

连环湖两水体浮游动物群落结构特征及水质评价

陈 昕^{1,2,3}, 李 喆², 唐富江², 齐 妍², 高文燕^{1,2,3}, 鲁万桥²

(1.上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

2.中国水产科学研究院 黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070;

3.上海海洋大学 农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306)

摘要:开展浮游动物群落时空分布和环境因子等调查,评价鱼类饵料生物资源和水生态现状,为连环湖水生态环境保护和渔业资源可持续利用提供科学依据。2018年6月-2019年5月,在连环湖阿木塔与牙门喜湖区共设置8个采样点,进行为期1年的调查。共检出浮游动物75种,其中原生动物20种、轮虫21种、枝角类15种、桡足类19种;优势种16种,其中原生动物12种、轮虫和枝角类各1种、桡足类2种;浮游动物群落结构趋于小型化。浮游动物年均丰度为1 060个/L,年均生物量为2.93 mg/L,夏季平均丰度与生物量最大。Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数年均值分别为1.09、0.36和1.56,多样性因季节不同而有所变化,各样点间并不存在明显差异。相关性分析显示,水温和DO是影响连环湖两湖区浮游动物群落结构变化的决定性因子,pH是影响浮游动物种类、丰度的重要正相关因子,透明度为负相关因子。冗余分析(RDA)显示,TN、TLI和叶绿素a也是影响浮游动物群落结构的重要因素。水体理化指标和多样性指数的综合评价结果表明,连环湖阿木塔与牙门喜湖区水质状况整体为 α -中污型、轻度富营养水平。

关键词:连环湖;浮游动物;相关性分析;RDA分析;水质评价

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)06-0089-09

浮游动物是水生态系统的关键组成部分,既是鱼类的重要饵料,也有助于浮游植物、微生物结构的优化,促进水体物质循环、能量流通和资源补充等(郭坤等,2017)。北方盐碱湖泊具有冬季冰封的特点,浮游动物呈现明显的季节变化特征(汪星等,2015),同时也会表现出适应盐碱性水环境的群落结构特征(高文燕等,2019;赵文等,2001)。因浮游动物体积小、生命周期短、环境灵敏度高,其种类组成及分布与pH、温度、透明度等水环境因子密切相关,其优势种类以及物种多样性等也常被作为水体污染和营养状况的重要指标(吴利等,2017;张婷等,2014;Riera, et al., 2012)。

连环湖位于黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县境内,由18个湖区相连,总面积556.08 km²,是东北地区最大的碱水湖泊和重要渔业基地。无霜期155 d左右,年平均气温4℃,年平均日照2 853.3 h,

盛行西风,年均风速5.4 m/s。水位139 m,最大水深4.6 m,平均水深2.16 m(王苏民等,1998)。其中,阿木塔与牙门喜湖区面积分别约4 667和2 000 hm²,形成了以增殖大银鱼和鲮为主的渔业模式。近年来,随着连环湖流域周边农业开垦范围的扩大,农田面源污染逐渐增多,水质污染状况尚不明确。此外,关于连环湖浮游动物的研究较少,对阿木塔与牙门喜湖区浮游动物的研究尚未见报道。本文于2018年6月-2019年5月对这2个湖区的浮游动物群落时空分布和环境因子等开展调查分析,评价鱼类饵料生物资源和水生态现状,为水生态环境保护和渔业资源可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

根据连环湖自然环境状况与人类活动区域分布等特征,共设置8个采样点(图1)。其中,1号至5号采样地点位于阿木塔湖区,位置分别为(A1:46°34'9"N, 124°5'42"E; A2: 46°34'19"N, 124°4'50"E; A3: 46°34'51"N, 124°6'5"E; A4: 46°35'12"N, 124°3'8"E; A5: 46°35'34"N, 124°1'7"E),6号至8号采样地点位于牙门喜湖区,位置分别为(A6: 46°34'3"N, 124°1'3"E; A7:

收稿日期:2019-09-14

基金项目:中央级科研院所基本科研业务费项目(HSY201806M)。

作者简介:陈昕,1995年生,女,硕士研究生,研究方向为水生态学。E-mail:981521311@qq.com

通信作者:唐富江,1979年生,男,副研究员,研究方向为水生生物资源与生态。E-mail:rivery2008@163.com

46°32′38″N, 124°1′28″E; A8: 46°31′10″N, 124°1′15″E。采样时间为2018年6月(夏)、9月(秋)、12月(冬)和2019年4月(春)中下旬,采样工作均在当天上午进行。

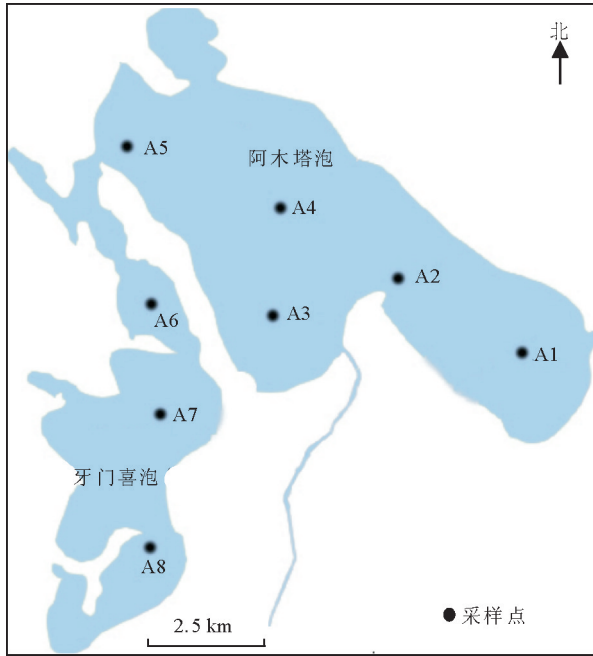


图1 连环湖两水体采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Lianhuan Lake

1.2 样品采集与处理

1.2.1 浮游动物采集与处理 浮游动物的定性、定量样品采集和处理按照《内陆水域渔业自然资源调查手册》(张觉民等,1991)进行。浮游动物定性样品:用25#浮游生物网于水面以下约0.5 m处反复作“∞”型拖曳约5~10 min,提出水面得到浓缩样,用4%甲醛溶液现场固定。小型及微型浮游动物定量样品:取表、底层混合水样1 L,当场用鲁哥氏液固定;大型浮游动物定量样品:用5 L采水器于各样点底、表层等量采水共10 L,用25#浮游生物网过滤取样,当即用波恩氏液固定。所有样品带回实验室镜检。浮游动物种类鉴定参考《原生动动物分类系统概论》(沈韞芬等,1999)、《中国淡水轮虫志》(王家辑,1961)、《中国动物志淡水枝角类》(蒋燮治等,1979)、《中国动物志淡水桡足类》(中国科学院动物研究所甲壳动物研究组,1979)。

1.2.2 水质样品的采集及测定 用便携式pH计、温度计及塞氏盘现场测定各采样点水体pH、温度(Wt)、透明度(SD),用多参数水质分析仪YSI(650MDS, USA)测定叶绿素a(chl-a)、溶解氧(DO)。用5L采水器在每个点采集水样各500 mL,加硫酸固定使pH约为2,带回实验室;用连续流动

分析仪(AA3, DE)测定总氮(TN)、总磷(TP)。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 优势度 浮游动物优势度计算公式:

$$Y = (N_i / N) \cdot f_i \quad (1)$$

式中, N_i 是第*i*种的个体数, N 是全部种数, f_i 是第*i*种发生频率。

当 $Y \geq 0.02$ 时为优势种(Mcnaughton,1967)。

1.3.2 多样性 浮游动物的多样性评价采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)。计算公式:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i \quad (2)$$

公式中 P_i 为物种*i*个体数所占的比例。

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$J = H / \log_2^S \quad (4)$$

式②~④中, n_i 代表第*i*种的个体总数, N 表示所有种类总个体数, S 表示总种类数。

以多样性指数评估水质的标准是:

H' : 0~1为多污型,1~2为 α -中污型,2~3为 β -中污型,>3为清洁-寡污型;

D : 0~1为多污型,1~2为 α -中污型,2~3为 β -中污型,3~4为寡污型,>4为清洁型;

J : 0~0.3为多污型,0.3~0.5为中污型,0.5~0.8为寡污型,0.8~1.0为清洁型。

1.3.3 综合营养状态指数 依据中国环境监测总站发布的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》,利用综合营养状态指数法对该湖生态系统的健康情况给予评估。综合营养状态指数计算公式:

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j TLI(j) \quad (5)$$

式中, W_j 是第*j*种参数的营养状态指数的相关权重,其中 $W_{Chl-a} = 1$ 、 $W_{TP} = 0.84$ 、 $W_{TN} = 0.82$ 、 $W_{SD} = -0.83$; $TLI(j)$ 是第*j*种参数的营养状态指数,其中 $TLI(Chl-a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl-a)$ 、 $TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$ 、 $TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$ 、 $TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD)$ 。

综合营养状态指数评价标准: $TLI(\Sigma) < 30$, 贫营养(Oligotropher); $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$, 中营养(Mesotropher); $TLI(\Sigma) > 50$, 富营养(Eutropher); $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ 轻度富营养(light eutropher); $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$, 中度富营养(Middle eutropher); $TLI(\Sigma) > 70$, 重度富营养(Hyper eutropher)。

1.3.4 浮游动物丰度指标评价 浮游动物丰度是

对湖泊营养度进行评估的一个指标, 其中 $< 1\ 000$ 个/L 为贫营养, $1\ 000 \sim 3\ 000$ 个/L 为中营养, $> 3\ 000$ 个/L 为富营养(张觉民等, 1991)。

1.3.5 相关性分析 选取浮游动物种类、丰度及生物量 3 个浮游动物群落结构指标及 pH、水温、DO、叶绿素 a、TP、TN、TLI 和透明度 8 个理化指标, 用 SPSS19.0 软件对浮游动物与环境因子进行 Spearman 相关性分析。

1.3.6 冗余分析(RDA) 选择密度至少在一个样点中的占比 $\geq 1\%$ 且在 8 个样点中出现频度 $\geq 30\%$ 的浮游动物作为排序物种, 运用 Canoco 5.0 软件对浮游动物与环境因子进行 RDA 分析。在进行 RDA 分析之前, 先进行降维对应分析(DCA), 当 DCA 分析结果中排序轴梯度最大值小于 3 时选择 RDA 对浮游动物与环境因子间的关系作进一步分析。

2 结果与分析

2.1 浮游动物群落结构

2.1.1 种类组成及优势种 连环湖阿木塔与牙门喜湖区浮游动物共鉴定出 75 种, 种类组成相对平均。其中, 原生动物 20 种, 占总种类数的 28.6%; 轮

虫 21 种, 占 30.0%; 枝角类 15 种, 占 21.4%; 桡足类 19 种, 占 27.1%。从季节变化看, 夏季种类数最多, 高达 40 种; 秋季次之, 为 38 种; 春冬季节较少, 分别为 24 和 21 种。优势种共 16 种(表 1); 以原生动物为主, 共计 12 种, 分别为瓶累枝虫(*Epistylis urceolata*)、球形砂壳虫(*D.globulosa*)、砂壳虫(*Difflugia* sp.)、叶绿尖尾虫(*Oxyrrhis marina*)、长圆砂壳虫(*Difflugia oblonga* Ehrenberg)、锥形似铃壳虫(*Tintinnopsis conicus* Chiang)、中华似铃壳虫(*Tintinnopsis sinensis* Stein)、线条三足虫(*Trinema lineare*)、滚动焰毛虫(*Askenasia volvox*)、刺胞虫(*Acanthocystis* sp.)、侠盗虫(*Strobilidium* sp.) 和淡水筒壳虫(*Tintinnidium fluviatile*); 其次为桡足类, 共 2 种, 分别为无节幼体(Nauplii)、剑水蚤(Cyclopidae); 轮虫和枝角类各 1 种, 分别为针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*) 和长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)。春季优势种为 6 种, 以原生动物、轮虫和桡足类为主; 夏季优势种为 6 种, 以原生动物为主; 秋季优势种为 6 种, 以原生动物、枝角类和桡足类为主; 冬季优势种仅为线条三足虫、滚动焰毛虫和侠盗虫 3 种原生动物。

表 1 连环湖浮游动物优势种及优势度季节变化

Tab.1 Seasonal variation of dominant zooplankton species and their degree of dominance in Lianhuan Lake

优势种	优势度			
	春	夏	秋	冬
原生动物 Protozoa				
瓶累枝虫 <i>Epistylis urceolata</i>	-	0.31	0.03	-
球形砂壳虫 <i>D.globulosa</i>	-	0.18	0.05	-
砂壳虫 <i>Difflugia</i> sp.	-	0.04	-	-
叶绿尖尾虫 <i>Oxyrrhis marina</i>	-	0.03	-	-
长圆砂壳虫 <i>Difflugia oblonga</i> Ehrenberg	-	0.03	-	-
锥形似铃壳虫 <i>Tintinnopsis conicus</i> Chiang	-	0.03	-	-
中华似铃壳虫 <i>Tintinnopsis sinensis</i> Stein	-	-	0.02	-
线条三足虫 <i>Trinema lineare</i>	-	-	-	0.03
滚动焰毛虫 <i>Askenasia volvox</i>	-	-	-	0.04
刺胞虫 <i>Acanthocystis</i> sp.	0.02	-	-	-
侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.	0.25	-	0.19	0.14
淡水筒壳虫 <i>Tintinnidium fluviatile</i>	0.02	-	-	-
轮虫 Rotifera				
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.08	-	-	-
枝角类 Cladocera				
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	-	-	0.02	-
桡足类 Copepoda				
无节幼体 Nauplii	0.05	-	0.06	-
剑水蚤 Cyclopidae	0.03	-	-	-

2.1.2 丰度及生物量 连环湖阿木塔与牙门喜湖区浮游动物年均丰度是 1 060 个/L, 变化范围 355 ~ 2 195 个/L, 由此得出该湖为中营养状态。其中, 原生动物丰度最高, 为 940.4 个/L, 占比达 89.25%;

桡足类次之, 为 49.5 个/L, 占 4.67%; 轮虫 38.3 个/L, 占 3.62%; 枝角类 26.1 个/L, 占 2.47%。年均生物量为 2.930 mg/L, 变化范围 0.373 ~ 4.690 mg/L。其中, 枝角类、桡足类生物量最高, 分

别为 1.30、1.57 mg/L, 分别占 44.52%、53.74%。原生动物、轮虫的生物量分别为 0.026、0.024 mg/L, 分别占 0.91%、0.82%。

夏季平均生物量最高, 为 4.690 mg/L; 春季次之, 为 3.669 mg/L; 秋季、冬季分别为 2.988、0.374 mg/L, 存在明显的季节差异 ($P < 0.05$)。夏季平均丰度最高, 为 2 195 个/L; 春季次之, 为 1 037 个/L; 秋季、冬季分别为 655、355 个/L, 季节差异显著 ($P < 0.05$), 季节变化趋势与生物量一致 (图 2)。各样点的年平均生物量范围是 1.621 ~ 4.489 mg/L, 其中样点 A7 生物量最高, 样点 A6 生物量最低; 各样点的年平均丰度范围为 450.75 ~ 1 812.75 个/L, 其中样点 A1 的丰度最高, 样点 A4 的丰度最低 (图 3)。

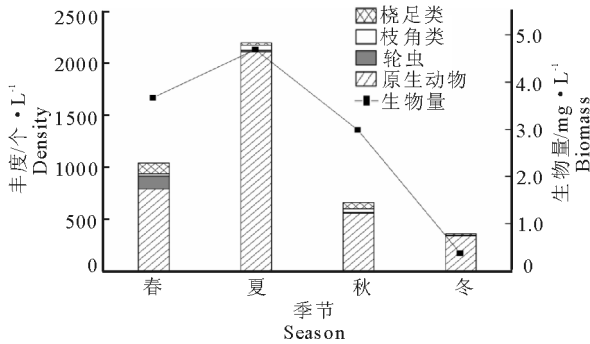


图 2 浮游动物平均丰度、生物量季节变化

Fig.2 Seasonal variation of average zooplankton density and biomass

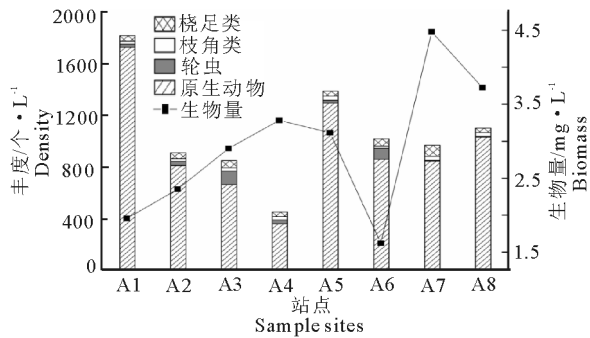


图 3 浮游动物年均丰度、生物量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average zooplankton density and biomass

2.2 多样性指数及水质评价

各样点 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 年均值, A8 样点最高, A4 样点最低, 差异不显著 ($F = 0.872, P = 0.386$); 各样点 Pielou 均匀度指数 (J) 年均值, A8 样点最高, A1 样点最低, 差异不显著 ($F = 0.874, P = 0.254$); 各样点 Margalef 丰富度指数

(D) 年均值, A2 样点最高, A6 样点最低, 差异不显著 ($F = 0.723, P = 0.428$) (图 4)。

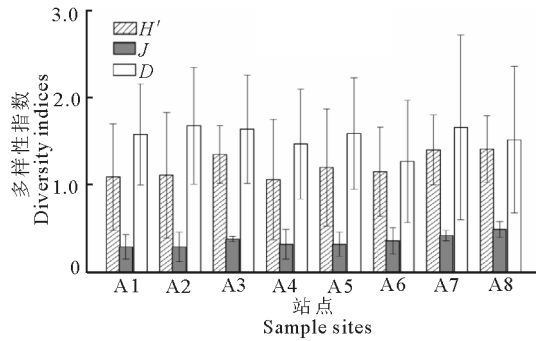


图 4 浮游动物多样性指数的空间分布

Fig.4 Spatial distributions of zooplankton diversity indices

Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 年均值为 1.09, 变化范围 0.18 ~ 1.92; 最大值出现在样点 A4 的秋季, 最小值出现在样点 A2 的冬季, 秋季 (1.60) > 夏季 (1.47) > 春季 (1.31) > 冬季 (0.50)。Pielou 均匀度指数 (J) 年均值为 0.36, 变化范围 0.07 ~ 0.60; 最大值出现在样点 A8 的冬季, 最小值出现在样点 A2 的冬季, 春季 (0.42) > 秋季 (0.41) > 夏季 (0.38) > 冬季 (0.23)。Margalef 丰富度指数 (D) 年均值为 1.56, 变化范围 0.62 ~ 2.65; 最大值出现在样点 A7 的秋季, 最小值出现在样点 A7 的冬季, 秋季 (2.31) > 夏季 (1.85) > 春季 (1.34) > 冬季 (0.75) (图 5)。根据多样性指数评价法, 连环湖阿木塔与牙门喜湖区水质状况春夏季为 α -中污型, 秋季为 β -中污型, 冬季为多污型, 总体而言属于 α -中污型。

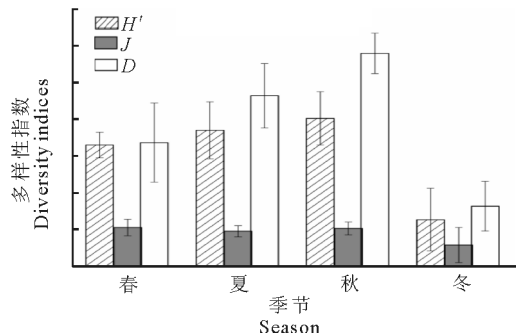


图 5 浮游动物多样性指数的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of zooplankton diversity indices

2.3 环境因子分析及水质评价

阿木塔湖与牙门喜湖水体环境因子指标见表 2。两湖均为碱性水体, 总氮、总磷超出《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002) 中 III 类标准。

表 2 阿木塔湖与牙门喜湖水体环境因子指标

Tab.2 Physiochemical parameters of water in Lianhuan Lake

季节	pH	水温/ °C	透明度/ cm	溶氧/ mg · L ⁻¹	叶绿素 a/ μg · L ⁻¹	总磷/ mg · L ⁻¹	总氮/ mg · L ⁻¹
春	8.18±0.32	10.88±0.54	82.00±27.88	9.42±1.29	3.54±2.75	0.04±0.02	2.14±0.31
夏	8.09±0.07	23.96±0.91	50.13±8.06	10.89±0.54	13.76±2.00	0.04±0.03	0.88±0.14
秋	8.49±0.08	17.59±0.55	25.34±2.53	10.79±0.58	11.70±1.28	0.13±0.01	1.55±0.26
冬	6.98±0.24	2.55±0.65	167.50±54.72	5.01±1.15	2.61±0.90	0.07±0.02	0.81±0.22
年平均	7.93±0.61	13.74±8.10	81.24±62.00	9.03±2.59	7.90±5.28	0.07±0.04	1.34±0.60

各样点营养状态指数全年变化范围为 37.1~63.3(图 6), 年均值为 51.3。

不同季节水体营养状况存在差异。秋季水体较差, 为中度富营养; 春季和夏季为轻度富营养; 冬季为中营养。全湖全年属于轻度富营养状态; 从空间上看, 各样点年均 TLI 差异不大, 多属于轻度富营养状态。

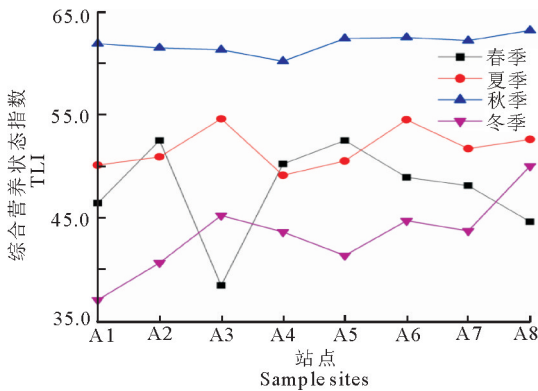


图 6 各样点综合营养状态指数季节变化

Fig.6 Seasonal variation of the comprehensive trophic level index (TLI) at each sampling site

2.4 浮游动物与环境因子的关系

2.4.1 相关性分析 浮游动物种类数、浮游动物的丰度及浮游动物的生物量与环境因子的 Spearman 相关性分析见表 3。浮游动物种类与 pH、水温、DO、叶绿素 a 及 TLI 呈显著正相关 ($P < 0.01$), 与透明度呈显著负相关 ($P < 0.01$); 浮游动物丰度与 pH、水温、DO、叶绿素 a 及 TLI 呈显著正相关

($P < 0.01$), 与透明度呈显著负相关 ($P < 0.05$); 浮游动物生物量与水温、DO 及叶绿素 a 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 TP 呈显著负相关 ($P < 0.01$)。整体来看, 水温和 DO 是影响浮游动物种类、丰度及生物量变化的主要环境因子, 起决定性作用。

2.4.2 RDA 分析 选择阿木塔湖与牙门喜湖 14 种浮游动物与环境因子进行冗余分析, 代码见表 4, 统计信息见表 5。前面 2 轴特征值是 0.6704 和 0.0985, 共解释了浮游动物群落变异程度的 76.62%, 物种与环境因子关联系数都达到 1, 反映排序可较好地表现出浮游动物与环境因子间的关系。

表 3 浮游动物与环境因子相关系数

Tab.3 Correlation coefficients of zooplankton species, density and biomass with environmental factors

环境因子	浮游动物种类	浮游动物丰度	浮游动物生物量
pH	0.698 **	0.551 **	0.248
水温	0.739 **	0.595 **	0.591 **
透明度	-0.698 **	-0.435 *	-0.227
DO	0.679 **	0.64 **	0.492 **
叶绿素 a	0.649 **	0.469 **	0.394 *
TP	0.191	-0.111	-0.373 **
TN	0.144	0.259	-0.057
TLI	0.742 **	0.499 **	0.205

注: * 表示相关性达到显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

Note: * denotes a significant correlation ($P < 0.05$); ** denotes an extremely significant correlation ($P < 0.01$).

表 4 RDA 分析的浮游动物代码

Tab.4 Zooplankton species codes used for redundancy analysis (RDA)

代码	种类	代码	种类
S1	瓶累枝虫 <i>Epistylis urceolata</i>	S8	狭盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.
S2	球形砂壳虫 <i>D.globulosa</i>	S9	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>
S3	砂壳虫 <i>Diffflugia</i> sp.	S10	长额象鼻溇 <i>Bosmina longirostris</i>
S4	叶绿尖尾虫 <i>Oxyrrhis marina</i>	S11	无节幼体 Nauplii
S5	长圆砂壳虫 <i>Diffflugia oblonga</i> Ehrenberg	S12	剑水蚤 Cyclopidae
S6	锥形似铃壳虫 <i>Tintinnopsis conicus</i> Chiang	S13	小栉溇 <i>Daphnia cristata</i> Sars
S7	中华似铃壳虫 <i>Tintinnopsis sinensis</i> Stein	S14	脆弱象鼻溇 <i>Bosmina fatalis</i>

表5 浮游动物种类和环境因子间 RDA 分析的统计信息

Tab.5 Statistics for the axes of RDA of zooplankton and environmental factors

指标	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.6704	0.0985	0.0218	0.0055
解释群落变异程度(累积)/%	67.04	76.62	78.80	79.35
相关系数	0.8838	0.9967	0.7839	0.8210

RDA 排序图见图 7。排序轴 1 和 TN 之间存在最大正相关性,相关系数为 0.3417;与叶绿素 a 存在最大负相关性,相关系数是 -0.8907;与 TLI、DO 相关系数分别为 -0.8534 和 -0.8467。排序轴 2 和 TN 之间存在最大正相关性,相关系数是 0.7516;与 DO 存在最大负相关性,相关系数为 -0.6014。TN、DO、TLI 和叶绿素 a 为影响连环湖阿木塔湖与牙门喜湖浮游动物群落的主要因素。

RDA 排序图不仅可全面阐述物种和环境因子间的关系,还能反映各个物种在生活习性上的差异。球形砂壳虫和小栉溞、砂壳虫和狭盗虫、无节幼体和剑水蚤在排序图中位置比较接近,表明它们对生态环境的适应能力接近;而砂壳虫和长圆砂壳虫虽都为砂壳虫属,但是两者在排序图位置较远,即二者对生态环境的依赖差异较大。

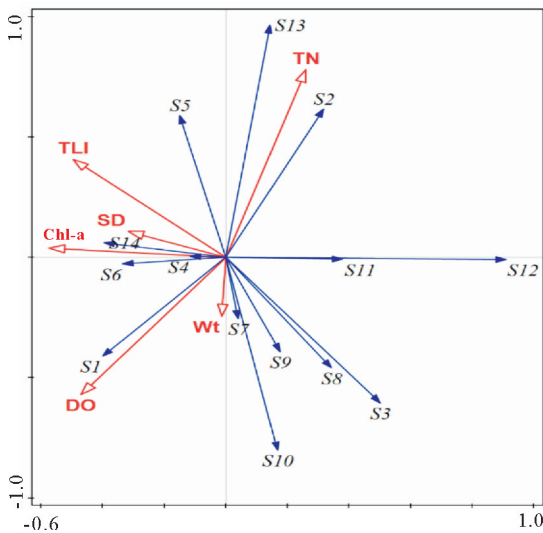


图7 阿木塔湖与牙门喜湖浮游动物与环境因子的 RDA 分析排序

Fig.7 RDA ordination of zooplankton and environmental factors in Lianhuan Lake

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构特征及影响因素

阿木塔湖与牙门喜湖浮游动物种类、丰度、生物量在季节上存在差异,呈现出夏秋季节高、春冬季节

低的特点,这与水温的季节性变化有关;温度越高,水中食物资源及生存环境越有利于浮游动物的大量繁殖,所以夏季较其他季节浮游动物的种类最多、丰度最大、生物量最高,这与鞠永富等(2017)在松花江哈尔滨段调研的结果一致。浮游动物种类组成中,原生动物种类最多、丰度最高,但个体小,所以生物量所占比例较低。轮虫优势种针簇多肢轮虫为典型的咸水环境生存物种,广泛分布于内陆盐碱水体中(李宽意等,2002),表明了连环湖两水体的浮游动物群落结构特征与其水质呈盐碱性有一定关系(Barnes et al,2014)。全年枝角类均较小,主要以长额象鼻溞等为主,这可能是由于大银鱼主要以大型枝角类为食(刘健,2001),湖区大银鱼的连年高产减少了大型枝角类的现存量。桡足类优势种以无节幼体和剑水蚤为主;剑水蚤广泛存在盐碱水域中而无节幼体是以滤食细菌为食,所以细菌的资源量是影响无节幼体生物量的重要因素(马少博等,2016;李共国等,2017)。此外,研究表明无节幼体冬季生物量明显低于春夏秋,主要是因为春夏秋季节气温较高,有利于细菌的生长繁殖,为无节幼体提供了较为丰富的食物来源。各采样点浮游动物的种类、丰度、生物量均无显著差异,说明相关生态环境和渔业放养对相对独立的两湖区的影响基本一致。

浮游动物的群落结构是环境因子综合作用的结果,水温、溶氧、透明度和 pH 是影响浮游动物群落的直接因子(林海等,2019;蔡阳等,2019)。N、P 等营养盐类可通过影响浮游植物生物量而间接影响浮游动物(Rich et al,2013;李喆等,2014)。叶绿素 a 可通过影响以浮游植物为食的浮游动物的摄食,进而影响浮游动物的群落结构(徐晓群等,2013)。碱性水体的 pH 会对浮游动物群落结构产生明显影响,这可能是酸碱度的微变导致一些敏感型浮游动物的消失或出现造成的(王晓明等,2007)。正如本研究结果所示,连环湖阿木塔与牙门喜湖区浮游动物与 pH、水温、DO、叶绿素 a、TLI、透明度相关关系显著,而水温是影响浮游动物群落结构变化的决定性因子,这可能与连环湖地处北温带、属寒冷性湖泊、季节以及昼夜温差较大有关。许多研究均表明水温是影响浮游动物群落结构变动的关键性因子(Nelson,2014;吴利等,2011;林青等,2014;代培等,2019),这与本研究结果一致。相关性分析表明 DO 是影响浮游动物群落结构变化的另一个决定性因子,这与王松、杜明敏等人的调查结果一致(王松等,2018;杜明敏等,2013)。大多数浮游动物与水温、

pH、TN、DO、叶绿素 a 及 TLI 呈显著正相关; 与透明度呈显著负相关, 即水体透明度越高, 浮游动物越少, 这与相关研究结果(邱小琮等, 2012; 高文燕等, 2019)一致。

阿木塔与牙门喜湖区浮游动物优势种中除剑水蚤为中型浮游动物外, 其他均为小型浮游动物, 浮游动物群落结构整体有小型化的趋势。已有研究表明, 浮游动物群落结构小型化可能与水体富营养化有关(张才学等, 2011)。水体富营养化和营养盐结构的改变使水域浮游植物群落构成趋于小型化(Scherer, 2012; Park et al, 2015)并通过食物链的传递效应, 进一步引起摄食者浮游动物的小型化(龚玉艳等, 2015)。因此, 轻度富营养化可能是引起连环湖阿木塔与牙门喜湖区浮游动物趋于小型化的一个重要因素。

3.2 水质总体评价

TLI 数值显示连环湖阿木塔与牙门喜湖区为轻度富营养水平, 浮游动物丰度显示为中营养水平, 2 种方法评价的结果基本一致, 存在轻微差异推测是由于湖区鱼类的过度放养导致了浮游动物的现存量偏低。因此, 应进一步优化连环湖阿木塔与牙门喜湖区鱼类放养结构和模式。生物多样性指数评价连环湖阿木塔与牙门喜湖区的水污染程度在不同季节存在差异, 冬季为多污染型, 春夏为 α -中污型, 秋季为 β -中污型, 秋季水体的污染状况较其他 3 季水体的污染程度要轻, 总体而言连环湖阿木塔与牙门喜湖区水质整体为 α -中污型。

综合水体理化指标与浮游动物多样性指数的评价结果, 连环湖阿木塔与牙门喜湖区目前水质状况为 α -中污型、轻度富营养。近年来, 连环湖周边农业开垦范围逐渐扩大, 农田面源污染普遍存在; 春夏季是农业生产活动频繁和雨量较多的季节, 流入湖中的污染物质也较秋季高; 冬季是冰封季节和枯水期, 污染物质在水中浓缩使得污染状况加剧。为防止湖区水质的进一步恶化, 应坚持农业合理开垦原则, 禁止违规开垦, 注重水生态环境保护。同时, 需要进一步采取净水生态渔业技术, 有效掌控氮、磷收支, 降低水体富营养化风险。

参考文献

蔡阳, 陆欣鑫, 巴秋爽, 等, 2019. 镜泊湖春、夏两季浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 50(1): 120-132.

代培, 刘凯, 周彦锋, 等, 2019. 太湖五里湖湖滨带浮游动物群

落结构特征[J]. 水生态学杂志, 40(1): 57-65.

杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等, 2013. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 33(17): 5407-5418.

高文燕, 李培伦, 李喆, 等, 2019. 小龙虎泡浮游动物组成与环境因子相关性分析[J]. 水产科学, 38(6): 840-845.

龚玉艳, 张才学, 陈作志, 等, 2015. 湛江湾浮游动物群落结构特征及其周年变化[J]. 海洋科学, 39(12): 46-55.

郭坤, 彭婷, 罗静波, 等, 2017. 长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 48(1): 40-49.

鞠永富, 于洪贤, 于婷, 等, 2017. 松花江哈尔滨段浮游动物群落结构特征与水质评价[J]. 湖泊科学, 29(3): 646-653.

马少博, 朱津永, 陆开宏, 等, 2016. 铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)对藻华水体中浮游动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 35(7): 1872-1878.

李共国, 史红伟, 徐智焕, 2017. 象山港电厂温排水影响夏季河口桡足类群落结构的通径分析[J]. 海洋环境科学, 36(5): 706-711.

李宽意, 刘正文, 高光, 2002. 低洼盐碱地鱼虾混养塘中的浮游生物[J]. 湖泊科学, 14(4): 369-373.

李喆, 霍堂斌, 唐富江, 等, 2014. 松花江哈尔滨段冰下浮游生物群落结构与环境因子的相关分析[J]. 水产学杂志, (6): 44-50.

林海, 王源, 李冰, 2019. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态学报, 39(20): 2-8.

林青, 由文辉, 徐凤洁, 等, 2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 34(23): 6918-6929.

刘键, 2001. 水库移植大银鱼试验[J]. 淡水渔业, 31(1): 24-25.

邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪, 2012. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J]. 生态学杂志, 31(4): 118-123.

汪星, 刘录三, 李黎, 等, 2015. 镜泊湖浮游动物组成及其与环境因子的相关分析[J]. 中国科技成果, 33(16): 22-27.

王松, 陈红, 刘清, 等, 2018. 汉城湖浮游动物群落结构特征及与水质关系[J]. 生态科学, 134(2): 116-125.

王苏民, 窦鸿身, 1998. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社.

王晓明, 宋晓梅, 2007. 淮南市高塘湖浮游动物与水环境因子的相关性研究[J]. 北京教育学院学报(自然科学版), 2(5): 19-23.

吴利, 冯伟松, 张堂林, 等, 2011. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 23(4): 619-625.

吴利, 周明辉, 沈章军, 等, 2017. 巢湖及其支流浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 动物学杂志, 52(5): 792-811.

徐晓群, 曾江宁, 陈全震, 等, 2013. 浙江三门湾浮游动物优势种空间生态位[J]. 应用生态学报, 24(3): 818-824.

张才学, 龚玉艳, 王学锋, 等, 2011. 湛江港湾浮游桡足类群落

- 结构的季节变化和影响因素[J].生态学报,31(23):7086-7096.
- 张觉民,何志辉,1991.内陆水域渔业自然资源调查手册[M].农业出版社.
- 赵文,董双林,张兆琪,2001.盐碱池塘浮游动物的群落演替和多样性[J].湖泊科学,14(2):159-165.
- 张婷,马行厚,王桂苹,等,2014.鄱阳湖国家级自然保护区浮游生物群落结构及空间分布[J].水生生物学报,38(1):158-165.
- Barnes B, Wurtsbaugh W, 2014. The effects of changing salinity on communities of the Great Salt Lake: A mesocosm experiment and implication for management[J]. Landscape Limnology.
- Mcnaughton, 1967. Relationships among functional properties of californian grassland[J]. Nature, 216(5111): 168-169.
- Nelson J L, 2014. The influence of freshwater inflow on the abundance, distribution and community structure of decapod zooplankton in a Southwest Florida estuary[J]. Dissertations & Theses-Gradworks.
- Park M O, Lee Y C, Yang E J, et al, 2015. Taxonomic variability of phytoplankton and relationship with production of CDOM in the polynya of the Amundsen Sea, Antarctica[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 123:30-41.
- Rich W, Hamilton, David P, 2013. Nutrients and eutrophication: introduction [J]. Marine and Freshwater Research, 64(5):3-6.
- Riera R, Sanchez-Jerez P, Myriam Rodríguez, et al, 2012. Long-term monitoring of fish farms: Application of Nematode/Copepod index to oligotrophic conditions[J]. Marine Pollution Bulletin, 64(4):844-850.
- Scherer C, 2012. Developing and testing an index of change in microplankton community structure in temperate shelf seas[J]. Edinburgh Napier University.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Lianhuan Lake

CHEN Xin^{1,2,3}, LI Zhe², TANG Fu-jiang², QI Yan², GAO Wen-yan^{1,2,3}, LU Wan-qiao²

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China;

2. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, P.R. China;

3. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China)

Abstract: Lianhuan Lake is located in Daqing City, Heilongjiang Province and consisted of 18 connected lakes with a total area of 556.08 km², the largest alkaline lake and primary fishery of northeast China. In this study, we explored the spatiotemporal distribution of the zooplankton community and analyzed its relationship with environmental factors in Lianhuan Lake. The objectives were to evaluate the food organism resources of fish, the status of hydroecology, and provide scientific evidence for conserving the aquatic ecology and sustainably developing fishery resources. From June 2018 to May 2019, a seasonal investigation of zooplankton was carried out at eight sampling sites in Amuta and Yamenxi Lakes and included measurement of environmental factors, including pH, water temperature (WT), transparency (SD), chlorophyll a (Chl-a), dissolved oxygen (DO), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). A total of 75 zooplankton species were identified, including 20 protozoans, 21 rotifers, 15 cladocerans and 19 copepods. Dominant species included 12 protozoans, 1 rotifer, 1 cladoceran and 2 copepods. The zooplankton community structure displayed a trend towards miniaturization. The annual average abundance and biomass of zooplankton were 1 060 ind/L and 2.930 mg/L and both were higher in summer than in other seasons. The annual Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness and Margalef richness indices of the zooplankton community averaged, respectively, 1.09, 0.36 and 1.56. Zooplankton diversity also varied seasonally, but difference among the eight sampling sites was not significant. Correlation analysis showed that WT and DO were the major environmental factors affecting zooplankton community structure. Zooplankton species and abundance were positively correlated with pH and negatively correlated with SD. RDA shows that the zooplankton community was also related to TN, Chl-a and the comprehensive trophic level index (TLI). Overall, the diversity indices indicated α -mesosaprobic conditions and the TLI indicated that Lianhuan Lake was mesotrophic.

Key words: Lianhuan Lake; zooplankton; correlation analysis; RDA analysis; water quality evaluation