

基于底栖动物的水质生物学评价 ——以江苏骆马湖为例

张庆吉^{1,2}, 王金东³, 王明明⁴, 蔡永久², 龚志军², 秦伯强^{1,2*}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 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, 江苏 南京 210008; 3. 江苏省骆马湖水利管理处, 江苏 宿迁 223800; 4. 宿迁市水利局, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 基于2018年1—11月骆马湖水质和底栖动物逐月监测数据, 利用Goodnight指数(GBI)、生物学污染指数(BPI)、Shannon-Wiener指数(H')等生物学指数对水质现状进行了评价。结果表明, 骆马湖 ρ (总氮)年均值为2.31 mg/L, ρ (总氮)和 ρ (溶解氧)呈先下降后上升趋势; ρ (总磷)年均值为0.05 mg/L, 先上升于8月达到峰值(0.15 mg/L)后下降; 高锰酸盐指数呈先上升后下降趋势; ρ (氟离子)呈逐渐下降趋势, 水温和电导率存在明显季节变化, pH值呈逐渐升高趋势。共鉴定出底栖动物27种, 其中软体动物5种, 环节动物7种, 节肢动物15种。铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)、纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*)、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、多巴小摇蚊(*Microchironomus tabarui*)和中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)是现阶段优势种。全湖底栖动物年均密度为174.5个/m², 年均生物量为24.93 g/m², 表现出明显的时空差异。水质评价结果表明, 骆马湖水环境处于中污染状态。结合近年来研究结果, 骆马湖底质荒漠化现象趋于好转, 但富营养化趋势正在加深。

关键词: 浅水湖泊; 水质评价; 群落结构; 营养盐; 底栖动物

中图分类号: Q958.8; X824

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2022)06-0057-07

Biological Assessment of Water Quality Based on Macroinvertebrates—A Case Study in Lake Luoma, Jiangsu Province

ZHANG Qing-ji^{1,2}, WANG Jin-dong³, WANG Ming-ming⁴, CAI Yong-jiu², GONG Zhi-jun², QIN Bo-qiang^{1,2*}

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 3. Jiangsu Luoyun Hydraulic Engineering Management Division, Suqian, Jiangsu 223800, China; 4. Water Conservancy Bureau of Suqian City, Suqian, Jiangsu 223800, China)

Abstract: Based on the monthly monitoring data of water quality and macroinvertebrates in Lake Luoma from January to November 2018, the water quality status were evaluated using biological indexes such as the Goodnight index, BPI index, and Shannon-Wiener index. The results showed that the annual average value of total nitrogen in Lake Luoma was 2.31 mg/L, ρ (TN) and ρ (DO) were indicated a trend of first decreasing and then increasing. The annual average of total phosphorus was 0.05 mg/L, which first rose to the peak in August (0.15 mg/L) and then decreased. Permanganate index showed a trend of first increasing and then decreasing; while fluoride ions was gradually decreasing, and temperature and conductivity showed obvious seasonal changes, pH value was gradually increasing. A total of 27 species of macroinvertebrates were identified, including 5 species of mollusks, 7 species of annelids, and 15 species of arthropods. *Bellamya aeruginosa*, *Prosilocerus akamusi*, *Parafossarulus striatulus*, *Branchiura*

收稿日期: 2022-03-04 修订日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171119); 中国科学院青年创新促进会项目(2020316)

作者简介: 张庆吉(1994—), 男, 博士, 主要研究方向为水环境与水生态。

* 通讯作者: 秦伯强 E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

sowerbyi, *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Microchironomus tabarui* and *Tanypus chinensis* were the dominant species. The average annual density of macroinvertebrates in the whole lake was 174.5 ind/m^2 , and the yearly average biomass was 24.93 g/m^2 , showing noticeable temporal and spatial differences. The results of the water quality assessment showed that the water environment of Lake Luoma was in moderate pollution, and the dominant species tended to increase in oligochaete groups. The desertification at the bottom of Luoma Lake tends to be improved but tends to be eutrophic.

Key words: Shallow lake; Water quality evaluation; Community structure; Nutrient; Macroinvertebrates

城市化和工业的快速发展使得湖泊水环境受到严重威胁,水体富营养化成为湖泊水环境问题的焦点^[1-3]。骆马湖($34^{\circ}0' - 34^{\circ}14' \text{ N}$ 、 $118^{\circ}6' - 118^{\circ}16' \text{ E}$)位于江苏省北部,为宿迁、新沂两市共辖,地处徐连经济带中部,与连云港、徐州、淮阴等大中城市较近,交通便捷,区位优势明显^[4]。作为淮河流域第三大湖泊、江苏省第四大湖泊^[5],同时还是国家南水北调东线输水工程的主要调节湖泊之一^[4-5],其水环境质量对调水用水安全和生态健康具有重要影响。对骆马湖进行的水质监测和生物学评价的历史研究表明,20世纪以来骆马湖水环境变化较大^[6],尤其是近十年的人类活动对水环境存在较大干扰。

底栖动物影响着水生态系统中营养物质的分解与循环,对环境变化反应敏感^[7]。同时,底栖动物种类繁多,对水质污染的反应范围广,生活场所固定,生活周期长,能够反映较长一段时间内水体状况^[8]。并且底栖动物群落中不同物种对环境变化的敏感性差异较大,群落组成与结构往往受水质影响发生变化,因此被广泛应用于生物监测和水质评价。2014年以来,骆马湖经历了采砂、围网养殖、调水等影响,湖泊水环境与水生生态系统可能出现更多的不确定性^[9-12]。现利用2018年1—11月底栖动物和水质逐月监测数据,对骆马湖水环境状况进行分析,以期骆马湖生态环境保护与管理提供科学支撑。

1 研究方法

1.1 采样时间

2018年1—11月。

1.2 采样点位

根据骆马湖的形态、围网养殖、采砂和水生植被分布以及出湖入湖河流等情况共设置10个监测点位,分别为北部湖区5个点位(LM1、LM2、LM4、LM5、LM8),南部湖区5个点位(LM3、LM6、LM7、LM9、LM10),具体采样点位示意图见图1。

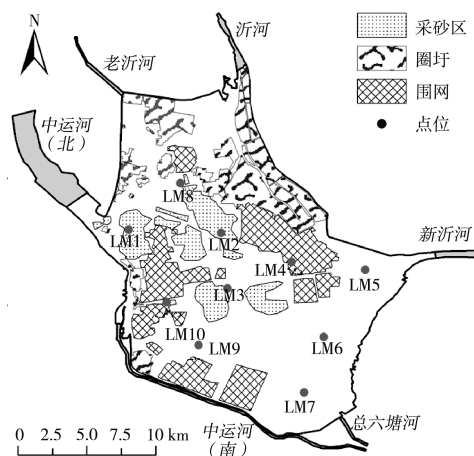


图1 骆马湖采样点位分布示意

1.3 样品采集、处理与分析

底栖动物样品采集用面积为 $1/20 \text{ m}^2$ 的改良彼得森采泥器,每个样点采集3次,采用网孔径为 0.45 mm 尼龙筛网进行洗涤,剩余物带回实验室进行分样。将洗净的样品置入白色盘中,加入清水,利用尖嘴镊、吸管、毛笔、放大镜等工具进行挑拣工作。挑拣出的各类动物,分别放入已装好固定液的 50 mL 塑料瓶中,直到采样点采集到的标本全部检完,标本投入7%福尔马林中固定。把每个采样点所采到的底栖动物按不同种类准确统计个体数,根据采样器的开口面积推算出 1 m^2 内的底栖动物数量,包括每种的数量和总数量,样品称重获得的结果换算为 1 m^2 面积上的生物量(g/m^2)。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^[13-15]。

水温、pH值、溶解氧(DO)和电导率(EC)等水质指标由6600 EDS型多参数水质监测仪(美国YSI公司)现场测定;水深和透明度分别利用SM-5A声呐测深仪(美国Speedtech公司)和SD20塞氏盘(中国普利特仪器公司)现场测定;总氮(TN)采用《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(GB 11894—89);总磷(TP)采用《水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89);高锰酸盐指

数(COD_{Mn})采用《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—89);氟离子(F^-)采用《水质 氟化物的测定》(GB 7484—1987);样品保存参考《水与废水监测分析方法》(第四版)^[16]。

1.4 数据处理与分析

采用相对重要性指数确定优势种,该指数的计算将每种生物的个体质量、密度及出现频率均考虑在内,能够较为全面地反映出每种生物在整个群落中的地位,其计算公式为:

$$I_{\text{IRI}} = (W_i + N_i) \times f_i \quad (1)$$

式中: I_{IRI} ——相对重要性指数; W_i ——物种 i 的生物量占各采样点大型底栖动物总生物量的百分比; N_i ——物种 i 的密度占各采样点总密度的百分比^[17]; f_i ——物种 i 在采样点出现的相对频率。

采用 Goodnight 指数 (GBI)、生物学污染指数 (BPI)、Shannon-Wiener 指数 (H') 几种生物指数评价骆马湖营养及污染状况。计算公式如下:

$$\text{GBI} = \frac{N_1}{N} \quad (2)$$

式中: N_1 ——寡毛类个体数,个; N ——样品中底栖动物总数^[18],个。

$$\text{BPI} = \frac{\log(N_1 + 2)}{\log(N_2 + 2) + \log(N_3 + 3)} \quad (3)$$

式中: N_1 ——寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数,个/ m^2 ; N_2 ——多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他的水生昆虫个体数,个/ m^2 ; N_3 ——软体动

物个体数,个/ m^2 。

$$H' = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N} \quad (4)$$

式中: n_i ——物种 i 的个体数目,个/ m^2 ; N ——群落中所有种的个体总数,个。

GBI 对应评价标准如下: $0.6 > \text{GBI}$, 为轻污染; $0.6 \leq \text{GBI} \leq 0.8$, 为中污染; $0.8 < \text{GBI} \leq 1.0$, 为重污染。

BPI 对应评价标准如下: $\text{BPI} < 0.1$, 为水质清洁; $0.1 \leq \text{BPI} < 0.5$, 为轻污染; $0.5 \leq \text{BPI} < 1.5$, 为 β -中污染; $1.5 \leq \text{BPI} \leq 5.0$, 为 α -中污染; $5.0 < \text{BPI}$, 为重污染。

H' 对应评价标准如下: $0 \leq H' < 1.0$, 为重污染; $1.0 \leq H' < 2.0$, 为中污染; $2.0 \leq H' \leq 3.0$, 为轻度污染; $3.0 < H'$, 为无污染。

2 结果与分析

2.1 骆马湖水体各理化指标变化特征

骆马湖水体各理化指标变化趋势见图 2(a)~(h)。由图 2 可见, $\rho(\text{TN})$ 呈现先下降再升高的趋势, 在 8 月达到最大值 4.96 mg/L , 其年均值为 2.31 mg/L 。 $\rho(\text{TP})$ 年均值为 0.05 mg/L , 呈先升高再下降趋势, 与 $\rho(\text{TN})$ 一样在 8 月到达最大值 0.15 mg/L 。 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 呈现逐渐升高后下降, 峰值出现时间与 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 一致, 最大值为 6.69 mg/L , 最小值为 3.15 mg/L 。 $\rho(\text{F}^-)$ 总体呈

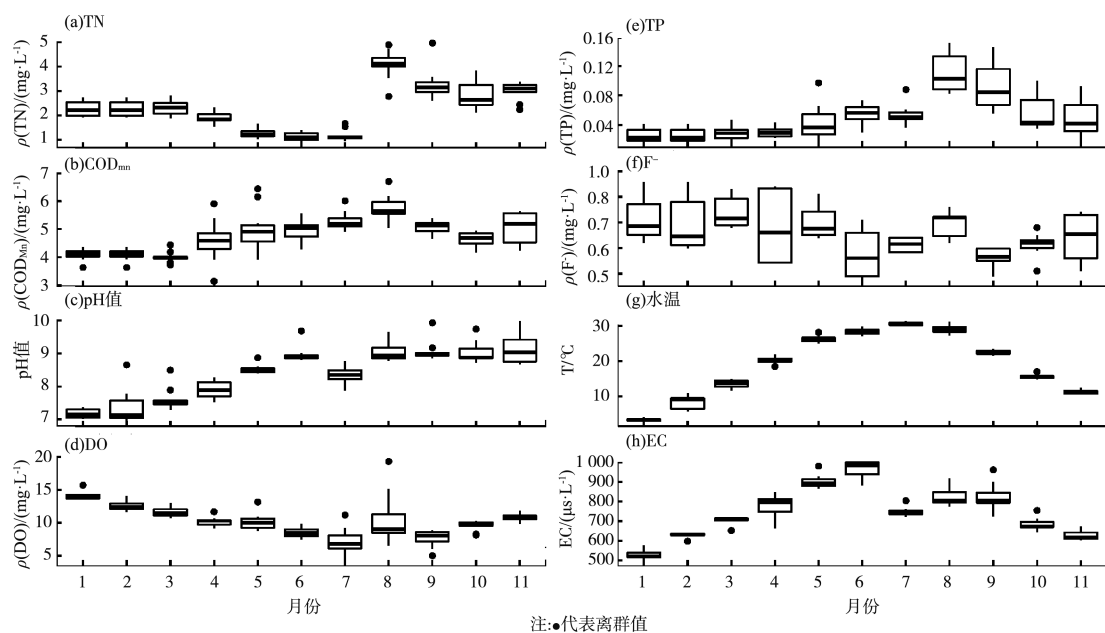


图2 2018年骆马湖水体各理化指标变化趋势

现下降趋势,最大值为 0.86 mg/L ,最小值为 0.47 mg/L ;与 $p(\text{F}^-)$ 相反, pH 值呈现升高趋势且年均值为 9.37 。水温与 EC 表现一致,均为先升高再下降趋势, $p(\text{DO})$ 与水温变化趋势相反。

2.2 底栖动物群落结构

2.2.1 底栖动物种类及优势种

研究期间共鉴定底栖动物 27 种,属 7 个纲。其中节肢动物种类最多(15 种),以昆虫纲种类占优,共 12 种,均为摇蚊幼虫,占总物种数的 48%,甲壳类 3 种,占比 12%;环节动物中寡毛纲 3 种,占比 12%,多毛纲和蛭纲各 2 种,均占比 8%;软体动物物种数为 5 种,包括腹足纲 3 种和双壳纲 2 种,分别占比 12% 和 8%。2018 年骆马湖底栖动物优势种密度、生物量及优势度见表 1。

表 1 2018 年骆马湖底栖动物优势种密度、生物量及优势度^①

纲	种类	密度/ (个· m^{-2})	相对 密度/ %	生物 量/($\text{g} \cdot$ m^{-2})	相对生 物量/ %	出现 频率/ %	I_{IRI}
寡毛纲	霍甫水丝蚓 (<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>)	41.64	23.77	0.103 9	0.42	66.4	1 605.1
	苏氏尾鳃蚓 (<i>Branchiura sowerbyi</i>)	12.00	6.85	0.212 4	0.85	44.5	343.1
昆虫纲	多巴小摇蚊 (<i>Microchironomus tabarui</i>)	19.52	11.14	0.009 1	0.04	40.0	447.1
	红裸须摇蚊 (<i>Procladius akamusi</i>)	52.17	29.78	0.707 9	2.84	50.0	1 631.2
	中国长足摇蚊 (<i>Tanytarsus chinensis</i>)	12.67	7.23	0.055 2	0.22	25.5	189.7
腹足纲	铜锈环棱螺 (<i>Bellamya aeruginosa</i>)	3.88	2.21	0.841 2	43.49	26.4	1 204.9
	纹沼螺 (<i>Parafossarulus striatulus</i>)	24.51	13.99	3.322 0	13.33	6.4	173.8

①相对密度和相对生物量分别为某一物种占总密度和总生物量的百分比;出现频率为某物种在所有样品的出现次数百分比。

由表 1 可见,骆马湖底栖动物密度和生物量被少数种类所主导。昆虫纲的红裸须摇蚊、多巴小摇蚊和中国长足摇蚊,寡毛纲的霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓,以及腹足纲的纹沼螺密度较高分别占总密度的 29.78%, 11.14%, 7.23%, 23.77%, 6.85% 和 13.99%。由于软体动物个体较大,铜锈环棱螺占据绝对优势,占总生物量的 43.49%。霍甫水丝蚓、红

裸须摇蚊、苏氏尾鳃蚓和多巴小摇蚊的出现频率最高,分别为 66.4%, 50.0%, 44.5% 和 40.0%,表明其在全湖广泛分布。研究期间出现频率低于 10% 的物种数有 20 种,占总物种数的 74%。综合底栖动物的密度、生物量以及各物种的出现率,利用 I_{IRI} 确定优势种类,结果表明骆马湖 2018 年的底栖动物优势种主要为红裸须摇蚊、霍甫水丝蚓、铜锈环棱螺、多巴小摇蚊、苏氏尾鳃蚓、中国长足摇蚊和纹沼螺。

2.2.2 底栖动物群落时空格局

骆马湖底栖动物年均生物量和密度空间分布格局见图 3(a)(b)。

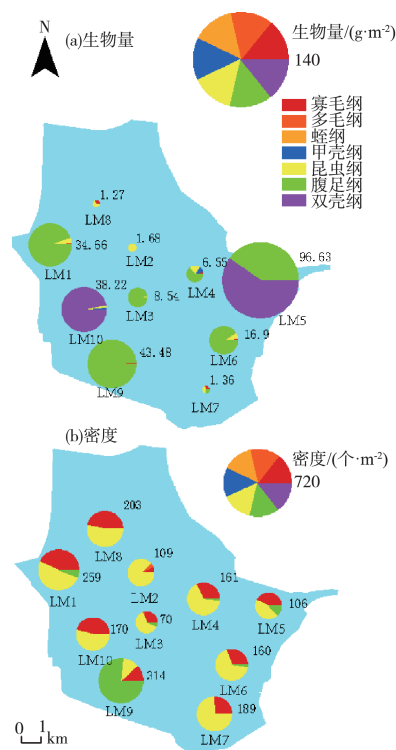


图 3 2018 年骆马湖底栖动物年均生物量和密度空间分布格局

由图 3(a)可见,调查期间各点位底栖动物生物量差异较大。年均底栖动物总生物量范围在 $1.27 \sim 96.63 \text{ g/m}^2$,年平均总生物量为 24.93 g/m^2 ,最高值出现在南湖区的新沂河附近水域(LM5),其次是西南水域(LM9),较低值出现在北部水域(LM8)、六塘河出湖水域(LM7)和北部采砂区(LM2),表现出明显的南北差异。

由图 3(b)可见,各点位底栖动物年均总密度范围为 $70.3 \sim 314.6 \text{ 个/m}^2$,密度平均值为 174.5 个/m^2 ,密度高值出现在西南水域水生植被

区(LM9点位),而湖心敞水区采砂区边缘(LM3点位)密度最低。此外除西南水域水生植被区(LM9点位)、运河沿岸带的采砂区边缘水域(LM1点位)和北部水域采砂区边缘(LM8点位)密度超出200个/ m^2 外,其他各点位密度均低于200个/ m^2 。

骆马湖底栖动物优势类群密度、生物量季节变化分别见图4(a)(b)(c)(d)和图5(a)(b)(c)(d)。由图4可见,2018年骆马湖底栖动物总密度在各季节间存在一定波动变化,冬季总密度明显高

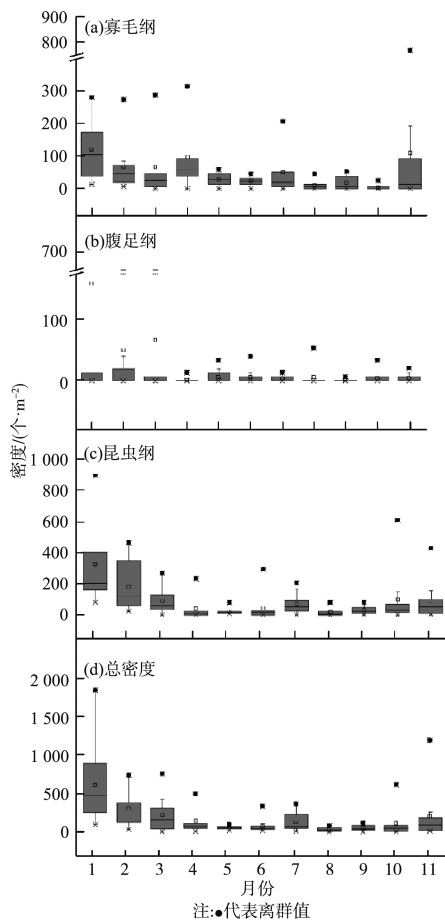


图4 2018年骆马湖底栖动物优势类群密度季节变化

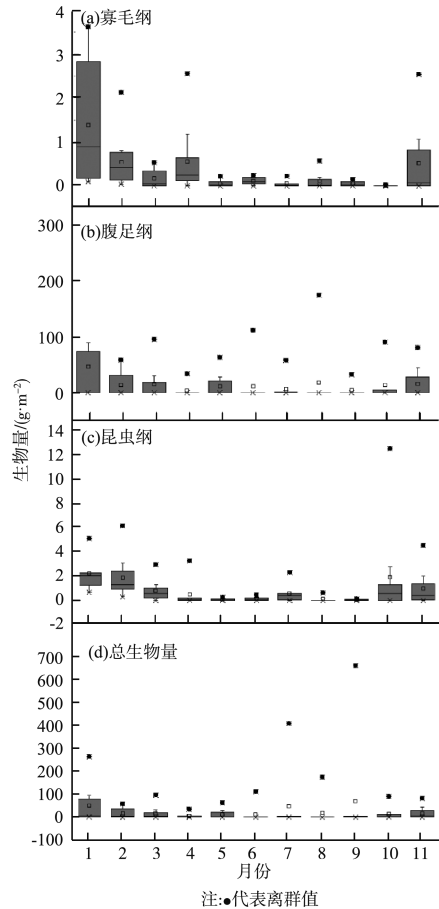


图5 2018年骆马湖底栖动物优势类群生物量季节变化

于其他季节;昆虫纲在冬季至初春(1—3月)密度较高,寡毛纲在11月和1—2月的密度略高于其他月份,腹足纲密度的季节变化趋势不明显。由图5可见,寡毛纲冬季生物量较高,昆虫纲的生物量和总生物量呈现类似的变化趋势。

2.3 水质生物学评价

基于2018年1—11月的底栖动物监测数据,计算各点位3种生物学指数得分,见图6(a)(b)(c)。

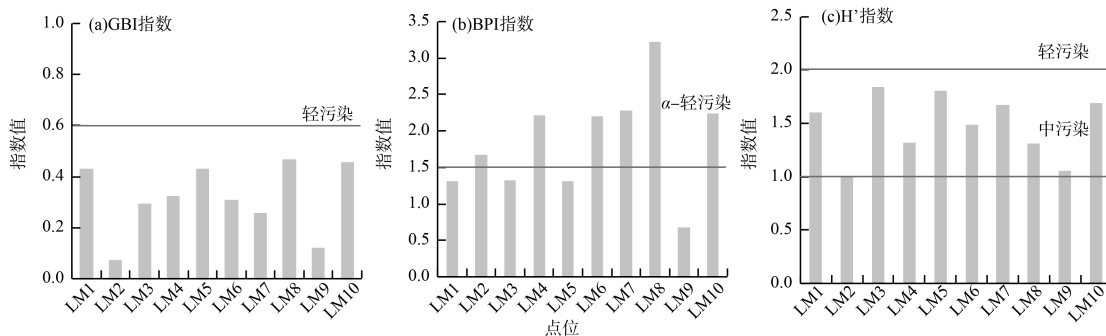


图6 骆马湖底栖动物水质生物学评价

由图6(a)可见,GBI指数在10个监测点位中得分介于0.07~0.47,平均值为0.31,最高值出现在LM8点位,但各点位得分均低于0.6,处于轻污染状态。由图6(b)可见,BPI指数得分介于0.67~3.22,平均值为1.84,得分最低出现在LM9点位,但各点位指数处于0.5~5.0,处于中污染状态。由图6(c)可见,H'指数最低值出现在LM2点位,但各点位得分处于1.0~2.0范围内,属于中污染状态。综合以上评价结果,表明骆马湖水体现阶段处于中污染状态。

3 讨论

3.1 骆马湖水体环境因子变化特征

骆马湖属于过水性湖泊,水质变化受上游来水的影响较大^[19]。湖体 $\rho(\text{TN})$ 年平均值从2014年的1.20 mg/L上升到2018年的2.32 mg/L,这说明骆马湖水体营养程度逐渐加深^[20]。历史研究表明,骆马湖水质数据可通过聚类划分为南北湖区,北部湖区氮磷浓度高于南部湖区,其原因与入湖污染物以及围网养殖等因素有关^[21]。2017年6月骆马湖开展围网拆除工作,而后自2017年7月起 $\rho(\text{TN})$ 变化幅度较大,2017和2018年的7—9月均明显升高且北部围网养殖湖区大于南部湖区^[22]。除了 $\rho(\text{TN})$ 外, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、pH值、 $\rho(\text{DO})$ 相比于2014年均产生明显变化, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 明显升高,这可能是围网内大量养殖残饵释放导致的结果,与淀山湖围网拆除后出现的水体TN、TP浓度增加的现象一致^[23]。 F^- 是骆马湖采砂活动的重要指标^[24],2015年骆马湖实行禁止湖区采砂政策后 $\rho(\text{F}^-)$ 大幅度下降,由2014年的0.88 mg/L显著下降到2016年的0.66 mg/L,随之pH值呈现下降趋势^[22]。本研究结果与上述结果一致。

3.2 基于底栖动物的水质评价

基于底栖动物的生物学评价表明,骆马湖水生态环境质量同苏南经济发达地区的太湖和溧湖相比,骆马湖寡毛纲密度较溧湖和太湖梅梁湾低,密度均值仅为54个/ m^2 ,而溧湖和太湖梅梁湾均值分别达到301和4 617个/ m^2 ^[25-26]。骆马湖GBI指数得分显著低于溧湖和太湖梅梁湾,BPI指数显著低于溧湖,H'指数则显著高于后2个湖泊^[26]。对比分析结果表明,骆马湖水质好于溧湖和太湖梅梁湾,这与水质监测结果一致^[25-26]。此外,与2014年监测结果相比,2018年骆马湖H'、GBI指

数、寡毛类密度和BPI指数有所上升^[20]。BPI指数和H'指数对骆马湖水质的评价结果均为中度污染,但GBI指数对骆马湖评价结果为轻度污染。3种生物学水质评价指数在部分点位存在不一致性,相比于2014年骆马湖底栖动物重度污染的监测结果,LM2点位H'指数明显上升,说明采砂带来的底质生境破坏现象有所好转^[20]。现今骆马湖虽然因采砂带来的影响有所缓解,但仍需加强外源污染物的管控力度。

对比各评价指数在骆马湖内的适用程度,相比于2014年,现今BPI指数或可用于骆马湖整体区域反映多年水生态变化趋势,但在局部区域不适用。计算BPI指数本质上是大型底栖动物按照:耐污种、中度耐污种和敏感种分类成3个水平,3个类群密度经过对数转换后,耐污种作为分子,中等耐污种和敏感种求和作为分母,求得的比值用来评价水质优劣,相对适用于水质有机污染评价^[27]。GBI指数仅关注寡毛类单类群物种密度和总体的比值,LM2点位位于北部主采砂区域,该区域全年未发现寡毛类,只发现了少量的摇蚊幼虫,因此评价结果数值偏低^[18]。早期研究表明,早年间采砂活动改变了底栖动物的生境,使颤蚓类难以生存,致使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如BPI和GBI指数^[20]。随着历史采砂区域生境的转好,底栖动物群落有所恢复但多为耐污物种,BPI可能仍具有评价功能,但GBI指数仅针对寡毛类评价并不全面,因此GBI指数在全湖内可能不适用。采砂区域的H'指数相比于2014年结果有所升高,主要是底质生境有所恢复的结果但其中多为耐污物种仍然需关注。

2018年骆马湖底栖动物总密度在各季节间存在一定波动变化,冬季总密度明显高于其他季节,该变化趋势主要是由昆虫纲密度的季节性变化所致。昆虫纲在1—3月密度较高,寡毛纲在11月和1—2月的密度略高于其他月份,这与该类群生活史周期有关^[14]。上述结果说明,底栖动物自身的生活史也会对水质生物学评价结果产生影响。另外调水引起的水文条件变化同样会引起底栖动物群落的改变,在区位相近的东平湖南和四湖结果表明调水带来的水文脉冲变化会通过水质、沉积物中的重金属和水深3个层面影响底栖动物群落结构^[28]。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,但同时随着采砂活动的禁止,相比2014年,骆马湖底栖环境正处于恢复阶段,部分水域水底“荒漠化”现象可能正在改善,但富营养化和污染水平正在提高,湖泊健康水平恶化趋势明显。对比作为南水北调东线工程重要的调蓄湖泊以及饮用水源地,防治湖泊富营养化和外源污染的相关工作仍需关注。

4 结论

(1)2018年骆马湖水体 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DO})$ 呈现先下降再升高的趋势; $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 在8月达到峰值, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈先升高后下降趋势; $\rho(\text{F}^-)$ 呈逐渐下降趋势,水温和电导率存在明显季节变化,pH值是呈逐渐升高趋势。

(2)2018年骆马湖底栖动物优势种为红裸须摇蚊、霍甫水丝蚓、铜锈环棱螺、多巴小摇蚊、苏氏尾鳃蚓、中国长足摇蚊和纹沼螺等耐污种。

(3)水质评价结果表明,骆马湖水体为中污染程度。建议制定湖泊管理政策时应考虑在此区域继续严格实行禁止采砂政策,并持续关注外源营养物质的输入。

致谢

感谢江苏省骆运水利工程管理处及陈业协助野外采样,薛静琛协助室内样品分析。

【参考文献】

- [1] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,25(3):589-595.
- [2] 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[J]. 湖泊科学,2002,14(3):193-202.
- [3] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(6):575-578.
- [4] 岳金隆,邢小燕,夏成亮. 宿迁市骆马湖岸线利用情况调查与思考[J]. 治淮,2016(3):25-26.
- [5] 刘涛,揣小明,陈小锋,等. 江苏省西部湖泊水环境演变过程与成因分析[J]. 环境科学研究,2011,24(9):995-1002.
- [6] 彭凯,李太民,刘利,等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学,2018,30(1):183-191.
- [7] MENCIO A, BOIX D. Response of macroinvertebrate communities to hydrological and hydrochemical alterations in Mediterranean streams[J]. Journal of Hydrology,2018,566:566-580.
- [8] 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[J]. 生态学报,2004,24(12):2768-2775.
- [9] 赵爱军. 骆马湖宿迁水域禁采遗留问题化解处置探索[J]. 中国水利,2018(14):31-33.
- [10] 高鸣远,刘俊杰. 南水北调工程江苏省受水区水环境保护与思考[J]. 治淮,2018(12):10-11.
- [11] 韩周洋. 宿迁市水污染防治工作成效、问题及建议[J]. 绿色科技,2018(2):46-48.
- [12] 张小明,李超,李倩. 骆马湖浮游藻类调查与水质评价[J]. 治淮,2016(1):29-30.
- [13] 刘月英. 中国经济动物志:淡水软体动物[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [14] MORSE J C, YANG L F, TIAN L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality[M]. Nanjing: Hohai University Press,1994.
- [15] 王俊才,王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京:中国言实出版社,2011.
- [16] 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[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] PIANKA E R. Ecology of the Agamid Lizard *Amphibolurus isolepis* in Western Australia[J]. Copeia,1971(3):527-536.
- [18] HERING D, MOOG O, SANDIN L, et al. Overview and application of the AQEM assessment system[J]. Hydrobiologia,2004,516(1):1-20.
- [19] 张志滨,王兰. 骆马湖水资源节约与保护面临的现状及对策[J]. 治淮,2016(11):47-48.
- [20] 邹伟,李太民,刘利,等. 苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. 湖泊科学,2017,29(5):1177-1187.
- [21] 胡婷婷,刘劲松,戴小琳,等. 骆马湖水水质时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(5):794-801.
- [22] 张庆吉,王业宇,王金东,等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子[J]. 环境科学,2020,41(4):1648-1656.
- [23] 薛俊增,蔡桢,方伟,等. 淀山湖养殖围网拆除后昆山水域浮游生物生态现状初步研究[J]. 上海海洋大学学报,2010,19(4):514-520.
- [24] 王飞,叶慎忠,朱泉. 骆马湖采砂作业对水体影响分析及对策思考[J]. 江苏水利,2015(7):36-37.
- [25] 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[J]. 湖泊科学,2015,27(5):840-852.
- [26] 王丽卿,吴亮,张瑞雷,等. 溧湖底栖动物群落的时空变化及水质生物学评价[J]. 生态学杂志,2012,31(8):1990-1996.
- [27] HILSENHOFF W L. A modification of the biotic index of organic stream pollution to remedy problems and permit its use throughout the year[J]. Great Lakes Entomologist,1998,31(1):1-12.
- [28] LI Q, WANG G, WANG H, et al. Macrozoobenthos variations in shallow connected lakes under the influence of intense hydrologic pulse changes[J]. Journal of Hydrology,2020,584:124755.