

济南市雪野湖浮游生物群落结构特征及多样性分析

徐珊¹, 于莉¹, 徐秋云¹, 陈聪², 白海锋²

(1. 济南市水文中心, 山东济南 250013; 2. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁大连 116023)

摘要 为了解济南市湖库水生生物资源状况, 有效保护城市水生态环境, 于2021年秋季对雪野湖开展了浮游生物调查。结果显示, 共采集到浮游植物6门40种, 其中绿藻门种类数最多, 占浮游植物总种类数的35.00%, 浮游植物密度和生物量平均值分别为 10.06×10^6 cell/L、12.88 mg/L, 优势种有5种。采集到浮游动物4类13种, 其中轮虫种类数最多, 占浮游动物总种类数的38.46%, 浮游动物密度和生物量平均值分别为1.93个/L、0.013 mg/L, 优势种有5种。浮游植物和浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数平均值分别为1.554、1.556, Pielou 均匀度指数平均值分别为0.467、0.966, Margalef 丰富度指数平均值分别为1.059、2.873。生物多样性指数水质评价表明, 湖区水质整体处于中污染状态, 污染程度存在区域差异。

关键词 浮游生物; 群落结构; 生物多样性; 水质评价; 雪野湖

中图分类号 X17 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0056-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis of Plankton Community Structure and Its Diversity in Xueye Lake of Jinan City

XU Shan, YU Li, XU Qiu-yun et al (Jinan Hydrology Office, Jinan, Shandong 250013)

Abstract In order to understand the status of aquatic resources in the lake and reservoir, and effectively protect the urban water ecological environment, the plankton in Xueye Lake was investigated in the autumn of 2021. The results showed that there were a total of 40 species of phytoplankton belonging to 6 phyla, among which chlorophyta accounted for 35.00% of the total phytoplankton species, and the average density and average biomass of phytoplankton were 10.06×10^6 cells/L and 12.88 mg/L, respectively. There were 5 dominant species in phytoplankton. A total of 13 zooplankton species belonging to 4 groups were identified, in which the number of rotifera species was the most, accounting for 38.46% of the total zooplankton species, and the average density and average biomass of zooplankton were 1.93 ind./L and 0.013 mg/L, respectively. There were 5 dominant species in zooplankton. The average Shannon-Wiener diversity index of phytoplankton and zooplankton were 1.554 and 1.556, the average Pielou evenness index of phytoplankton and zooplankton were 0.467 and 0.966, the average Margalef richness index of phytoplankton and zooplankton were 1.059 and 2.873, respectively. The water quality evaluation of the diversity index showed that the water quality of the Xueye Lake was in the state of medium pollution, and the pollution degree was different in every research area.

Key words Plankton; Community structure; Biodiversity; Water quality assessment; Xueye Lake

浮游生物是湖泊、水库等水域的主要生产者和消费者, 是生态系统中重要的组成部分^[1]。浮游生物的种类组成和数量分布在理化参数的影响下呈现出广泛的时空变化^[2], 这种变化通常被认为是由环境参数例如温度、水流、光照、溶解氧、营养盐等的上行效应和滤食性鱼类、滤食性底栖动物等的下行效应控制, 这些因子发生变化将在一定程度上影响浮游生物群落结构, 改变其多样性。浮游生物不仅是影响湖库水体透明度的主要因素, 也是湖库水生态修复的关键因素。浮游生物具有采集方便、对环境变化敏感等特点, 对维持健康的水生生态系统至关重要, 因此常被作为评价水环境质量变化与水生生态系统健康的重要指示生物^[3]。

济南市雪野湖为山区丘陵型湖库, 是一座集防洪、工农业供水、水产养殖、旅游科普等多功能于一体的大型水利工程。雪野湖湖面开阔, 岸线曲折, 四周群山环抱, 周边有诸多河流水系, 其中通天河和嬴汶河为大汶河的上游支流, 是雪野湖的主要汇水河流, 受区域降水量和上游来水量的影响, 湖区水位全年变化幅度较大^[4]。近年来, 随着雪野湖周边城市化速度的加快, 人类剧烈的社会活动、过度的养殖捕捞、严重的水质污染和大气污染等对湖区生态环境造成了重大影响, 导致浮游生物的生存环境发生了变化, 群落结构出现了

演替^[5]。该研究于2021年9—10月对雪野湖浮游生物进行调查分析, 探索浮游生物群落组成、优势种变化、密度空间分布及其多样性, 以为济南地区水生生物资源的保护和生态健康评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况与采样点设置 雪野湖(36°24'~36°27'N, 117°30'~117°38'E)位于山东省济南市莱芜区北部, 处于大汶河上游, 距离济南市中心46 km, 其流域面积444.0 km², 水域面积12.5 km², 蓄水量 2.21×10^8 m³, 平均水位为232.8 m^[6]。雪野湖气候属暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 温差较大, 年平均气温11.0~13.0℃, 年极端最高气温为39.2℃(7月), 极端最低气温为-21.8℃(1月), 年降水量为760.9 mm, 年平均最大风速为13.5 m/s。根据雪野湖的水文、地势及地貌特征, 于2021年9—10月对湖区浮游生物资源进行了分布特征调查, 此次调查共设置6个调查区域(X₁~X₆)(图1)。其中, X₁和X₃位于湖上游的湖叉区, X₂位于湖上游的通天河入湖区, X₄和X₅分别位于湖中游和下游的敞水区, X₆位于湖下游的码头区(嬴汶河的入湖处)。每个区域设置3个平行采样点, 共设置采样点12个。

1.2 浮游生物采集与鉴定 根据雪野湖水流及水深的具体情况, 参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》在各调查点对浮游植物和浮游动物进行定性和定量采样。浮游植物定性用25#浮游生物网采集, 在水面下0.5 m处呈“∞”型拖拽; 定

量样品用 5 L 有机玻璃采水器在水面下 0.5 m 处采集水样 1 L,定性、定量样品现场加入 1.5% (V/V) 鲁哥试剂固定,将收集的样品带回实验室静置沉淀 24 h 后浓缩至 30 mL 待检。浮游植物的细胞计数在 400 倍生物显微镜下进行,种类鉴定参照相关文献^[7]进行。



图 1 雪野湖调查点位分布

Fig.1 Distribution of survey points in Xueye Lake

浮游动物采集使用 5 L 有机玻璃采水器,在每个采样点采集集中上层水样并均匀混合,从混合水样中取 1 L 对轮虫和原生动物进行定量采集,加入 1% (V/V) 鲁哥试剂固定,带回实验室沉淀 24 h 后浓缩并定容到 30 mL。枝角类与桡足类定量样品用采水器取均匀混合水样 50 L,用 25#浮游生物网过滤浓缩,用 4% 甲醛溶液现场固定后带回实验室镜检、分类与计数,种类鉴定参照相关文献^[8-9]进行。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 浮游生物群落多样性。采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 和 Margalef 丰富度指数 (D) 对浮游生物物种进行分析^[10]。计算公式如下:

$$H' = -\sum (P_i \log_2 P_i) \tag{1}$$

$$P_i = n_i / N \tag{2}$$

$$J = H' / H'_{\max} \tag{3}$$

$$H'_{\max} = \log_2 S \tag{4}$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N \tag{5}$$

式中: P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值; n_i 为第 i 种个体数; N 为所有种个体数; S 为样品中总种类数。

浮游生物多样性指数水质评价标准如表 1 所示,可分为 5 个等级^[11]。

表 1 生物多样性指数水质评价标准

Table 1 Biodiversity index water quality evaluation standards

水质状况 Water quality	H'	J	D
清洁 Clean	$H' > 3$	$J > 0.8$	$D > 6$
轻污染 Light pollution	$2 < H' \leq 3$	$0.5 < J \leq 0.8$	$4 < D \leq 6$
中污染 Medium pollution	$1 < H' \leq 2$	$0.3 < J \leq 0.5$	$1 < D \leq 4$
重污染 Heavy pollution	$0 < H' \leq 1$	$0 < J \leq 0.3$	$0 < D \leq 1$
极重污染 Extremely heavy pollution	$H' = 0$	$J = 0$	$D = 0$

1.3.2 浮游生物群落优势种与常见种。优势种的确定采用优势度 (Y), 计算公式如下:

$$Y = (N_i / N) f_i \tag{6}$$

式中: N_i 为第 i 种生物的个体数; N 为所有种类的总个体数; f_i 为某种浮游生物出现的频率。 $Y \geq 0.02$ 的物种确定为优势种, $f \geq 65\%$ 的物种确定为常见种^[12]。

2 结果与分析

2.1 浮游生物种类组成 雪野湖共鉴定出浮游植物 6 门 40 种, 绿藻门最为丰富, 有 14 种, 占总种类数的 35.00%, 其次是硅藻门 12 种, 占比为 30.00%, 蓝藻门 7 种, 占比为 17.50%, 隐藻门 3 种, 占比为 7.50%, 裸藻门 2 种, 占比为 5.00%, 甲藻门 2 种, 占比为 5.00% (表 2 和图 2a)。各调查区的浮游植物门类组成和物种数存在差异, 其中种类数最多的是调查区 X_5 (25 种), 最少的是调查区 X_2 (8 种), 平均每个调查区有 10 种。

浮游动物共鉴定出 4 类 13 种, 其中轮虫有 5 种, 占总种类数的 38.46%, 原生动物有 5 种, 占比为 38.46%, 枝角类有 1 种, 占比为 7.69%, 桡足类有 2 种, 占比为 15.39% (表 2 和图 2b)。浮游动物种类组成在不同调查点位上存在差异, 其中种类数最多的调查区是 X_1 (6 种), 最少的调查区是 X_4 (2 种)、 X_5 (2 种)、 X_6 (2 种), 平均每个调查区有 3.5 种。

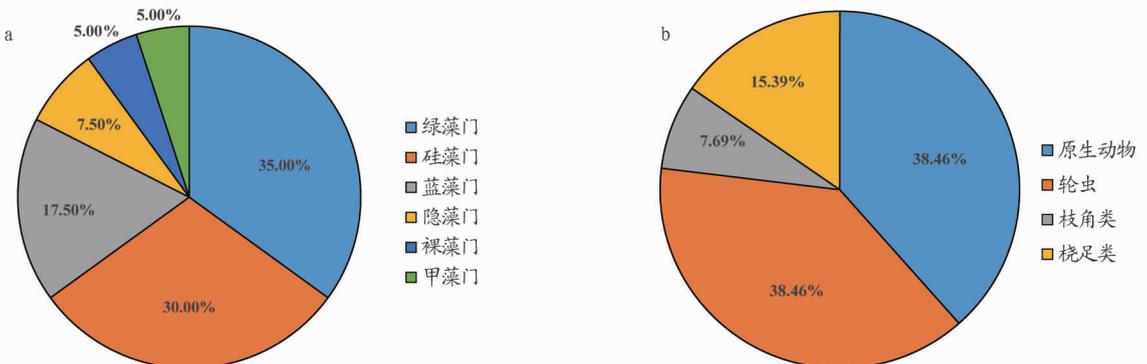


图 2 浮游植物 (a) 和浮游动物 (b) 种类组成

Fig.2 Species composition of phytoplankton (a) and zooplankton (b)

表2 雪野湖浮游生物名录

Table 2 List of planktonic organisms in Xueye Lake

类别 Category	门 Phylum	种 Species	
浮游植物 Phytoplankton	绿藻门	布朗衣藻	
		球衣藻	
		小球衣藻	
		莱哈衣藻	
		德巴衣藻	
		椭圆卵囊藻	
		月牙藻	
		长刺顶棘藻	
		双对栅藻	
		直角十字藻	
		空球藻	
		实球藻	
		小空星藻	
		绿球藻	
		硅藻门	变异直链藻
			颗粒直链藻
			梅尼小环藻
			尖针杆藻
			扁圆卵形藻
			近缘曲壳藻
			短小舟形藻
			箱型桥弯藻
			小桥弯藻
			近箱型桥弯藻
			谷皮菱形藻
			两栖菱形藻
		蓝藻门	微小平裂藻
			不定微囊藻
			两栖颤藻
			小颤藻
			小席藻
			多变鱼腥藻
		隐藻门	类颤藻鱼腥藻
	卵形隐藻		
	嗜蚀隐藻		
	裸藻门	尖尾蓝隐藻	
		尖尾扁裸藻	
		椭圆鳞片藻	
	甲藻门	腰带光甲藻	
		角甲藻	
	浮游动物 Zooplankton	原生动物	盘状表壳虫
			游仆虫
			冠砂壳虫
			瓶砂壳虫
			球形砂壳虫
轮虫		螺形龟甲轮虫	
		缘板龟甲轮虫	
		针簇多肢轮虫	
		玫瑰旋轮虫	
		前节晶囊轮虫	
枝角类		长额象鼻蚤	
		台湾温剑水蚤	
桡足类		台湾温剑水蚤	
		无节幼体	

2.2 浮游生物密度与生物量 雪野湖浮游植物密度和生物

量空间变化及组成占比如图3所示。浮游植物密度为 $61.41 \times 10^4 \sim 2\,473.57 \times 10^4$ cell/L,平均值为 $1\,005.80 \times 10^4$ cell/L,其中蓝藻门密度占比最高,占浮游植物总密度的92.06%,其次是绿藻门,占比为5.07%,硅藻门占比第三,隐藻门占比第四,占比分别为1.52%、1.19%,裸藻门和甲藻门占比较小,合计占比为0.16%。调查区 X_6 的浮游植物密度相对最大($2\,473.57 \times 10^4$ cell/L),其中蓝藻门密度占比最高,占 X_6 浮游植物总密度的90.62%;调查区 X_3 的浮游植物密度相对最小(61.41×10^4 cell/L),蓝藻门密度占比最高,占 X_3 浮游植物总密度的50.11%。

浮游植物生物量为2.09~56.98 mg/L,平均值为12.88 mg/L,其中蓝藻门占比最大,为77.46%,其次是硅藻门,占比为11.93%,绿藻门占比第三,隐藻门占比第四,占比分别为5.66%、3.33%,裸藻门和甲藻门占比较小,合计占比为1.62%。调查区 X_2 的浮游植物生物量相对最大(56.98 mg/L),其中蓝藻门生物量占比最高,占 X_2 浮游植物总生物量的97.77%;调查区 X_3 的浮游植物生物量相对最小(2.09 mg/L),其中硅藻门生物量占比最高,占 X_3 浮游植物总生物量的93.77%。

雪野湖浮游动物密度和生物量空间变化及组成占比如图4所示。浮游动物密度为0.80~4.00个/L,平均值为1.93个/L,其中轮虫密度占比最高,占浮游动物总密度的34.48%,其次是原生动物,占比为31.04%,桡足类占比第三,为20.69%,枝角类占比最小,为13.79%。调查区 X_1 的浮游动物密度相对最大(4.00个/L),其中轮虫密度占比最高,占 X_1 浮游动物总密度的50.00%;调查区 X_4 、 X_5 的浮游动物密度相对最小(均为0.80个/L),其中原生动物和轮虫密度各占 X_4 总密度的50.00%,原生动物和枝角类密度各占 X_5 总密度的50.00%。

浮游动物生物量0.001~0.047 mg/L,平均值为0.013 mg/L,其中枝角类占比最大,为41.74%,其次是桡足类,占比为31.30%,轮虫占比第三,为26.87%,原生动物占比最小,为0.09%。调查区 X_2 的浮游动物生物量相对最大(0.047 mg/L),其中枝角类生物量占比最高,占 X_2 浮游动物总生物量的51.06%;调查区 X_3 的浮游动物生物量相对最小(0.001 mg/L),其中原生动物生物量占比最高,占 X_3 浮游动物总生物量的100%。

2.3 浮游生物优势种与常见种 从表3可以看出,雪野湖浮游生物优势种有10种,其中浮游植物优势种5种,全部属于蓝藻门,主要包括微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、不定微囊藻(*Microcystis incerta*)、两栖颤藻(*Oscillatoria amphibia*)、小席藻(*Phormidium tenus*)、类颤藻鱼腥藻(*Anabaena osicellarioides*);浮游动物优势种有5种,其中原生动物1种(球形砂壳虫 *Diffugia globulosa*),轮虫2种(缘板龟甲轮虫 *Keratella ticinensis*、前节晶囊轮虫 *Asplachna priodonta*),枝角类1种(长额象鼻蚤 *Bosmina longirostris*),桡足类1种(台湾温剑水蚤 *Cyclops strennus*)。雪野湖浮游生物常见种有3种,其中浮游植物常见种2种,主要包括嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)、

类颤藻鱼腥藻 (*Anabaena osicellarioides*), 浮游动物常见种 1 种, 即球形砂壳虫 (*Diffugia globulosa*)。

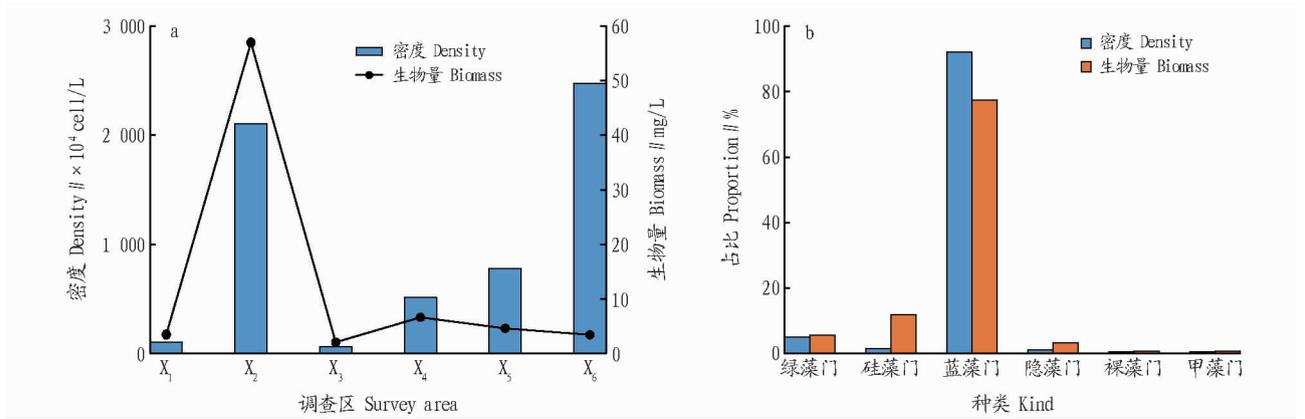


图 3 浮游植物密度和生物量空间变化 (a) 及组成占比 (b)

Fig.3 Spatial changes (a) and proportion of composition (b) of phytoplankton density and biomass

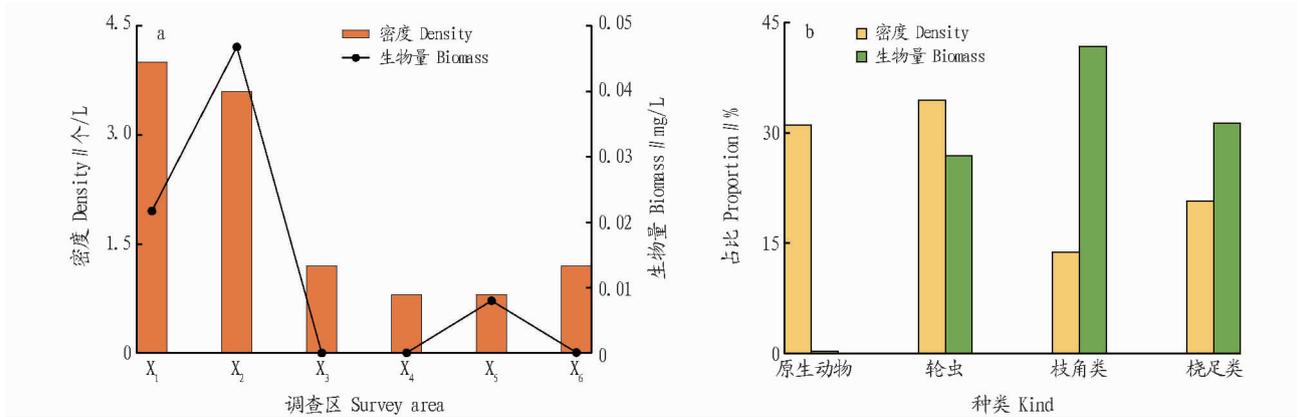


图 4 浮游动物密度和生物量空间变化 (a) 及组成占比 (b)

Fig.4 Spatial changes (a) and proportion of composition (b) of zooplankton density and biomass

表 3 浮游生物优势种及常见种

Table 3 Dominant and common species of plankton

类别 Category	优势种 Dominant species	优势度 Degree of dominance	常见种 Common species	频率 Frequency // %
浮游植物 Phytoplankton	微小平裂藻	0.024	嗜蚀隐藻	66.67
	不定微囊藻	0.058	类颤藻鱼腥藻	66.67
	两栖颤藻	0.113		
	小席藻	0.024		
	类颤藻鱼腥藻	0.074		
浮游动物 Zooplankton	球形砂壳虫	0.144	球形砂壳虫	83.33
	缘板龟甲轮虫	0.046		
	前节晶囊轮虫	0.034		
	长额象鼻溞	0.046		
	台湾温剑水蚤	0.057		

2.4 浮游生物多样性与水质评价 从图 5 可以看出,雪野湖浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 为 0.272~3.083, 平均值为 1.554,最高值出现在 X₁ 调查区,最小值出现在 X₂ 调查区;浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 为 0.917~2.721,平均值为 1.556,最高值出现在 X₁ 调查区,最小

值出现在 X₆ 调查区。浮游植物 Pielou 均匀度指数 (J) 为 0.091~0.928,平均值为 0.467,最高值出现在 X₁ 调查区,最小值出现在 X₂ 调查区;浮游动物 Pielou 均匀度指数 (J) 为 0.910~1.000,平均值为 0.966,最高值出现在 X₃、X₄、X₅ 调查区,最小值出现在 X₂ 调查区。浮游植物 Margalef 丰富度指

数(D)为0.634~1.347,平均值为1.059,最高值出现在 X_3 调查区,最小值出现在 X_2 调查区;浮游动物 Margalef 丰富度指数(D)为2.165~7.604,平均值为2.873,最高值出现在 X_3 调查区,最小值出现在 X_2 调查区。参照浮游生物多样性指数水质评价标准,依据浮游植物和浮游动物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数,雪野湖秋季水质处于中污染状态,各调查区水质状况存在差异。

3 讨论与结论

3.1 浮游生物群落结构变化特征 在水生生物种群中,浮游生物个体小、具有较短的生活史,对环境变化响应迅速,生活史过程与湖泊水库的自然水文密切相关,其种类、密度和多样性直接影响水域生态系统的结构和功能。随着湖库水体富营养化程度提高,浮游生物群落结构区域简单,种类减少,数量增加,多样性指数降低,生物群落稳定性下降^[13]。此次调查发现雪野湖水体中浮游植物物种组成以绿藻和硅藻占主导,水体呈现出绿-硅藻型,浮游动物的种类数以小型浮游

动物(原生动物、轮虫)为主,这与国内已报道的相关湖泊、水库、池塘等水体研究结果相似^[14-16]。由于浮游植物中的绿藻和硅藻具有快速适应水环境变化等特点,浮游动物中的轮虫具有孤雌生殖、生长周期短、对环境变化敏感等特点,使其能快速在水体中占据优势。浮游生物群落结构趋于小型化的特征,很大程度上与湖区周边城镇发展及农业开发密切相关。此次调查分析共发现浮游生物优势种10种,其中浮游植物优势种主要为蓝藻门种类,优势种较为简单;浮游动物优势种相比2019年雪野湖调查结果,增加的种类主要是球形砂壳虫、缘板龟甲轮虫、前节晶囊轮虫、台湾温剑水蚤等的种类。浮游植物出现的微囊藻和鱼腥藻类均是水体富营养化的标志^[17],浮游动物出现的龟甲轮虫和晶囊轮虫类均为 β -中污带的指示物种^[5]。浮游生物相比同一区域的大明湖^[18]和小清河^[19],优势种均较为丰富。优势种间的差异主要与湖泊和河流所处的地理位置及生态环境有关。

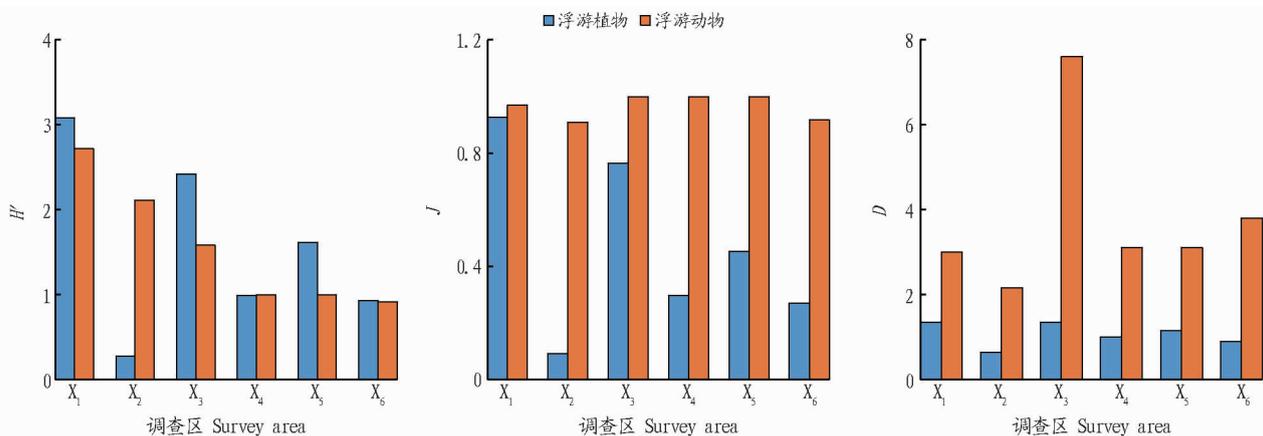


图5 浮游生物多样性指数(H')、均匀度指数(J)、丰富度指数(D)变化

Fig.5 Changes of biodiversity index (H'), uniformity index (J) and abundance index (D) of plankton

该研究各调查区浮游植物密度为 $61.41 \times 10^4 \sim 2\ 473.57 \times 10^4$ cell/L,浮游动物密度为0.80~4.00个/L,浮游植物的生物量为2.09~56.98 mg/L,浮游动物的生物量为0.001~0.047 mg/L。与2019年雪野湖浮游生物的调查结果^[5]相比较,此次调查获得的浮游生物的密度和生物量相对偏低,但与同一区域的湖库、河流和湿地^[5]相比较,此次雪野湖浮游生物的密度和生物量相对较高。有研究表明,蓝藻和轮虫喜欢富营养环境,水体营养状态的提升有利于蓝藻和轮虫种类密度的提高,硅藻、绿藻及枝角类喜还原性的中营养或贫营养的清洁水体,其对水环境的变化响应能力更为敏感,而大型藻类及桡足类受环境因子的影响相对较少^[20]。该研究结果显示浮游生物密度主要是由蓝藻和轮虫占比较大,大型藻类及浮游甲壳类密度所占比例相对较低。

3.2 浮游生物多样性及水环境质量初步评价 物种多样性是衡量生物群落结构的基本特征之一,Shannon-Wiener多样性指数主要反映生物群落结构的复杂性,是表示生物群落内种类多样性的程度的量纲数值,通过结合生物种类、数量等参数比较客观地反映生境对生物产生的综合累积效应,多样

性指数在一定程度上可以反映水质好坏状况,数值越大,表明浮游植物群落结构越稳定,水质相对较好,反之则相对较差^[21]。Margalef丰富度指数用于对同一地点进行群落种类的多样性比较,其值表示的水质类型与Shannon-Wiener多样性指数接近,Pielou均匀度指数是实际多样性与理论最大多样性的比值,反映各个物种个体数目在群落中分配的均匀程度^[22]。

此次调查发现,雪野湖生物多样性指数和均匀度指数均相对较高,与2019年的调查结果相比多样性指数和均匀度指数增加,丰富度指数降低;与同一区域的湿地调查结果相比,济西湿地多样性指数比雪野湖高46.45%^[23];与河流调查结果相比,徒骇河多样性指数比雪野湖高84.97%^[24]。多样性指数的差异与湖区生境密不可分,生境发生变化,生物群落多样性在空间上会随之作出响应,以便较快适应新的生境。根据生物多样性水质评价标准,雪野湖水质状况为中污染,水环境质量与白云湖(β -中污染)、小清河(α -中污染)和济西湿地(β -中污染)基本一致^[5];与以往调查结果^[5]相比,雪野湖的浮游生物水质评价结果变化不大,水环境质量一直

保持在 α -中污染至 β -中污染,表明湖区的水质在一定时期内受到污染,环境治理和生态保护亟待加强,以改善水环境质量提高水生生物多样性。

3.3 湖区水生态保护措施 雪野湖是济南重要的水资源与水生态区,其水生态系统的健康直接关系到人类的发展。雪野湖区周边主要为发展休闲度假旅游区,环湖地区主要分布国际航空园、国际度假区等旅游项目。雪野湖是济南莱芜区最大的地表水水源地,据资料分析,雪野湖库区经过兴利库容,减少弃水,环境容量及储水量有所提高,在保证现有工农业用水的情况下,每年还可以提供工业或城市供水 $2.54 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[25]。近年来,由于湖库调储运行和自然环境变化以及湖滨滩地资源过度开发等原因,导致湖区自然生态系统逐渐退化。尤其是大坝建成后随着河水流速的减缓,库区内水体的自净能力减弱,加之上游及库区周边人类活动产生的垃圾及污染物进入湖区,造成水体污染,水质降低,生物群落减少,生态系统的平衡遭到破坏。基于此,根据湖库水体保护要求,应在湖区划定分级保护区,在保护区禁止一切不利于保护生态系统水源涵养功能的社会经济活动和生产方式,同时在湖区浅水区通过采取种植水生植物等手段,增强水体的生态调节能力。此外,在保护水资源和水环境的同时通过科学增殖放流,合理利用水体,以鱼养水,实现更大的生态效益,为区域生态保护和高质量发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 白海锋,宋进喜,龙永清,等.红碱淖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):1064-1075.
 [2] SRICHANDAN S, BALIARSINGH S K, PRAKASH S, et al. Seasonal dynamics of phytoplankton in response to environmental variables in contrasting coastal ecosystems[J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(12): 12025-12041.
 [3] 刘麟菲,徐宗学,殷旭旺,等.济南市不同区域水生生物与水环境因子的响应关系[J].湖泊科学,2019,31(4):998-1011.

[4] 洪治中.山东莱芜雪野湖水库消落带生态修复策略研究[J].华中建筑,2014,32(3):102-106.
 [5] 相华,殷旭旺,商书芹,等.城市水生态系统健康评价与修复对策研究[M].北京:中国水利水电出版社,2021.
 [6] 韩国良.雪野湖水资源优化配置研究[D].济南:山东建筑大学,2022.
 [7] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等.中国淡水藻类[M].上海:上海科学技术出版社,1979.
 [8] 韩茂森,束蕴芳.中国淡水生物图谱[M].北京:海洋出版社,1995.
 [9] 赵文.水生生物学[M].北京:中国农业出版社,2005.
 [10] 白海锋,王怡睿,宋进喜,等.渭河浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2022,31(1):117-130.
 [11] 郑丙辉,田自强,张雷,等.太湖西岸湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况[J].生态学报,2007,27(10):4214-4223.
 [12] 刘钢,孟云飞,吴丹,等.青藏高原可鲁克湖浮游动物群落结构特征与水质评价[J].大连海洋大学学报,2018,33(3):379-386.
 [13] 刘盼盼,王龙,王培,等.沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价[J].水生生物学报,2018,42(2):373-381.
 [14] 姜忠峰,李畅游,张生.呼伦湖浮游动物调查与水体富营养化评价[J].干旱区资源与环境,2014,28(1):158-162.
 [15] 杨毓鑫,杜春艳,钱湛,等.洞庭湖区南汉口水体浮游植物群落结构特征及其影响因素[J].环境科学学报,2020,33(1):147-154.
 [16] 白禄军,张子媛,王利,等.响水水库浮游生物渔业资源分析[J].大连海洋大学学报,2020,35(2):280-287.
 [17] 国家环保局《水生生物监测手册》编委会.水生生物监测手册[M].南京:东南大学出版社,1993.
 [18] 郑琳琳,唐厚全,王兆军,等.济南大明湖景观水体浮游植物调查及水质评价[J].山东师范大学学报(自然科学版),2017,32(1):135-138.
 [19] 相华,朱中竹,商书芹,等.小清河济南段浮游动物群落结构空间变化特征[J].河北渔业,2020(1):38-43.
 [20] 张世羊,周巧红,成水平,等.复合养殖系统中浮游动物种类丰度及其影响因素[J].中国环境科学,2009,29(7):745-750.
 [21] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
 [22] PIELOU E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of theoretical biology, 1996, 10(2): 370-383.
 [23] 于志强,王帅帅.济南市 2016 年浮游植物调查及水质评价[J].治淮,2017(12):73-74.
 [24] 贾丽,梁晶晶,商书芹,等.徒骇河济南段浮游植物群落结构及多样性研究[J].江西水产科技,2021(1):8-10.
 [25] 徐景超,杨学凤,马华倩.雪野水库洪水资源利用及供水潜力分析[J].山东水利,2014(2):57-58.

(上接第 50 页)

[15] 谢德意,王惠萍,王付欣,等.盐胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国棉花,2000,27(9):12-13.
 [16] 马小娟,戚金亮,印莉萍,等.植物钾离子转运相关蛋白及基因研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2004,25(2):41-45.
 [17] ADAMS E, SHIN R. Transport, signaling, and homeostasis of potassium and sodium in plants[J]. Journal of integrative plant biology, 2014, 56(3): 231-249.
 [18] 郝艳淑,姜存仓,夏颖,等.植物钾的吸收及其调控机制研究进展[J].中国农学通报,2011,27(1):6-10.
 [19] SHABALA S. Ionic and osmotic components of salt stress specifically mod-

ulate net ion fluxes from bean leaf mesophyll[J]. Plant, cell and environment, 2000, 23(8): 825-837.
 [20] LICHTENTHALER H K. Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants[J]. Journal of plant physiology, 1996, 148(1/2): 4-14.
 [21] MUNDS R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, cell and environment, 2002, 25(2): 239-250.
 [22] 唐晓倩,李金龙,李焕勇,等. NaCl 处理对西伯利亚白刺幼苗生长及离子平衡的影响[J].西北植物学报,2018,38(3):517-524.
 [23] 蔺丽媛.盐胁迫下甜菜不同倍性品种 Na^+/K^+ 稳态平衡作用研究[D].兰州:兰州理工大学,2019:18-19.
 [24] 廖岩,彭友贵,陈桂珠.植物耐盐性机理研究进展[J].生态学报,2007,27(5):2077-2089.