

DOI: 10.5846/stxb201909262022

马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性. 生态学报, 2021, 41(1): 224-234.

Ma Y, Lu X X, Fan Y W. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 224-234.

松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性

马煜¹, 陆欣鑫^{1,2}, 范亚文^{1,2,*}

¹ 哈尔滨师范大学, 生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025

² 黑龙江省水生生物多样性研究重点实验室, 哈尔滨 150025

摘要: 松花江是黑龙江在我国境内的最大支流, 流经吉林、黑龙江两省。松花江哈尔滨段是哈尔滨市工农业生产与生活用水的重要水资源, 近年来由于人类活动的频繁影响, 水体质量有所下降。鉴于此, 于 2018 年春、夏、秋三季(4 月、8 月和 10 月), 在松花江哈尔滨段设置 14 个采样点, 对电导率、总氮和总磷等理化指标进行测定, 同时对其浮游植物群落结构及环境因子相关性进行研究。利用群落相似性分析(ANOSIM)探讨浮游植物群落时空分布差异; 通过 SIMPER 分析筛选出影响群落时空格局的关键物种。基于优势种和 10 项理化指标的冗余分析(RDA)揭示了浮游植物群落生态分布特征并对关键影响因子进行识别。研究表明, 调查期间共鉴定浮游植物 136 种, 其中优势种 15 种, 群落结构主要以硅藻门和绿藻门的物种构成。松花江哈尔滨段浮游植物群落结构与过去 10 余年间相比较为稳定。ANOSIM 和 SIMPER 分析表明, 季节变化和人为活动干扰对浮游植物群落时空格局具有一定驱动作用, 蓝藻门物种的空间分布活动干扰影响明显。RDA 分析表明, 浮游植物分布特征与水环境时空异质性关系密切, 驱动松花江哈尔滨段浮游植物群落时空分布的主要水环境因子为电导率、总磷、浊度和 pH。

关键词: 松花江哈尔滨段; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 冗余分析

Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River

MA Yu¹, LU Xinxin^{1,2}, FAN Yawen^{1,2,*}

¹ College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

² Key Laboratory of Biodiversity of Aquatic Organisms, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: The Songhua River, the largest tributary of the Heilongjiang River, flows through Jilin and Heilongjiang province. The Harbin section of the Songhua River starts from the upstream of Zhu Shuntun and ends at the Dadingzi Mountain in the lower reaches. It is an important water resource for industrial, agricultural and domestic use in Harbin city. Recent years, the intensively anthropogenic activities have resulted in water pollution. The water quality and biodiversity of Harbin section of the Songhua river has been attracted wide attention. At present, more and more studies focused on phytoplankton diversity and community structure. However, the study on phytoplankton in Harbin section of the Songhua River is still in its infancy. To explore the phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Harbin section of the Songhua River, multivariate statistical analysis was conducted in this study. All sampling sites of Harbin section of the Songhua River were divided into two parts, sampling sites under intense human disturbance and other less polluted sites. A total of 14 sampling sites, the phytoplankton community and 10 environmental parameters were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31870187); 哈尔滨师范大学博士启动金项目(XKB201912)

收稿日期: 2019-09-26; **网络出版日期:** 2020-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanyaw@163.com

investigated in the spring (April), summer (July), and autumn (October) of 2018. The spatial and temporal distribution differences of phytoplankton community were analyzed by analysis of similarity (ANOSIM). The key species with contribution to the spatio-temporal patterns were identified by similarity percentage (SIMPER) analysis. Additionally, the redundancy analysis (RDA) based on dominant species and 10 environmental variables revealed the ecological distribution of phytoplankton community and identified main factors. The results showed that a total of 136 species of phytoplankton were detected, including 15 dominant species. The species composition was dominated by Bacillariophyta and Chlorophyta (76%), followed by Cyanobacteria (12%), Cryptophyta (7%) and others. Compared with the past 10 years, the community structure belonging to Bacillariophyta-Chlorophyta was relatively stable. Among the three seasons, except for the physical and chemical indicators of specific conductivity (SpCond.), oxidation-reduction potential (ORP) and total phosphate (TP), others were significant differences ($P < 0.05$). During the study, the abundance of phytoplankton in Harbin section of the Songhua River was 7.92×10^6 — 21.76×10^6 ind./L, and the average was 15.27×10^6 ind./L. The independent sample t-test showed that there were significant differences in total nitrogen (TN), chemical oxygen demand (COD_{Mn}) and chemical oxygen demand (BOD_5) among the sampling sites affected by human disturbance and other sites ($P < 0.01$). Additionally, there was significant difference of SpCond. at the 0.01 level in different sites, while other physical indicators such as pH did not change greatly ($P > 0.05$). ANOSIM and SIMPER analysis showed that seasonal changes and human-induced disturbances in Site 4 to Site 7 had effects on the spatial and temporal patterns of phytoplankton community. The spatial distribution of Cyanobacteria species was significantly affected by human activity. The results of RDA analysis found that the distribution characteristics of phytoplankton were closely related to the spatio-temporal heterogeneity of water environment. SpCond., TP, turbidity (Tur.) and pH were the key driving factors of phytoplankton community in Harbin section of the Songhua River.

Key Words: Harbin section of the Songhua River; phytoplankton; community structure; environmental factors; redundancy analysis

浮游植物作为水域生态系统重要的初级生产者,是形成食物链的基础环节^[1]。浮游植物不但参与完成生态系统内物质循环和能量流动过程,同时在构建群落环境、维持生态平衡、供应能源等多种方面都具有重要的意义^[2]。浮游植物群落的种类组成和数量特征与河流生态系统结构与功能密切相关,其群落演替格局会间接影响河流生态系统的生态平衡^[3]。温带河流生态系统中,季节间水文条件变化明显^[4]。浮游植物群落结构及时空分布特征具有一定的周期性,能反映出不同营养状态下水体的生态条件和营养状况。因此,浮游植物的演替与水体氮、磷等营养盐的耦合关系,可作为反映水体营养状态的有效指标^[5]。

随着人类活动干扰及全球环境变化,淡水生态系统的水体污染及富营养化事件频发。江河等大型水体的保护和治理成为生态经济社会与可持续发展的保障和来源^[6]。近年来我国大型水体水质呈现出显著下降的趋势,水体受人为污染事件不断增多。松花江流域作为东北地区经济和发展的生态载体,供给城市饮用水和承载工农业生活污水排放。特别是2005年松花江水污染事件后,松花江流域生物多样性及生态系统服务功能遭受不同程度的破坏^[7]。根据《2017年中国生态环境公报》数据,松花江流域目前属于轻度污染水平,流域中Ⅳ至劣Ⅴ类水体占30%以上^[8]。松花江哈尔滨段作为哈尔滨市生产生活用水的主要水源之一,城市污水排放、污染物质的地表径流等点、面源污染已经对松花江水质和水体健康状况造成一定压力。目前,基于水生生物群落特征与水环境关系来阐述水体生态状况,指导水体生态修复的研究已广泛应用于江、河、湖、水库等淡水生态系统中^[9-11]。我国有关浮游植物群落演替特征与水环境因子的关系研究,主要集中于湖泊、水库等水体,对于江河特别是城市河段的研究工作,仍有待深入。

本研究对松花江哈尔滨段浮游植物群落分布格局进行系统研究,基于多元统计分析,阐述松花江哈尔滨段浮游植物群落格局与水体环境因子的相互关系,并对驱动群落分布的主要环境因子进行识别,进一步阐述

温带河流生态系统中,浮游植物群落格局与环境因子的耦合关系,为我国温带河流生态系统水生生物群落及水域环境的保护与修复提供基于浮游植物群落的基础生态学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

本研究在松花江哈尔滨段设置 14 个采样点,如图 1 所示,从上游朱顺屯断面到下游大顶子山断面分别是 S1(朱顺屯)、S2(调度中心)、S3(阳明滩大桥)、S4(何家沟)、S5(马家沟)、S6(信义沟)、S7(水泥厂)、S8(滨江湿地)、S9(兴港渔村)、S10(东飞)、S11(泉眼)、S12(巨源镇)、S13(黄土山)、S14(大顶子山船闸)。分别于 2018 年 4 月(春季)、8 月(夏季)、10 月(秋季)对此段水域进行了 3 次季度调查。其中 S4—S7 样点为受城市污水、工业污水排放等人为活动干扰较为明显的区域^[12]。

1.2 样品采集与理化指标测定方法

1.2.1 浮游植物样品的采集

定性样品用 25#浮游网在水体表层进行“∞”形捞取至 3—5 min,用 4%甲醛溶液进行固定^[13],实验室内通过光学显微镜镜检进行种类鉴定。

定量样品在水体表层(约 0.5 m)处取 1 L 水样,用鲁格试剂固定,并使最终浓度为 1.5%,固定沉淀并浓缩至 50 mL,在 10×40 倍显微镜下利用浮游植物计数框进行种类鉴定和计数,其中优势种鉴定到种。种类鉴定参考相关文献^[14-15]。所有样品于监测断面左侧、右侧分别采集,并混合。

1.2.2 水体理化指标的测定

用多参数水质分析仪(Hydrolab DS5X)现场采集水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、电导率(SpCond.)、浊度(Tur.)、氧化还原电位(ORP)数据;实验室 24h 内对总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Mn})和五日生化需氧量(BOD₅)进行测定,参考《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)。

1.3 数据处理和分析

浮游植物优势度通过下述公式计算:

$$y = f_i \times P_i$$

式中, f_i 为第 i 种出现的频率, P_i 为第 i 种个体数量占总个体数量的比例;当优势度 ≥ 0.02 时为优势种^[16]。

使用 SPSS 24.0 进行独立样本 t 检验。浮游植物群落与环境因子间的排序分析使用 Canoco 4.5 软件。对

浮游植物的丰度进行平方根转换,各样点出现频率 $\geq 50\%$ 纳入物种数据矩阵,环境因子除 pH 外进行 $\log(x+1)$ 转换。对浮游植物物种数据进行去趋势(DCA)分析,计算 DCA 排序轴的最大长度梯度,并判断单峰模型(CCA)和线性模型(RDA)的选择。ANOSIM 分析和 SIMPER 分析使用 Primer 5.0 软件完成。采样点的绘制和浮游植物种类组成分布基于 Google earth 和 Arcmap 10.2 软件完成。

2 结果与分析

2.1 水体理化指标

松花江哈尔滨段 2018 年春、夏、秋三季各水体理化指标呈现一定的时空变化规律(表 1)。春季平均 DO (9.22 mg/L) 显著高于夏季和秋季(5.82 mg/L 和 7.54 mg/L) ($P < 0.05$)。pH 的变化范围在 7.24—8.32 之间,

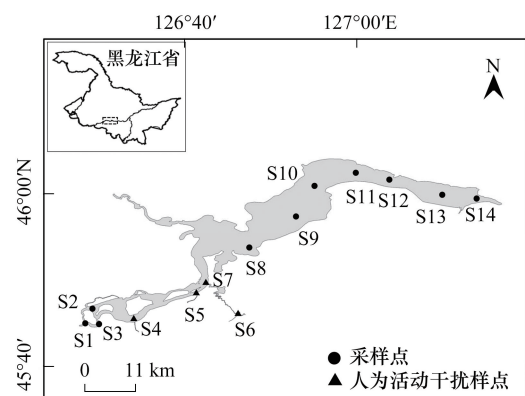


图 1 松花江哈尔滨段采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in Harbin section of the Songhua River
S (Sampling site) 表示样点

春季平均 pH 最高,夏季最低。SpCond.、ORP 和 TN 呈现随着三季的推移逐渐降低的规律,平均 SpCond.、ORP 和 TN 分别为 331.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、401.63 mV 和 1.13 mg/L,变化范围分别在 278.93—427.87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、384.07—414.33 mV 和 0.85—1.49 mg/L 之间。WT、TP 和 COD_{Mn} 呈现夏季最高,秋季最低的规律,且 WT 在季节间变化差异显著 ($P<0.05$)。平均 WT、TP 和 COD_{Mn} 分别为 16.99 $^{\circ}\text{C}$ 、0.41 mg/L 和 5.97 mg/L,变化范围在 10.84—25.82 $^{\circ}\text{C}$ 、0.29—0.56 mg/L 和 4.85—7.03 mg/L 之间。Tur.在三季的变化差异极显著 ($P<0.01$),与 BOD_5 变化规律类似,平均值在秋季最高,春季最低。三季平均 Tur.为 41.72 NTU,平均 BOD_5 为 3.63 mg/L,变化范围分别为 19.42—62.27 NTU 和 3.23—3.93 mg/L。独立样本 t 检验表明,在 3 个季节之间,除 SpCond.、ORP 和 TP 外的理化指标,季节之间均存在显著差异 ($P<0.05$)。在空间上,受到人为活动干扰影响的样点与其他样点之间,表征水体营养状态的 TN、 COD_{Mn} 和 BOD_5 含量差异极显著 ($P<0.01$)。此外,SpCond. 含量在不同样点间梯度变化极显著 ($P<0.01$),而其他水体物理指标如 pH 等空间梯度变化不明显。

表 1 松花江哈尔滨段 2018 年水环境因子变化情况

Table 1 Environmental variables in Harbin section of the Songhua River in 2018

环境变量 Environmental variables	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	其他样点	S4—S7 样点	其他样点	S4—S7 样点	其他样点	S4—S7 样点
WT/ $^{\circ}\text{C}$	14.00 $\pm$ 1.95	15.05 $\pm$ 0.83	26.68 $\pm$ 0.84	23.68 $\pm$ 0.85	10.47 $\pm$ 1.85	11.78 $\pm$ 1.26
DO/(mg/L)	9.05 $\pm$ 0.98	9.65 $\pm$ 0.94	5.69 $\pm$ 0.34	6.15 $\pm$ 0.38	7.48 $\pm$ 0.68	7.68 $\pm$ 0.44
SpCond./($\mu\text{S}/\text{cm}$)	268.04 $\pm$ 13.18	827.43 $\pm$ 96.02	210.32 $\pm$ 38.27	479.38 $\pm$ 34.44	223.96 $\pm$ 17.18	416.35 $\pm$ 144.25
pH	8.47 $\pm$ 0.48	7.95 $\pm$ 0.67	7.28 $\pm$ 0.31	7.15 $\pm$ 0.21	7.59 $\pm$ 0.26	7.33 $\pm$ 0.48
ORP/mv	407.06 $\pm$ 26.21	432.50 $\pm$ 12.34	405.10 $\pm$ 30.90	410.00 $\pm$ 21.24	386.30 $\pm$ 31.80	378.50 $\pm$ 25.86
Tur./NTU	18.63 $\pm$ 3.49	21.40 $\pm$ 1.88	44.22 $\pm$ 6.32	41.63 $\pm$ 6.48	60.33 $\pm$ 2.69	67.13 $\pm$ 10.06
TN/(mg/L)	1.29 $\pm$ 0.15	1.98 $\pm$ 0.27	0.85 $\pm$ 0.13	1.56 $\pm$ 0.58	0.64 $\pm$ 0.06	1.37 $\pm$ 0.41
TP/(mg/L)	0.16 $\pm$ 0.02	0.93 $\pm$ 0.36	0.35 $\pm$ 0.18	1.09 $\pm$ 0.33	0.15 $\pm$ 0.03	0.65 $\pm$ 0.31
COD_{Mn} /(mg/L)	5.02 $\pm$ 1.04	8.53 $\pm$ 1.63	6.60 $\pm$ 1.32	8.11 $\pm$ 1.86	4.19 $\pm$ 0.54	6.50 $\pm$ 2.40
BOD_5 /(mg/L)	2.96 $\pm$ 0.52	3.89 $\pm$ 1.15	3.29 $\pm$ 0.30	4.83 $\pm$ 0.61	3.46 $\pm$ 0.83	5.11 $\pm$ 0.93

WT:水温 Water temperature; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; SpCond.:电导率 Specific conductivity; ORP:氧化还原电位 Oxidation-reduction potential; Tur.:浊度 Turbidity; TN:总氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total phosphate; COD_{Mn} :化学需氧量 Chemical oxygen demand; BOD_5 :生化需氧量 Biochemical oxygen demand

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类组成及优势种分布

研究期间松花江哈尔滨段共检出浮游植物 7 门 55 属 136 种,其中绿藻门的种类最多,为 22 属 60 种;硅藻门次之,为 12 属 33 种;蓝藻门 11 属 20 种;裸藻门 4 属 15 种;甲藻门 3 属 4 种;隐藻门 2 属 3 种;金藻门 1 属 1 种。其中夏季浮游植物各门类的平均种类数为三季最高,春季最低。受人为活动干扰样点(S4—S7)的浮游植物各门类平均种类数均高于其他样点(图 2)。

共划分浮游植物优势种 15 种,隶属于 4 门 13 属。硅藻门和隐藻门的种类如梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)和卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)为全年优势种;绿藻门和蓝藻门的优势种多出现在夏秋两季,包括小球藻(*Chlorella vulgaris*)、镰形纤维藻(*Ankistrodesmus falcatus*)、镰形纤维藻奇异变种(*Ankistrodesmus falcatus* var. *mirabilis*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)和微小色球藻(*Chroococcus minutus*)。此外硅藻门的颗粒直链藻(*Melosira granulata*)和绿藻门的短刺四星藻(*Tetrastrum staurogeniaeforme*)也是松花江哈尔滨段的主要优势种(表 2)。

优势度的季节变化上,梅尼小环藻在春、夏、秋三季的优势度均为各优势种中最高,平均优势度分别为 0.214、0.114 和 0.229。空间变化上,受人为活动干扰样点(S4—S7)绿藻门和蓝藻门的主要优势种在三季的平均优势度高于其他样点(表 2)。

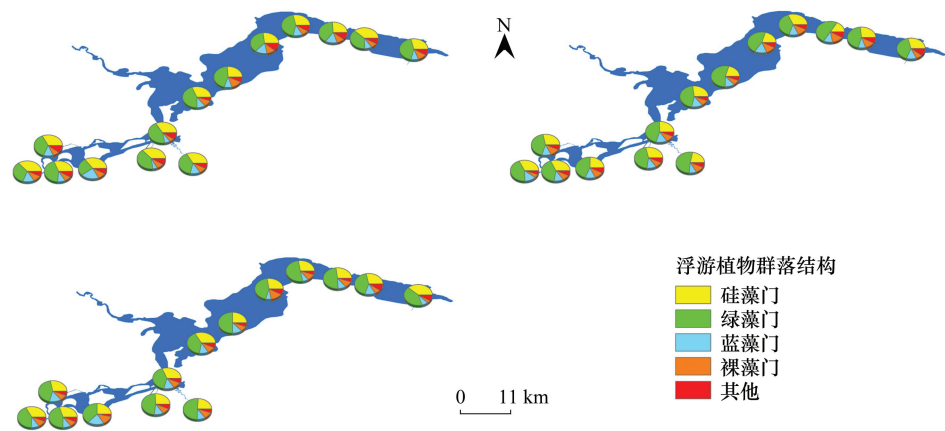


图 2 松花江哈尔滨段浮游植物种类组成与分布

Fig.2 The composition and distribution of phytoplankton taxa in Harbin section of the Songhua River

表 2 松花江哈尔滨段浮游植物优势种优势度

优势种 Dominant species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	其他 样点	S4—S7 样点	其他 样点	S4—S7 样点	其他 样点	S4—S7 样点
硅藻门 Bacillariophyta						
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.225	0.186	0.122	0.094	0.210	0.275
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	0.063	0.080	0.032	0.060	0.045	0.032
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	—	0.021	—	0.032	0.020	0.044
线形双菱藻 <i>Surirella linearis</i>	0.036	0.025	—	—	—	—
美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	0.048	0.060	—	—	—	—
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	—	—	0.022	—	0.020	0.028
绿藻门 Chlorophyta						
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	—	—	0.021	0.038	0.022	0.045
镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	—	—	0.020	0.032	0.020	0.026
镰形纤维藻奇异变种 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i>	—	—	0.027	—	0.024	—
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	—	—	0.022	0.042	0.026	0.030
短刺四星藻 <i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>	—	0.022	—	—	0.020	0.026
蓝藻门 Cyanophyta						
湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	—	0.025	0.031	0.124	0.022	0.081
微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	—	—	0.023	0.047	—	0.031
隐藻门 Cryptophyta						
嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	0.022	0.020	—	0.040	0.021	0.025
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	0.024	—	—	0.032	0.022	0.024

“—”表示该种在某个季节中出现但不是优势种;空白表示该种未出现

2.2.2 浮游植物丰度变化

研究期间,松花江哈尔滨段浮游植物丰度的季节变化整体上呈现秋季>夏季>春季的规律,三季总丰度在 7.92×10^6 — 21.76×10^6 个/L 之间变化,平均丰度为 15.27×10^6 个/L (图 3)。其中秋季的平均丰度最高,为 1.55×10^6 个/L,变化范围在 0.27×10^6 — 7.23×10^6 个/L 之间;夏季次之,平均丰度为 1.15×10^6 个/L,变化范围在 0.51×10^6 — 3.22×10^6 个/L 之间;春季的平均丰度最低,为 0.57×10^6 个/L,变化范围在 0.25×10^6 — 1.15×10^6 个/L 之间。浮游植物群落主要以硅藻门和绿藻门为主,合计贡献浮游植物群落丰度 76%,其次为蓝藻门(12%)、隐

藻门(7%)和其它门类(5%)。硅藻门的平均相对丰度在春季最高,夏季最低,分别为 71%和 40%。绿藻门在秋季的平均相对丰度最高,蓝藻门则为夏季最高,各占 28%和 25%。而绿藻门和蓝藻门的平均相对丰度在春季最低,为 10%和 4%。独立样本 t 检验显示,浮游植物丰度在不同季节之间差异不显著,但是硅藻门、绿藻门和蓝藻门的种类在不同季节之间存在显著差异($P<0.05$)。受人为活动干扰的样点(S4—S7)与其他样点之间平均丰度差异不显著,但蓝藻门和隐藻门的相对丰度存在显著差异($P<0.05$)(图 3)。

2.2.3 浮游植物群落分布特征

基于浮游植物优势种的群落相似性分析(ANOSIM)表明,本次研究期间季节变化($r=0.41$, $P<0.05$)和人为活动干扰($r=0.44$, $P<0.01$)均对浮游植物群落格局存在一定的驱动作用。相似性百分比(SIMPER)分析表明,松花江哈尔滨段春、夏、秋三季之间浮游植物群落差异的主要贡献物种为美丽星杆藻、湖泊假鱼腥藻、线形双菱藻和卵形隐藻等。其中春季和夏季浮游植物群落之间的差异最大($r=0.66$, $P<0.01$),美丽星杆藻、湖泊假鱼腥藻、线形双菱藻、小球藻和卵形隐藻等物种起到贡献作用。春季和秋季浮游植物群落之间的差异略小于春、夏季($r=0.55$, $P<0.01$),美丽星杆藻、湖泊假鱼腥藻、线形双菱藻和镰形纤维藻是群落季节性分布差异的主要物种。夏季和秋季浮游植物群落间差异最小($r=0.14$, $P<0.05$),两个季节间的物种分布与环境特征较为相似,导致群落季节性差异的主要贡献物种为湖泊假鱼腥藻、尖针杆藻、卵形隐藻和颗粒直链藻等。研究期间受人为活动干扰样点(S4—S7)与其他样点的物种分布存在显著的差异。梅尼小环藻、湖泊假鱼腥藻、谷皮菱形藻和四尾栅藻的种群变化是构成松花江哈尔滨段浮游植物群落空间格局变化的主要物种。

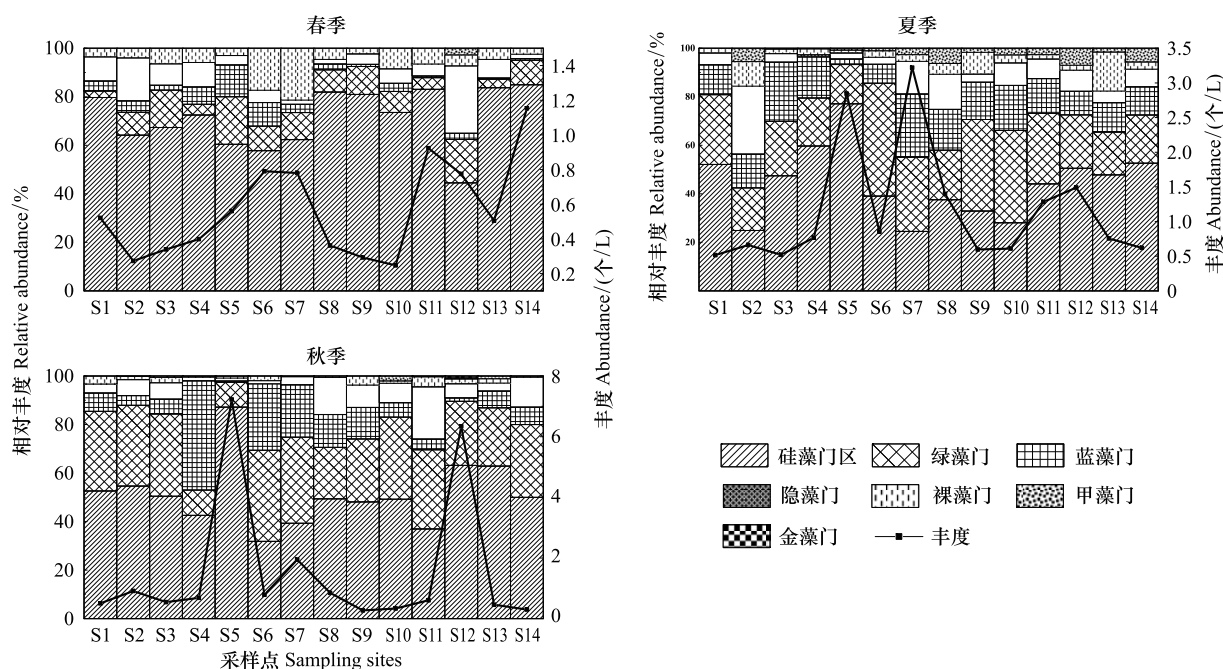


图 3 松花江哈尔滨段浮游植物丰度和相对丰度的时空变化

Fig.3 Spatial and temporal variations of phytoplankton abundance (ind./L) and relative abundance in Harbin section of the Songhua River

2.3 浮游植物群落与环境因子的排序分析

DCA 分析结果表明排序轴最长轴长度梯度为 0.969,说明线性模型 RDA 能更好的解释本次排序分析。RDA 排序分析结果显示(图 4),第一排序轴和第二排序轴分别解释了 79.3%和 89.5%的浮游植物群落与环境因子关系变量,说明本次排序分析较好地解释了种类与环境因子的关系。

使用 Monte Carlo 置换检验对影响浮游植物群落演替的环境变量进行识别和筛选,结果表明,SpCond. ($F=25.24$, $P=0.002$),TP ($F=2.855$, $P=0.002$),pH ($F=6.091$, $P=0.004$),Tur. ($F=8.702$, $P=0.012$)是影

响松花江哈尔滨段浮游植物群落时空分布的主要环境因子,其在排序图中的权重值,反映了对浮游植物群落影响的重要程度。

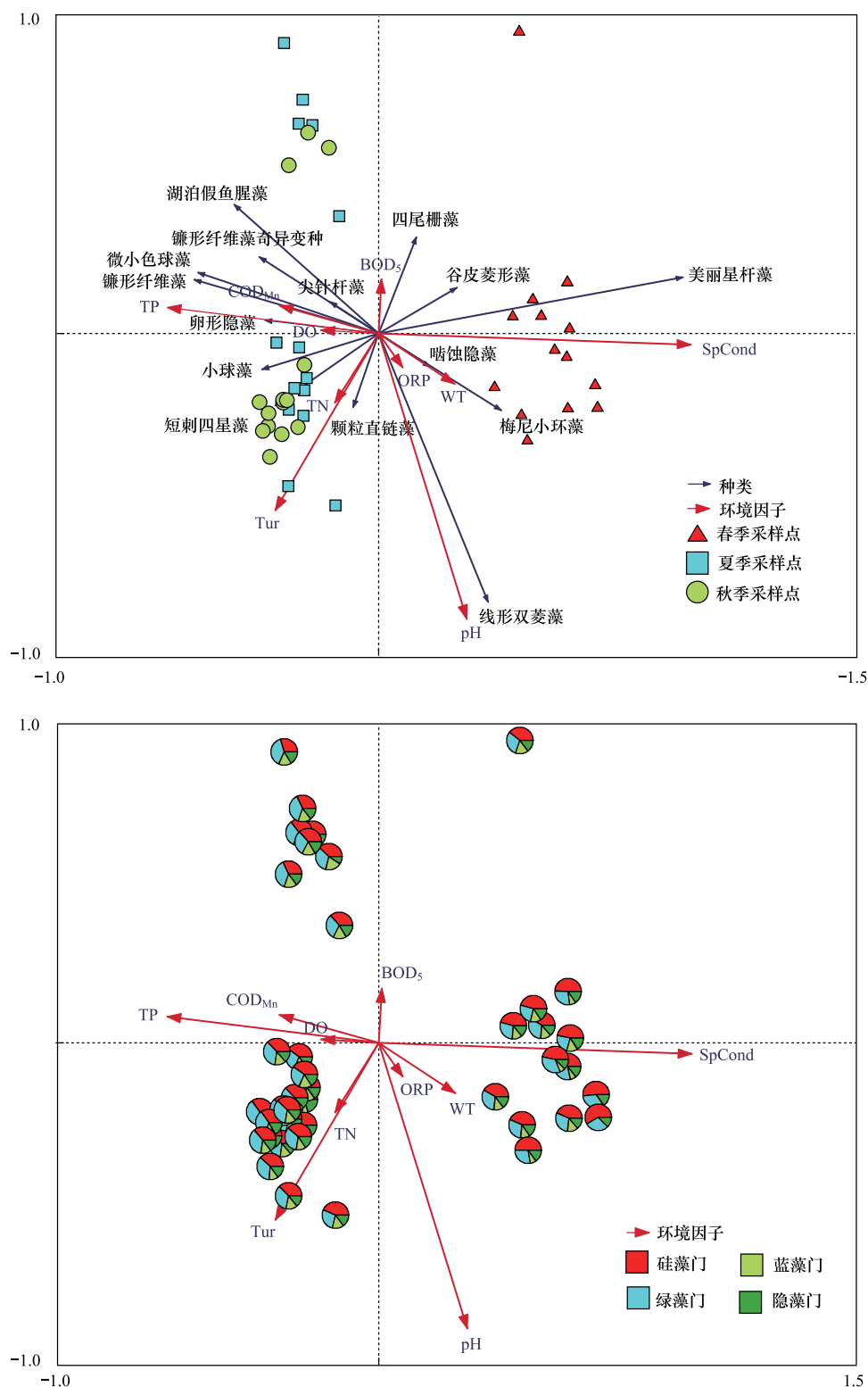


图4 浮游植物种类、环境因子与样点间的 RDA 排序图

Fig.4 RDA ordination of phytoplankton species, environmental variables and sample sites

WT:水温;DO:溶解氧;SpCond.:电导率;ORP:氧化还原电位;Tur.:浊度;TN:总氮;TP:总磷;COD_{Mn}:化学需氧量;BOD₅:生化需氧量

3 讨论

3.1 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局变化

浮游植物群落分布特征与水体环境因子及自身的生存策略关系密切,不同季节间流域内水文条件改变时,浮游植物群落会调控演替机制而维持群落的生态平衡,如浮游植物的形态、沉降情况、捕光能力、营养盐的利用和固碳作用等发生相应的生态响应^[17]。伴随着营养物质的可利用性和光照的增加,大量小型的、繁殖速率快的中心硅藻和隐藻门种类在降雨量较低、干旱和低温的春季环境中占据优势^[18]。蓝、绿藻通常在夏、秋季节占据主导地位,特别是蓝藻门的物种通常在水温和营养盐较为稳定的秋季容易成为优势类群^[19]。松花江流域受温带季风气候影响,季节间水环境条件变化明显。本次研究中,浮游植物群落的动态变化呈现从春季硅藻门占绝对优势,演替到夏、秋两季绿藻门和蓝藻门的比例逐渐升高的规律(表 2、图 3)。除在研究期间全期优势种的梅尼小环藻等种类外,春季的硅藻门优势种,如美丽星杆藻和线形双菱藻在夏、秋两季逐渐被绿藻门的镰形纤维藻、小球藻和蓝藻门的湖泊假鱼腥藻等优势种取代。Sommer 提出的浮游生物季节性演替模型(Plankton Ecology Group, PEG)认为,中营养水域中硅藻门通常在春季占据优势。随着时间推移,浮游植物群落向蓝绿藻逐渐占优的格局演替^[20],而松花江哈尔滨段浮游植物群落的演替机制和物种适应策略也正与 PEG 模型相吻合。

河流连续理论(River Continuum Concept, RCC)认为水体的营养盐或有机物由于河流的连续性会随着河流的走势呈现一定的空间格局,物种多样性通常在源头河段和下游河段相对较低^[21]。经 ANOSIM 分析表明,研究区域中受人为活动干扰较为明显的 S4—S7 样点与其他样点之间,蓝藻门种类空间分布特征差异显著($P < 0.05$),其他门类浮游植物空间分布特征基本稳定($P > 0.05$)。城市污水排放带来的点源污染和面源污染,会改变流域尺度内的营养状态和底质的环境因子,对水域环境及水生生物多样性带来干扰^[22]。松花江哈尔滨段朱顺屯污水排放(约 450 万吨)及城区内工业生活废水注入,是导致松花江哈尔滨段水体营养状态较高的原因之一^[23]。以本次研究区域尺度分析,受人为活动干扰较为明显区域(S4—S7)内水体营养状态与其他样点差异明显(表 1)。蓝藻门种类通常在营养盐较高的栖息环境内占据优势生态位,在资源竞争和栖息地适应中占优。由于城市污水排放导致营养盐含量升高,使蓝藻门在该区域内逐渐成为优势种群,这与在同纬度其他河流的研究结果一致^[24-25]。本研究中蓝藻门种群的空间变化格局基本反映了松花江哈尔滨段城市活动干扰对水生生物群落的改变。此外,在分析流域内河流走势对浮游植物群落格局影响的过程中,城市活动的干扰是不可忽略的因素之一。SIMPER 分析表明,梅尼小环藻、湖泊假鱼腥藻、谷皮菱形藻是贡献松花江哈尔滨段受人为活动干扰样点与其他样点浮游植物群落差异的主要种类。梅尼小环藻和谷皮菱形藻为淡水水域生境广布种,耐受于中污性水体;通常高浓度的氮含量有利于维持此类藻的持续生长,使之成为优势种群。特别是水环境中的磷含量增加可以促进谷皮菱形藻细胞内外有机物的合成,进一步促进谷皮菱形藻的生长^[26]。因此在本次研究中,梅尼小环藻和谷皮菱形藻能在营养盐水平相对较高的 S4—S7 样点中占据一定优势。湖泊假鱼腥藻对于高浓度氮、磷含量存在较强的生态适应性,在个体代谢过程中需要消耗较多的氮磷营养盐^[27]。鱼腥藻丰度会随着氮磷质量浓度的增加而升高。鉴于梅尼小环藻、湖泊假鱼腥藻、谷皮菱形藻对污染水体的耐受性及敏感性,其种群分布特征在一定程度上能反映松花江哈尔滨段环境因子的分布格局,可以作为指示松花江哈尔滨段受不同人为活动干扰影响的有效生态指示指标。

近年来对我国的内陆河流调查发现,硅藻和绿藻作为主要的优势类群,在丰富度和丰度上都处于主导地位^[28]。本次研究共鉴定浮游植物 136 种,种类组成以绿藻门种类最多,硅藻门次之的特点,优势种群多为指示中等营养状态的广布种类,这与松花江哈尔滨段过去 10 余年间研究结果类似^[29-30]。此外,栾卓等在 2005—2006 年松花江硝基苯水污染期间对松花江哈尔滨段硅藻植物进行了调查^[31],发现梅尼小环藻、颗粒直链藻为主要的优势种,并且出现了很多嗜碱性的硅藻种类。魏南等于 2013—2014 年对松花江哈尔滨段浮游植物的群落结构进行分析^[32],指出绿藻和硅藻的优势种较多,如小球藻、肥壮蹄形藻、颗粒直链藻、梅尼小环

藻等。这些研究结果都说明在过去 10 余年间尺度内,松花江哈尔滨段浮游植物群落结构特征较为稳定。

3.2 浮游植物群落结构与环境因子的相关性

群落格局与生境时空异质性的耦合关系是陆地生态系统、海洋和淡水生态系统生态研究的核心问题^[33-35]。探索水体环境因子对水生生物群落特征的驱动作用,是水域多样性保护和受损生态系统恢复的有效手段。松花江哈尔滨段属于典型受城市污水影响河段,水体环境因子空间异质性主要受支流污染源汇入及工业排污影响^[36]。本次研究中,电导率、总磷等环境因子的空间分布特征呈现受城市污水排放干扰明显的 S4—S7 显著高于其他样点的规律(表 1)。RDA 排序分析表明,浮游植物优势种、浮游植物门类的时空分布格局基本反映了浮游植物群落特征对栖息地空间异质性生态响应过程。

磷是水生生物物质合成和能量传输的必要元素,其浓度变化会影响水生生物的代谢及群落的动态格局。就淡水生态系统而言,流域内总磷的含量与浮游植物群落演替及分布特征关系密切。受 2005 年污染事件及城市工业排污影响,松花江哈尔滨段部分水体磷含量一直处于营养盐相对较高的水平^[37-38]。Reynolds 等^[39]研究指出,蓝藻门和绿藻门的种类通常适应于磷含量较高且水温适中的环境中。本研究 RDA 分析表明,蓝藻门和绿藻门种类分布呈现随着磷含量升高而逐渐升高的趋势,镰形纤维藻、湖泊假鱼腥藻等种类与总磷含量关系密切(图 4)。浮游植物代谢过程中氮、磷摩尔比约为 16:1,通常当水体 N/P 大于 16:1 时,浮游植物群落特征表现为磷限制,而 N/P 小于 16:1 时为氮限制。本次研究期间平均氮、磷比为 23.3,属于磷限制,磷限制浮游植物的初级生产主要与浮游植物对磷的积累和磷的低再生率有关。这与李晓钰等^[40]对松花江哈尔滨段浮游植物研究中的结果一致。

电导率(SpCond.)是反映水体可电离的带电微粒的含量,用作指示环境状况的重要指标,其大小反映了溶解在水体的物质种类、浓度和水环境特征。RDA 排序图显示硅藻门物种季节分布特征与 SpCond.含量变化密切,呈现随着 SpCond.升高丰度上升的趋势。水体电导率含量的变化是驱动硅藻群落演替的重要环境因子,硅藻群落分布的差异性受到以电导率为主的环境因子所影响^[41]。哈尔滨属于温带季风气候,松花江由于夏、秋季雨水的冲刷增加了水体的流动,而春季水体滞留时间较长,促进了可溶性物质(有机物、重金属离子、其他营养物)的富集和积蓄作用^[42]。因此,耐受于低温且喜好较高营养水平的硅藻类群如梅尼小环藻、谷皮菱形藻能够在松花江哈尔滨段春季占据优势。同时,污水的排放导致受人为活动干扰影响区域(S4—S7)可溶物质的增加,使该区域的 SpCond.含量显著高于其他样点($P<0.01$)。此外在松花江哈尔滨段流域内的呼兰河湿地和金河湾湿地内的浮游植物群落结构研究表明,电导率是驱动浮游植物群落演替的主要环境因子^[43-44]。这进一步证明电导率含量常常对流域内浮游植物群落特征的形成产生重要的驱动作用。

浊度的变化是影响浮游植物光合代谢的主要环境因素。天然河道下水动力条件促使水体携沙能力增强,水文径流的作用下增大了泥沙含量,削弱了光在水下的传播,降低真光层的深度。并且由于光抑制作用,浮游植物的初级生产力在水下 0—1.6 m 处最大^[45]。浮游植物可以与相似粒径的泥沙携带发生迁移,其群落格局会随着浊度的变化而发生改变。独立样本 t 检验表明,松花江哈尔滨段不同季节之间浊度变化差异显著($P<0.05$)。RDA 分析表明,浊度与绿藻门和蓝藻门种类(如:小球藻、镰形纤维藻、湖泊假鱼腥藻及微小色球藻等)关系密切,进一步说明浊度变化所导致光照限制是限制浮游植物生产力的重要原因。松花江哈尔滨段河道下堆积着大量的泥沙,大量的建筑用砂来自天然河道的开采。同时夏、秋季的降雨径流所携带的陆源物质发生沉降,同样引起水体浊度升高,透明度降低,促进了耐受高浊度环境的种类在群落中占据优势地位,进而使群落结构发生改变。加之丰水季节径流量增大,对浮游植物群落起到一定的稀释作用,使原本较为集中的优势种分散开来,种类增加^[9]。

城市河段水体缓冲能力、河水径流量以及人为活动干扰排放的无机营养盐的注入都可能使 pH 值的稳定性发生改变。水体 pH 含量与溶解性无机碳的关系密切,当 pH 在适度范围内升高时,会促进浮游植物对溶解性无机碳的吸收。通常直链藻和小环藻属种类对水环境 pH 升高较为敏感^[38]。直链藻通常适宜生长在碱性水体中,当 pH=8.5 时直链藻能够达到最大密度,这与本研究的结果一致^[46]。研究期间,松花江哈尔滨段春

季 pH 为 8.15,与夏季和秋季差异显著($P<0.05$) (表 1),弱碱性水体为优势种群颗粒直链藻、线形双菱藻和梅尼小环藻提供了适宜的栖息地环境,并在春季快速增长,光合作用加强,并随着 pH 升高呈现丰度明显上升的趋势。综合来看,松花江哈尔滨段浮游植物优势种及不同门类浮游植物的时空分布格局受水体电导率、总磷、浊度和 pH 共同影响;松花江哈尔滨段水域环境的时空异质性限制和驱动了浮游植物群落的分布格局。因此加强浮游植物群落对理化环境时空变化的响应机制研究,对松花江哈尔滨段生态修复与控制具有重要的实际意义。

4 结论

(1)本次研究共鉴定浮游植物 136 个分类单位,群落结构以硅藻门和绿藻门占据优势,与过去 10 余年间相比,松花江哈尔滨段浮游植物群落结构较为稳定。

(2)松花江哈尔滨段浮游植物群落结构呈现一定时空特征,受人为活动干扰明显的区域浮游植物种群分布与其他区域存在一定差异。

(3)浮游植物群落结构对松花江哈尔滨段生境的时空异质性响应明显,SpCond、TP、pH 和 Tur.是驱动浮游植物群落结构时空分布的主要环境因子。

参考文献 (References):

- [1] Herrera-Silveira J A, Morales-Ojeda S M. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(1/3): 72-86.
- [2] Reynolds C S. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [3] Ha K, Kim H W, Joo G J. The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea. *Hydrobiologia*, 1998, 369-370: 217-227.
- [4] Hagan S M, Able K W. Seasonal changes of the pelagic fish assemblage in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(1): 15-29.
- [5] 傅明珠,孙萍,孙霞,韦钦胜,张学雷,王宗灵. 锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应. *生态学报*, 2014, 34(13): 3650-3660.
- [6] 王浩,王琳. 我国江河源头区水生态保护战略. *中国水利*, 2017, (17): 15-18.
- [7] 林兰钰,史宇,罗海江,张殷俊,于洋,陈远航. 2001—2015 年松花江流域水污染变化特征研究. *中国环境监测*, 2016, 32(6): 58-62.
- [8] 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,邹伟,胡林娜,笪文怡,季鹏飞. 江苏水源地区型水库异味物质发生风险及影响因素. *环境科学*, 2019, 40(09): 4000-4008.
- [9] 王超,李新辉,赖子尼,曾艳艺,高原,刘乾甫,杨婉玲. 珠三角河网浮游植物生物量的时空特征. *生态学报*, 2013, 33(18): 5835-5847.
- [10] Sommer U, Adrian R, De Senerpont Domis L, Elser J J, Gaedke U, Ibelings B, Jeppesen E, Lüring M, Molinero J C, Mooij W M, Van Donk E, Winder M. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43(1): 429-448.
- [11] Deiningner A, Faithfull C L, Bergström A K. Phytoplankton response to whole lake inorganic N fertilization along a gradient in dissolved organic carbon. *Ecology*, 2017, 98(4): 982-994.
- [12] 樊庆铨,杨先兴,邱微. 松花江哈尔滨段城市水环境质量评价. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2292-2298.
- [13] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法*(第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 胡鸿钧,李尧英,魏印心. *中国淡水藻类*. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [15] 胡鸿钧,魏印心. *中国淡水藻类——系统、分类及生态*. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 何青,孙军. 长江口及其邻近水域网采浮游植物群落. *生态学报*, 2009, 29(7): 3928-3938.
- [17] Reynolds C S, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: a synthesis. *Hydrobiologia*, 1993, 249(1/3): 183-188.
- [18] Boix D, García-Berthou E, Gascón S, Benejam L, Tornés E, Sala J, Benito J, Munné A, Solà C, Sabater S. Response of community structure to sustained drought in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 2010, 383(1/2): 135-146.
- [19] Bussi G, Whitehead P G, Bowes M J, Read D S, Prudhomme C, Dadson S J. Impacts of climate change, land-use change and phosphorus reduction on phytoplankton in the River Thames (UK). *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 1507-1519.

- [20] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W I, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1986, 106(4): 433-471.
- [21] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, Sedell J R, Cushing C E. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.
- [22] 刘东晓. 城镇化对溪流水质和底栖动物群落结构的影响——以钱塘江中游为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [23] 焦龙, 祁佩时, 宫凯悦, 刘云芝. 松花江底泥沉积物中重金属释放影响因素的研究. *环境保护科学*, 2016, 42(2): 85-89, 102-102.
- [24] 李芳芳, 董芳, 段梦, 王珂, 朱琳. 大辽河水系夏季浮游植物群落结构特征及水质评价. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2489-2496.
- [25] 庞科, 姚锦仙, 王昊, 刘松涛, 李翀, 吕植. 额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征. *生态学报*, 2011, 31(12): 3391-3398.
- [26] 韩林林. 两种常见水华藻类代谢有机物组成及对 N、P 浓度的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [27] 王英英. 不同氮磷质量浓度对太浦河四种优势藻类生长影响的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [28] 任辉, 田恬, 杨宇峰, 王庆. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(22): 7729-7740.
- [29] 阎齐. 松花江哈尔滨段浮游植物群落结构与环境影响评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [30] 陈威, 魏南, 金小伟, 孟庆庆, 于宗灵, 赵然. 松花江哈尔滨段藻类植物分布及其与环境因子的关系. *中国环境监测*, 2018, 34(4): 102-110.
- [31] 栾卓, 范亚文, 马跃. 松花江哈尔滨段水域硅藻植物与相关环境因子的回归分析及初步预测. *植物研究*, 2010, 30(3): 349-354.
- [32] 魏南. 松花江哈尔滨段藻类植物群落结构的初步研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015.
- [33] Xi N X, Carrère P, Bloor J M G. Plant community responses to precipitation and spatial pattern of nitrogen supply in an experimental grassland ecosystem. *Oecologia*, 2015, 178(2): 329-338.
- [34] Edwards K F, Litchman E, Klausmeier C A. Functional traits explain phytoplankton community structure and seasonal dynamics in a marine ecosystem. *Ecology Letters*, 2013, 16(1): 56-63.
- [35] Ko C Y, Lai C C, Hsu H H, Shiah F K. Decadal phytoplankton dynamics in response to episodic climatic disturbances in a subtropical deep freshwater ecosystem. *Water Research*, 2017, 109: 102-113.
- [36] 郑倩玉, 刘硕, 万鲁河, 李潇屹, 齐少群. 松花江哈尔滨段水环境质量评价及污染源解析. *环境科学研究*, 2018, 31(3): 507-513.
- [37] 李静文. 松花江哈尔滨段底泥中营养盐释放规律与数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [38] 马广文, 王业耀, 香宝, 王金生, 汪大明, 胡钰. 松花江流域非点源氮磷负荷及其差异特征. *农业工程学报*, 2011, 27(14): 163-169.
- [39] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [40] 李晓钰. 松花江哈尔滨段浮游生物群落动态变化特征研究及水质评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [41] Stenger-Kovács C, Körmendi K, Lengyel E, Abonyi A, Hajnal É, Szabó B, Buczkó K, Padisák J. Expanding the trait-based concept of benthic diatoms: development of trait- and species-based indices for conductivity as the master variable of ecological status in continental saline lakes. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 63-74.
- [42] 邓培雁, 张婉, 王旭涛, 曾宝强, 刘翔, 刘威. 水质对东江流域附生硅藻群落的影响. *生态学报*, 2015, 35(6): 1852-1861.
- [43] 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. *生态学报*, 2014, 34(5): 1264-1273.
- [44] 范小晨, 代存芳, 陆欣鑫, 范亚文. 金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(16): 5726-5738.
- [45] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 李林, 宋立荣, 吴月. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 853-860.
- [46] 王珺, 邢诒炫, 陈国华, 刘志媛, 李洪武, 王爱雯. 不同生态因子对直链藻生长的影响. *热带生物学报*, 2010, 1(3): 220-223, 227-227.