

西尔根气河水系浮游植物功能群时空变化特征

丁妍¹, 李晓兵², 杨凤娟³, 刘曼红², 孟昭军¹

¹东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨

²东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

³扎龙保护区管护中心, 黑龙江 齐齐哈尔

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

为探究寒温带河流浮游植物功能群的时空变化特征, 本研究于2024年春季(6月)、夏季(8月)和秋季(9月)在黑龙江省双河国家级自然保护区内的西尔根气河水系(包括大西尔根气河、小西尔根气河及西尔根气河)设置9个采样点, 开展浮游植物样本的采集、鉴定及功能群划分。研究结果显示, 浮游植物功能群共划分为23个, 分别为A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、LO、MP、M、N、P、S1、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y。依据优势度指数($Y \geq 0.02$)三个季节共筛选出10种优势功能群, 其演替趋势为: 春季(C、J、LO、MP、P、TB、X1)→夏季(C、D、J、MP、P、TB、W1、W2)→秋季(B、C、D、H1、N、P、S1、X1、X2、Y); 三条河流共有的优势功能群为D、LO、MP、P、TB。NMDS分析表明浮游植物优势功能群在季节间存在差异, 而在空间上未表现出明显差异。西尔根气河水系浮游植物优势功能群的季节演替特征显著, 空间变化特征不明显, 反映了季节变化的驱动作用。

关键词

西尔根气河水系, 浮游植物, 功能群, 时空特征

Spatiotemporal Variation Characteristics of Phytoplankton Functional Groups in the Xiergenqi River System

Yan Ding¹, Xiaobing Li², Fengjuan Yang³, Manhong Liu², Zhaojun Meng¹

¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

²College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

³Zhalong Nature Reserve Management and Protection Center, Qiqihar Heilongjiang

Received: April 15, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

To investigate the spatiotemporal variation characteristics of phytoplankton functional groups in a cold-temperate river, this study established nine sampling sites in the Xiergenqi River system (including the Daxiergenqi River, Xiaoxiergenqi River, and Xiergenqi River) within the Shuanghe National Nature Reserve in Heilongjiang Province during spring (June), summer (August), and autumn (September) of 2024. Phytoplankton samples were collected, identified, and classified into functional groups. The results showed that the phytoplankton were divided into 23 functional groups: A, B, C, D, E, F, G, H1, J, K, LO, MP, M, N, P, S1, TB, W1, W2, X1, X2, X3, and Y. Based on the dominance index ($Y \geq 0.02$), a total of 10 dominant functional groups were identified across the three seasons, with a succession trend as follows: spring (C, J, LO, MP, P, TB, X1) → summer (C, D, J, MP, P, TB, W1, W2) → autumn (B, C, D, H1, N, P, S1, X1, X2, Y). The dominant functional groups common to all three rivers were D, LO, MP, P, and TB. NMDS analysis indicated differences in the dominant phytoplankton functional groups among seasons, but no significant spatial differences were observed. The seasonal succession of dominant phytoplankton functional groups in the Xiergenqi River system was significant, whereas spatial variation was not pronounced, reflecting the driving role of seasonal changes.

Keywords

Xiergenqi River System, Phytoplankton, Functional Groups, Spatiotemporal Characteristics

Copyright © 2026 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

黑龙江双河自然保护区位于大兴安岭塔河县内，地处我国寒温带，保存着大片完整的原始森林，是典型的寒温带针叶林生态系统。西尔根气河水系，作为保护区的核心水系，由西尔根气河、大西尔根气河和小西尔根气河三条河流组成[1]。该水系不仅是区域生态环境的重要组成部分，发挥着涵养水源、调节气候、维持生物地球化学循环等关键生态功能，也为东北虎(*Panthera tigris altaica*)、驼鹿(*Alces alces*)等国家一级保护动物提供饮用水源。

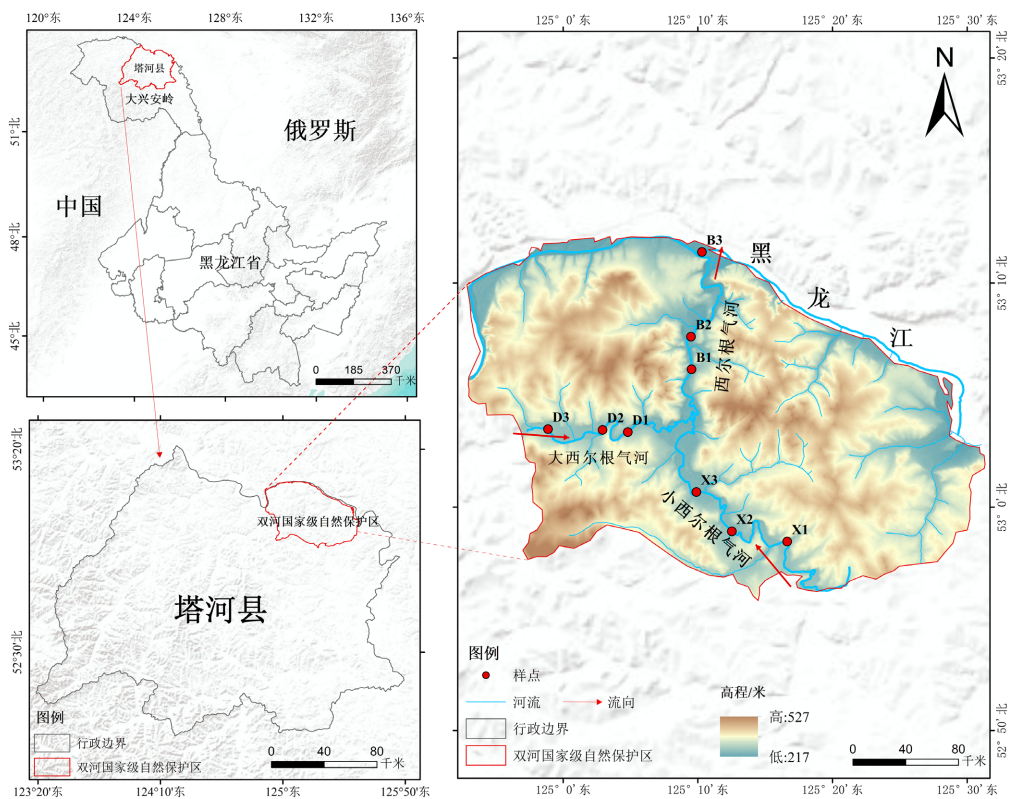
浮游植物作为水生生态环境中的初级生产者[2]，是河流食物网的基石，对河流生态系统的能量流动与物质循环发挥着重要作用[3]。其群落结构的动态变化能迅速、敏感地反映水环境的质量[4]。浮游植物功能群将形态、生理和生态特征相似的浮游植物归为一组，群组内的浮游植物具有相同或相近的生存策略，每一个组可以反映特定生境类型[5]-[7]。1980年 Reynolds 等[8]首次提出功能群的概念及分类方法，这对于了解水生态系统的水质和食物网结构具有重要意义。2009年经 Padisák 等人[9]的补充完善，现有39个浮游植物功能群被广泛使用。相较于传统分类方法，功能群划分法能够更好地反映浮游植物群落与水体环境之间的动态变化关系[10]。因此，浮游植物功能群的变化，可以作为衡量水体生态状况的重要指标[2][8]。

本研究旨在通过调查研究西尔根气河水系浮游植物的多样性及浮游植物功能群的时空变化特征，分析西尔根气河水系水生态状况，为保护区的管理提供精准、科学的依据。

2. 材料与方法

2.1. 采样点设置

西尔根气河水系位于黑龙江省塔河县东北部的黑龙江省双河国家级自然保护区内, 保护区北部和东北部与俄罗斯隔江相望, 地理坐标为东经 $124^{\circ}52'48''\sim 125^{\circ}32'03''$, 北纬 $52^{\circ}54'25''\sim 53^{\circ}12'08''$ 。西尔根气河水系由大西尔根气河和小西尔根气河以及两条支流汇聚的西尔根气河组成。本研究于西尔根气河水系设置 9 个采样点, 其中, 西尔根气河干流设置 3 个采样点, 标为 B1、B2 和 B3; 大西尔根气河支流设置 3 个采样点, 标为 D1、D2 和 D3; 小西尔根气河支流设置 3 个采样点, 标为 X1、X2 和 X3 (图 1)。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Sampling sites in the Xiergenqi River system
图 1. 西尔根气河水系采样点位

2.2. 样品的采集与处理

本研究于 2024 年春季(6 月)、夏季(8 月)和秋季(9 月)在西尔根气河水系进行浮游植物样品的采集及水体理化因子的测定。使用 1L 有机玻璃采水器在水面下 0.5 m 处采集水样, 现场立即向水样中加入 15 mL 鲁哥氏液进行固定。将固定后的样品带回实验室, 静置沉淀 48 小时后, 采用虹吸法移除上清液, 将样品浓缩至 30 mL。充分摇匀后, 取 0.1 mL 浓缩样品置于 0.1 mL 浮游生物计数框中, 在标准光学显微镜下于 $\times 400$ 放大倍数下进行种类鉴定和计数。

采集浮游生物样本的同时, 利用 YSI6600-02 (USA)便携式水质分析仪现场测定水体的 pH、溶解氧(DO)、水温(WT)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、叶绿素 a(Chla)和氯离子(Cl^-)等理化指标。采集水样带回实验室, 使用

多参数水质分析系统(HCAH, DRB200/DR1900)和配套的试剂, 测量水样中的总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)。

2.3. 数据的处理与分析

浮游植物功能群的划分根据 2002 年 Reynolds [8]提出和 2009 年 Padisák [9]补充完善的浮游植物功能群(FG)划分方案进行。

优势功能群的计算公式如下:

$$Y = P_i \times f_i \quad (1)$$

式(1)中, P_i 为各点位浮游植物功能群 i 的数量占总数的比例, f_i 为功能群 i 在各点位出现的频率, 当 $Y \geq 0.02$ 时, 则视为优势功能群。

采样点空间分布图使用 ArcGIS 10.8 软件绘制, 主要的数据分析与 ANOVA 检验在 R 语言(4.3.2)和 SPSS 软件中完成, RDA 分析使用 Canoco5 进行分析作图, 基础数据整理使用 Microsoft Excel 2021。

3. 结果与分析

3.1. 浮游植物多样性及功能群划分

西尔根气河水系在三个季节共检出浮游植物 8 门 84 属 253 种。其中硅藻门(Bacillariophyta)最多, 共检出 119 种; 绿藻门(Chlorophyta)检出 57 种; 裸藻门(Euglenophyta)检出 43 种; 蓝藻门(Cyanophyta)检出 21 种; 隐藻门(Cryptophyta)检出 5 种; 甲藻门(Dinophyta)和黄藻门(Xanthophyta)均检出 3 种; 金藻门(Chrysophyta)检出 2 种(图 2)。

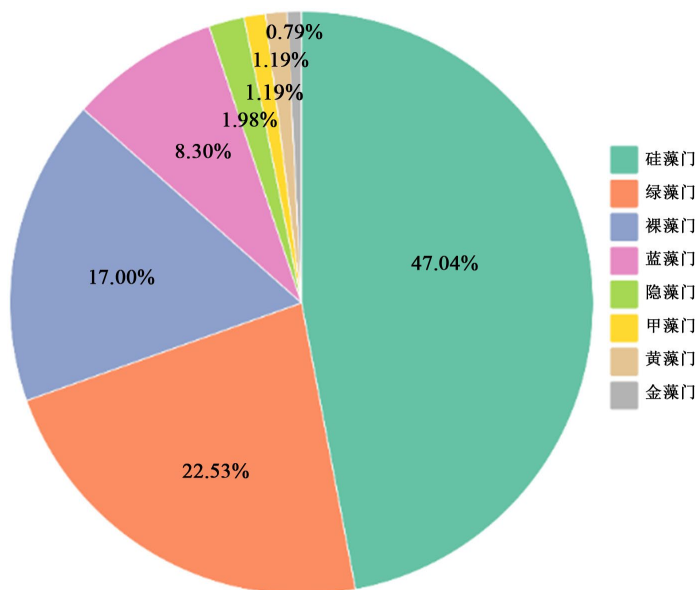


Figure 2. Phytoplankton species composition
图 2. 浮游植物物种组成

从季节上看, 浮游植物在夏季丰富度最高; 从河流上看, 小西尔根气河浮游植物的丰富度最高(图 3)。单因素 ANOVA 分析表明, 浮游植物在季节上无显著差异($P > 0.05$)。绿藻门的丰富度在干流西尔根气河和支流大西尔根气河差异显著($P < 0.05$)。

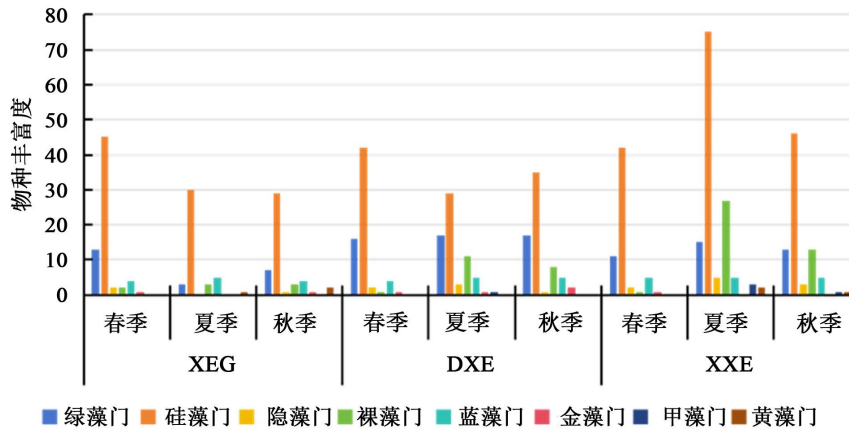


Figure 3. Spatiotemporal differences in phytoplankton species richness
图 3. 浮游植物物种丰富度时空差异

3.2. 浮游植物功能群特征

根据 FG 功能群的分类方法，本研究将浮游植物划分为 23 个功能类群。分别为 A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、LO、MP、M、N、P、S1、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y，功能群的具体特征如表 1 所示。

Table 1. Classification of phytoplankton functional groups and habitat characteristics
表 1. 浮游植物功能群的类型及其生境特征

功能群	生境特征	代表藻属(种)
A	贫营养、洁净清澈、深水水体	根管藻属
B	中营养水体，对分层敏感	小环藻属、冠盘藻属
C	富营养中小型水体，对分层敏感	梅尼小环藻
D	浅水、浊度较大的水体	尖针杆藻、针杆藻属、菱形藻属
E	较浅的贫中营养型水体	锥囊藻属
F	中富营养型湖泊变温层	月牙藻属、韦斯藻属、浮球藻属、
G	富营养型小型湖泊或池塘	实球藻属、空球藻属
H1	富营养分层水体，浅水湖泊	鱼腥藻属
J	混合的高富营养浅水水体	四星藻属、空星藻属、盘星藻属
K	中营养至富营养化水体	隐球藻属
LO	广适性	等片藻属、双眉藻属、角甲藻属、多甲藻属
MP	频繁扰动的浑浊型浅水湖泊	伪鱼腥藻属、颤藻属、舟形藻属、卵形藻属
M	较稳定的中富营养水体，透明度不宜太低	微囊藻属
N	中营养型水体混合层	鼓藻属
P	混合程度较高中富营养浅水水体	新月藻属、直链藻属、脆杆藻属
S1	透明度较低的混合水体，多为丝状蓝藻，对冲刷敏感	席藻属
TB	强急流	异极藻属、溢缩异极藻
W1	富含有机质，或农业废水和生活污水的水体	裸藻属、扁裸藻属

续表

W2	浅水型中营养湖泊	囊裸藻属、陀螺藻属
X1	混合程度较高的富营养浅水水体	纤维藻属、小球藻属
X2	混合程度较高的中 - 富营养浅水水体	衣藻属、蓝隐藻属
X3	浅水、清水、混合层	布纹藻属、波缘藻属、双壁藻属
Y	广适性	裸甲藻属、隐藻属

春季、夏季和秋季西尔根气河水系三条河流浮游植物功能群共检出 23 种。其中，西尔根气河共检出 23 种，大西尔根气河共检出 20 种，小西尔根气河共检出 21 种；春季共检出 18 种，夏季共检出 21 种，秋季共检出 22 种(表 2)。

Table 2. Phytoplankton functional group types

表 2. 浮游植物功能群种类

功能群	西尔根气河			大西尔根气河			小西尔根气河		
	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
A			√			√			
B		√	√	√	√	√		√	
C	√	√	√	√			√	√	√
D	√	√	√	√	√	√	√	√	√
E	√		√	√		√	√		
F		√	√					√	√
G		√	√					√	
H1	√	√	√	√	√	√	√	√	√
J	√	√	√	√		√	√	√	√
K		√	√		√	√			
LO	√	√	√	√		√	√	√	√
MP	√	√	√	√	√	√	√	√	√
M		√							
N	√	√	√	√		√	√	√	√
P	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S1			√	√			√	√	√
TB	√	√	√	√	√	√	√	√	√
W1	√	√	√	√	√	√	√	√	√
W2		√	√	√	√	√		√	√
X1	√	√	√	√		√	√		
X2		√	√		√		√	√	√
X3	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Y	√	√	√	√		√	√	√	√

注：√表示该浮游植物功能群在此季节和河流中检出。

从季节上看,春季浮游植物功能群以 P 功能群为主导;夏季以 MP、P、J 等功能群为主;秋季以 MP、P、D 功能群为主。从空间上看,西尔根气河以 P、MP、D 及 J 功能群为主;大西尔根气河以 P、MP、D 及 N 功能群为主;小西尔根气河以 P、MP、D 功能群为主(图 4)。

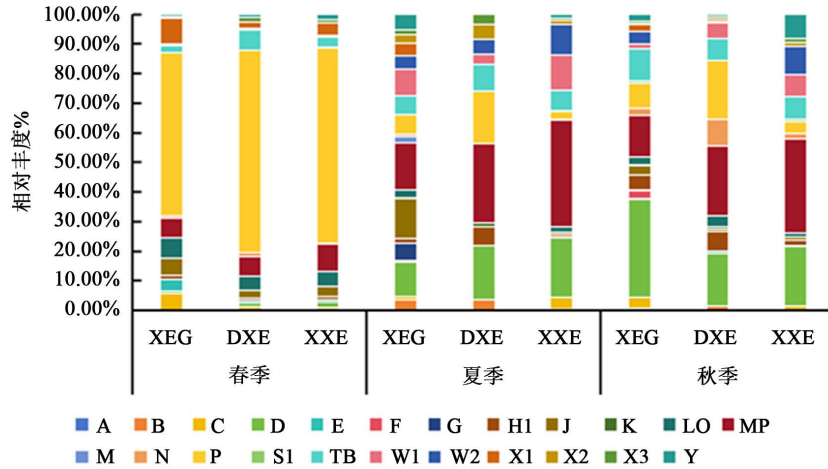


Figure 4. Spatiotemporal characteristics of relative abundance of phytoplankton functional groups
图 4. 浮游植物功能群相对丰度时空特征

3.3. 浮游植物优势功能群时空变化

根据优势度指数 $Y \geq 0.02$ 筛选出浮游植物优势功能群,三个季节筛选出浮游植物优势功能群 10 种,分别为 C、D、J、LO、MP、P、TB、X1、W1、W2;呈显出 C、J、LO、MP、P、TB、X1→C、D、J、MP、P、TB、W1、W2→B、C、D、H1、N、P、S1、X1、X2、Y 的演替趋势(图 5)。

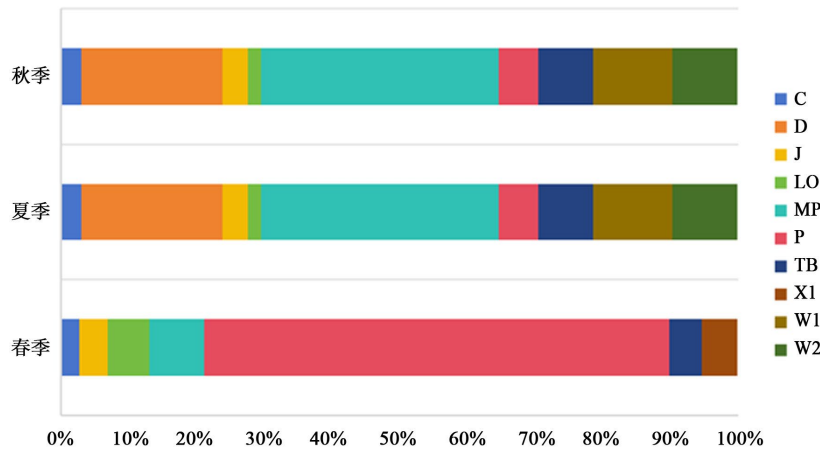


Figure 5. Seasonal characteristics of dominant phytoplankton functional groups
图 5. 浮游植物优势功能群季节特征

从河流上看,三条河流共筛选出 12 种优势功能群,分别为 C、D、E、H1、J、LO、MP、N、P、TB、W1、W2。西尔根气河浮游植物优势功能群为 C、D、E、H1、J、LO、MP、P、TB、W1、X1;大西尔根气河优势功能群为 D、H1、J、LO、MP、N、P、TB、X3;小西尔根气河优势功能群: C、D、LO、MP、P、TB、W1、W2、Y。三条河流共有的优势功能群为 5 种,分别为 D、LO、MP、P、TB。

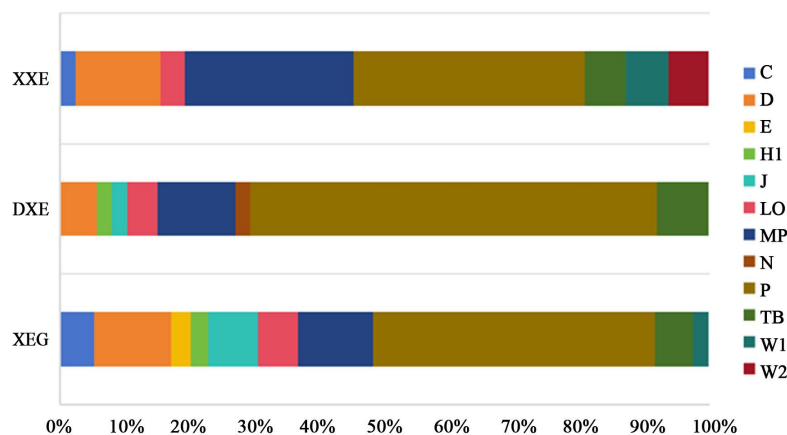


Figure 6. Spatial characteristics of dominant phytoplankton functional groups
图 6. 浮游植物优势功能群空间特征

3.4. 浮游植物优势功能群时空差异

NMDS 分析结果表明,不同季节的浮游植物优势功能群间存在差异(图 7(a))。春季、夏季和秋季浮游植物优势功能群的分布范围存在重叠,但秋季优势功能群整体偏向负值方向。大西尔根气河、小西尔根气河和西尔根气河的浮游植物优势功能群高度相似(图 7(b)),三条河流的浮游植物优势功能群组成无明显差异。

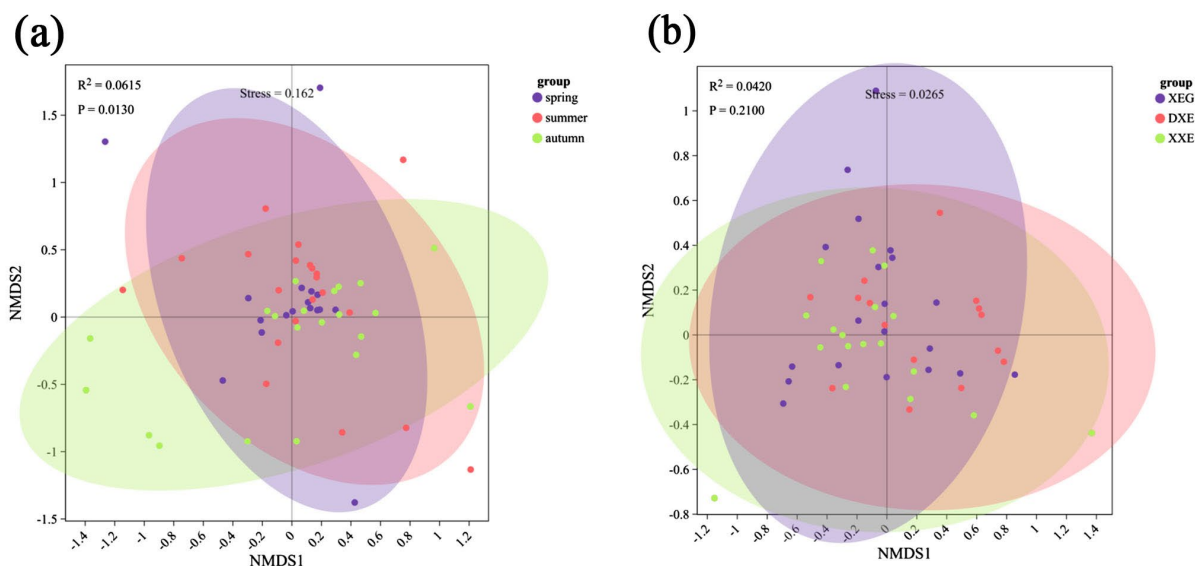


Figure 7. Spatiotemporal differences of dominant phytoplankton functional groups
图 7. 浮游植物优势功能群时空差异

3.5. 浮游植物优势功能群与水体理化因子的 RDA 分析

RDA 分析如图 8 所示,春季 TB 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、pH、DO、Chla 呈正相关;与 Cl^- 呈负相关。LO 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 的正相关性最强,与 pH、DO 的正相关性次之。MP 与 pH、DO、Chla 呈强正相关,与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 也呈正相关,但程度稍弱于 LO;与 Cl^- 呈负相关。所有功能群均与 TN 和 WT 的相关性较弱。夏季所有功能群与环境因子均表现为正相关,其中 Cl^- 是主导驱动因子,其次为 pH 和 TN。功能

群之间的差异不大。W1 和 MP 与 Cl^- 、pH、TN 的相关性最强；TB 与 COD、DO 的相关性更突出；W2 对各因子的响应强度略低于其他三个功能群。秋季 Chla 达到显著水平 ($P < 0.05$)，是秋季驱动功能群分布的关键环境因子。D、C、H1、B 与 Chla 呈强正相关；S1 与 Chla 相关性较弱。COD 与 D、C、H1、B 的正相关性较强，与 S1 的正相关性中等。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 D、C、H1、B 呈明显正相关，与 S1 的正相关性较弱。WT 与所有功能群均呈正相关。

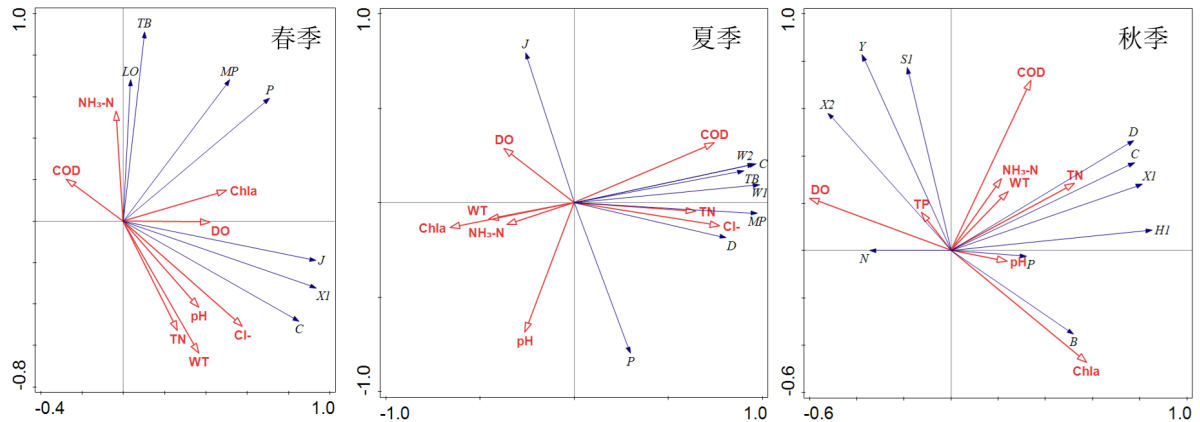


Figure 8. RDA of dominant phytoplankton functional groups and water physicochemical factors
图 8. 浮游植物优势功能群与水体理化因子的 RDA 分析

4. 讨论

4.1. 浮游植物多样性的时空特征

本研究共检出浮游植物 8 门 84 属 253 种，种类组成以硅藻门最为丰富。硅藻门在北方河流中普遍占据优势地位，主要归因于其对该区域环境条件的适应能力[11]。硅藻细胞壁由硅质构成，在低温、低营养盐的寡营养水体中具有较强的竞争力；同时，硅藻偏好较高的 pH 值，而我国北方河流多呈偏碱性特征，为其生长提供了适宜的水化学条件[12] [13]。

季节变化方面，本研究发现浮游植物种类在夏季最为丰富，但单因素 ANOVA 分析显示季节间差异不显著，可能有多方面原因。首先，西尔根气河地处大兴安岭北部寒温带大陆性气候区，冬季漫长严寒，夏季短暂凉爽，季节性温差变化剧烈[1]，但浮游植物群落可能以耐受低温的广温性物种为主，不同季节的优势类群虽然存在不同，但在宏观指标上未能表现出显著差异[12]。其次，海拉尔河的相关研究也表明，不同纬度、营养水平和酸碱度河流的浮游植物功能群组成差异较小，其浮游植物生物量的季节差异同样不显著[12]，说明在北方寒区河流中，季节因素对浮游植物群落的塑造作用可能弱于空间环境因子的影响。

从空间分布来看，本研究发现小西尔根气河的浮游植物丰富度最高，且绿藻门的丰富度在干流西尔根气河和支流大西尔根气河之间存在显著差异。支流通常水流较缓、水体滞留时间较长，营养盐截留效应更为明显，有利于绿藻类群的增殖；而干流水流较快、水体更新频繁，可能对绿藻的生长形成一定制约。此外，绿藻对环境因子的响应有其特异性：绿藻能适应较高的水温和 pH 值，对氮、磷等营养盐也表现出较强的依赖，同时受到溶解氧和电导率的影响[13]。大西尔根气河与小西尔根气河之间在 pH、水温、营养盐水平等方面的差异，可能是导致绿藻丰富度空间分布不均的关键驱动因素[14] [15]。

4.2. 浮游植物优势功能群的时空特征

西尔根气河水系浮游植物优势功能群组成存在显著的季节演替规律。三个季节共筛选出浮游植物优

势功能群 10 种, 从季节变化来看, 浮游植物优势功能群呈现出 C、J、LO、MP、P、TB、X1→C、D、J、MP、P、TB、W1、W2→B、C、D、H1、N、P、S1、X1、X2、Y 的明显演替趋势。这一演替规律表明, 春季优势功能群以 C、J、LO、MP、P 等硅藻和绿藻类群为主, 适应较为洁净、混合良好的水体环境; 夏季增加了 D、W1、W2 等功能群, 反映水体温度升高、营养盐输入增加; 秋季则新增了 B、H1、N、S1、X2、Y 等类群, 其中 B、H1、Y 等功能群多与中富营养化水体有关。上述季节演替格局与我国北方其他水域的研究结果具有一致性。拉林河浮游植物群落演替明显, 水温和总氮与功能群演替关系最为密切[16]; 呼兰河湿地的研究同样发现 X1、W2、MP、LO、J 功能群在夏、秋两季均有稳定出现, H1、Y、W1 等功能群则只在特定季节出现, D、P、TB 功能群虽然出现频率较高但相对丰度较低[17]; 雅鲁藏布江中上游浮游植物功能群的季节变化也较为明显, 水温、pH、溶解氧是影响优势功能群分布的主要环境因子[18]。

从空间分布来看, 三条河流共筛选出 12 种优势功能群, 均以 D、LO、MP、P、TB 等硅藻类功能群作为共有优势类群, 反映了西尔根气河水系以硅藻为主导的群落结构特征。干流西尔根气河拥有最多的优势功能群, 且包含 X1 和 E 等功能群; 支流大西尔根气河中出现了 N 和 X3 等功能群, N 功能群常与富营养水体中的蓝藻相关; 支流小西尔根气河中则出现了 Y 功能群。这种干支流之间的功能群组成差异与渭河流域的研究结果相似[19]。上述空间差异的形成可能是因为支流水流较缓, 有利于营养盐的累积和浮游植物的生长; 干流则水流较快, 对藻类的冲刷作用更强[20] [21]。

4.3. 浮游植物优势功能群的时空差异

西尔根气河水系浮游植物优势功能群在季节上存在差异, 而在空间上三条河流表现出高度相似性。这一结果表明季节变化是驱动优势功能群演替的主导因素, 而干支流之间的水文差异未引发优势功能群的空间差异。

季节尺度上, 春季以硅藻(如功能群 D、P)、部分绿藻(如功能群 X1)和裸藻(如功能群 W1)为主, 这些功能群适应水温较低、水体扰动均匀、光照充足的生境。其中, 功能群 D 常见于浅水、扰动频繁的水体, 而功能群 P 偏好混合良好的富营养环境, 二者在春季高溶氧、低营养盐条件下具竞争优势。秋季新增 B、H1、N、S1、X2、Y 等功能群。B 和 H1 常与固氮蓝藻相关, 多见于氮含量低的水体; 功能群 Y 属于适应中富营养且光强较低的环境; 功能群 S1 则常见于浅层浑浊水体。这一演替反映了秋季水温下降、光照减弱以及外源营养盐输入可能增加所导致的生境变化。

空间尺度上, 三条河流的优势功能群组成并未出现显著差异。可能是由于三条河流同属西尔根气河水系, 水文连通性强, 水体交换频繁, 导致生境条件趋于均质化; 尽管干支流之间在流速、水深、营养盐浓度等环境因子上可能存在一定波动, 但整体环境梯度尚未达到足以驱动功能群发生根本性分化的阈值。

这与渭河流域干流与部分支流的浮游植物功能群仅当环境梯度足够大时才表现出显著差异的研究结果相似[19]。

致 谢

感谢所有研究人员的参与, 感谢黑龙江省双河国家级自然保护区工作人员的帮助。

基金项目

本文受 2024 黑龙江省自然科学基金联合基金培育项目(PL2024D001)的支持。

参考文献

[1] 董淼, 刘曼红, 赵婧祎, 等. 基于稳定同位素技术的小西尔根气河鱼类群落营养结构及食物网研究[J]. 湿地科学,

- 2025, 23(6): 1258-1267.
- [2] 刘英龙, 李秋华, 刘晨, 等. 贵州高原猫跳河流域浮游植物功能群组成特征及其与环境因子之间的关系[J]. 生态学杂志, 2023, 42(4): 880-888.
- [3] 郭旭东, 王雨春, 曾艳, 等. 长江干流南京段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学研究, 2025, 38(7): 1418-1429.
- [4] 赵贺, 赵年桦, 李丽, 等. 新疆克孜勒河浮游生物群落特征及其与环境因子关系[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1123-1131.
- [5] 汪星, 李利强, 郑丙辉, 等. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3766-3776.
- [6] 靳佳霖, 吕绪聪, 曾大海, 等. 丹江口水库(丹库区)浮游植物功能群时空特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2026, 38(3): 931-942.
- [7] 姜海霞. 河溪生态系统浮游生物和底栖动物多样性及交互影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
- [8] Reynolds, C.S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L. and Melo, S. (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>
- [9] Padišák, 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>
- [10] 丁隆强, 周彦锋, 陈永进. 松花湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. 湿地科学, 2025, 23(4): 774-782.
- [11] 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.
- [12] 刘子暄, 王莹莹, 赵昶, 等. 海拉尔河浮游植物功能群时空特征及其与水环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(4): 689-697.
- [13] 王华, 杨树平, 房晟忠, 等. 滇池浮游植物群落特征及与环境因子的典范对应分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 544-552.
- [14] 李明, 叶思思, 李娟, 等. 丹江流域浮游植物群落的时空变化及驱动因子[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 1-14.
- [15] 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 等. 土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2211-2222.
- [16] 娄恬, 陆欣鑫, 刘妍, 等. 拉林河浮游植物三种功能群分布特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(4): 1085-1100.
- [17] 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.
- [18] 李晓东, 巢欣, 刘惠秋, 等. 雅鲁藏布江中游浮游植物群落优势种时空生态位[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7746-7760.
- [19] 赵耿楠, 潘保柱, 丁一桐, 等. 渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3226-3237.
- [20] 沈旭舟, 张佳磊, 曾一恒, 等. 三峡水库干支流浮游植物群落演替规律及驱动机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 18-21.
- [21] 叶四化, 陈湛峰, 林学明, 等. 潭江干流及主要支流浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. 湿地科学, 2025, 23(5): 1011-1023.