 称之为采砂区域; 监测点 S7、S8、S9 水草相对茂盛, 称之为植被区域; 其他点位均受到人类采砂、围网养殖等活动一定程度的干扰, 称之为其他区域。利用 SPSS 19.0 对不同的区域的水质理化参数等进行差异

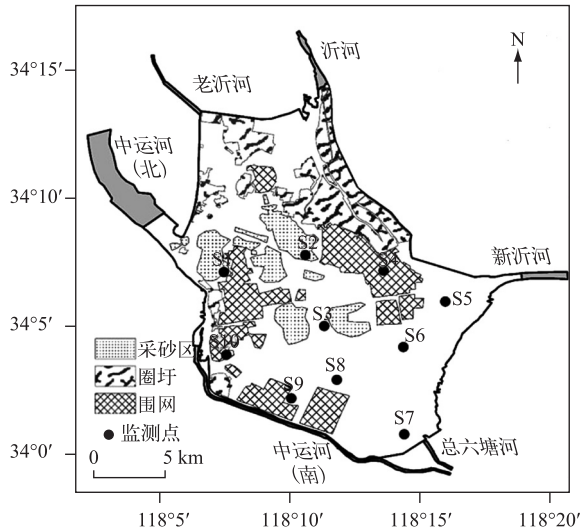


图 1 骆马湖监测点位分布

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Luoma

性分析,若数据满足正态性、独立性和方差齐性,则采用单因素方差分析;若数据满足正态性和独立性但不满足方差齐性,利用 Welch 矫正的方差分析;若不满足参数检验前提条件,则用非参数 Kruskal-Wallis 检验.多重比较方法的选择根据数据是否满足方差齐性采用 LSD (the least significant difference) 检验或 GH (Games-Howell) 检验.

优势度(Y)的计算公式为:

$$Y=(n_i/N) \cdot f_i \tag{1}$$

式中, f_i 为物种 i 在采样点中的出现频率, n_i 为第 i 个物种的密度, N 为大型底栖动物群落总密度. $Y>0.02$ 时,定为优势种^[19].

Shannon-Wiener 指数(H')的计算公式为:

$$H'=-\sum P_i \cdot \ln P_i \tag{2}$$

式中, P_i 为物种 i 的个体数 n_i 占总个体数 N 的比例.

Margalef 物种丰富度指数(d_M)的计算公式为:

$$d_M=(S-1)/\ln N \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数(J')的计算公式为:

$$J'=H'/\ln S \tag{4}$$

式中, S 为大型底栖动物群落总物种数, N 为大型底栖动物群落总个体数^[20].

1.2.2 水质评价 结合综合营养状态指数、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和水质生物学指数综合评价骆马湖水质(表 1).

综合营养状态指数的计算公式为^[21]:

$$TLI(\Sigma)=\sum_{j=1}^m TLI(j) \cdot W_j \tag{5}$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 表示综合营养状态指数; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重,本次的营养状态参数包括 TN、TP、Chl.a、SD 和 COD_{Mn} ,权重分别为 0.179、0.188、0.266、0.183 和 0.184.

生物学污染指数(biological pollution index, BPI)的计算公式为^[4]:

$$BPI=\lg(N_1+2)/[\lg(N_2+2)+\lg(N_3+2)] \tag{6}$$

式中, N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体, N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他的水生昆虫个体数, N_3 为软体动物个体数.

BPI 指数、Shannon-Wiener 指数和 *TLI* (Σ) 指数的评价标准见表 1^[3].

表 1 水质生物学指数和综合营养状态指数的评价标准

Tab.1 The evaluation standard of biological indices and comprehensive trophic level index

<i>BPI</i> 指数	Shannon-Wiener 指数	<i>TLI</i> (Σ) 指数
<0.1 为清洁	<1.0 为重度污染	<30 为贫营养
[0.1, 0.5] 为轻度污染	[1.0, 2.0] 为中度污染	[30, 50] 为中营养
(0.5, 3.0] 为中度污染	(2.0, 3.0] 为轻度污染	(50, 60] 为轻度富营养
(3.0, 5.0] 为重度污染	>3.0 为无污染	(60, 70] 为中度富营养
>5.0 为严重污染		>70 为重度富营养

2 结果

2.1 环境因子特征与水质理化评价

2.1.1 环境因子特征 3 个区域的水深、SD、TN 浓度、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度差异显著 ($P<0.05$), 采砂区域的平均水深是 4.93 m, 显著高于植被区域 ($P<0.01$), 但 SD 显著低于植被区域和其他区域 ($P<0.05$). 植被区域 TN 浓度为 1.05 mg/L, 显著低于采砂区域和其他区域 ($P<0.05$), TDN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度也表现出类似的趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低, 3 个指标在不同区域间均无显著差异. TP 和 TDP 浓度在不同区域间差异不显著, 但植被区域 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度 (1.96 $\mu\text{g/L}$) 显著低于采砂区域和其他区域 ($P<0.05$). COD_{Mn} 和 Chl.a 浓度在不同区域间差异不显著 (表 2).

表 2 骆马湖不同区域主要水质参数 *

Tab.2 Main water quality parameters of different regions in Lake Luoma

参数	采砂区域 (n_1)	植被区域 (n_2)	其他区域 (n_3)
WD/m	4.93±1.92 ^a	2.65±0.66 ^b	3.45±1.81 ^a
SD/m	0.64±0.27 ^b	1.01±0.59 ^a	1.03±0.70 ^a
TN/(mg/L)	1.42±0.67 ^a	1.05±0.41 ^b	1.24±0.52 ^a
TDN/(mg/L)	1.19±0.62	0.82±0.44	1.02±0.55
TP/($\mu\text{g/L}$)	39.24±18.69	40.24±20.87	48.83±22.09
TDP/($\mu\text{g/L}$)	22.62±16.91	17.22±12.49	21.97±14.69
$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg/L})$	0.17±0.12	0.12±0.13	0.15±0.16
$\text{NO}_3^-\text{-N}/(\text{mg/L})$	0.88±0.75	0.47±0.49	0.63±0.61
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/(\mu\text{g/L})$	3.43±2.81 ^a	1.96±1.16 ^b	3.35±4.16 ^a
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg/L})$	3.07±1.12	3.38±0.87	3.33±0.82
Chl.a/($\mu\text{g/L}$)	7.70±5.91	7.28±7.10	8.00±6.68

* 不同的字母表示两个区域之间的多重比较结果具有显著差异 ($P<0.05, n_1=12, n_2=36, n_3=72$).

2.1.2 水质理化评价 骆马湖综合营养状态指数年平均值为 45.62±4.37, 为中营养水平. 秋季 (9—11 月) 综合营养状态指数平均值最高, 为 50.13±3.30, 处于轻度富营养状态; 夏季 (6—8 月, 47.15±7.07)、春季 (3—5 月, 42.28±4.46) 和冬季 (12—2 月, 43.99±4.08) 均为中营养水平. 骆马湖营养水平在 4—7 月和 7—12 月分别对应明显的上升和下降过程, 全年营养水平处于中营养—轻度富营养. 10 个监测点的综合营养状态指数平均得分最高值出现在 S4, 最低值出现在 S9, 各监测点均属于中营养水平, 但接近轻度富营养 (图 2). 基于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 和 COD_{Mn} 的监测结果, 根据 GB 3838—2002 标准, TN 不参评时, 骆马湖水质为 II~IV 类, 而 TN 参评时水质为 III~劣 V 类, 表明 TN 是现阶段骆马湖的主要污染物.

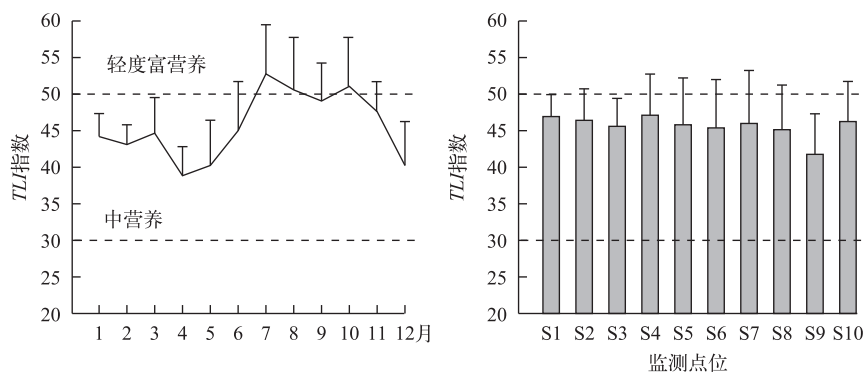


图2 骆马湖综合营养状态指数的时空格局

Fig.2 Spatial-temporal pattern of comprehensive trophic level index in Lake Luoma

2.2 大型底栖动物群落特征与水质生物学评价

2.2.1 种类组成和优势种 共采集到大型底栖动物 41 种,其中环节动物 8 种,软体动物 15 种,节肢动物 18 种. 铜锈环棱螺平均密度最高 (16.89 ind./m^2), 其次是苏氏尾鳃蚓 (13.61 ind./m^2) 和霍甫水丝蚓 (8.28 ind./m^2). 出现频率最高的是苏氏尾鳃蚓 (0.542), 其次是铜锈环棱螺 (0.483) 和霍甫水丝蚓 (0.325). 平均生物量最高的是铜锈环棱螺 (29.035 g/m^2), 占绝对优势, 其次是中国圆田螺 (1.105 g/m^2) 和长角涵螺 (0.870 g/m^2). 优势度分析表明铜锈环棱螺、苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓、长角涵螺是现阶段的优势种 (表 3).

2.2.2 密度和生物量的时空格局 骆马湖大型底栖动物的年均密度和年均生物量分别为 $77.19 \pm 43.59 \text{ ind./m}^2$ 和 $37.62 \pm 28.31 \text{ g/m}^2$, 生物量与密度的空间分布格局类似, 最高值均出现在西北湖区的 S1 点位, 最低值均出现在采砂区域 (S2 点位), 且生物量和密度的高值多处于湖泊四周监测点位, 湖心区相对较低 (图 3). 从不同类群所占比重可以看出, 密度方面, 腹足纲和寡毛纲是优势类群, 昆虫纲也占据一定比重, 年均密度分别为 28.67 ± 29.56 、 24.81 ± 17.29 和 $16.39 \pm 12.62 \text{ ind./m}^2$, 三者共同主导了底栖动物密度的空间变化. 采砂区域的优势类群与其他监测点位不同, 为蛭纲和多毛纲 (占该点位总密度的 51%). 由于软体动物个体相对较大, 其主导了生物量的空间变化, 主要为腹足纲, 年均生物量为 $32.07 \pm 29.89 \text{ g/m}^2$; 双壳纲的分布均匀程度较差, 一些监测点未发现双壳纲 (S4、S5、S8、S9 点位), 只在部分监测点位占主导地位, 其年均生物量为 $5.03 \pm 8.59 \text{ g/m}^2$. 其他类群由于个体相对较小, 对骆马湖底栖动物生物量空间格局的影响很小.

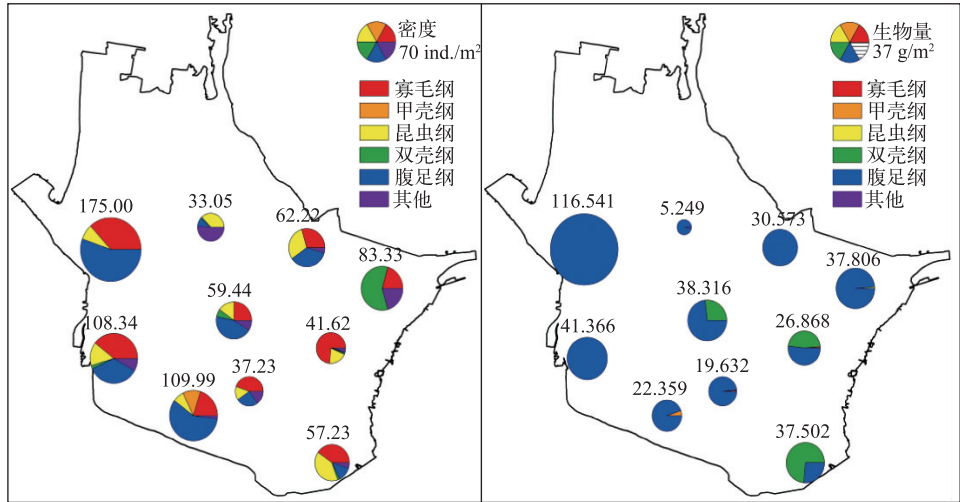


图3 骆马湖大型底栖动物平均密度与平均生物量的空间分布格局

Fig.3 Spatial patterns of average density and biomass of macrozoobenthos in Lake Luoma

表 3 骆马湖大型底栖动物种类、密度和生物量、出现频率和优势度*

Tab.3 Species, density, biomass, frequency of occurrence and dominance index of macrozoobenthos in Lake Luoma

物种	平均密度/ (ind./m ²)	平均生物量/ (g/m ²)	出现频率	优势度
寡毛纲 Oligochaeta				
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	8.28	0.006	0.325	0.035
巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	2.39	0.004	0.125	0.004
中华河蚓 <i>Rhyacodrilus sinicus</i>	0.53	0.004	0.058	<0.001
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	13.61	0.207	0.542	0.096
多毛纲 Polychaeta				
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	3.89	0.035	0.283	0.014
尖刺缨虫 <i>Potamilla acuminata</i>	0.56	0.003	0.050	<0.001
蛭纲 Hirudinea				
泽蛭属一种 <i>Helobdella</i> sp.	0.11	<0.001	0.017	<0.001
宽身舌蛭 <i>Glossiphonia lata</i>	0.22	0.001	0.017	<0.001
甲壳纲 Crustacea				
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	0.33	0.042	0.033	<0.001
细足米虾 <i>Caridina nilotica gracilipes</i>	0.06	0.006	0.008	<0.001
中华齿米虾 <i>Neocaridina denticulata sinensis</i>	1.17	0.116	0.025	<0.001
昆虫纲 Insecta				
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	2.94	0.065	0.117	0.004
林间环足摇蚊 <i>Cricotopus sylvestris</i>	1.39	0.001	0.008	<0.001
隐摇蚊属一种 <i>Cryptochironomus</i> sp.	0.06	<0.001	0.017	<0.001
浅绿二叉摇蚊 <i>Dicortendipes pelochloris</i>	0.83	<0.001	0.008	<0.001
浅白雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes pallens</i>	0.94	<0.001	0.025	<0.001
德永雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	0.44	<0.001	0.042	<0.001
多巴小摇蚊 <i>Microchironomus tabarui</i>	5.39	0.002	0.167	0.012
软铗小摇蚊 <i>Microchironomus tener</i>	0.06	<0.001	0.008	<0.001
小云多足摇蚊 <i>Polypedilum nubeculosum</i>	0.06	<0.001	0.008	<0.001
梯形多足摇蚊 <i>Ploypedilum scalaenum</i>	1.89	0.001	0.008	<0.001
红裸须摇蚊 <i>Procladius akamusi</i>	1.39	0.015	0.083	0.001
中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i>	0.33	0.001	0.050	<0.001
色螳科一种 <i>Calopterygidae</i> sp.	0.44	0.006	0.017	<0.001
螳属一种 <i>Coenagrion</i> sp.	0.17	<0.001	0.008	<0.001
大蜻科一种 <i>Macromiidae</i> sp.	0.06	0.007	0.008	<0.001
双壳纲 Bivalvia				
背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	0.11	0.038	0.017	<0.001
背瘤丽蚌 <i>Lamprotula lei</i>	0.06	0.013	0.008	<0.001
短褶矛蚌 <i>Lanceolaria grayana</i>	0.22	4.945	0.033	<0.001
中国淡水蚌 <i>Novaculina chinensis</i>	0.22	0.003	0.025	<0.001
淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>	0.39	0.033	0.042	<0.001
腹足纲 Gastropoda				
铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	16.89	29.035	0.483	0.106
中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>	0.33	1.105	0.050	<0.001
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancelata</i>	0.22	0.106	0.033	<0.001
赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i>	0.06	0.003	0.008	<0.001
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	0.83	0.497	0.025	<0.001
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	1.33	0.222	0.092	0.002
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	7.00	0.870	0.233	0.021
大脐圆扁螺 <i>Hippeutis umbilicalis</i>	0.28	0.001	0.017	<0.001
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	0.83	0.088	0.033	<0.001
狭萝卜螺 <i>Radix lagotis</i>	0.89	0.142	0.058	0.001

* 出现频率指存在物种 *i* 的样品数与样品总数 (120) 的比值.

骆马湖大型底栖动物平均密度以冬季最高 ($104.22 \pm 143.66 \text{ ind./m}^2$), 其次是春季 ($80.44 \pm 88.58 \text{ ind./m}^2$), 夏季 ($63.33 \pm 66.71 \text{ ind./m}^2$) 和秋季 ($60.78 \pm 44.40 \text{ ind./m}^2$) 相差不大. 平均生物量的最大值出现在夏季 ($47.56 \pm 77.98 \text{ g/m}^2$), 其次是冬季 ($45.52 \pm 75.68 \text{ g/m}^2$) 和春季 ($34.71 \pm 44.61 \text{ g/m}^2$), 最小值出现在秋季 ($22.71 \pm 30.10 \text{ g/m}^2$) (图 4). 从类群组成上来看, 腹足纲、昆虫纲和寡毛纲是各季度优势类群, 昆虫纲和寡毛纲主导了平均密度的季节变化. 腹足纲和双壳纲由于个体较大, 是平均生物量的绝对贡献者, 所占比例约为 98%, 主导了平均生物量的季节变化.

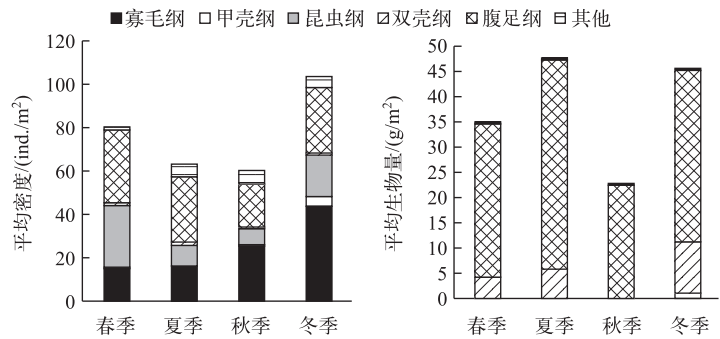


图 4 骆马湖大型底栖动物平均密度与平均生物量的季节变化

Fig.4 Seasonal composition variation of average density and biomass of macrozoobenthos in Lake Luoma

2.2.3 多样性特征 骆马湖大型底栖动物各个监测点的 Shannon-Wiener 指数平均值为 0.87 ± 0.29 , 最高值出现在 S10 点位, 最低值出现在 S2 点位. Margalef 指数平均值为 0.56 ± 0.37 , 最高值出现在 S10 点位, 最低值出现在 S2 点位. Pielou 指数得分平均值为 0.22 ± 0.08 , S10 点位最高, S2 点位最低. 3 种多样性指数在不同区域间差异显著, 多重比较结果表明植被区域和其他区域的大型底栖动物多样性均显著高于采砂区域 (表 4).

表 4 骆马湖不同区域底栖动物多样性指数*

Tab.4 Diversity index of macrozoobenthos of different regions in Lake Luoma

多样性指数	采砂区域(n_1)	植被区域(n_2)	其他区域(n_3)	P
Shannon-Wiener 指数	0.13 ± 0.31^b	0.87 ± 0.55^a	0.91 ± 0.50^a	<0.001
Margalef 指数	0.10 ± 0.21^b	0.57 ± 0.35^a	0.62 ± 0.35^a	<0.001
Pielou 指数	0.04 ± 0.08^b	0.24 ± 0.15^a	0.25 ± 0.13^a	0.006

* 不同字母表示两个区域之间的多重比较结果具有显著差异 ($P < 0.05$, $n_1 = 12$, $n_2 = 36$, $n_3 = 72$).

2.2.4 水质生物学评价 Shannon-Wiener 多样性指数显示骆马湖各个监测点水质为中度—重度污染水平, S2 点位的 Shannon-Wiener 多样性指数仅为 0.14, 显著低于重度污染的阈值 1, 多样性指数极低, 很可能是采砂对底质的破坏造成的. BPI 指数介于 0.34~1.56 之间, 平均值为 0.88 ± 0.38 , 除 S2 和 S9 点位低于 0.6 (轻度污染), 其他监测点均处于中度污染水平, 根据 BPI 指数评价标准, 骆马湖水质处于轻度—中度污染水平 (图 5).

3 讨论

3.1 底栖动物群落结构及演变特征

近年来人类活动对骆马湖的干扰强度不断增加, 导致环境条件恶化, 引起底栖动物群落发生变化. 历史上曾对骆马湖底栖动物进行过数次调查: 1976 年调查的总生物量为 $288.20 \sim 338.90 \text{ g/m}^2$; 1997 年为 90.60 g/m^2 ; 1998 年为 86.00 g/m^2 , 种类为 26 种; 2005 年由于发现大量河蚬, 生物量达 571.10 g/m^2 ; 2007 年的调查发现优势类群为双壳纲和腹足纲^[22]; 2011 年调查显示铜锈环棱螺为第一优势种, 未发现河蚬^[23]. 本次调查共发现大型底栖动物 41 种, 年均密度和年均生物量分别为 $77.19 \pm 43.59 \text{ ind./m}^2$ 和 $37.62 \pm 28.31 \text{ g/m}^2$. 前 3

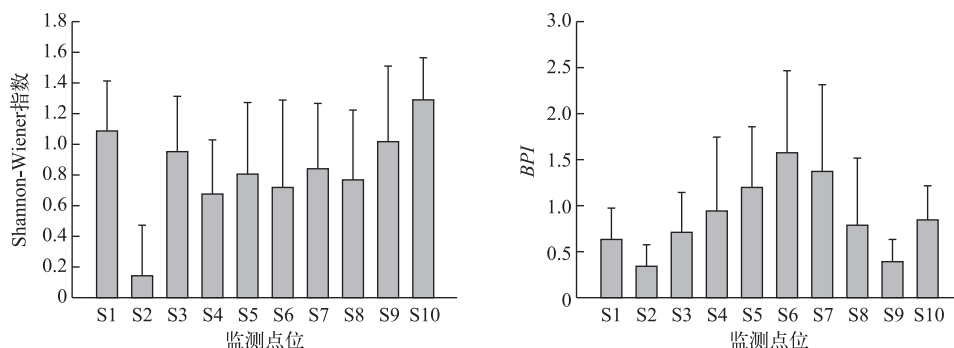


图5 骆马湖各监测点位的 Shannon-Wiener 和 BPI 指数

Fig.5 Shannon-Wiener and BPI indices of the 10 sampling sites in Lake Luoma

位优势种为铜锈环棱螺、苏氏尾鳃蚓和霍甫水丝蚓,均为富营养耐受种,未发现河蚬。环棱螺属种类耐污能力较强,生态幅宽,对污染敏感度较低,能栖息于多污性和中污性水体^[24]。苏氏尾鳃蚓和霍甫水丝蚓更常大量出现于富营养化严重的水体,如武汉东湖重污染区以及太湖梅梁湾,霍甫水丝蚓均占据绝对优势^[25-26],主要原因是其能耐受有机物分解时造成的沉积物—水界面低氧甚至缺氧环境,而其他很多种类往往受到抑制^[27]。

与历史研究结果相比^[22-23],大型底栖动物群落结构变化显著,第一优势类群由双壳纲变为腹足纲,出现了河蚬大面积消失的现象,可能有以下两方面的原因:一方面,随着周边地区工农业生产的发展和人口压力的加剧,工业废水、生活污水和农业面源污染大量增大,尤其是大面积围网养殖,导致富营养化程度不断提高,水体底层可能会出现低氧甚至缺氧环境,而河蚬喜好砂质淤泥底质,对低氧环境的耐受性较差,低氧条件会对河蚬的生存造成负面影响^[28]。另一方面,近10年大规模采砂可能是另一个重要影响因素。根据调查结果,高强度的采砂活动改变了原来的湖盆形态,骆马湖北部大部分区域深度都大于10 m,且在湖底形成了许多深浅不等的沙坑,沉积物结构受到严重破坏,部分采砂区无任何底栖动物和水生植物,“水下荒漠”日益严重。采砂区域透明度显著低于另外两个区域,这会对水下光照和溶解氧等生境条件产生负面影响,将严重限制滤食性底栖动物的生存^[29],另外由于采砂造成的水柱中大量无机悬浮颗粒物和沉积物有机质含量的大幅度降低也会对河蚬的生存产生消极作用。底栖动物的食物来源主要为有机碎屑、藻类和微生物,有机碎屑是多数底栖动物的主要食物来源,比如寡毛类的有机碎屑占胃、肠含物体积的比例一般大于80%^[30],河蚬一般为滤食者,但在水体中食物不充分的时会利用斧足获取沉积物中有机颗粒物为食,因此采砂区域沉积物低有机质含量也对河蚬的密度有抑制作用^[31]。低有机质含量的底质无法支撑复杂的底栖动物食物网结构和较高生物量,造成湖泊底栖动物群落结构的改变和群落多样性的显著降低。

3.2 水质评价

综合营养状态指数显示骆马湖水质总体处于中营养水平。同流域的洪泽湖和山东南四湖近年来已达到富营养水平^[32-33],骆马湖营养水平相对较低。洪泽湖属于大型浅水湖泊,表现为风浪扰动的沉积物再悬浮作用尤为强烈,且洪泽湖营养状态指数的主控因子是悬浮物和透明度^[34],因此内源释放可能是其营养状态较高的主要原因;南四湖较高的营养状态可能和工农业污染以及围网养殖等人类活动的关系更为密切^[35]。本次骆马湖所有监测点的TLI平均得分均不超过50,均处于中营养水平;围网区的监测点(S1、S4和S10点位)TLI得分相对较高,接近轻度富营养水平;最低值出现在西南湖区(S9点位),这可能与该区域丰富的水生植物对水质的净化作用有关^[36-37]。

BPI指数对骆马湖水质的评价结果为轻度—中度污染,而Shannon-Wiener指数的结果为中度—重度污染,两种生物学水质评价指数在部分点位存在不一致性,尤其是采砂区域的S2点位,该监测点Shannon-Wiener多样性指数仅为0.14,属于重度污染,而BPI指数结果为轻度污染。BPI指数的计算过程是将大型底栖动物按照耐污能力分成3个水平:耐污种、中度耐污种和敏感种,将耐污种的密度经过对数转换后作为分

子,中等耐污种和敏感种密度进行对数转换并求和作为分母,求得的比值用来评价水质优劣,其实质就是利用耐污种(如寡毛类、摇蚊类幼虫)的分布情况来评价水环境质量,相对适用于水质有机污染评价^[38]。S2点位于北部主采砂区域,该区域全年未发现寡毛类,只发现了极少量的摇蚊幼虫,耐污种数量极少。研究表明,沉积物中的有机质为多数寡毛和摇蚊类的主要食物来源^[30],且沉积物粒径过大导致寡毛类密度显著降低^[39],结合沉积物分析结果得出采砂区域耐污种数量极少的原因并不是水质优良,而是采砂活动改变了底栖动物的生境,破坏了生物的庇护场所,减少了其食物来源,使颤蚓类、摇蚊类难以生存,可见骆马湖区使用涉及耐污种密度的生物学评价指数判断采砂相关区域的水质情况可能会低估实际的污染水平,BPI指数并不一定适用于骆马湖所有区域的生物学评价;采砂区域的Shannon-Wiener等生物多样性指数显著降低,也不是完全由于水质污染造成的。多样性指数能够较好地反映采砂区域生态系统的健康水平,但是对其水质情况的评估可能也有一定的局限性,因此采砂区域水质的评估需要更好地结合水质理化评价等多方面的结果。综合水质理化参数、水质生物学指数得出骆马湖水质处于中营养状态,总体属于中度污染。需要注意的是,结合底栖动物的历史数据,耐污能力较强的物种逐渐成为骆马湖的优势类群,反映了该湖泊富营养化和污染水平有加剧的趋势,且大规模的采砂活动对骆马湖生态系统的破坏极大,造成了部分水域水底“荒漠化”,湖泊健康水平恶化趋势明显,作为南水北调东线工程重要的调蓄湖泊以及饮用水源地和重要的水产养殖基地,防治湖泊富营养化和无序采砂的相关工作不容懈怠。

致谢:感谢江苏省骆运水利工程管理处在野外采样中的帮助。

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. DOI: 10.2307/1313537.
- [2] Birk S, Bonne W, Borja A *et al.* Three hundred ways to assess Europe's surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 31-41. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.10.009.
- [3] Cai Yongjiu, Liu Jingsong, Dai Xiaolin *et al.* Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Changdang, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1224-1232. [蔡永久, 刘劲松, 戴小琳等. 长荡湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 生态学杂志, 2014, **33**(5): 1224-1232.]
- [4] Chi Shiyun, Peng Jianhua, Wan Chengyan *et al.* Preliminary study on macrozoobenthos of Sandaohe Reservoir, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 705-712. DOI: 10.18307/2009.0515. [池仕运, 彭建华, 万成炎等. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 705-712.]
- [5] Wang Suming, Dou Hongshen eds. *Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998: 281-282. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 281-282.]
- [6] Cui Caixia, Hua Weihua, Yuan Guangwang. The evaluation of current water quality and Lake trend analysis. *Hebei Fisheries*, 2013, (8): 31-34. [崔彩霞, 花卫华, 袁广旺. 骆马湖水质现状评价与趋势分析. 河北渔业, 2013, (8): 31-34.]
- [7] Wan Lei, Xu Delan, Gao Mingxia *et al.* Effect of macrophytes on nitrogen and phosphorus in Luoma Lake. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(10): 3579-3584. [万蕾, 徐德兰, 高明侠等. 大型水生植物对骆马湖氮、磷元素的影响. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3579-3584.]
- [8] Yang Shijian. The ecological construction of eastern route of South-to-North Water Diversion Project in Lake Luoma. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29**(1): 92-93. [杨士建. 南水北调东线工程骆马湖生态建设. 环境科学与技术, 2006, **29**(1): 92-93.]
- [9] Xu Delan, Zhang Dongdong, Zhang Cuiying *et al.* Distribution and change of macrophytes in Luoma Lake for 3 periods. *Wetland Science*, 2013, **11**(3): 320-325. [徐德兰, 张东东, 张翠英等. 3个时期骆马湖大型水生植物的分布及变化. 湿地科学, 2013, **11**(3): 320-325.]
- [10] Li Daming, Yang Zhen, Yu Yang *et al.* Photosynthetic activity of phytoplankton in Lake Gehu and Lake Luoma in spring. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 688-694. DOI: 10.18307/2013.0510. [李大命, 阳振, 于洋等. 漏湖和骆马湖春季浮游植物光合作用活性的研究. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 688-694.]

- [11] Feng Yawei. Desmids community variation and environmental factors in Luoma Lake and Dongping Lake of the east route of South-to-North Water Diversion Project [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2015. [冯亚威. 南水北调东线骆马湖和东平湖鼓藻种群变化与环境因子研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.]
- [12] Ding Hanming. The current situation, problems and countermeasures of Luoma lake wetland [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. [丁汉明. 骆马湖湿地资源状况、问题及对策[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2010.]
- [13] Hu Tingting, Liu Jinsong, Dai Xiaoling *et al.* Spatio-temporal variation of water quality in Lake Luoma, Jiangsu Province, China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 794-801. [胡婷婷, 刘劲松, 戴小琳等. 骆马湖水水质时空变化特征. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(5): 794-801.]
- [14] Zhang Xiaoming, Li Chao, Li Qian. Phytoplankton investigation and water quality assessment. *Zhi Huai*, 2016, (1): 29-30. [张小明, 李超, 李倩. 骆马湖浮游藻类调查与水质评价. 治淮, 2016, (1): 29-30.]
- [15] Morse JC, Yang LF, Tian LX eds. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [16] Liu Yueying ed. Economic fauna of China (freshwater mollusk). Beijing: Science Press, 1979. [刘月英. 中国经济动物志: 淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [17] Wang Juncui, Wang Xinhua eds. Northern China Chironomus larva. Beijing: Yanshi Press in China, 2011. [王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫. 北京: 中国言实出版社, 2011.]
- [18] "Water and wastewater monitoring and analysis method" editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] Lu Qiang, Chen Huili, Shao Xiaoyang *et al.* Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(9): 2803-2815. [陆强, 陈慧丽, 邵晓阳等. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2013, **33**(9): 2803-2815.]
- [20] Xu Hao, Cai Yongjiu, Tang Xiangming *et al.* Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 840-852. DOI 10.18307/2015.0510. [许浩, 蔡永久, 汤祥明等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 840-852.]
- [21] Wang Mingcui, Liu Xueqin. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [22] Pan Yuanchao, Yan Weihui, Zhao Muzi *et al.* Survey report of macrozoobenthos in Lake Luoma. In: Society for aquatic products in Jiangsu Province. Nanjing: Academic papers of fishery annually meeting in Jiangsu Province, 2009: 99-100. [潘元潮, 严维辉, 赵沐子等. 骆马湖底栖生物调查报告. 见: 江苏省水产学会编. 南京: 江苏省水产学术年会暨学术研讨会论文集, 2009: 99-100.]
- [23] Shen Xia, Hong Dalin, Tan Yongfeng *et al.* Ecological environment of Luoma Lake and protection measures. *Water Resources Protection*, 2013, (3): 39-43. [申霞, 洪大林, 谈永锋等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施. 水资源保护, 2013, (3): 39-43.]
- [24] Cao Zhengguang, Jiang Xinpo. The influence of environmental factors on *Beamllya purficata*. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1998, **7**(3): 200-205. [曹正光, 蒋忻坡. 几种环境因子对梨形环棱螺的影响. 上海水产大学学报, 1998, **7**(3): 200-205.]
- [25] Gong Zhijun, Xie Ping, Tang Huijuan *et al.* The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(3): 210-216. [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.]
- [26] Cai Yongjiu, Gong Zhijun, Qin Boqiang. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China. *Biodiversity Science*, 2010, **18**(1): 50-59. [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.]
- [27] Chapman PM, Farrell MA, Brinkhurst RO. Effects of species interactions on the survival and respiration of *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tubifex tubifex* (Oligochaeta, Tubificidae) exposed to various pollutants and environmental factors. *Water*

- Research*, 1982, **16**(9): 1405-1408. DOI: 10.1016/0043-1354(82)90225-1.
- [28] Ling Qufei, Song Xuehong, Kang Huadong *et al.* Preliminary study of Corbicula resources and water physicochemical factors of Kuncheng Lake. *Water Conservancy Fishery*, 2001, **21**(1): 44-46. [凌去非, 宋学宏, 康华东等. 昆承湖河蚬资源及水体理化因子的初步探讨. 水利渔业, 2001, **21**(1): 44-46.]
- [29] Foe C, Knight A. The effect of phytoplankton and suspended sediment on the growth of Corbicula fluminea (Bivalvia). *Hydrobiologia*, 1985, **127**(2): 105-115. DOI 10.1007/BF00004190.
- [30] Liu Xueqin. Food composition and foodwebs of zoobenthos in Yangtze Lakes [Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006. [刘学勤. 湖泊底栖动物食物组成与食物网研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.]
- [31] Marroni S, Iglesias C, Mazzeo N *et al.* Alternative food sources of native and non-native bivalves in subtropical eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 2014, **735**(1): 263-276. DOI 10.1007/s10750-013-1714-3.
- [32] Wu Zhouhu, Yang Liankuan, Jin Linren *et al.* Spatial-time comparative analysis and evaluation of eutrophication level of Nansi Lake. *Journal of Qingdao Technological University*, 2012, **33**(3): 1-6. [武周虎, 杨连宽, 金玲仁等. 南四湖水体富营养化时空比较分析与评价. 青岛理工大学学报, 2012, **33**(3): 1-6.]
- [33] Li Wei, Du Xue, Lin Mingli. Spatial-temporal variation characteristics of water quality in Hongze Lake based on PCA and SOM. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(12): 1593-1599. [李为, 都雪, 林明利等. 基于PCA和SOM网络的洪泽湖水质时空变化特征分析. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(12): 1593-1599.]
- [34] Yang Guangli, Han Aimin, Liu Tiekun *et al.* The relationship of eutrophication of the Lake of Hongze and environmental physical-chemical factors. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2003, **15**(2): 17-20. [杨广利, 韩爱民, 刘铁琨等. 洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系. 环境监测管理和技术, 2003, **15**(2): 17-20.]
- [35] Li Yanhong, Yang Liyuan, Liu Enfeng *et al.* Evaluation of eutrophic levels in Nansi Lake and analysis of the causes. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2010, **24**(2): 212-215. [李艳红, 杨丽原, 刘恩峰等. 南四湖富营养化评价与原因分析. 济南大学学报: 自然科学版, 2010, **24**(2): 212-215.]
- [36] Takamura N, Kadono Y, Fukushima M *et al.* Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes. *Ecological Research*, 2003, **18**(4): 381-395. DOI: 10.1046/j. 1440-1703.2003.00563.x.
- [37] He Jun, Gu Xiaohong, Liu Guofeng. Aquatic macrophytes in East Lake Taihu and its interaction with water environment. *J Lake Sci*, 2008, **20**(6): 790-795. DOI: 10.18307/2008.0618. [何俊, 谷孝鸿, 刘国锋. 东太湖水生植物及其与环境的相互作用. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 790-795.]
- [38] Hilsenhoff WL. A modification of the biotic index of organic stream pollution to remedy problems and permit its use throughout the year. *Great Lakes Entomologist*, 1998, **31**(1): 1-12.
- [39] Sauter G, Güde H. Influence of grain size on the distribution of tubificid oligochaete species. *Hydrobiologia*, 1996, **334**(1/2/3): 97-101. DOI 10.1007/BF00017358.