

DOI: 10.5846/stxb201907251574

杨威, 孙雨琛, 张婷婷, 刘琪, 黄悦, 葛茜, 邓道贵. 富营养化对小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(14): 4874-4882.

Yang W, Sun Y C, Zhang T T, Liu Q, Huang Y, Ge Q, Deng D G. Impact of eutrophication on the community structure and species diversity of crustacean zooplankton in small lakes. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4874-4882.

富营养化对小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及多样性的影响

杨 威^{1, 2}, 孙雨琛¹, 张婷婷¹, 刘 琪¹, 黄 悦², 葛 茜¹, 邓道贵^{1, *}

1 淮北师范大学生命科学学院, 淮北 235000

2 淮北师范大学信息学院, 淮北 235000

摘要: 2017 年 3 月到 2018 年 2 月研究了临涣湖浮游甲壳动物群落结构的季节变化。临涣湖共记录浮游甲壳动物 13 种, 其中枝角类 8 属 8 种, 桡足类 5 属 5 种。短尾秀体溞 (*Diaphanosoma brachyurum*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*) 和象鼻溞 (*Bosmina* sp.) 等小型富营养种类是温暖季节的优势种, 而近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*) 是冬季的优势种。盃形溞 (*Daphnia galeata*) 等大型种类仅在少数月份中被观察到。临涣湖浮游甲壳动物的年平均密度和生物量分别为 28.3 个/L 和 0.33 mg/L。营养状态指数 (TSI_M) 的年平均值为 62.6。浮游甲壳动物的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数的年平均值分别为 0.86、0.74 和 0.49, 且 3 种多样性指数均具有显著的季节差异。营养盐水平、营养状态指数和物种多样性指数均表明, 临涣湖水体处于富营养化状态。冗余分析结果表明, 水温、总磷浓度和叶绿素 *a* 浓度是影响临涣湖浮游甲壳动物群落结构变化的上行效应因子。鲢、鳙鱼的捕食压力是临涣湖浮游甲壳动物群落结构小型化的下行效应因子。

关键词: 浮游甲壳动物; 群落结构; 富营养化; 物种多样性

Impact of eutrophication on the community structure and species diversity of crustacean zooplankton in small lakes

YANG Wei^{1, 2}, SUN Yuchen¹, ZHANG Tingting¹, LIU Qi¹, HUANG Yue², GE Qian¹, DENG Daogui^{1, *}

1 School of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China

2 Information College, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China

Abstract: The seasonal dynamics of the crustacean zooplankton community in Lake Linhuan were investigated from March 2017 to February 2018. A total of 13 species were recorded, including 8 species (8 genera) from Cladocera and 5 species (5 genera) from Copepoda. The eutrophic species *Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina* sp., and *Mesocyclops leuckarti* were the dominant species during the warm season, whereas *Cyclops vicinus* was the dominant species during winter. The large-sized *Daphnia galeata* was observed infrequently. The annual mean density and biomass of crustacean zooplankton were 28.3 ind/L and 0.33 mg/L, respectively. The annual mean trophic state index (TSI_M) was 62.6. The average yearly values of Shannon-Weiner index, Pielou index, and Simpson index of crustacean zooplankton were 0.86, 0.74, and 0.49, respectively, and there were significant seasonal differences in these indices. The nutrient levels, TSI_M, and species diversity index indicated that Lake Linhuan was affected by eutrophication. Redundancy analysis revealed that water temperature, total phosphorus concentration, and chlorophyll *a* concentration were the bottom-up factors affecting the

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2017A842); 安徽省高校科研平台创新团队项目 (KJ2015TD001); 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目 (gxyq2019169)

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengdg@263.net

community structure of crustacean zooplankton. The predation pressure from *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* was the top-down factor affecting the miniaturization of crustacean zooplankton community.

Key Words: crustacean zooplankton; community structure; eutrophication; species diversity

浮游甲壳动物(包括枝角类和桡足类),处于水生食物链的中间环节,主要以浮游植物为食,同时也是鱼类的重要饵料,在水体生态系统中具有重要的作用^[1-3]。浮游甲壳动物个体小,生命周期短,对水环境变化敏感,可在短时间内对环境变化做出反应。其群落多样性与水质状况密切相关,可以作为水体营养状况的指示类群^[4-5]。

湖泊富营养化已成为全球性的水环境污染问题^[6]。我国湖泊数量多,分布广,以小型、浅水湖泊为主。目前,我国约 70%的湖泊受到了不同程度的污染,多数湖泊出现了不同程度的富营养化^[7]。研究表明,湖泊富营养化对浮游动物的物种多样性和种群数量具有重要的影响^[8]。随着水体富营养化的加剧,浮游动物的密度和生物量也逐渐增加^[9-10]。因此,研究富营养化湖泊浮游动物群落结构和多样性的变化具有重要的意义。

近年来,随着人类活动干扰和污染加剧,临涣湖水体由轻度富营养化状态向富营养化状态转变^[11-13]。因此,本文通过对淮北临涣湖浮游甲壳动物群落结构和多样性的调查,有助于探讨富营养化对湖泊浮游甲壳动物群落结构和多样性的影响,以期为湖泊的生物多样性保护和富营养化治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样地点和采样时间

临涣湖(N33°37', E116°36')位于淮北市濉溪县西部,属暖温带半湿润季风气候,年均气温为 15.2℃,年均降雨量为 842.7 mm^[14]。临涣湖由采煤塌陷形成,塌陷时间约 17a,水域面积约 1.5 km²,平均水深 5.7 m。湖的东部为矸石山和粉煤灰厂,西南部为临涣工业园和矸石堆积^[14-15]。目前,临涣湖用于渔业养殖,主要养殖种类为鲢鱼和鳊鱼,年均鱼产量约为 2.7×10⁴ kg/km²。

2017 年 3 月至 2018 年 2 月对临涣湖浮游甲壳动物的群落结构进行调查,根据湖泊的形态特征,设置 5 个采样点(图 1),每月采样一次。

1.2 样品的采集及鉴定

将 13# 浮游生物网(112 μm)在水面下约 0.5 m 处呈“∞”形缓慢拖行 3—5 min,将定性样品放入 50 mL 小塑料瓶中,用 4%的甲醛溶液固定。定量样品用 5 L 有机玻璃采水器在表层、中层和底层共采集 30 L 混合水样,用 25 #浮游生物网(64 μm)过滤后,再用 4%的甲醛溶液固定。

浮游甲壳动物定量样品用 5 mL 浮游生物计数框在显微镜下计数。种类鉴定参照《中国动物志·淡水枝角类》^[16]和《中国动物志·淡水桡足类》^[17],生物量的计算参照章宗涉等的研究方法^[18]。

1.3 理化指标的测定

水温(water temperature, WT)和 pH 用 pH 计(Hach, 美国)现场测定,透明度(secchi depth, SD)使用透明盘现场测定。总氮(total nitrogen, TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷(total phosphorus, TP)用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定^[19],叶绿素 *a* (chlorophyll *a*, Chl *a*)浓度的测定参照章宗涉等的研究

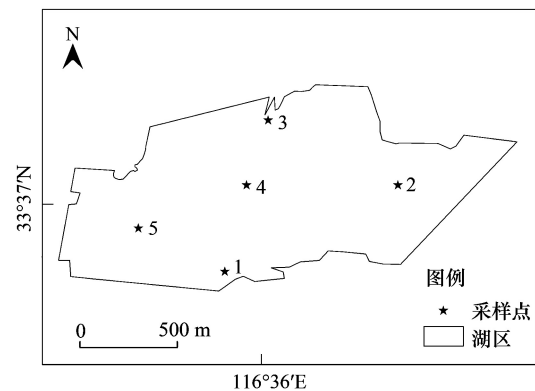


图 1 临涣湖采样点位置

Fig.1 The location of sampling sites in Lake Linhuan

方法^[18]。

1.4 浮游甲壳动物的多样性和优势度

采用 Shannon 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Simpson 多样性指数(D)和优势度(Y)对浮游甲壳动物群落特征进行分析^[20-22]：

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

$$J = H' / \ln S \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$Y = n_i \times f_i / N \quad (4)$$

式中, S 为种类总数; P_i 为第*i*种浮游甲壳动物密度占总密度的比例; n_i 为第*i*种浮游甲壳动物的密度; f_i 为第*i*种浮游甲壳动物出现的频率; N 为所有浮游甲壳动物的总密度。 $Y \geq 0.02$ 的种类确定为优势种。

1.5 营养状态指数

采用修正的卡尔森营养状态指数(TSI_M)评价临涣湖营养化类型^[23-24],计算公式为:

$$TSI_M(Chl.a) = 10 \times (2.46 + \ln Chl.a / \ln 2.5) \quad (5)$$

$$TSI_M(SD) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \ln SD) / \ln 2.5) \quad (6)$$

$$TSI_M(TP) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \ln TP) / \ln 2.5) \quad (7)$$

$$TSI_M = 0.54 T_M(Chl.a) + 0.297 T_M(SD) + 0.163 T_M(TP) \quad (8)$$

式中, $TSI_M(Chl.a)$ 、 $TSI_M(SD)$ 和 $TSI_M(TP)$ 是以叶绿素 *a* 浓度为基准的营养状态指数, $Chl.a$ 、 SD 、 TP 的单位分别为 $\mu g/L$ 、 m 、 mg/L 。

1.6 数据分析

用 SPSS 17.0 软件分析浮游甲壳动物密度与理化因子的相关性。利用 CANOCO 4.5 软件分析浮游甲壳动物优势种与环境因子间的关系。先进行去趋势对应分析(DCA)以检验临涣湖的第1轴梯度长,结果表明,第1轴梯度长为2.334,可见选择线性模型比选择单峰模型更为合理,因此选择冗余分析(RDA)进行约束性排序。所有数据均进行 $\ln(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 理化因子

临涣湖水温差异较大,春季开始上升,7月水温最高,秋季水温开始下降,1月最低,年平均水温为17.8℃。总氮和总磷浓度的年平均值分别为1.19 mg/L和0.12 mg/L,最大值均出现在10月,最小值均出现在3月。透明度的年平均值为0.99 m,最大值出现在1月,最小值出现在5月。临涣湖 pH 偏碱性,年平均值为8.45,最大值出现在9月。叶绿素 *a* 浓度的变动范围较大,年平均值为25.7 $\mu g/L$,最大值出现在7月份(表1)。

表1 临涣湖理化因子及其与浮游甲壳动物密度的关系

Table 1 Physico-chemical parameters and their correlation with crustacean zooplankton in Lake Linhuan

理化参数 Physico-chemical variables	范围 Range	平均值 Mean value	相关性 Correlation	显著性 Significance
水温 Water temperature/℃	2.5—31.0	17.8±9.7	0.679	<0.001
总氮浓度 Total nitrogen concentration/(mg/L)	0.59—1.98	1.19±0.41	0.055	0.677
总磷浓度 Total phosphorus concentration/(mg/L)	0.03—0.24	0.12±0.06	0.392	0.002
透明度 Secchi depth/m	0.73—1.03	0.99±0.25	-0.458	<0.001
叶绿素 <i>a</i> 浓度 Chlorophyll <i>a</i> concentration/($\mu g/L$)	8.8—43.4	25.7±11.6	0.614	<0.001
pH	8.23—8.69	8.45±0.12	0.382	0.003

2.2 浮游甲壳动物种类组成及优势种的变化

临涣湖共记录浮游甲壳动物 13 种,其中枝角类 8 属 8 种,桡足类 5 属 5 种。春季种类数最多,为 10 种,秋冬季均为 9 种,夏季种类数最少,为 5 种,且主要以小型浮游甲壳动物为主(表 2)。临涣湖在冬春季以象鼻溞(*Bosmina* sp.)、汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)和近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*)为优势种。随着水温的上升,夏秋季以短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)和象鼻溞(*Bosmina* sp.)为优势种。就全年的优势度而言,象鼻溞(*Bosmina* sp.)为第一优势种,其次是短尾秀体溞(*D. brachyurum*)和广布中剑水蚤(*M. leuckarti*)。

象鼻溞(*Bosmina* sp.)、短尾秀体溞(*D. brachyurum*)和广布中剑水蚤(*M. leuckarti*)的年平均密度分别为 9.8、9.7、7.6 个/L,分别占总密度的 35%、34%和 27%。象鼻溞(*Bosmina* sp.)的出现频率为 100%,全年都有分布,最大密度(40.6 个/L)出现在 9 月;短尾秀体溞(*D. brachyurum*)的出现频率为 58%,最大密度(43.3 个/L)出现在 8 月;广布中剑水蚤(*M. leuckarti*)的出现频率为 92%,最大密度(38.9 个/L)出现在 9 月(表 2)。

2.3 浮游甲壳动物密度和生物量的季节动态

临涣湖浮游甲壳动物密度和生物量呈现出明显的季节变化,且变化趋势相一致,年平均密度和生物量分别为 28.3 个/L 和 0.33 mg/L,最小密度和生物量(0.53 个/L 和 0.01 mg/L)均出现在 4 月。随着水温的升高,浮游甲壳动物开始大量繁殖,到 9 月达到最大值(107.2 个/L 和 1.07 mg/L),10 月开始逐渐下降,12 月—2 月维持在较低水平(图 2)。

临涣湖浮游甲壳动物的密度与水温($P<0.001$)、总磷浓度($P<0.01$)、透明度($P<0.001$)、pH($P<0.01$)和叶绿素 *a* 浓度($P<0.001$)均呈极显著正相关,与总氮浓度无相关性(表 1)。

2.4 浮游甲壳动物物种多样性指数

临涣湖浮游甲壳动物的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数的季节差异均显著($P<0.05$)。Shannon 指数和 Simpson 指数的最大值均出现在 6 月,最小值均出现在 1 月,年平均值分别为 0.86 和 0.49。Pielou 指数的变化范围为 0.58—0.96,年平均值为 0.74(表 3)。

2.5 TSI_M指数及与浮游甲壳动物群落和多样性的关系

临涣湖的 TSI_M值季节差异极显著($P<0.001$),在冬季较低,秋季较高,变化范围为 54.2—67.1,年平均值为 62.6,临涣湖水体处于富营养化状态。Pearson 相关分析表明,临涣湖的 TSI_M值与浮游甲壳动物密度、主要优势种和 Simpson 指数均呈极显著正相关,与 Shannon 指数和 Pielou 指数均呈显著正相关(表 4)。由此可见,临涣湖水体富营养化初期明显提高了浮游甲壳动物的密度、均匀度和多样性,对浮游甲壳动物群落具有重要的影响。

2.6 浮游甲壳动物群落与环境因子的相关分析

去趋势对应分析(DCA)显示,第 1 轴梯度长为 2.334,可见选择线性模型比选择单峰模型更为合理。因此,选择冗余分析(RDA)进行约束性排序。RDA 分析结果显示,第 1 轴和第 2 轴特征值分别为 0.598 和 0.094,前 2 轴共解释了 95.0%的物种与环境的关系(表 5)。

由表 6 可见,两物种排序轴的相关系数为 0.0006,近似垂直,两环境因子排序轴的相关系数为 0,表明排序结果可靠^[25]。水温和叶绿素 *a* 浓度与第一排序轴呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.7474 和 -0.6552; pH 和透明度也与第一排序轴有相关性,相关系数分别为 -0.3676 和 0.4960; TN 与第二排序轴正相关,相关系

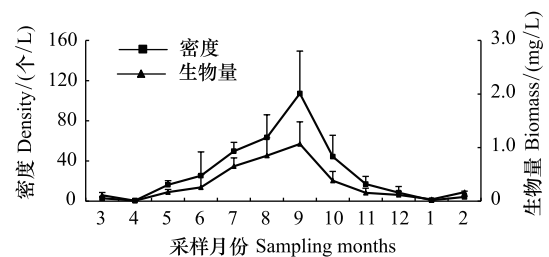


图 2 临涣湖浮游甲壳动物密度和生物量的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of density and biomass of crustacean zooplankton in Lake Linhuan

表 2 临涣湖浮游甲壳动物密度和种类组成

种类 Species	2017												2018	
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	January	February
	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	January	February		
象鼻溞 <i>Bosmina</i> sp.	0.2	<0.1	10.1	9.1	6.3	4.7	40.6	30.7	11.8	4.4	<0.1	0.3		
方形尖额溞 <i>Alono quadrangularis</i>	0.1	0.1	0.1						0.1	0.3		0.1		
盆形溞 <i>Daphnia galeata</i>	0.1	<0.1		0.1						0.1				
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>				0.3		0.2			0.1	0.1				
角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>								0.1						
卵形盘肠溞 <i>Chydorus ovalis</i>		0.1	0.1							0.2	<0.1	0.1		
老年低额溞 <i>Simocephalus vetulus</i>									0.1					
短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>			3.4	6.5	32.1	43.3	27.7	3.8	0.1					
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus doerrii</i>	0.2	0.1	0.3						0.3	0.1	0.1	0.3		
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	2.0								0.2	1.5	0.6	3.2		
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	0.1	0.1	2.4	9.2	11.3	15.3	38.9	9.8	4.4	0.1		0.1		
真剑水蚤 <i>Eucyclops</i> sp.		0.1	0.1											
猛水蚤 <i>Harpacticoida</i>	0.1	0.1								2.0	0.1			
无节幼体 Nauplius	7.2	0.8	2.9	4.8	3.3	6.6	9.4	10.4	4.9	5.5	6.5	6.9		

表 3 临涣湖浮游甲壳动物多样性指数的季节变化

多样性指数 Diversity index	2017												2018	
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	January	February
	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	January	February		
Shannon 指数 Shannon index	0.86	1.01	0.97	1.13	0.87	0.76	1.05	0.83	0.73	0.92	0.55	0.64		
Pielou 指数 Pielou index	0.67	0.90	0.74	0.87	0.79	0.63	0.96	0.69	0.66	0.68	0.75	0.58		
Simpson 指数 Simpson index	0.45	0.59	0.54	0.66	0.51	0.44	0.63	0.48	0.44	0.49	0.33	0.33		

数为 0.3340;TP 浓度与第一排序轴负相关,与第二排序轴极显著正相关,相关系数分别为-0.3424 和 0.6772;TSI_M与第一排序轴极显著负相关,相关系数为-0.6642。从第一、第二排序轴的相关性分析可知,TSI_M、水温、叶绿素 *a* 浓度和 TP 浓度对浮游甲壳动物的密度变化有较大影响,而透明度、TN 浓度和 pH 的影响较小。

由图 3 可知,象鼻蚤和广布中剑水蚤与叶绿素 *a* 浓度、TSI_M、TP 浓度和 pH 呈正相关关系,与透明度负相关;短尾秀体蚤与 TSI_M、水温、叶绿素 *a* 浓度和 pH 呈正相关关系;近邻剑水蚤和汤匙华哲水蚤与透明度呈正相关关系。

表 4 TSI_M与浮游甲壳动物群落和物种多样性指数的相关性
Table 4 Correlation analysis of TSI_M and crustacean zooplankton community and species diversity index

参数 Parameters	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 指数 Pielou index	Simpson 指数 Simpson index	象鼻蚤 <i>Bosmina</i> sp.	短尾秀体 <i>D. brachyurum</i>	广布中剑水蚤 <i>M. leuckarti</i>	浮游甲壳动物 Crustacean zooplankton
相关性 Correlation	0.314	0.317	0.383	0.649	0.569	0.661	0.655
显著性 Significance	0.015	0.014	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表 5 临涣湖浮游甲壳动物和环境因子的冗余分析结果
Table 5 Redundancy analysis between crustacean zooplankton and environmental factors in Lake Linhuan

排序轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.598	0.094	0.031	0.003
物种-环境相关系数 Species-environment correlations	0.889	0.866	0.736	0.484
累积变异百分比 Cumulative percentage variance				
物种 Species data	59.8	69.2	72.4	72.7
物种-环境 Species-environment relation	82.1	95.0	99.3	99.8
全部特征值总和 Sum of all eigenvalues	1.000			
全部典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	0.729			

表 6 前 2 个排序轴和环境因子间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients of environmental factors with the first two axes

项目 Item	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
TN	0.0183	0.3340	0.0206	0.3856
TP	-0.3424	0.6772	-0.3852	0.7818
Chl <i>a</i>	-0.6552	-0.0901	-0.7371	-0.1041
T	-0.7474	-0.1951	-0.8408	-0.2251
pH	-0.3676	-0.0122	-0.4135	-0.0141
SD	0.4960	-0.0750	0.5580	-0.0866
TSI _M	-0.6642	0.1002	-0.7472	0.1157

TN:总氮浓度 Total nitrogen concentration; TP:总磷浓度 Total phosphorus concentration; T:水温 Water temperature; pH:酸碱度 Potential of hydrogen; SD:透明度 Secchi depth; Chl*a*:叶绿素 *a* 浓度 Chlorophyll *a* concentration; TSI_M:营养指数 Trophic state index

3 讨论

3.1 环境因子对浮游甲壳动物群落结构的影响

水温、总氮和总磷是影响浮游甲壳动物群落结构的重要因素^[26-28]。总氮和总磷能促进浮游植物的生长,为浮游甲壳动物提供更多的食物来源,从而间接的促进浮游甲壳动物的生长和繁殖^[29-30]。在食物充足的条件下,随着水温的升高,浮游甲壳动物的发育时间缩短,使浮游甲壳动物种群密度迅速增加,进而影响浮游甲壳动物群落结构的变化^[18,31-32]。从第一、第二排序轴的相关性可知,水温和 TP 对浮游甲壳动物的影响较大,而 TN 的影响较小。夏秋季水温和总磷浓度相对较高,浮游甲壳动物具有较高的密度,而冬春季水温和总磷

浓度相对较低时,浮游甲壳动物密度也较低。Pearson 分析表明,临涣湖浮游甲壳动物密度与水温 and 总磷浓度均呈极显著正相关。RDA 分析也表明,水温和总磷浓度对浮游甲壳动物群落结构影响较大。因此,水温和总磷浓度是影响临涣湖浮游甲壳动物群落结构的上行效应因子。这与于婷婷等的研究结果相一致^[33]。

浮游甲壳动物主要以浮游植物为食,浮游植物生物量的高低对浮游甲壳动物群落结构具有重要的影响^[34]。叶绿素 *a* 浓度是衡量浮游植物生物量的重要指标,在一定程度上可以体现出浮游甲壳动物的食物量^[3,35]。李娟等研究表明,叶绿素 *a* 浓度与浮游甲壳动物呈正相关性,对浮游甲壳动物群落结构的季节变化影响较大^[8]。本研究中,2017 年 7 月—10 月,临涣湖叶绿素 *a* 浓度的含量较高,为浮游甲壳动物提供更多的食物,导致浮游甲壳动物的密度也较高。Pearson 分析表明,叶绿素 *a* 浓度与浮游甲壳动物密度呈显著正相关性。RDA 分析也表明,叶绿素 *a* 浓度与短尾秀体蚤、象鼻蚤和广布中剑水蚤呈正相关关系,对浮游甲壳动物群落结构的影响较大。因此,叶绿素 *a* 浓度是影响临涣湖浮游甲壳动物群落结构的重要因素。

鲢、鳙鱼对浮游动物的捕食具有明显的选择性,主要以大型浮游甲壳动物为食,导致浮游动物群落结构小型化^[36]。但短尾秀体蚤身体较透明,且行动敏捷,不易为鱼类察觉,有较强的逃避能力^[37]。杨威等(2019)研究表明,鲢、鳙鱼的捕食压力和选择性捕食对浮游甲壳动物种类和密度具有重要的影响^[38]。临涣湖主要养殖鲢、鳙鱼,且以小型浮游甲壳动物(象鼻蚤和广布中剑水蚤)及身体较透明的短尾秀体蚤为优势种,而盍形蚤和近邻剑水蚤等大型浮游甲壳动物密度均较低。因此,鲢、鳙鱼的选择性捕食是造成临涣湖浮游甲壳动物群落结构小型化的下行效应因子。

3.2 富营养化对浮游甲壳动物群落结构和物种多样性的影响

水体富营养化与浮游甲壳动物群落结构的季节变化密切相关^[9,39]。鲁敏等研究表明,营养水平是导致武汉东湖浮游甲壳动物群落结构在不同湖区具有不同分布格局的重要因素^[40]。水体富营养化使一些敏感种类消失,耐受种类大量繁殖^[41-42],导致浮游甲壳动物密度增加。临涣湖主要优势种为象鼻蚤、短尾秀体蚤和广布中剑水蚤,均为富营养化指示种类。随着营养水平的升高,其密度增大^[43-45]。本研究中,Pearson 分析结果表明,营养状态指数(TSI_M)与浮游甲壳动物密度呈极显著正相关,水体富营养化提高了浮游甲壳动物的密度。RDA 分析结果也表明, TSI_M 与短尾秀体蚤、广布中剑水蚤和象鼻蚤呈正相关关系,对浮游甲壳动物的群落结构具有重要的影响。这与李娟等的研究结果一致^[8]。

富营养化对浮游动物物种多样性的季节变化也具有重要的影响^[46-48]。王颖等研究表明,长期的水体富营养化降低了浮游甲壳动物的物种多样性^[5]。本研究中,营养状态指数(TSI_M)与浮游甲壳动物的多样性指数呈正相关。随着水体富营养化的加剧,浮游甲壳动物的多样性指数增大。湖泊富营养化的过程中,多样性一般先升后降,在中营养水平时,群落结构复杂,多样性高;在超富营养水平时,群落结构简单,多样性低^[49]。氮、磷等营养盐水体显示,临涣湖水体呈现中营养水平,并向富营养化演变。因此,随着营养状态指数(TSI_M)的升高,浮游甲壳动物的多样性呈上升趋势。

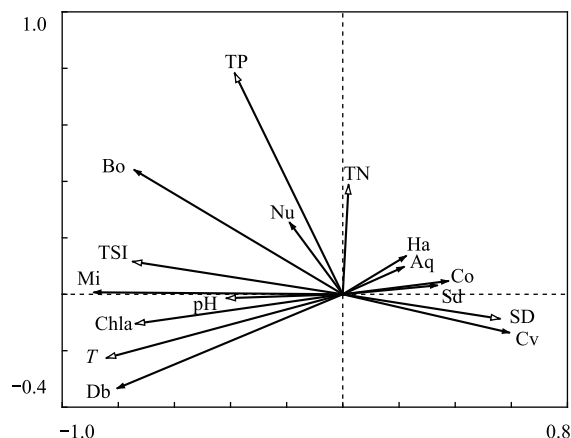


图3 临涣湖浮游甲壳动物与环境因子的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis between crustacean zooplankton and environmental factors in Lake Linhuan

TN: 总氮浓度 Total nitrogen concentration; TP: 总磷浓度 Total phosphorus concentration; T: 水温 Water temperature; SD: 透明度 Secchi depth; Chla: 叶绿素 *a* 浓度 Chlorophyll *a* concentration; TSI: 营养指数 Trophic state index; Db: 短尾秀体蚤 *D. brachyurum*; Mi: 广布中剑水蚤 *M. leuckarti*; Cv: 近邻剑水蚤 *C. vicinus*; Bo: 象鼻蚤 *Bosmina* sp.; Co: 卵形盘肠蚤 *C. ovalis*; Aq: 方形尖额蚤 *A. quadrangularis*; Ha: 猛水蚤 *Harpacticoida*; Sd: 汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*; Nu: 无节幼体 Nauplius

3.3 与淮南和淮北采煤塌陷湖泊的比较

由表 7 可知,淮南和淮北采煤塌陷湖泊营养盐浓度、浮游甲壳动物群落结构及密度具有一定的空间差异。本次调查结果显示,临涣湖浮游甲壳动物密度高于淮南和淮北塌陷湖泊,且淮南和淮北塌陷湖泊浮游甲壳动物密度均较低。就种类而言,淮南和淮北塌陷湖泊浮游甲壳动物种类少,群落结构小型化。从营养盐来看,淮北采煤塌陷湖泊总磷浓度均高于淮南塌陷湖泊,而总氮浓度均低于淮南塌陷湖泊,水体均呈现出不同程度的富营养化。因此,要加强对淮南和淮北采煤塌陷湖泊水环境的保护,减少鱼类养殖活动,调整鱼类养殖结构,可以降低鲢、鳙鱼对浮游甲壳动物的捕食压力,促进生态系统的良性循环。

表 7 与淮南和淮北采煤塌陷湖泊浮游甲壳动物群落结构的比较

Table 7 Comparison with crustacean zooplankton community structure in small lakes of Huainan and Huaibei excavating coal subsidence region

湖泊 Lakes	总氮浓度 (TN)/ (mg/L)	总磷浓度 (TP)/ (mg/L)	物种数 Species number	密度 Density/ (个/L)	叶绿素 a (Chl a)/ (μg/L)	主要鱼类 Major fish species	鱼产量 Fish yield/ (kg/km ²)	优势种 Dominant species	营养状态 Trophic state	参考文献 References
淮南潘集站	2.0	0.08	13	5.5	16.8	鲢鱼 鳙鱼	17×10 ⁴	象鼻溞、短尾秀体溞	轻度富营养化	易齐涛等 ^[50]
淮南谢桥站	1.9	0.07	12	4.9	14.9	鲢鱼 鳙鱼	13×10 ⁴	象鼻溞、多刺秀体溞	轻度富营养化	易齐涛等 ^[50]
淮南淮西湖	5.28	0.94	14	8.5	68.3	鲢鱼 鳙鱼	40×10 ⁴	象鼻溞、近邻剑水蚤	重度富营养化	余艳霞 ^[51]
淮北东湖	1.52	0.14	8	12.8	55.8	鲢鱼 鳙鱼	2.5—3×10 ⁴	广布中剑水蚤、短尾秀体溞、近邻剑水蚤	中度富营养化	杨威等 ^[38,52]
淮北刘桥湖	1.35	0.138	10	4.4	59.0	鲢鱼 鳙鱼	2.5—3 ×10 ⁴	广布中剑水蚤、短尾秀体溞、近邻剑水蚤	中度富营养化	杨威等 ^[38,52]
淮北临涣湖	1.19	0.12	13	28.3	25.7	鲢鱼 鳙鱼	2.7 ×10 ⁴	象鼻溞、广布中剑水蚤、短尾秀体溞	轻度富营养化	本研究

4 结论

(1) 临涣湖共记录浮游甲壳动物 13 种,其中枝角类 8 种,桡足类 5 种。浮游甲壳动物密度和生物量的季节差异显著,年平均密度和生物量分别为 28.3 个/L 和 0.33 mg/L。

(2) 临涣湖主要优势种为短尾秀体溞、广布中剑水蚤和象鼻溞。

(3) TN、TP 和营养状态指数(TSI_M)表明,临涣湖水体处于富营养状态。TSI_M值与浮游甲壳动物主要优势种、均匀度和多样性指数均呈显著正相关。

(4) 冗余分析结果表明,水温、总磷浓度和叶绿素 a 浓度是影响临涣湖浮游甲壳动物群落结构变化的上行效应因子。

参考文献 (References):

[1] Feniova I Y, Razlutskiy V I, Gladyshev M I, Kostrzevska-Szlakowska I, Majsak N N, Rzepecki M, Sushchik N N, Zilitinkevich N S. Factors of dynamics of plankton crustacean communities under eutrophic conditions. Russian Journal of Ecology, 2019, 50(1): 50-57.

[2] Piscia R, Mazzoni M, Bettinetti R, Caroni R, Cicala D, Manca M M. Stable isotope analysis and persistent organic pollutants in crustacean zooplankton: the role of size and seasonality. Water, 2019, 11(7): 1490.

[3] 孙颖, 舒婷婷, 李静, 戴曦, 吕志均, 陈非洲. 南京玄武湖浮游甲壳动物的水平分布及其与环境的关系. 湖泊科学, 2012, 24(3): 422-428.

[4] 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价. 生态学报, 2019, 39(20): 7583-7591.

[5] 田雪, 付宏臣, 李宇, 姜明, 姜云垒. 2015 年富锦国家湿地公园水体中浮游甲壳动物群落结构及多样性季节动态. 湿地科学, 2017, 15(1): 73-79.

[6] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 席北斗, 鲁奇. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 92-98.

[7] 朱颖, 马骏, 陈睿哲. 富营养化的湖泊. 生态经济, 2018, 34(12): 6-9.

[8] 李娟, 温周瑞, 李庚辰, 张敏. 太湖梅梁湾和贡湖湾浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的相互关系. 长江流域资源与环境, 2014, 23(S1): 81-90.

[9] García-Chicote J, Armengol X, Rojo C. Zooplankton species as indicators of trophic state in reservoirs from Mediterranean river basins. Inland

- Waters, 2019, 9(1): 113-123.
- [10] 王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2017, 29(1): 216-223.
- [11] 范廷玉, 程方奎, 严家平, 刘杰, 喻怀君, 张冰, 陈威. 淮北临涣煤矿塌陷水域叶绿素 a 与相关因子分析. 环境化学, 2015, 34(6): 1168-1176.
- [12] 任梦溪, 郑刘根, 程桦, 喻怀君. 淮北临涣采煤沉陷区水域水体污染源解析. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(8): 680-688.
- [13] 汪晨琛. 淮北临涣采煤沉陷湿地浮游植物群落结构研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [14] 孔令健, 姜春露, 郑刘根, 程桦, 任梦溪, 闵飞虎, 方刘兵. 淮北临涣矿采煤沉陷区不同水体水化学特征及其影响因素. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1158-1167.
- [15] 纪磊, 李晓明, 邓道贵. 淮北煤矿区塌陷湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 水生生物学报, 2016, 40(1): 147-156.
- [16] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志-淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [17] 沈嘉瑞. 中国动物志·淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [18] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [21] Pielou E C. Ecological Diversity. New York: John Wiley, 1975.
- [22] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15, 19-19.
- [23] Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T. Application of Modified Carlson's Trophic State Index to Japanese Lakes and Its Relationships to Other Parameters Related to Trophic State. Japan; Research Report of National Institute of Environmental Study, 1981: 13-31.
- [24] 杨梅玲, 胡忠军, 刘其根, 任丽萍, 陈来生, 李培培. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化(2007 年-2011 年). 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 240-245.
- [25] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. Ecology, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [26] 刘宝贵, 刘霞, 吴瑶, 钟正, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征. 生态学报, 2016, 36(24): 8205-8213.
- [27] Yin J H, Zhang G T, Li C L, Wang S W, Zhao Z X, Wan A Y. Community composition, abundance and biomass of zooplankton in Zhangzi Island waters, Northern Yellow Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(5): 1144-1151.
- [28] 赵会, 张坤, 彭水秀, 张萌, 邓道贵. 军山湖、青山湖和瑶湖春夏季节浮游甲壳动物的群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1197-1203.
- [29] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 徐镇, 金春华. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. 水生生物学报, 2014, 38(4): 720-728.
- [30] 陈星, 熊飞, 刘红艳, 张繁荣. 武汉三角湖浮游甲壳动物群落结构. 动物学杂志, 2017, 52(5): 824-834.
- [31] Maier G. The effect of temperature on the development times of eggs, naupliar and copepodite stages of five species of cyclopoid copepods. Hydrobiologia, 1989, 184(1): 79-88.
- [32] Deng D G, Xie P. Effect of food and temperature on the growth and development of *Moina irrasa* (Cladocera: Moinidae). Journal of Freshwater Ecology, 2003, 18(4): 503-513.
- [33] 于婷婷, 朱雅, 徐琰, 赵磊, 钱文杰, 常青, 王国祥, 陈建琴. 苏州工业园区水体浮游甲壳动物群落特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2534-2542.
- [34] Yang W, Deng D G, Zhang S, Hu C L. Seasonal dynamics of crustacean zooplankton community structure in Erhai Lake, a plateau lake, with reference to phytoplankton and environmental factors. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1074-1082.
- [35] 王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2010, 30(13): 3385-3395.
- [36] 杨宇峰, 黄祥飞. 鲢鳙对浮游动物群落结构的影响. 湖泊科学, 1992, 4(3): 78-86.
- [37] 李纯厚, 黄祥飞. 略论武汉东湖枝角类种类演替及其与生态因子的关系. 水生生物学报, 1992, 16(2): 101-112.
- [38] 杨威, 张婷婷, 孙雨琛, 刘琪, 葛茜, 邓道贵. 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2019, 38(1): 188-196.
- [39] 邓道贵, 杨威, 孟小丽, 葛茜, 金显文, 胡振东. 淮中游浮游甲壳动物群落结构的季节动态. 水生生物学报, 2013, 37(5): 869-875.
- [40] 鲁敏, 谢平. 武汉东湖不同湖区浮游甲壳动物群落结构的比较. 海洋与湖沼, 2002, 33(2): 174-181.
- [41] 钱方平, 席贻龙, 温新利, 黄林. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响. 生物多样性, 2007, 15(4): 344-355.
- [42] 胡艺, 李秋华, 何应, 孟纯兰, 韩孟书. 贵州高原水库浮游动物分布特征及影响因素——以阿哈水库为例. 中国环境科学, 2020, 40(1): 227-236.
- [43] 徐杭英, 于海燕, 韩明春, 黄平沙, 李共国. 浙江饮用水源地浮游动物群落特征及环境响应. 生态学报, 2015, 35(21): 7219-7228.
- [44] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [45] 林志, 万阳, 徐梅, 汪晨琛, 吴奇丽, 周忠泽. 淮南迪沟采煤沉陷区湖泊后生浮游动物群落结构及其影响因素. 湖泊科学, 2018, 30(1): 171-182.
- [46] 郭凯, 赵文, 殷守仁, 李艳颖, 徐立蒲, 徐锋, 陈立斌. 北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况. 湖泊科学, 2010, 22(2): 256-264.
- [47] 丁瑞睿, 郭匿春, 马友华. 巢湖流域双桥河底泥疏浚对浮游甲壳动物群落结构的影响. 湖泊科学, 2019, 31(3): 714-723.
- [48] 胡菊香, 吴生桂, 陈金生, 胡望斌, 唐会元, 邹清. 巢湖富营养化对轮虫的影响研究. 环境科学与技术, 2007, 30(12): 16-18, 68-68.
- [49] 日本生态学会环境问题专门委员会编. 环境和指示生物. 水域分册. 卢全章, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [50] 易齐涛, 汪琪, 谢凯, 张鑫. 淮南采煤塌陷湖泊浮游甲壳动物群落结构特征及其影响因素. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 37-43.
- [51] 余艳霞. 渔业捕捞方式对采煤塌陷湖泊生态系统营养结构和功能的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [52] 杨威, 张婷婷, 孙雨琛, 刘琪, 邓道贵, 金显文. 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊轮虫的群落结构特征. 水资源保护, 2020, 36(1): 82-88, 96-96.