

文章编号:1005-3832(2019)04-0055-08

# 农业面源污染对莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物群落结构的影响

王慧博<sup>1</sup>, 黄晓丽<sup>1</sup>, 吴计生<sup>2</sup>, 都雪<sup>1</sup>, 王秋实<sup>1</sup>, 宋聃<sup>1</sup>, 霍堂斌<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 农业农村部黑龙江流域渔业资源与环境重点野外科学观测试验站, 黑龙江 哈尔滨 150070;

2. 松辽水环境科学研究所, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 2018年7月采用常规方法调查了莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物的群落结构。本次调查共鉴定出浮游植物6门15属18种及变种, 其中硅藻门种类最多, 蓝藻门的丰度、生物量高于其他藻类。浮游植物的总平均丰度为  $45.36 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 总平均生物量为  $15.3192 \text{ mg/L}$ ; 共鉴定出浮游动物13属16种属, 其中桡足类种类较多, 生物量较高; 原生动物和轮虫种类很少, 但丰度较高。浮游动物的总平均丰度为  $787.19 \text{ ind./L}$ , 总平均生物量为  $0.3914 \text{ mg/L}$ 。仅在两个采样点发现底栖动物2目3科3种, 都为优势种。底栖动物的总平均丰度为  $83.2 \text{ ind./m}^2$ , 总平均生物量为  $0.240 \text{ g/m}^2$ 。水库水质浑浊, 浮游生物和底栖动物物种较单一, 优势种多为耐污种类, Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 丰富度指数( $D$ )结果表明, 水库水环境质量属于  $\alpha$ -中度污染。浮游生物和底栖动物与环境因子的典范对应分析结果表明, 水温、透明度和磷酸盐含量是影响浮游生物和底栖动物群落结构及其分布的主要环境因子。通过研究该水库受农业面源污染影响后的水生态特征, 可为保护与合理利用呼伦贝尔水资源提供基础数据

**关键字:** 浮游生物; 底栖动物; 群落结构; 面源污染

**中图分类号:** Q178.1 **文献标志码:** A

## Effect of Agricultural Non-point Source Pollution on Plankton and Zoobenthos Communities in a Reservoir in Morin Dawa Daur Autonomous Banner

WANG Hui-bo<sup>1</sup>, HUANG Xiao-li<sup>1</sup>, WU Ji-sheng<sup>2</sup>, DU Xue<sup>1</sup>, WANG Qiu-shi<sup>1</sup>, SONG Dan<sup>1</sup>, HUO Tang-bin<sup>1</sup>

(1. Key Field Scientific Observation Station of Fisheries Resources and Environment in Heilong Jiang River Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Heilongjiang Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China

2. Songliao Institute of Water Environmental Science, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The community structures of plankton and zoobenthos were investigated in a reservoir affected by agricultural non-point source pollution in Morin Dawa Daur Autonomous Banner in July of 2018 in order to study the effects of agricultural non-point source pollution on water ecological characteristics in a reservoir, and to provide basic data with the protection and application of HulunBuir water resources. A total of 18 phytoplankton species (belonging to 15 genera and 6 phyla) were found, with the maximal species number in Bacillariophyta, and higher abundance and biomass of Cyanophyta than the others. There were average total phytoplankton abundance of  $45.36 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , and the average total phytoplankton biomass of  $15.3192 \text{ mg/L}$ . A total of 16 zooplankton species (belonging to 13 genera) were observed, total average abundance of  $787.19 \text{ ind./L}$ , and the total average biomass of  $0.3914 \text{ mg/L}$ , with the most diverse group and biomass of copepods, and rare species of protozoa and rotifer which they had a high abundance. A total of 3 zoobenthos species (belonging to 3 Family and 2 Order) were recorded only at 2 sampling points, and all dominant species, with total average abundance of  $83.2 \text{ ind./m}^2$ , and the total average biomass of  $0.240 \text{ g/m}^2$ . The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) and the Margalef diversity indices ( $D$ ) indicated that the reservoir, which had turbid water and the plankton and rare dominant species of

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 农财物种保护项目(2019-HLJ-01).

作者简介: 王慧博(1991-), 女, 硕士, 从事渔业生态与环境研究. E-mail: wanghuiibo0068@163.com

通信作者: 霍堂斌(1980-), 男, 博士, 副研究员, 从事渔业生态与环境研究. E-mail: tbhuo@163.com

zoobenthos, was under  $\alpha$ -moderate pollution. Analysis of the plankton and zoobenthos and environmental factors' CCA showed water temperature, transparency and phosphate content were the main environmental factors affecting the community structure and distribution of plankton and benthic fauna in the reservoir.

**Key words:** plankton; zoobenthos; community structure; non-point source pollution

农业面源污染是由农业生产活动中溶解或固体的污染物,从非特定的地域,在降水和径流冲刷作用下进入水体,引起的水体污染<sup>[1,2]</sup>。我国农业面源污染较严重,在农业农村部提出的“农业面源污染整治实施办法”政策落实后,农业面源污染情况有所好转,但总体仍不乐观<sup>[3]</sup>。内蒙古呼伦贝尔市莫力达瓦达斡尔族自治县(以下简称莫力达瓦旗)的某水库,距莫力达瓦旗市区约 97.5km,近巴彦鄂温克民族乡和奎勒河镇,右邻嫩江县,主要功能为灌溉、防洪。水库面积 1.5 km<sup>2</sup>,坐标 124°38'E,49°21'N,海拔高度 220.0~451.1 m;年平均气温 0~0.3℃,年平均降水量 460~50 mm,年平均日照时数 227 h,年有效积温 1900~2100℃,无霜期 105~125d。水库淤泥沉积严重,两岸基本都为农田,农业面源污染是影响其水质和水生生物生存的首要因素。

浮游生物是水域生态系统中的重要组成部分,在物质转化、能量流动、信息传递等生态过程中起重要作用<sup>[4-6]</sup>。浮游生物群落结构,如物种组成、生物多样性等直接或间接地影响水域生态系统<sup>[7]</sup>,能综合反映出较长时间内水体的污染结果;不少浮游生物种类还是环境污染和水体富营养化的指示生物<sup>[8-10]</sup>。底栖动物也是水生态系统生物群落的关键组分,是水生生物食物链(网)的中间环节,特别是其对生境的选择和适应的特性,已成为水环境状况的重要指示生物类群,是水域生态系统研究的热点之一,在生态系统结构、功能及能量学中扮演重要

的角色,是营养物质循环和能量向更高营养级流动的重要通道<sup>[11]</sup>。关于莫力达瓦市水域浮游生物和底栖动物的研究尚未见报道。本研究通过调查莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物群落的结构,监测水库水环境污染状况,以期对呼伦贝尔小型水库水资源保护与合理利用提出建议和指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间与采样点

2018 年 7 月在莫力达瓦旗某水库泥沙淤积较严重,底质均为厚淤泥底质,共设置 5 个采样点(图 1),采集浮游生物和底栖动物样品。

### 1.2 样品的采集与处理

用 5L 有机玻璃采水器,分别采集各采样点水面下 0.5m 处和距水底 0.5m 处的 2 个水样,将各水层水样等量混合得到 1L 混合水样,样品均用鲁哥氏碘液固定、染色,带回实验室内,用沉淀法经 48h 沉淀后,吸出上清液,留存 30mL 浓缩液用于鉴定浮游植物。浮游动物中原生动物、轮虫等小型浮游动物采样方法同浮游植物;枝角类和桡足类用 5L 有机玻璃采水器采集各采样点水面下 0.5m 处和距水底 0.5m 处的 2 个水样,将各水层水样等量混合得 20L 混合水样,之后用 13# 浮游生物网进行过滤,经 5%的甲醛溶液固定后,用沉淀法留存 30mL 浓缩液用于鉴定。底栖动物泥底断面定量样本采用 1/16 m<sup>2</sup>彼得逊采泥器,泥样用 40 目和 60 目分样筛过滤,

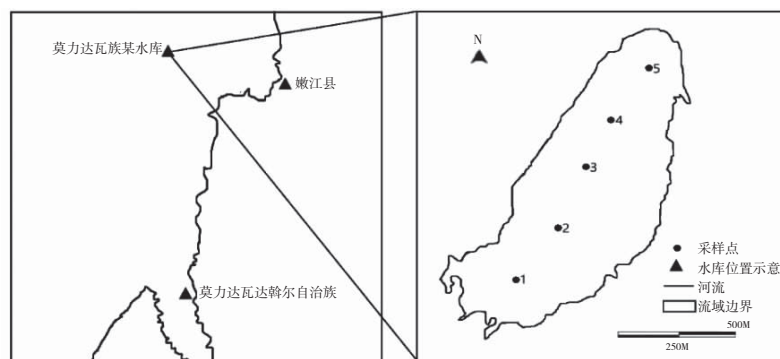


图 1 莫力达瓦旗某水库采样点分布图

Fig.1 Locations of sampling sites of a reservoir in Morin Dawa Daur Autonomous Banner

样品先用体积分数为 4% 的甲醛溶液固定, 带回实验室后再移入体积分数为 75% 的酒精中保存, 进行鉴定、计数。

根据《淡水浮游生物研究方法》<sup>[12,13]</sup>进行浮游生物定性、定量鉴定; 根据《中国淡水藻类—系统、分类及生态》鉴定浮游植物; 浮游动物根据《微生物监测新技术》<sup>[14]</sup>鉴定原生动物, 根据《中国淡水轮虫志》<sup>[15]</sup>鉴定轮虫, 根据《中国动物志》(淡水枝角类)<sup>[16]</sup>鉴定枝角类, 根据《中国动物志》(淡水桡足类)<sup>[17]</sup>鉴定桡足类; 根据《中国小蚓科研究》、《水生昆虫学》、《辽河流域底栖动物监测》<sup>[18-20]</sup>鉴定底栖动物种类与数量。

### 1.3 指标选取及其计算公式

用优势度评价浮游生物和底栖动物优势种。其计算公式为:  $Y=f_i \times P_i$ , 式中:  $Y$  为优势度;  $f_i$  为第  $i$  种物种的出现频率;  $P_i$  为第  $i$  种物种个体数量占总个体数量的比例。将  $Y > 0.02$  的物种定为优势种<sup>[21]</sup>。

利用 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数, 研究浮游生物和底栖动物群落物种的多样性。

### 1.4 群落结构与环境因子关系的分析方法

用物种丰度反映浮游生物和底栖动物种类与环境因子的关系。对物种丰度数据和除 pH 外的水环境因子数据进行  $\lg(x+1)$  转换<sup>[22]</sup>; 然后, 对数据进行去趋势对应分析, 检验典范对应分析单峰模型排序和冗余分析单峰模型排序哪种更适宜分析数据, 发现两者都适宜; 本文选择采用典范对应分析方法, 利用 Canoco 5.0 软件, 进行物种—环境因子关系

排序, 用双序图表示排序结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游生物、底栖动物的种类组成

在莫力达瓦旗某水库 5 个采样点共鉴定出浮游植物 6 门 15 属 18 种及变种, 其中硅藻门 5 属 6 种, 种数最多, 占总种类数的 33.3%; 裸藻门次之, 3 属 4 种, 占 22.2%; 绿藻门 2 属 3 种, 占 16.7%; 蓝藻门和甲藻门都为 2 属 2 种, 各占 11.1%; 隐藻门 1 属 1 种, 占 5.6%。各采样点的浮游植物数量分布见图 2, 1# 采样点采集到的浮游植物数量最多。

共鉴定出浮游动物 13 属 16 种。其中桡足类种类数最多, 6 属 9 种, 占总种类数的 56.3%; 原生动物 4 属 4 种, 占 25.0%; 轮虫 2 属 2 种, 占 12.5%; 枝角类 1 属 1 种, 占 6.3%。从图 2 中看出, 桡足类在各采样点中占极大优势。仅在 1# 和 2# 采样点采集到底栖动物 2 目 3 科 3 种, 其中环节动物 1 种, 占 33.3%; 水生昆虫 2 种, 占 66.7%, 3#、4#、5# 采样点没有采集到底栖动物。

根据浮游生物出现的频率和丰度, 以优势度  $Y > 0.02$  为界来确定优势种, 莫力达瓦旗某水库浮游植物优势度在 0.02~0.19 之间, 浮游动物优势度在 0.05~0.07 之间, 底栖动物优势度在 0.02~0.32 之间, 优势种见表 1。

### 2.2 浮游生物、底栖动物的丰度、生物量

各采样点的浮游生物丰度和生物量显著不同, 其中 1# 采样点显著高于其他采样点。水库浮游植物的总平均丰度为  $45.36 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 其中, 蓝藻门的

表 1 莫力达瓦旗某水库浮游生物及底栖动物优势种

Tab.1 Dominant species of the plankton and zoobenthos in a reservoir in Morin DawaDaur Autonomous Banner

生物类群	优势种	出现频率 $f$	优势度 $Y$
浮游植物	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.80	0.11
	华丽囊裸藻 <i>Trachelomonas superba</i>	0.40	0.03
	尾棘囊裸藻 <i>T. armata</i>	0.40	0.02
	椭圆鳞孔藻 <i>Lepocinclis steinii</i>	0.60	0.04
	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	0.60	0.03
	水绵属 <i>Spirogyra</i> Link	0.40	0.03
	裸甲藻 <i>Gymnodinium aeruginosum</i>	1.00	0.19
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	0.80	0.06
浮游动物	球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>	1.00	0.54
	绿急游虫 <i>Strombidium viride</i>	0.60	0.14
	矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>	1.00	0.02
底栖动物	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	0.40	0.32
	羽摇蚊幼虫 <i>Chironomus plumosus</i>	0.20	0.02

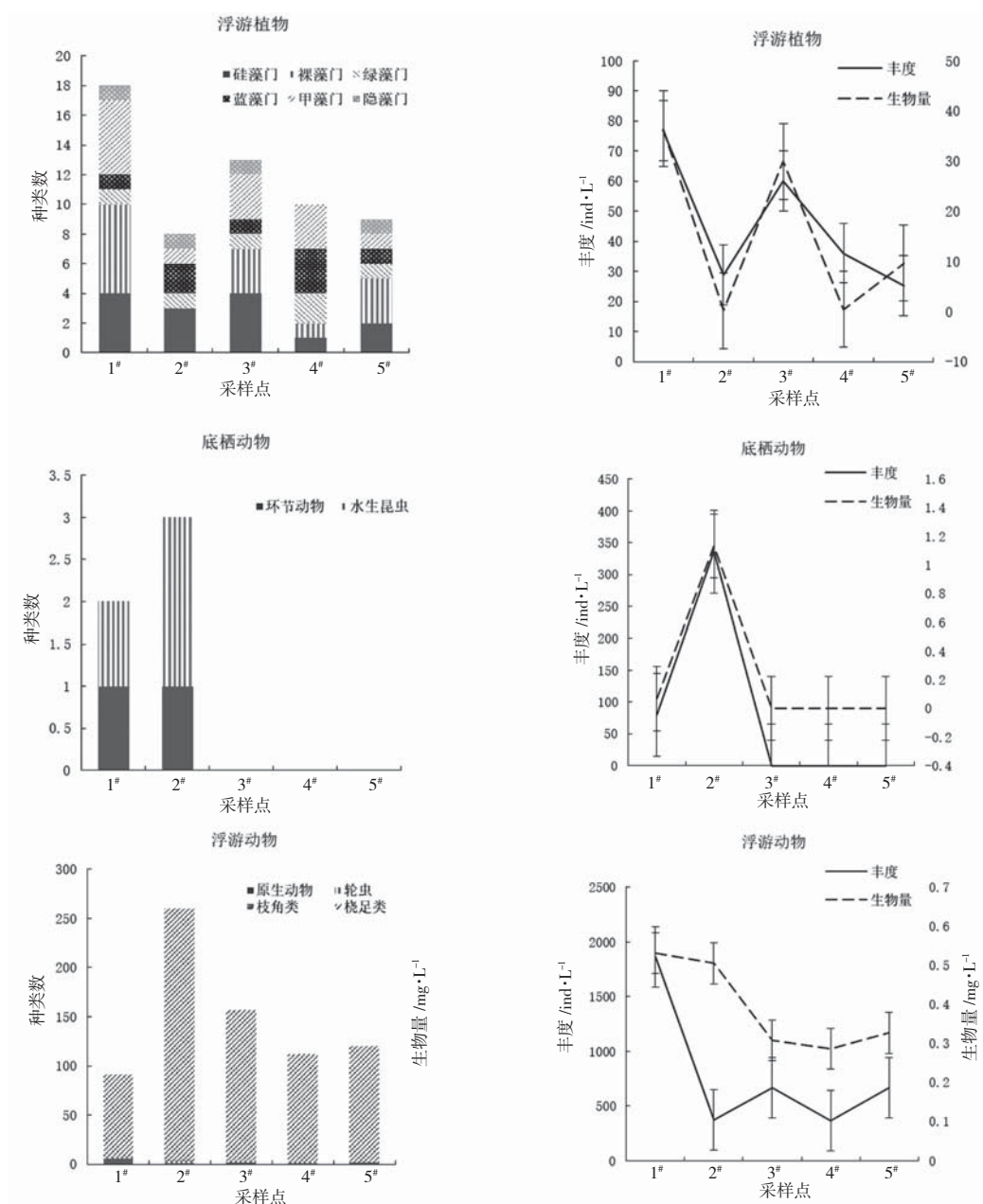


图2 莫力达瓦旗某水库各采样点浮游生物和底栖动物种类组成、数量分布及丰度生物量变化

Fig.2 Species composition, quantity distribution and changes in abundance and biomass of the plankton and zoobenthos in a reservoir in Morin Dawa Daur Autonomous Banner

丰度最高  $32.40 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 硅藻门和甲藻门次之,  $3.36 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 裸藻门  $3.12 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 绿藻门  $2.16 \times 10^4 \text{ ind./L}$ , 隐藻门  $0.96 \times 10^4 \text{ ind./L}$ 。浮游植物的总平均生物量为  $15.3192 \text{ mg/L}$ , 同样为蓝藻门最高,  $14.9947 \text{ mg/L}$ , 甲藻门次之为  $0.1548 \text{ mg/L}$ , 裸藻门  $0.0936 \text{ mg/L}$ , 硅藻门  $0.0534 \text{ mg/L}$ , 隐藻门  $0.0192 \text{ mg/L}$ , 绿藻门的生物量最低, 为  $0.0035 \text{ mg/L}$ 。浮游动物的总平均丰度为  $787.19 \text{ ind./L}$ , 其中, 原生动物的丰度最多为  $726.00 \text{ ind./L}$ , 轮虫  $54.00 \text{ ind./L}$ , 枝角类

$0.01 \text{ ind./L}$ , 桡足类  $7.18 \text{ ind./L}$ 。浮游动物的总平均生物量为  $0.3914 \text{ mg/L}$ 。桡足类最高为  $0.3331 \text{ mg/L}$ , 轮虫次之, 为  $0.0294 \text{ mg/L}$ , 原生动物  $0.0284 \text{ mg/L}$ , 枝角类  $0.0005 \text{ mg/L}$ 。

调查期间, 仅 1# 和 2# 断面采集到底栖动物, 底栖动物总平均丰度为  $83.2 \text{ ind./m}^2$ , 环节动物数量最高为  $67.2 \text{ ind./m}^2$ , 水生昆虫为  $16 \text{ ind./m}^2$ 。底栖动物总平均生物量为  $0.240 \text{ g/m}^2$ , 环节动物为  $0.216 \text{ g/m}^2$ , 水生昆虫为  $0.024 \text{ g/m}^2$ 。

## 2.3 浮游生物、底栖动物多样性指数分析

浮游生物和底栖动物的 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 丰富度指数( $D$ )结果显示,各采样点 Shannon-Wiener 指数均值为 1.62,变化范围为 0.32~2.85;Margalef 指数均值为 1.233,变化范围为 0.36~2.02。两种指数均为 4<sup>#</sup> 采样点最低,其次是 2<sup>#</sup> 采样点较低,1<sup>#</sup> 采样点最高。

浮游生物及底栖动物多样性指数水质评价标准见表 2。综合多样性指数判断:水库水环境质量属

于  $\alpha$  - 中度污染。

## 2.4 浮游生物及底栖动物与环境因子的关系

由表 3 可知,莫力达瓦旗某水库采样日总氮含量平均为 1.23 mg/L,超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类标准;总磷和氨氮平均含量分别为 0.27 mg/L 和 1.79 mg/L,超出地表水Ⅳ类标准。水库平均水深 4.5m,受面源污染影响,透明度平均仅为 5cm,水质浑浊。雨后水库悬浮物增加,长时间不沉降,这种情况持续一周左右。采样日平均水温 25℃。

表 2 多样性指数水质评价标准

Tab.2 List of water quality evaluation standards by diversity index

生物多样性指数	轻污或无污染	$\beta$ - 中度污染	$\alpha$ - 中度污染	重度污染
$H'$	>3.0	>3.0~2.0	>2.0~1.0	<1.0
$D$	>3.0	>3.0~2.0	>2.0~1.0	<1.0

表 3 莫力达瓦旗某水库采样日环境因子数据

Tab.3 Factors of water environment in a reservoir in Morin Dawa Daur Autonomous Banner on the sampling day

环境因子	1 <sup>#</sup> 采样点	2 <sup>#</sup> 采样点	3 <sup>#</sup> 采样点	4 <sup>#</sup> 采样点	5 <sup>#</sup> 采样点
水温 /℃	24	25	24	26	23
水深 /m	4.5	4.4	4.8	4.5	4.2
透明度 /m	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06
总氮 /mg·L <sup>-1</sup>	0.903	1.094	1.119	1.205	1.831
氨氮 /mg·L <sup>-1</sup>	1.734	1.802	1.685	1.780	1.934
总磷 /mg·L <sup>-1</sup>	0.259	0.296	0.257	0.237	0.312
磷酸盐 /mg·L <sup>-1</sup>	0.036	0.264	0.028	0.028	0.252

表 4 典范对应分析中浮游生物和底栖动物种类代码

Tab.4 Codes of the plankton and zoobenthos species by Canonical Correspondence Analysis

编码	物种	编码	物种
A1	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	G2	绿急游虫 <i>Strombidium viride</i>
A2	微绿舟形藻 <i>Navicula viridula</i>	G3	钟虫属 <i>Genus Vorticella</i>
A3	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	G4	小单环栉毛虫 <i>Didinium balbianianum</i>
A4	变绿脆杆藻 <i>Fragilaria virescen</i>	H1	矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>
A5	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	H2	同尾轮属 <i>Diurella Boryde</i>
A6	双菱藻属 <i>Surirella Turpin</i>	I1	长刺蚤 <i>Daphnia longispina</i>
B1	华丽囊裸藻 <i>Trachelomonas superba</i>	J1	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>
B2	裸藻亚属 <i>subgenus Euglena Pringsheim</i>	J2	温剑水蚤属 <i>Thermocyclops</i>
B3	尾棘囊裸藻 <i>Trachelomonas armata</i>	J3	透明温剑水蚤 <i>T. hyalinus</i>
B4	椭圆鳞孔藻 <i>Lepocinclis steinii</i>	J4	等刺温剑水蚤 <i>T. kawamurai</i>
C1	球衣藻 <i>Chamydomonas globosa</i>	J5	华哲水蚤属 <i>Sinocalanus</i>
C2	卵形衣藻 <i>Chamydomonas ovalis</i>	J6	锥枝蒙镖水蚤 <i>Mongolodiptomus birulai</i>
C3	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	J7	直刺北镖水蚤 <i>Arctodiptomus salinus</i>
D1	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	J8	跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>
D2	水绵属 <i>Spirogyra Link</i>	J9	无节幼体 <i>Nauplius</i>
E1	薄甲藻 <i>Glenodinium pulvisculus</i>	K1	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
E2	裸甲藻 <i>Gymnodinium aeruginosum</i>	K2	羽摇蚊幼虫 <i>Chironomus plumosus</i>
F1	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	K3	幽蚊 <i>Chaoborus sp.</i>
G1	球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>		

对莫力达瓦旗某水库 18 种浮游植物、16 种浮游动物和 3 种底栖动物与环境因子进行典范对应分析,编码见表 4。在典范对应分析的排序中,排序轴 1 和排序轴 2 的特征值分别为 0.674 和 0.430,4 个排序轴特征值总和为 1.186,全部典范特征值总和为 1.186,前两轴共解释浮游生物和底栖动物物种与环境因子关系的 93.1%,物种和环境因子相关系数都达到 1,表明排序较好地反映了物种与环境因子间的关系。物种的两个排序轴之间相关系数和环境因子的两个排序轴之间的相关系数均分别为 0,表明排序结果可靠<sup>[23-25]</sup>。

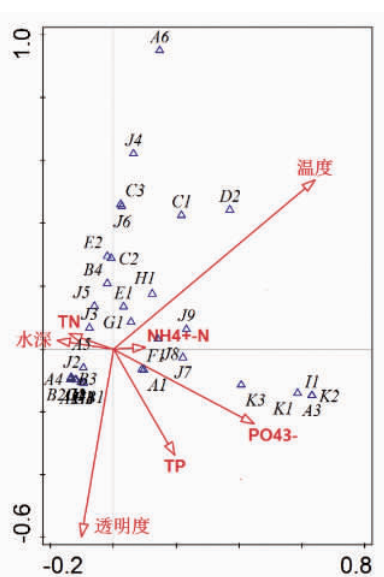


图3 莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物与水环境因子的典范对应排序图

Fig.3 Ordination biplot of Canonical Correspondence Analysis between the plankton and zoobenthos species and water environmental factors in a reservoir in Morin Dawa Daur Autonomous Banner

由图3可知,温度和磷酸盐含量是排序轴1的重要影响因子,与排序轴1显著正相关,相关系数分别为0.6405和0.4476;温度和透明度是排序轴2的重要影响因子,其中水温与排序轴2显著正相关,相关系数为0.5392;透明度与排序轴2显著负相关,相关系数为-0.5684。典范对应分析的排序结果表明,水温、透明度和磷酸盐含量是影响浮游生物和底栖动物群落结构及其分布的主要环境因子。

### 3 讨论

#### 3.1 浮游生物、底栖动物群落结构及水库污染现状

本研究水库受面源污染影响透明度极低,雨后水中悬浮物增加且长时间不沉降。同时发现,水库多数浮游植物水样藻体上附有大量悬浮物,极大影响了浮游植物的光合作用<sup>[26]</sup>,水体中溶解氧含量不高,这解释了虽然水库氮、磷营养盐含量高,但水库浮游植物丰度和生物量却不高。莫力达瓦旗年平均气温 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ <sup>[27]</sup>,水库年平均水温 $0\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。温度于浮游生物的影响,不仅表现在浮游生物的种类组成上,更表现为对浮游生物的丰度和生物量上,水温达到浮游生物生长的最适温度时,初级生产力开始迅速上升,当温度低于其生长的最适温度时,其生长繁殖速度均较低<sup>[28,29]</sup>。本研究7月采样,水库从5月水温开始逐渐上升,到7月浮游生物并没有达到最高丰度和生物量,北方寒冷气候特点导致浮游植物丰度和生物量较低,也导致硅藻种类呈现较大优势。而7月采样时平均水温上升至 $25^{\circ}\text{C}$ ,硅藻在浮游植物种类中呈现较大优势,但在数量上硅藻的优势被蓝藻取代。这是因为蓝藻具有嗜高温的特性,当温度为 $10^{\circ}\text{C}$ 时,硅藻占绝对优势,而当温度升高到 $24^{\circ}\text{C}$ 时,蓝藻逐渐占更大优势<sup>[30]</sup>。浮游动物中桡足类种类较多,生物量较高。浮游植物为桡足类的生长、繁衍提供饵料,所以浮游植物丰度和生物量较低,也与桡足类处于生物量高峰相关。桡足类虽然种类最多,但都不为优势种,3个优势种都为原生动物或轮虫。原生动物仅发现4种,轮虫仅发现2种,二者种类较少,但丰度较高。底栖动物同样仅发现3种,都为优势种。2#采样点采集到的底栖动物数量最多,而羽摇蚊幼虫 *Chironomus plumosus* 仅在2#采样点发现且数量庞大,过大的摄食压力导致2#采样点浮游植物数量最少。摇蚊幼虫通过改变沉积物结构和理化性质,抑制浮游植物的生长<sup>[31]</sup>,这也导致2#采样点浮游植物数量较少。3#、4#、5#采样点采集到的底泥中,没有发现底栖动物,而1#和2#采样点采集到的底栖动物优势种霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri* 和羽摇蚊幼虫都为耐污指示种。从原生动物、轮虫和底栖动物种类数可以看出,水库生物物种较单一,这与农业面源污染,水质较差有关。多样性指数分析表明:水库水环境为 $\alpha$ -中度污染。水库两岸基本都为农田,化肥的施用及降雨可造成农业面源污染,水库氮、磷等营养盐浓度总体偏高,农业面源污染是影响其水质的首要因素。浮游生物和底栖动物优势种中,多数种类像梅

尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*、铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa*、绿急游虫 *Strombidiu mviride*、矩形龟甲轮虫 *Keratella quadrata*、底栖动物的霍甫水丝蚓、羽摇蚊幼虫等,都为耐污种类,这也表明了水库水环境质量较差的污染现状。

### 3.2 浮游生物、底栖动物与水环境因子的关系

典范对应分析结果表明,莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物与环境因子有显著的相关性,水温、透明度和磷酸盐含量是影响浮游生物、底栖动物群落结构及其分布的主要环境因子。

北方气候寒冷决定了温度对水生生物的影响要高于其他地区。浮游植物球衣藻 *Chamydomonas globosa*、小球藻 *Chlorella vulgaris*、水棉 *Spirogyra Link* 和浮游动物桡足类的等刺温剑水蚤 *Thermocyclops kawamurai*、锥枝蒙镖水蚤 *Mongolodiptomus birulai* 与温度呈显著相关性。桡足类的生长既受内在因素代谢率的影响,又受外界因素的影响,温度是其中重要因素之一。在适温范围内,桡足类的生长率随温度升高而加速<sup>[32,33]</sup>。而作为浮游甲壳动物主要食物来源,浮游植物影响桡足类的分布<sup>[34]</sup>。当浮游植物的丰度增加到一定程度时,充足的食物来源为桡足类的生长繁殖提供有利条件,桡足类的丰度也随之增加,而桡足类达到一定数量之后,浮游植物丰度会因摄食压力而降低,这解释了浮游植物、桡足类和温度之间的显著相关性。浮游植物微绿舟形藻 *Navicula viridula*、变绿脆杆藻 *Fragilaria virescen* 和尖针杆藻 *Synedraacus* 的生态适应相似,表现为更适宜水深和总氮含量高的生长环境,与透明度的相关性比其他物种高。这三种藻类都为硅藻,有研究认为,硅藻密度分布与水流流速和透明度的相关程度明显高于与营养盐和温度的相关程度,较低的透明度明显抑制了浮游植物,尤其是硅藻的生长<sup>[35-37]</sup>。该水库水质浑浊,平均水深 4.5m,平均透明度仅为 5cm,藻体悬浮物的大量附着影响浮游植物的光合作用,直接导致透明度与浮游植物的相关性。浮游植物梅尼小环藻,浮游动物直刺北镖水蚤 *Arctodiptom ussalinus*、跨立小剑水蚤 *Microcyclops varicans* 和无节幼体在排序图中位置相近,表现出生态适应上的相似性。它们更适宜氨氮含量较高的环境;浮游动物球形砂壳虫 *Diffflug iaglobulosa* 和矩形龟甲轮虫在排序图中位置相近,它们更适宜总氮含量较高的生长环境。氮、磷等营养盐一般通

过浮游植物间接影响浮游动物的生长与分布。水体中营养盐含量的升高势必引起浮游植物密度的增加,促进浮游动物丰度的增加<sup>[38,39]</sup>。磷酸盐含量是影响底栖动物丰度的主要环境因子,底栖动物霍甫水丝蚓、羽摇蚊幼虫、幽蚊 *Chaoborus sp.* 和浮游植物肘状针杆藻 *Synedra ulna* 在排序图中位置相近。它们与磷酸盐含量相关性显著。研究发现,随着温度的升高,底栖动物如霍甫水丝蚓的磷酸盐释放率逐渐升高<sup>[40]</sup>。水丝蚓能显著提高水体营养盐水平,这些营养盐被浮游植物利用后会促进浮游植物的生长<sup>[41]</sup>,而浮游植物是底栖动物的可口饵料,底栖动物与浮游植物的依存关系离不开磷酸盐等营养盐浓度的高低变化。

### 3.3 小结

农业面源污染使莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物物种较单一,优势种多为耐污种类。多样性指数分析表明:水库水环境为  $\alpha$ -中度污染。水温、透明度和磷酸盐含量是影响莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物群落结构及其分布的主要环境因子。应加强水库水环境保护工作,防止水库生态环境进一步恶化,保证呼伦贝尔水资源的合理利用。在农民按照化肥质量标准施肥的基础上,针对水库农业面源污染情况,提出以下建议:(1)减少人类活动对沿岸带的破坏和干扰,阻止泥沙向水库运动,水库沿岸开展植被缓冲带,维系河岸带植被;(2)根据不同季节水文情况,科学合理调整水库调度方式;(3)选择合理方式开展水库清淤工作,消除水库的水生态环境潜在威胁。

### 参考文献

- [1] 赵彪,孙治旭,胡万里,等.大理洱河流域凤羽河小流域农业面源污染调查与分析[J].云南农业科技,2016(6):11-14.
- [2] Ren C M, Duan W B, Li Z Y, et al. Evaluation of sustainable development of typical small watershed in mountain area - a case study of Puwa small watershed[J]. Advanced Materials Research, 2011, 183-185:729-733.
- [3] 管程程. 基于乡村振兴战略视域下的农业面源污染治理体系建设研究[J].中国集体经济,2019(1):6-7.
- [4] Mehner T, Padisak J, Kasprzak P. A test of food web hypotheses by exploring time series of fish, zooplankton and phytoplankton in an oligo-mesotrophic lake[J]. Limnologia, 2008, 38(3-4):179-188.

- [5] Dumont H, Negrea S. Introduction to the Class Brachiopoda, Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental waters of the World[M]. Leiden: Backhuys Publishers, 2002.
- [6] 郭沛涌,沈焕庭,刘阿成,等.长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性[J].生态学报,2003,23(5):892-900.
- [7] 刘春燕,余艳惠,王蓉,等.滇池浮游生物多样性特征[J].西部林业科学,2016(1):74-80.
- [8] Honggang Z, Baoshan C. Species diversity and distribution for zooplankton in the inter-tidal wetlands of the Pearl River estuary, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13:2383-2393.
- [9] Sebastian P, Stibor H, Berger S, et al. Effects of water temperature and mixed layer depth on zooplankton body size [J]. Marine Biology, 2012, 159(11):2431-2440.
- [10] Batchelder H, Mackas D, Ghghghbrien T. Synchrony in marine zooplankton biomass and abundance patterns: a world-wide comparison [C]. Proceedings from the 2010 AGU Ocean Sciences Meeting, American Geophysical Union, 2000 Florida Ave., N W Washington DC 20009, USA.
- [11] Odountan H, Abou Y. Structure and composition of macroinvertebrates during flood period of the Nokoue Lake, Benin[J]. Open Journal of Ecology, 2016, 6(2):62-73.
- [12] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991.
- [13] 赵文.水生生物学[M].北京:中国农业出版社,2005:503-516.
- [14] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等.微生物监测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [15] 王家辑.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1961.
- [16] 蒋燮治,堵南山.中国动物志:淡水枝角类[M].北京:科学出版社,1979:1-297.
- [17] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组.中国动物志(淡水桡足类)[M].北京:科学出版社,1979.
- [18] 王洪铸.中国小蚓类研究[M].高等教育出版社,2002.
- [19] 津田松苗.水生昆虫学[M].东京:北隆馆,1962.
- [20] 辽河流域底栖动物监测[M].北京:中国环境出版社,2014.
- [21] Asknes L, Wassman P. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production[J]. Limnol Oceanogr, 1993, 38(5):978-985.
- [22] Flores L N, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy)[J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370:163-178.
- [23] 李秋华,韩博平.基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析[J].生态学报,2007,27(6):2355-2364.
- [24] TerBraak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5):1167-1179.
- [25] 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[J].生态学报,2010,30(13):3385-3395.
- [26] 万蕾,朱伟.重污染河道中浮游植物初级生产力特征[J].生态环境学报,2010(1):34-39.
- [27] 刘桂玲,林聪.内蒙古莫旗地区近 50 年气温特点及变化趋势[J].北京农业(下旬刊),2013(A11):221-222.
- [28] Cohn S A, Farrell J F, Munro J D, et al. The effect of temperature and mixed species composition on diatom motility and adhesion[J]. Diatom Research, 2003, 18(2):225-243.
- [29] 杨文,朱津永,张克鑫,等.一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究[J].环境科学,2015,36(4):1310-1317.
- [30] 谢平.论蓝藻水华的发生机制[M].北京:科学出版社,2007:159-160.
- [31] 王昊天,刘凌,陈宁,等.浮游植物对摇蚊幼虫扰动的响应研究[J].水资源保护,2017,33(2):88-94.
- [32] 黄凤鹏,黄景洲,杨玉玲,等.胶州湾浮游桡足类时空分布[J].生态学报,2009,29(8):4045-4052.
- [33] 郑重,李少青,许振祖.海洋浮游生物学[M].北京:海洋出版社,1984.
- [34] Burks R L, Lodge D M, Jeppesen E, et al. Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral[J]. Freshwater Biology, 2002, 47(3):343-365.
- [35] 林秋奇,胡韧,韩博平.流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J].生态学报,2003,23(11):2278-2284.
- [36] 向蓉,李巧玉,喻焱,等.汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析[J].环境科学,2017,38(8):3290-3301.
- [37] 李蕊,陈光杰,康文刚,等.抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系[J].环境科学,2018,39(7):3168-3178.
- [38] 李共国,虞左明.千岛湖浮游动物的群落结构[J].生态学报,2002,22(2):156-162.
- [39] 黄丽,覃东立,吴松,等.总氮含量分析方法比较及黑龙江典型淡水养殖池塘和自然水域总氮含量的变化[J].水产学杂志,2018,31(4):37-42.
- [40] 龚志军,刘劲松,李艳,等.太湖霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的潜在释放量 [J].湖泊科学,2017,29(2):389-397.
- [41] 靳辉,谷娇,蔡永久,等.底栖藻对水丝蚓生物扰动效应的抑制研究[J].环境科学学报,2017,37(6):2055-2060.