

岱海夏季补水前后浮游动物群落结构及多样性

齐娟娟¹, 纪腾蛟¹, 程学慧², 元雪娇¹, 杨东妮³

¹内蒙古自治区环境监测总站乌兰察布分站, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古自治区环境监测总站, 内蒙古 呼和浩特

³东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年5月13日; 录用日期: 2024年6月10日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

为探究岱海夏季补水前后浮游动物的群落结构与多样性状况, 本研究于2022年夏季(6月)生态补水前、2023年夏季(6月)生态补水后对岱海的水体浮游动物群落结构及多样性进行调查, 分析其种类组成、丰度、生物量及生物多样性指数。结果表明, 补水前共鉴定出3门8种, 其中桡足类最多(5种)、轮虫2种、枝角类1种, 补水后共鉴定出4门21种, 其中桡足类最多(14种)、枝角类4种、原生动物2种、轮虫1种, 且补水后优势种数明显多于补水前; 补水前浮游动物平均丰度(145.35 ind./L)低于补水后丰度(157.50 ind./L), 而平均生物量(36.70 mg/L)高于补水后(5.44 mg/L); 补水前Shannon-Wiener多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J)和Margalef丰富度指数(d)分别介于0.77~1.50、0.36~0.70、0.60~1.12之间, 而补水后 H' 、 J 、 d 分别介于0.45~2.07、0.69~0.96、0.31~1.65之间。通过主坐标分析(PCoA)表明, 岱海夏季补水前后的浮游动物群落结构存在显著差异($P < 0.05$)。根据多样性指数水质评价标准, 岱海夏季补水后的水质并没有得到明显的改善, 需加强保护和治理。

关键词

浮游动物, 群落结构, 多样性, 生态补水, 岱海

Community Structure and Diversity of Zooplankton before and after Summer Water Replenishment in Daihai

Juanjuan Qi¹, Tengjiao Ji¹, Xuehui Cheng², Xuejiao Yuan¹, Dongni Yang³

¹Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station Ulanqabu Sub-Station, Hohhot Inner Mongolia

²Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station, Hohhot Inner Mongolia

³College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: May 13th, 2024; accepted: Jun. 10th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

文章引用: 齐娟娟, 纪腾蛟, 程学慧, 元雪娇, 杨东妮. 岱海夏季补水前后浮游动物群落结构及多样性[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(3): 591-599. DOI: 10.12677/aep.2024.143081

Abstract

In order to investigate the community structure and diversity of zooplankton before and after the summer water replenishment in Daihai, the community structure and diversity of zooplankton in the water body of Daihai were investigated before the summer water replenishment in 2022 (June) and after the summer water replenishment in 2023 (June), and their species composition, abundance, biomass and biodiversity index were analyzed. The results showed that 8 species of 3 phyla were identified before water replenishment, among which copepods (5), rotifers (2) and rotifers (1) were the most, and 21 species of 4 phyla were identified after water replenishment, among which copepods (14), rotifers (4), protozoa (2) and rotifers (1) were the most, and the number of dominant species after water replenishment was significantly higher than that before water replenishment. The average abundance of zooplankton before water replenishment (145.35 ind./L) was lower than that after water replenishment (157.50 ind./L), while the average biomass (36.70 mg/L) was higher than that after water replenishment (5.44 mg/L). Shannon-Wiener diversity index (H'), Pielou evenness index (J) and Margalef richness index (d) before water replenishment were 0.77~1.50, 0.36~0.70 and 0.60~1.12, respectively. After water replenishment, H' , J and d ranged from 0.45~2.07, 0.69~0.96 and 0.31~1.65, respectively. Principal coordinate analysis (PCoA) showed that there were significant differences in the community structure of zooplankton before and after water replenishment in summer ($P < 0.05$). According to the water quality evaluation standard of diversity index, the water quality of Daihai in summer has not been significantly improved, and it needs to be strengthened to protect and control.

Keywords

Zooplankton, Community Structure, Diversity, Ecological Water Replenishment, Daihai

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化、经济发展及城市化的不断推进,使得寒旱区浅水型湖泊富营养化一直是较为突出的水环境问题之一。大量营养物质的排入会造成湖泊水生生物的异常繁殖和水体生态功能的逐步恶化,最终导致湖泊水体富营养化的产生[1]。浮游动物在湖泊生态系统的物质和能量循环中扮演着重要的角色,其种类组成、现存量变化及多样性变化受湖泊的不同地理水文条件和人类活动影响较大。由于不同的种类对环境的敏感性和适应程度不同,浮游动物常被视作反映反映湖泊、水库等水体的营养程度和水质状况的生物指标[2]。

岱海作为寒旱区浅水型湖泊的典型代表,是内蒙古自治区中部生态保护的核心区,也是北方重要的生态屏障,具有独特的流域地质地貌环境、水文气候特征及特殊的富营养化形成机制。近年来,由于人为及自然因素的干扰,岱海的水位下降、水域面积急剧萎缩、水质持续恶化及生物种群匮乏[3]。2016年,内蒙古全面启动岱海治理工程,围绕水资源、水环境、水生态实施“三水共治”,投入了大量的人力物力,并取得了初步成效。2021年,岱海被自治区林业和草原局列入自治区级重要湿地名录。2022年“引黄济岱”生态应急补水工程全线贯通以来,已累计补水 1102 万 m^3 ,使得岱海的生态环境得到了一定程度的恢复[4]。目前,已有大量针对于岱海生态修复成果方面的研究,多数以水体理化参

数作为评价指标,从生态系统角度利用水生生物群落结构变化作为评价指标的研究较少,但水体理化指标并不能完全反映水体环境的变化。因此,研究岱海浮游动物群落结构及多样性对于水生生物现状的研究具有重要意义。

本研究于 2022~2023 年夏季对岱海生态补水前后浮游动物群落结构进行调查,通过分析岱海补水前后浮游动物的种类组成、丰度、生物量和生物多样性指数,对群落分布特征和水体状况进行讨论,以期对岱海的生态修复、环境保护及资源合理利用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究地概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县东部,地理位置为东经 112°33'~112°46',北纬 40°29'~40°37',流域面积达 2339 km²。岱海属微咸水湖,为内陆型封闭湖泊,其水源主要来自降水、河流输入和地下水,入湖河流有 22 条,主要的支流有西侧的弓坝河、五号河及南侧的天成河、步量河等 8 条。主要保护对象为湖泊湿地生态系统及栖息珍稀鸟类[4]。其气候类型为典型中温带大陆型干旱、半干旱季风气候,特点是干旱少雨、日照时间长以及较强的蒸发程度。岱海近几年平均气温为 5.1℃,年降水量为 392.0 mm,年蒸发量为 1938.0 mm。

2.2. 采样点设置

本研究分别于 2022 年 6 月(生态补水前)、2023 年 6 月(生态补水后)共开展 2 次对岱海浮游动物群落特征的调查。利用网格法对岱海均匀设置调查点位,兼顾湖滨带和湖心区,共设置 10 个采样点(表 1)。

Table 1. Basic information of sampling points

表 1. 采样点的基本信息

点位编号名称	点位名称	东经(度)	北纬(度)
D1	岱海 1	E 112°40'19.01"	N 40°36'07.26"
D2	岱海 2	E 112°42'12.90"	N 40°36'08.76"
D3	岱海 3	E 112°43'52.73"	N 40°36'04.93"
D4	岱海 4	E 112°38'44.61"	N 40°34'15.36"
D5	岱海 5	E 112°38'56.58"	N 40°34'46.26"
D6	岱海 6	E 112°42'25.02"	N 40°34'52.29"
D7	岱海 7	E 112°44'05.72"	N 40°35'23.02"
D8	岱海 8	E 112°39'49.15"	N 40°33'08.18"
D9	岱海 9	E 112°41'34.48"	N 40°33'29.55"
D10	岱海 10	E 112°43'53.35"	N 40°34'06.20"

2.3. 样品采集与处理

采集枝角类和桡足类,取 20 L 混合水样,通过 13#浮游生物网过滤浓缩至 50 mL,现场添 5%的甲醛溶液进行固定处理;利用 25#浮游生物网采集原生动物和轮虫,在水深 0.5 m 处采水,灌注 1000 ml 聚乙烯塑料大瓶中保存,现场加入 15 ml 鲁哥氏液进行固定并对水样贴上标签,运回实验室充分静置 48 h 后,

虹吸浓缩至 30 ml。均使用移液枪和 MoticBA400 光学显微镜进行计数与鉴定。枝角类和桡足类定量样品准确吸取 5 ml 置于相应规格计数框内, 在 10×物镜下, 进行镜检鉴定和计数(若其样品密度过高时, 适当稀释后再计数)。原生动物和轮虫浓缩样品经充分摇匀后分别取 0.1 ml 和 1 ml 置于相应规格计数框内, 在 20×物镜下全片计数。同一样品计数 2 片, 如果误差超过 15%, 则计数第 3 片, 结果取平均值。物类鉴定参考《微型生物监测新技术》[5]、《中国淡水轮虫志》[6]、《中国动物志淡水枝角类》[7]、《中国动物志淡水桡足类》[8]。

$$\text{浮游动物丰度的计算方法为: } N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$$

式中: N ——1 L 水样中所观察到的浮游动物个数; V_s ——浓缩后的样品体积; n ——显微镜下观察到的浮游动物个数; V ——采样量; V_a ——计数体积。通过上述公式计算得到浮游动物丰度, 结合浮游动物湿重数据, 即可计算浮游动物生物量。

2.4. 数据分析

2.4.1. 物种多样性分析方法

生物多样性指数是描述群落结构特征的一个指标, 运用 PAST 软件计算出的 3 种多样性指数 (Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数)对岱海夏季补水前后浮游动物多样性进行分析。Shannon-Wiener 多样性指数一般用于判断群落结构的复杂程度, 重复性越小, 复杂程度就越高, 值就越大; Pielou 均匀度指数则可以用于判断各物种个体数量分配的均匀程度; Margalef 丰富度指数是指一个群落或环境中物种数目的多少, 反映了群落物种的丰富度[9]。利用浮游动物生物多样性指数水质评价标准对岱海夏季补水前后水体状况[10]进行评价分级(表 2)。

(1) Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式[11]为: $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$;

式中: S 为样品中总种类数; P_i 为第 i 种的个体数(n_i)与总个体数(N)的比值(n_i/N)。

(2) Pielou 均匀度指数(J)计算公式[12]为: $J = H'/H_{\max}$;

式中: H' 为种类多样性指数; H_{\max} 为 $\log_2 S$, 表示多样性指数的最大值, S 为样品中总种类数。

(3) Margalef 种类丰富度指数(d)计算公式[13]为: $d = (S-1)/\log_2 N$;

式中: S 为样品中总种类数; N 为样品中的生物总个体数。

Table 2. Water quality assessment criteria for zooplankton biodiversity index

表 2. 浮游动物生物多样性指数水质评价标

生物多样性指数	重污染	α -中污染	β -中污染	轻污染	清洁
H'	<1.0	2.0~1.0	3.0~1.0	2.0~1.0	>4.5
J	<0.1	0.3~0.1	2.0~1.0	2.0~1.0	>0.8
d	1.0~0	2.0~1.0	2.0~1.0	2.0~1.0	>6.0

注: H' : 香农-维纳多样性指数; J : 均匀度指数; d : 丰富度指数。

2.4.2. 优势种分析方法

运用 Excel 2021 对浮游动物物种丰度、生物量和优势种进行统计计算。根据浮游生物的优势度(Y)来确定优势种, 当 $Y \geq 0.02$ 时确定为优势种。

优势度指数(Y)计算公式[14]为: $Y = (n_i/N) \times f_i$;

式中 n_i 为样品中第 i 种生物个体数, N 为样品种生物总数; f_i 为第 i 种生物在各采样点出现的频率。

2.4.3. 群落差异性分析方法

运用 R 语言“vegan”和“ggplot2”软件包对岱海夏季补水前后的浮游动物群落进行主坐标分析(PCoA), 计算浮游动物种类之间的 Bray-Curtis 距离;

3. 结果与分析

3.1. 浮游动物物种组成及优势种分析

岱海夏季补水前后浮游动物物种组成如表 3 所示, 2022 年 6 月生态补水前共鉴定出 3 门 8 种, 其中桡足类最多(5 种)、轮虫 2 种、枝角类 1 种, 分别占浮游动物总物种数目的 62.5%、25.00%、12.5%, 直额裸腹溞(*Monia rectirostris*)、球状许水蚤(*Schmackeria forbesi*)、腹突荡镖水蚤(*Neurodiaptomus genogibbosus*)、亚洲后镖水蚤(*Metadiaptomus asiaticus*)是补水前的优势种。2023 年 6 月生态补水后共鉴定出 4 门 21 种, 其中桡足类最多(14 种)、枝角类 4 种、原生动物 2 种、轮虫 1 种, 分别占浮游动物总物种数目的 66.66%、19.04%、9.52%、4.76%, 微型裸腹溞(*Moina micrura*Kurz)、荡镖水蚤(*Neurodiaptomus*)等是补水后的优势种。直额裸腹溞和球状许水蚤是补水前后共有的优势种(表 4)。

Table 3. Changes of zooplankton species composition before and after water replenishment in summer in Daihai

表 3. 岱海夏季补水前后浮游动物物种组成变化

时期/物种	原生动物	轮虫	枝角类	桡足类	总计
补水前	0	2	1	5	8
所占比例%	0.00	25.00	12.50	62.50	
补水后	2	1	4	14	21
所占比例%	9.52	4.76	19.04	66.66	

Table 4. Changes of dominant species of zooplankton before and after water replenishment in summer in Daihai

表 4. 岱海夏季补水前后浮游动物优势种的变化

门类	优势种		优势度	
	种类	拉丁名	补水前	补水后
枝角类	直额裸腹溞	<i>Monia rectirostris</i>	0.174	0.051
	微型裸腹溞	<i>Moina micrura</i> Kurz	-	0.124
桡足类	球状许水蚤	<i>Schmackeria forbesi</i>	0.025	0.050
	腹突荡镖水蚤	<i>Neurodiaptomus genogibbosus</i>	0.398	-
	亚洲后镖水蚤	<i>Metadiaptomus asiaticus</i>	0.154	-
	荡镖水蚤	<i>Neurodiaptomus</i>	-	0.050
	中华窄腹剑水蚤	<i>Limnoithona sinensis</i>	-	0.033
	哲水蚤幼体	<i>Calanoida</i>	-	0.041
	剑水蚤幼体	<i>Cyclopoidea</i>	-	0.100

3.2. 浮游动物丰度和生物量分析

岱海夏季补水前后浮游动物现存量的分析如图 1 所示, 2022 年 6 月生态补水前浮游动物平均丰度

(145.35 ind./L)低于 2023 年 6 月生态补水后丰度(157.50 ind./L), 而平均生物量(36.70 mg/L)高于补水后(5.44 mg/L)。补水前浮游动物丰度介于 0~478.98 ind./L, 以桡足类占主导, 补水后浮游动物丰度介于 72.00~300.00 ind./L, 以原生动物为主导, 而补水后原生动物、轮虫和枝角类的丰度都有所增加, 桡足类丰度下降。补水前浮游动物生物量介于 0~136.60 mg/L, 以桡足类为主导, 补水后浮游动物生物量介于 0.01~17.54 mg/L, 以桡足类为主导, 除桡足类生物量急剧下降之外, 其他类生物量并无太大变化。

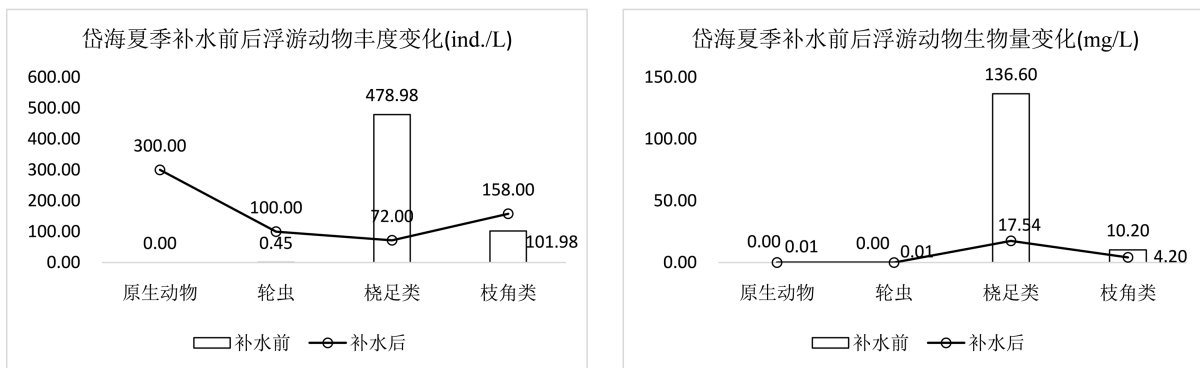


Figure 1. Changes of zooplankton abundance (ind./L) and biomass (mg/L) before and after water replenishment in summer in Daihai

图 1. 岱海夏季补水前后浮游动物丰度(ind./L)、生物量(mg/L)的变化

3.3. 浮游动物生物多样性分析

2022 年 6 月生态补水前 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(d)的平均值分别为 1.29、0.58、0.82, 均低于 2023 年 6 月生态补水后补水后 H' 、 J 、 d 的平均值(1.55、0.84、1.16)。补水前, 全域采样点 H' 介于 0.77~1.50 之间、 J 介于 0.36~0.70 之间、 d 介于 0.60~1.12。补水后, 全域采样点 H' 介于 0.45~2.07 之间、 J 介于 0.69~0.96 之间、 d 介于 0.31~1.65 (表 5)。由此可知, 补水后的 H' 和 d 变化不明显, 而 J 明显升高, 说明补水后的群落结构较一致, 稳定性较低, 均匀度较高。

Table 5. Water quality assessment of zooplankton diversity index at each sampling point in Daihai

表 5. 岱海各采样点浮游动物多样性指数

采样时期	采样点	H'	J	d
补水前	D1	1.50	0.56	1.01
	D2	1.50	0.64	1.12
	D3	1.23	0.69	0.60
	D4	0.77	0.36	0.75
	D5	1.26	0.58	0.84
	D6	1.43	0.70	0.66
	D7	1.36	0.65	0.73
	D8	1.37	0.65	0.72
	D9	1.36	0.49	1.02
	D10	1.16	0.53	0.70

续表

补水后	D1	1.66	0.87	1.07
	D2	1.91	0.75	1.65
	D3	1.28	0.90	0.90
	D4	1.70	0.91	1.20
	D5	1.34	0.96	0.79
	D6	0.45	0.78	0.31
	D7	1.47	0.87	1.06
	D8	1.94	0.87	1.45
	D9	2.07	0.80	1.61
	D10	1.71	0.69	1.55

注： H' ：香农-维纳多样性指数； J ：均匀度指数； d ：丰富度指数。

根据 Shannon-Wiener 指数水质评价标准(表 3)，来评价岱海夏季补水前后的水体状况，结果如表 5 所示，补水前，从 H' 来看，样点 D4 水质为重度污，其余大部分采样点水质为 α -中度污染。从 J 来看，样点 D4 水质为 α -中度污染，其余大部分采样点水质为轻度污染。从 d 来看，D1、D2 和 D10 为 α -中度污染，其余采样点均为重度污染；补水后，从 H' 来看，样点 D6 水质为重度污、D9 为 β -中度污染，其余采样点水质为 α -中度污染。从 J 来看，全域采样点水质为轻度污染。从 d 来看，D3、D6 和 D7 为重度污染，其余采样点均为 α -中度污染；由此可知，岱海夏季补水前后的水体状况并未得到明显的改善。

3.4. 浮游动物群落结构特征分析

通过 PCoA 对岱海夏季补水前后的浮游动物群落结构组成进行比较发现(图 2)，补水前与补水后的浮游动物群落分布没有交集，且群落结构组成具有显著差异($P < 0.05$)。

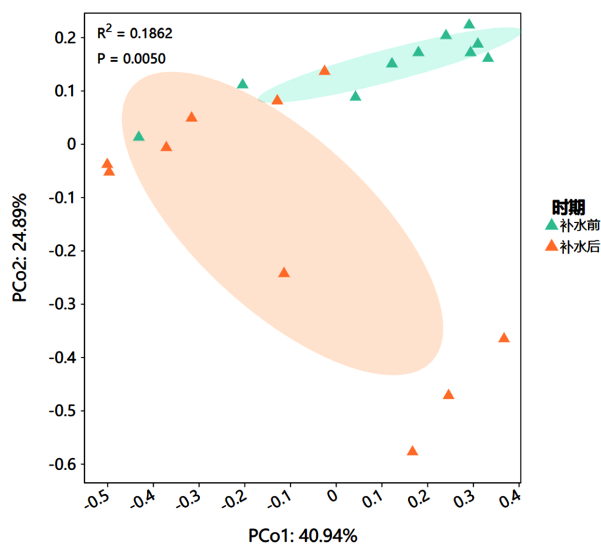


Figure 2. Principal Coordinate Analysis (PCoA) ranking of zooplankton community structure before and after summer water replenishment in Daihai based on Bray-Curits distance

图 2. 基于 Bray-Curits 距离的岱海夏季补水前后浮游动物群落结构的主坐标分析(PCoA)排序

4. 讨论

已知的湖泊、水库浮游动物群落组成的研究中,大多数都是以轮虫的种类和丰度所占的比例较高,而枝角类和桡足类占比较少[15] [16]。在本研究中,岱海补水前后浮游动物群落均表现出桡足类占主导并呈现大型化特征,这与以往研究结果不同。这可能是直接受到盐度的影响,其会干扰浮游动物的繁殖、发育和生长,在盐度较高的条件下,特别是在旱季的河口,桡足类的物种数量和丰度都会更加丰富[17] [18]。还有可能是因为浮游动物作为鱼类的重要诱饵,受到下行效应的调控,岱海水体中占优势的桡足类(大型浮游动物)更易被捕食,但有相关报道,岱海湖中并没有发现鱼类,缺少相应的捕食者从而造成岱海湖中呈现大型化趋势。

在富营养化的浅水湖泊中,浮游动物通常呈现小型化趋势(轮虫和原生动物),而本研究中表现出桡足类占主导并呈现大型化特征(桡足类和枝角类),补水前后桡足类均占总物种数的60%以上,优势种也是以桡足类和枝角类为主,不符合富营养化水域中的浮游动物的组成特点[19],并且通过Shannon-Wiener多样性指数水质评价标准可知,岱海夏季补水前后水质均处于中污染中营养型水平,这与本研究结果一致。

通常情况下,生物量与丰度成正比关系,即丰度增加,生物量也随之增加[20] [21]。在本研究中,岱海补水前浮游动物平均丰度(145.35 ind./L)低于生态补水后丰度(157.50 ind./L),而平均生物量(36.70 mg/L)反而高于补水后(5.44 mg/L),与以往研究结果不同。这可能是由于生态补水工程对岱海的水质造成较为强烈的波动,使得浮游动物短时间内对环境无法适应所造成的。浮游动物生物多样性指数是衡量生物群落是否稳定的方式之一,在本研究中补水前的 H' 值的水平变化不大,说明补水前浮游动物种类较少,群落组成重复性较大、稳定性较低,而补水后的 H' 较补水前微增、 J 较补水前显著增加,说明岱海补水后的浮游动物均匀度较高,生物状况有所提升,群落结构逐渐向比较复杂、稳定的状态发展,这与PCoA的结果相一致(补水前后的浮游动物群落结构存在显著差异)。这同样与生态补水工程有关,生态补水通过改变湖泊水体理化因子,这对浮游植物群落结构影响较大[22],而浮游植物作为浮游动物的食物来源,滤食性浮游动物的丰度会随着浮游植物的量而变化,最终间接地影响浮游动物的群落结构[23]。

5. 结论

岱海夏季生态补水前共鉴定出3门8种,补水后共鉴定出4门21种,均以桡足类和枝角类为优势种;补水前浮游动物平均丰度低于补水后,而平均生物量高于补水后;补水前后的浮游动物群落结构存在显著差异($P < 0.05$);经过生态补水工程后岱海夏季浮游动物生物状况呈现向好趋势,而水质仍处于较差水平,并没有得到明显的改善,考虑到浮游动物群落组成的复杂性,仅凭多样性指数来评价生物状况与水质状况不够全面。本次调查时间为夏季,只能代表该流域丰水期浮游动物群落分布情况,对于全年的整体变化规律,尚需进一步探讨。

参考文献

- [1] 全栋,张生,史小红,等. 环境因子对乌梁素海水体营养状态的影响:基于2013-2018年监测数据的分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1610-1619.
- [2] van der Zanden, M.J. and Vadeboncoeur, Y. (2020) Putting the Lake Back Together 20 Years Later: What in the Benthos Have We Learned about Habitat Linkages in Lakes? *Inland Waters*, **10**, 305-321. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1712953>
- [3] 马芳,冯金朝. 人类活动对内蒙古岱海湖影响[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2017, 26(1): 77-83.
- [4] 王珏. “一湖两海”再现美丽风采[J]. 内蒙古林业, 2024(2): 14-16.
- [5] 沈韞芬,顾曼如,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [6] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.

- [7] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志, 节肢动物门, 甲壳纲, 淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [8] 中国科学院中国动物志委员会. 中国动物志, 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 谢进金, 许友勤, 陈寅山, 等. 晋江流域水质污染与浮游动物四季群落结构的关系[J]. 动物学杂志, 2005(5): 8-13.
- [10] 许志. 上海河道浮游生物群落结构时空分布特征及水质生物学评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2021.
- [11] Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, **27**, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [12] 孙军, 刘东艳. 赤潮生物浮动弯角藻名称小记[J]. 海洋科学, 2003, 27(6): 45-46.
- [13] Margalef, R. (1951) Diversidad de especies en las comunidades naturales. <https://digital.csic.es/handle/10261/165981>
- [14] Lampitt, R.S., Wishner, K.F., Turley, C.M., *et al.* (1993) Marine Snow Studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, Composition and Role as a Food Source for Migrating Plankton. *Marine Biology*, **116**, 689-702.
- [15] 陈菁怡, 耿兆楣, 张秋英, 等. 白洋淀浮游生物群落结构及关键环境因子分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 50-61.
- [16] Habib, O.A., Tippet, R. and Murphy, K.J. (1997) Seasonal Changes in Phytoplankton Community Structure in Relation to Physico-Chemical Factors in Loch Lomond, Scotland. *Hydrobiologia*, **350**, 63-79.
- [17] Chavhan, A. (2017) Community Structure and Monthly Dynamics of Zooplankton in High Altitude Rice Fish System in Eastern Himalayan Region of India. *International Journal of Life Sciences*, **5**, 362-378.
- [18] Nguyen, C.T., Vila-Gispert, A., Quintana, X.D., *et al.* (2020) Effects of Salinity on Species Composition of Zooplankton on Hau River, Mekong Delta, Vietnam. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, **56**, Article 20.
- [19] 张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 336-344.
- [20] 陈亮, 刘一, 禹娜, 等. 分水江水库浮游动物群落结构的初步研究及水质评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2010(6): 72-82.
- [21] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 等. 西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5126-5132.
- [22] 李兴, 何婷婷, 勾芒芒. 乌梁素海冰封期浮游植物群落特征与环境因子 CCA 分析[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(4): 67-78.
- [23] Marques, S.C., Azeiteiro, U.M., Marques, J.C., *et al.* (2006) Zooplankton and Ichthyoplankton Communities in a Temperate Estuary: Spatial and Temporal Patterns. *Journal of Plankton Research*, **28**, 297-312. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbi126>