

# Seasonal Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups in Naoli River of Dajiahe Nature Reserve

Shang Li<sup>1\*</sup>, Yihan Chai<sup>1</sup>, Yuxi Zhao<sup>1</sup>, Di Liu<sup>1</sup>, Hongxian Yu<sup>1#</sup>, Yiwen Zhang<sup>1</sup>, Yawei Sun<sup>1</sup>, Haifeng Pan<sup>1</sup>, Xu Sun<sup>1</sup>, Xiaohui Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

<sup>2</sup>Heilongjiang Agricultural Environment and Farmland Protection Station, Harbin Heilongjiang

Email: 549151225@ qq.com, #china.yhx@163.com

Received: Aug. 17<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 5<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 12<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In order to study the seasonal succession characteristics and influencing factors of Phytoplankton functional groups in the Naoli River of Dajiahe Nature Reserve. Phytoplankton sampling analysis was performed on six sampling points separately in spring (May), summer (July) and autumn (October) of 2018. 140 species of 8 Phylum Phytoplankton were identified totally and divided into 21 functional groups, including L0, Tc, H1, M, P, K, D, C, MP, N, X3, E, T, Y, W1, W2, LM, X1, X2, F and J. Eight of them were important functional groups: L0, W0, D, MP, T, Y, W1, and X2. The seasonal variation of the Phytoplankton functional group in the Naoli River is characterized by  $D + Y \rightarrow Tc + W1 \rightarrow MP + Y$ . Relationship between Phytoplankton functional groups and environmental factors was explored by using Canonical Correspondence Analysis (CCA), the results showed that the Phytoplankton functional groups in the Naoli River were significantly affected by environmental factors, among them, pH, total Phosphorus (TP), transparency (SD) and turbidity (Tur) were the main factors affecting the distribution of Phytoplankton functional groups.

## Keywords

Phytoplankton, Functional Group, Seasonal Succession, Environmental Factors

# 大佳河保护区挠力河流域浮游植物功能群季节演替特征

李 上<sup>1\*</sup>, 柴一涵<sup>1</sup>, 赵予熙<sup>1</sup>, 柳 迪<sup>1</sup>, 于洪贤<sup>1#</sup>, 张译文<sup>1</sup>, 孙雅薇<sup>1</sup>, 潘海峰<sup>1</sup>, 孙 旭<sup>1</sup>, 王晓辉<sup>2</sup>

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李上, 柴一涵, 赵予熙, 柳迪, 于洪贤, 张译文, 孙雅薇, 潘海峰, 孙旭, 王晓辉. 大佳河保护区挠力河流域浮游植物功能群季节演替特征[J]. 环境保护前沿, 2019, 9(5): 597-605. DOI: 10.12677/aep.2019.95081

<sup>1</sup>东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨

<sup>2</sup>黑龙江省农业环境与耕地保护站, 黑龙江 哈尔滨

Email: 549151225@ qq.com, #china.yhx@163.com

收稿日期: 2019年8月17日; 录用日期: 2019年9月5日; 发布日期: 2019年9月12日

## 摘要

为了研究大佳河自然保护区挠力河流域浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子, 分别于2018年春季(5月)、夏季(7月)和秋季(10月)对挠力河流域设置的6个采样点进行浮游植物采样分析, 共鉴定出浮游植物8门140种, 划分为21个功能群, 分别为L0、K、Tc、H1、M、P、D、C、MP、N、X3、E、T、Y、W1、W2、LM、X1、X2、J、F, 其中重要功能群有8个, 分别为L0、W0、D、MP、T、Y、W1、X2。挠力河浮游植物功能群季节变化呈现为D + Y → Tc + W1 → MP + Y的变化特征。运用典范对应分析(CCA)探究浮游植物功能群与环境因子间的关系, 结果表明, 挠力河浮游植物功能群受水环境因子影响较为显著, 其中, pH、总磷(TP)、透明度(SD)、浊度(Tur)是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。

## 关键词

浮游植物, 功能群, 季节演替, 环境因子

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

浮游植物作为淡水水体的初级生产者, 能够迅速对水环境的变化做出响应, 因此通常将其作为指示性生物来评估水生态系统的健康状况[1]。传统的监测方法是基于系统分类学方法, 忽略了浮游植物的生态功能[2]。Reynolds [3]和 Padisak 等人[4]提出了浮游植物功能群的概念, 根据浮游植物个体的形态学、生理学和生态学特征, 将具有相似环境适应的浮游植物归为同一功能群[5], 现今共划分出 39 个浮游植物功能群。目前, 在国内外已有大量研究报道浮游植物功能群, Devercelli 等[6]探究了阿根廷下萨拉多河干流沿岸浮游植物群落结构与环境变量的关系, 认为浮游植物功能群的季节和时间变化取决于当时的水文条件; Santana 等[7]通过浮游植物组合指数(Q 指数)对不同营养状态供水水库的生态状况进行了评价; 君珊等[8]对拉萨河流域浮游植物群落结构特征及环境因子的关系进行探究, 阐述了 pH、化学需氧量、总氮、总磷是影响浮游植物群落结构的主要环境因子; 向蓉等[9]探究了汝溪河浮游硅藻功能群特征与环境因子相关性, 认为功能群能够较好地反映汝溪河特点。功能群分类方法比传统分类学方法可以更好地将功能群演替特征与水环境因子相结合, 从而反映出水体特征和水环境健康状况, 甚至可以对水质变化提供早期预警信息。因此, 运用功能群方法监测水生态系统具有重要现实意义。

挠力河位于大佳河自然保护区的西北部, 是乌苏里江的一级支流, 发源于完达山脉北坡, 河流全长为 596 公里, 流向为自西南向东北, 流域面积 23,988 平方公里。挠力河流域属温带大陆性季风气候特征, 年均温 3.5℃, 年平均降水量 518 mm, 多集中于 6~9 月份[10]。挠力河以河床曲折, 汛期常泛滥而著称, 属典型的蛇形河。

挠力河流域经过近 40 年的开垦, 耕地面积已由 1954 年的 206 km<sup>2</sup> 增加到 2000 年的 1440 km<sup>2</sup> [11], 湿地的生态特征发生了显著的变化, 大面积湿地被开垦, 湿地面积正在逐年减少。随着湿地资源的破坏, 造成了严重的环境污染, 生物种类减少, 生物多样性下降, 挠力河湿地正面临着严重的威胁。

本文运用划分浮游植物功能群的方法, 探讨功能群季节演替的特点, 并利用 CCA 分析, 对浮游植物功能群以及环境因子进行相关性分析, 探究影响浮游植物功能群季节演替的主要环境因子, 以期为挠力河流域湿地的保护和恢复提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 采样点设置

分别于 2018 年春季(5 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月) 三季对大佳河自然保护区挠力河流域进行水样及浮游植物样品采集。根据保护区内挠力河的水文情况及河流流经的周边环境特点共设置 6 个采样点, 见图 1, 分别为 S1 (小佳河镇北大桥)、S2 (桦林村北姜子家鱼池西)、S3 (桦林村老等窝)、S4 (菜嘴子村)、S5 (西丰镇河北村西大桥)和 S6 (莲花村)。采样点地理位置与周边环境特征见图 1, 表 1。

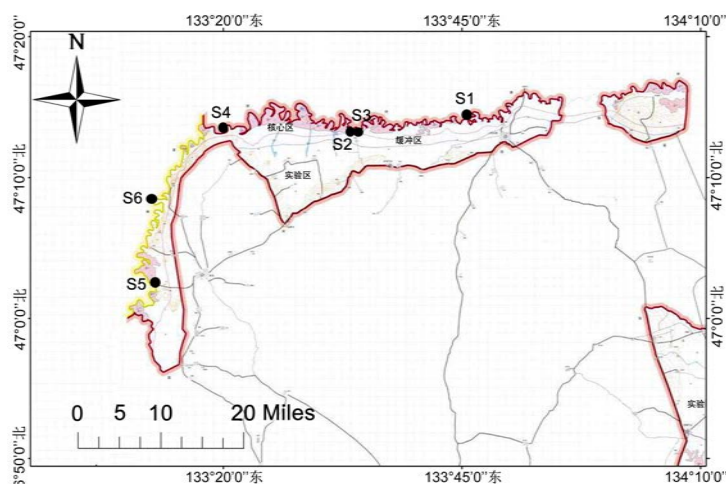


Figure 1. The sampling sites in Naoli river

图 1. 挠力河流域采样点分布

Table 1. The location of sampling sites

表 1. 采样点地理位置

采样点编号	采样点位置	地理坐标	环境特征
S1	小佳河镇北大桥	47°15'3"N 133°45'38"E	公路桥下, 河水较深, 水质浑浊, 透明度低
S2	桦林村北姜子家鱼池西	47°13'15"N 133°31'40"E	小叶樟群落, 淤泥底质, 水质浑浊
S3	桦林村老等窝	47°13'30"N 133°32'30"E	芦苇群落, 河水较深, 水质浑浊, 透明度低
S4	菜嘴子村	47°12'52"N 133°20'6"E	砂石底质, 河道两岸为杂草, 岸边有丢弃的化肥袋, 水质浑浊
S5	西丰镇河北村西大桥	47°3'27"N 133°13'57"E	公路桥下, 淤泥底质, 拂子茅群落
S6	莲花村	47°9'20"N 133°14'59"E	淤泥底质, 水质较为清澈, 周围大量灌木分布

## 2.2. 样品的采集、处理及鉴定

在各采样点用采水器采集 1 L 水样, 现场加入 10 ml Lugol 试剂对其进行固定, 带回室内, 静置沉淀 48 h 后, 吸出上清液, 浓缩至 50 ml, 取 0.1 ml 置于浮游植物计数框内, 在光学显微镜下进行种类鉴定和计数。每升水中浮游植物的数量应按下列公式计算[12]:

$$N = \frac{C_s}{F_s \cdot F_n} \cdot \frac{V}{v} \cdot P_n$$

式中:  $C_s$  为计数框面积,  $\text{mm}^2$ ;  $F_s$  为视野面积,  $\text{mm}^2$ ;  $F_n$  为计数视野数;  $V$  为浓缩体积, mL;  $v$  为计数框容积, mL;  $P_n$  为计数个数。

浮游植物分类依据《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》[13]进行鉴定。浮游植物功能群的划分依据 Reynolds 等对浮游植物功能群的划分标准进行分类。

## 2.3. 理化指标的测定

采用 YSI-6600 多功能水质分析仪现场测定 pH、水温(WT)、电导率(Cond)、氨氮质量浓度( $\text{NH}_4^+$ -N)和浊度(Tur), 透明度(SD)用塞奇氏盘测得。将采集的水样带回实验室, 依据《水和废水监测分析方法》[14]对总氮质量浓度(TN)、总磷质量浓度(TP)及生物耗氧量( $\text{BOD}_5$ )等水化学指标进行测定。

## 2.4. 数据处理和分析

浮游植物功能群与环境因子的关系运用 CANOCO for Windows 4.5 软件进行分析, 将除 pH 外的所有数据进行  $\lg(x+1)$  的处理, 使之趋于正态分布, 首先进行去趋势对应分析(DCA), DCA 结果显示排序轴最长梯度长度值为 3.523, 介于 3.0~4.0 之间, 因此选用冗余分析(RDA)和典范对应分析(CCA)皆可, 本文选用典范对应分析(CCA), 对浮游植物功能群特征具有影响的环境因子进行分析。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 浮游植物功能群组成

2018 年 5 月至 10 月, 大佳河保护区内挠力河流域通过采样分析共鉴定出浮游植物 8 门 140 种, 其中硅藻门 51 种, 绿藻门 45 种, 裸藻门 15 种, 蓝藻门 14 种, 其他门类 15 种, 共划分为 21 个功能群, 分别为 L0、K、Tc、H1、M、P、D、C、MP、N、X3、E、T、Y、W1、W2、LM、X1、X2、J、F(表 2), 其中将各采样点相对生物量 >20% 的功能群归为重要功能群, 共划分出 8 个重要功能群, 分别为 L0、Tc、D、MP、T、Y、W1、X2。

Table 2. Composition of function groups in Naoli river

表 2. 挠力河浮游植物功能群组成

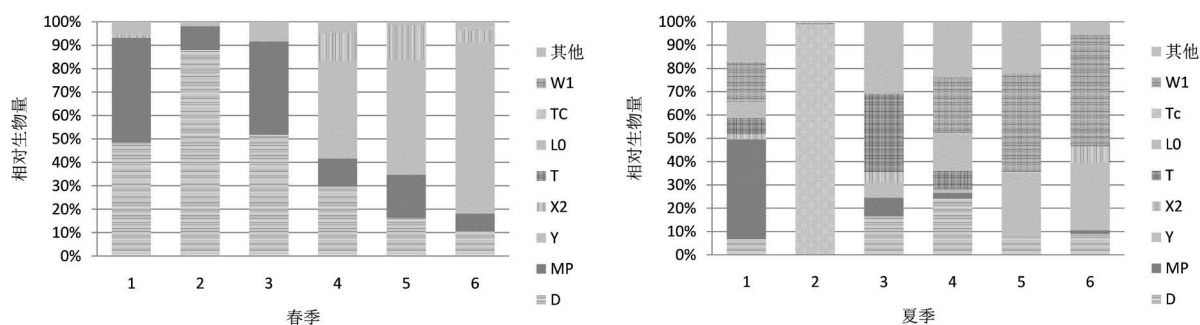
功能群	代表性种(属)	生境特征
L0	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.、色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.、多甲藻 <i>Glenodinium</i> sp.	深水或浅水、寡营养或富营养的中型至大型水体
K	集胞藻 <i>Synechocystis</i> sp.、隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	富营养的浅水
Tc	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	富营养的静水或者流动缓慢的水体、具有挺水植物
H1	鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.	富营养、分层、浅水
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	富营养或超富营养的中小型水体
P	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.、直链藻 <i>Melosira</i> sp.	富营养的混合水层

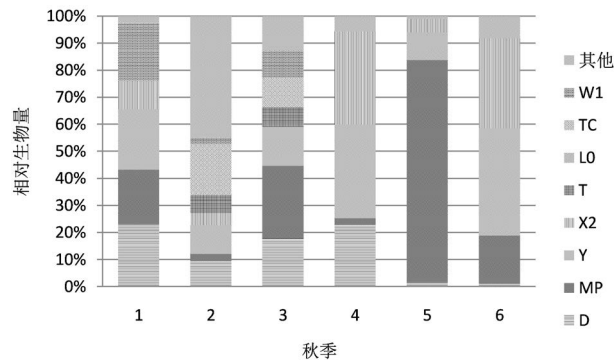
## Continued

D	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.、菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	含营养盐、浑浊的水体
C	星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.、小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	富营养的中小型水体
MP	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.、桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.、异极藻 <i>GomPHonema</i> sp.、羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.、等片藻 <i>Diatoma</i> sp.、曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	频繁搅动的中营养浅水水体
N	平板藻 <i>Tabellaria</i> sp.	中营养的混合水层
X3	色金藻 <i>Chromulina</i> sp.	寡营养的混合浅水
E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	寡营养或异养型的小型浅水水体
T	黄丝藻 <i>Tribonema</i> sp.	持续混合水层
Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	牧食强度低的静水环境
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	从农田或污水中获得有机质的浅水
W2	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	中营养的浅水
LM	角甲藻 <i>Glenodinium hirundinella</i>	富到超富营养的中小型水体
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	中到富营养的浅水水体
X1	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.、弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.、小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	超富营养的浅水
J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.、十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.、四星藻 <i>Tetrastrum</i> sp.、四角藻 <i>Tetraëdron</i> sp.	富营养、混合型的浅水水体
F	蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp.、月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp.、杆裂丝藻 <i>Stichococcus bacillaris</i>	中到富营养的清洁混合水体

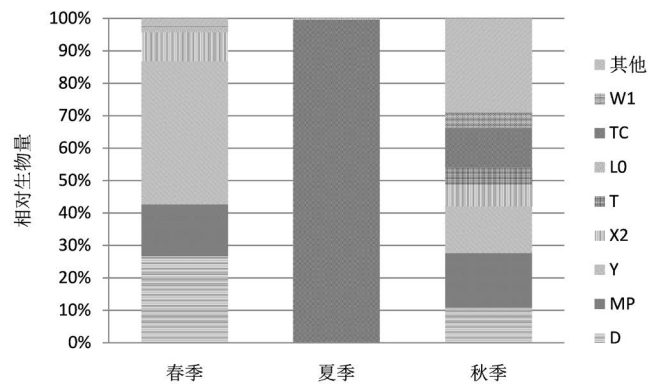
## 3.2. 浮游植物功能群时空分布

从图2中可以得知,功能群Y、D、MP是春、夏、秋三个季节最常见的种类;春季挠力河浮游植物功能群种类相对较少,以功能群D和MP较为常见,且生物量较高;功能群Tc主要出现在夏季S2采样点,且生物量很高;功能群X2是秋季最为常见的类群。根据各季节功能群平均相对生物量可以看出(图3),春季以功能群D、Y占优势,分别占44.15%和26.79%;夏季以功能群Tc占绝对优势,占98.12%,但是功能群Tc仅在夏季S2采样点出现且生物量远远大于其他所有功能群之和,从图2可以看出,功能群W1在夏季其他采样点占优势;秋季以功能群MP、Y占优势,分别占16.8%和14.38%。





**Figure 2.** Spatio-temporal variations of main phytoplankton functional groups in Naoli river  
**图 2.** 挠力河浮游植物功能群时空分布



**Figure 3.** Mean biomass of main phytoplankton functional groups in Naoli river  
**图 3.** 挠力河浮游植物功能群季节平均相对生物量

### 3.3. 影响浮游植物功能群分布的环境因子

CCA 分析结果表明, 轴 1、轴 2 共解释了物种数据累计变化率的 84.1% (表 3), 表明浮游植物功能群与环境因子之间有明显的相关性。与轴 1 最主要的正相关因子是 pH (0.6218), 其次为透明度(0.5819), 最主要的负相关因子为浊度(-0.6173); 与轴 2 最主要的正相关因子为总磷(0.4851), 最主要的负相关因子为流速(-0.4409)。从图 4 可以看出, 大部分功能群位于第一象限, 如: 功能群 Y、X2、X3、P、T、D、LO 等均与总氮、总磷、PH 呈正相关; 功能群 M、H1、Tc 等则与电导率、BOD 和水温呈正相关。整体来看, pH、总磷、透明度、浊度是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。

**Table 3.** Canonical correspondence analysis results for phytoplankton functional groups  
**表 3.** 浮游植物功能群的 CCA 分析结果

轴序	特征值	种类 - 环境相关性	物种数据累计变化率/%	物种 - 环境相关性累计变化率/%
1	0.596	0.990	34.9	39.9
2	0.243	0.962	49.2	56.2
3	0.204	0.964	61.2	69.9
4	0.168	0.893	71.1	81.1

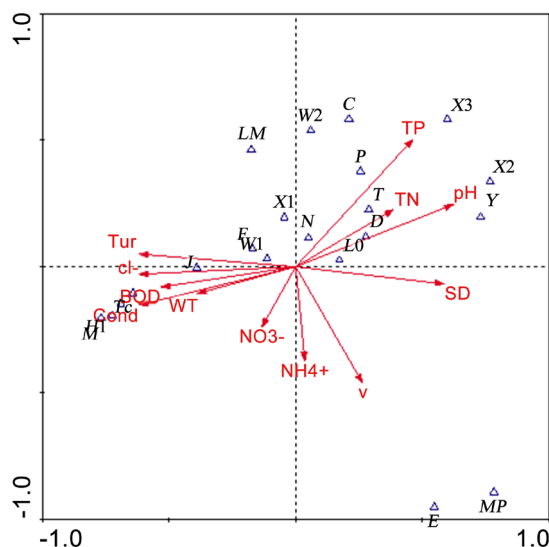


Figure 4. CCA analysis of functional groups and environment factors  
图 4. 功能群与环境因子的 CCA 分析

## 4. 讨论

### 4.1. 浮游植物功能群的季节演替

通过对挠力河浮游植物不同时期的调查显示,浮游植物功能群存在季节差异,呈现出  $D + Y \rightarrow Tc + W1 \rightarrow MP + Y$  的变化特征。挠力河春季水体浑浊,水温较低,河流两岸有长势较好的杂草和高等水生植物,使得水体的光照强度较低。功能群 D 的代表种类为针杆藻和菱形藻,其适宜环境为含营养盐、低光照、浑浊的水体,因此能够在春季的水体中获得竞争优势。

蓝藻门生长的最适温度为  $25^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ,随着夏季水温升高,蓝藻生长繁殖速度加快,逐渐占据优势。在夏季 S2 采样点,出现了蓝藻爆发的现象,由颤藻属和席藻属组成的功能群 Tc 的生物量远远大于其余各采样点浮游植物生物量之和。功能群 Tc 的适宜生境为富营养的静水或流速缓慢的水体,说明 S2 采样点受到上游居民排放的含有有机质的生活污水的影响,再加上河流流速缓慢,水温高,因此引起了蓝藻爆发。夏季除 S2 外的其它采样点,功能群 W1 的生物量较高甚至在个别采样点占优势。功能群 W1 以裸藻属为代表性种类,适宜生境为从农田或污水中获得有机质的浅水水体。由于挠力河流域两岸有大面积的农业耕地,农业灌溉频繁,同时,夏季降雨量大,降雨使得河流附近农田中的氮磷营养盐在地表径流的作用下被带到水中[15],水体中的氮磷含量升高,为 W1 功能群提供了适宜的生存条件,并最终成为优势类群。

秋季为挠力河流域的丰水季,在秋季采样前不久挠力河流域发生过一次较大的洪水,水位的涨落使水体扰动明显,以舟形藻属和桥弯藻属为代表的功能群 MP 能够适应于频繁受到扰动的浑浊的水体,秋季挠力河的这种水文条件正好有助于功能群 MP 的生长繁殖,使之成为优势种群。

功能群 Y 由卵形隐藻和嗜蚀隐藻组成,这类浮游植物具有鞭毛,能够利用鞭毛在水中垂直运动[16],对光高敏感,喜冷水环境,因此在光照强度较弱、水温较低的春、秋两季占优势。功能群 Y 主要适应于牧食强度低的静水环境,说明挠力河流域浮游动物对浮游植物的牧食压力较小,这也与调查结果相一致,根据对挠力河浮游动物的鉴定分析,挠力河水体中滤食性枝角类浮游动物的数量较少。功能群 D、MP、Y 一般生活在营养盐较高的小型水体中[17],也是挠力河流域最为常见的功能群种类,说明挠力河水体中的营养盐含量较高,水体呈富营养化状态。

## 4.2. 影响浮游植物功能群季节变化的环境因子

浮游植物功能群与环境因子间有密切的联系, 温度、营养盐、光照强度和水动力学都是影响浮游植物生长的主要环境因子, 同样也影响着浮游植物功能群的分布[18]。本文通过对浮游植物功能群与水环境因子进行 CCA 分析, 结果显示, 总磷、pH、透明度、浊度是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。氮、磷是浮游植物生长不可或缺的营养物质[19], 同时氮、磷的浓度对功能群分布有显著的影响。有研究表明, 当 N:P 等于 16:1 时为浮游植物生长的最适条件, N:P > 16:1 时受到磷限制, N:P < 16:1 时受到氮限制[20]。挠力河流域春、夏、秋三季的氮磷比均远大于 16:1, 此时 TP 为浮游植物的限制因子, CCA 分析结果表明, 功能群 N、T、P、X3 与 TP 有显著相关性, 因此, 控制磷的排放量能够对浮游植物功能群的分布有一定限制作用。

挠力河流域春季泥沙和悬浮物较多, 浊度较大, 透明度较低, 从图 4 可以看出, 绝大多数功能群与浊度呈负相关, 说明浊度大的水体限制了浮游植物的生长, 导致春季浮游植物生物量较小。以栅藻属为代表的功能群 J 和浊度呈正相关, 说明功能群 J 具有较广的耐受性, 能适应随着浊度增大而光照强度变低的环境, 这与陈倩[21]等对贵州百花水库的研究结果一致。蓝藻门功能群 H1、M、Tc 与浊度和温度呈正相关, 与透明度呈负相关, 这也解释了在夏季 S2 采样点功能群 Tc 占绝对优势的原因, 夏季水温升高为蓝藻的繁殖提供了良好的条件, 浮游植物生物量的增加使水体的透明度降低, 为适合在低光照浊度高的水体中生长的功能群 Tc 创造了有利条件。功能群 D 与 pH 呈显著正相关, 郑诚等[22]研究四明湖水库得出, 水体环境中高 pH 值符合功能群 D 的生长需求, 与本文的研究结果一致。

## 5. 结论

1) 挠力河流域共鉴定出浮游植物 8 门 140 种, 划分为 21 个功能群, 分别为 L0、K、Tc、H1、M、P、D、C、MP、N、X3、E、T、Y、W1、W2、LM、X1、X2、J、F, 其中重要功能群有 8 个, 分别为 L0、W0、D、MP、T、Y、W1、X2。

2) 挠力河浮游植物功能群季节变化呈现为  $D + Y \rightarrow Tc + W1 \rightarrow MP + Y$  的变化特征, 根据功能群的季节变化特征反应出挠力河水体的营养盐含量较高, 水体呈富营养化状态。

3) CCA 分析结果表明, 挠力河浮游植物功能群受水环境因子影响较为显著, 其中, pH、总磷、透明度、浊度是影响浮游植物功能群分布的主要环境因子。

## 基金项目

“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0500406)。

## 参考文献

- [1] 王帅帅, 王博涵, 韩洁, 等. 济南南部山区夏季水域浮游植物功能群分析[J]. 河北渔业, 2017(5): 24-25+30.
- [2] 钱烁统, 刘凌, 陈宁, 等. 河生藻类形态功能群分布及其与环境因子关系的分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 146-149.
- [3] Reynolds, C.S., Huszar, V., Kruk, C., et al. (2002) Towards a Functional Classification of the Freshwater Phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, **24**, 417-428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>
- [4] Padisak, J., Crossetti, L.O. and Naselli-Flores, L. (2009) Use and Misuse in the Application of the Phytoplankton Functional Classification: A Critical Review with Updates. *Hydrobiologia*, **621**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9645-0>
- [5] 胡忠军, 莫丹玫, 周小玉, 等. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 46-54.
- [6] Devercelli, M. and O'Farrell, I. (2013) Factors Affecting the Structure and Maintenance of Phytoplankton Functional



- Groups in a Nutrient Rich Lowland River. *Limnologica*, **43**, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2012.05.001>
- [7] Santana, L.M., Crossetti, L.O. and Ferragut, C. (2017) Ecological Status Assessment of Tropical Reservoirs through the Assemblage Index of Phytoplankton Functional Groups. *Brazilian Journal of Botany*, **40**, 695-704. <https://doi.org/10.1007/s40415-017-0373-4>
- [8] 君珊, 王东波, 周健华, 等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 34-45.
- [9] 向荣, 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.
- [10] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价[J]. 生态学报, 2008, 30(2): 481-486.
- [11] 侯伟, 张树文, 张养贞, 等. 三江平原挠力河流域 50 年代以来湿地退缩过程及驱动力分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 725-731.
- [12] 汪梦琪, 汪金成, 王琪, 等. 洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状[J]. 生态学杂志, 2018, 30(8): 193-204.
- [13] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [15] 武安泉, 郭宁, 覃雪波. 寒区典型湿地浮游植物功能群季节变化及其与环境因子关系[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1341-1349.
- [16] 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1264-1273.
- [17] 范小晨, 代存芳, 陆欣鑫, 等. 金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5726-5738.
- [18] 安睿, 王凤友, 于洪贤, 等. 小兴凯湖浮游植物功能群特征及其影响因子[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 985-994.
- [19] 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1397-1406.
- [20] 葛蔚, 汪芳, 柴超. 氮和磷浓度对中肋骨条藻和锥状斯氏藻种间竞争的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(7): 697-704.
- [21] 陈倩, 李秋华, 胡月敏, 等. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1266-1274.
- [22] 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2688-2697.