

DOI: 10.5846/stxb201911152444

贾鹏, 范亚文, 陆欣鑫. 基于功能类群分析呼兰河口湿地浮游植物群落结构特征. 生态学报, 2021, 41(3): 1042-1054.

Jia P, Fan Y W, Lu X X. Analysis of phytoplankton structure based on different functional groups in Hulanhe Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1042-1054.

基于功能类群分析呼兰河口湿地浮游植物群落结构特征

贾 鹏¹, 范亚文^{1,2}, 陆欣鑫^{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:浮游植物对水环境条件变化敏感,其群落演替特征被广泛应用于指示水环境变化。基于 3 种浮游植物功能类群方法,对呼兰河口湿地浮游植物群落结构进行研究。于 2018 年春季(4、5 月)、夏季(6、7、8 月)和秋季(9、10 月)三季,在呼兰河口湿地共设置 11 个采样点,通过 ASINOSIM 和 SIMPER 分析探索 FG、MFG 和 MBFG 功能类群的演替特征,基于 RDA 分析阐述功能类群对环境因子的响应模式。研究期间共鉴定浮游植物 243 个分类单位,隶属于 7 门 9 纲 18 目 32 科 75 属;其种类组成主要以绿藻门(46.09%)、裸藻门(19.34%)和硅藻门(18.52%)为主。共划分 FG 功能类群 25 个, MFG 功能类群 20 个, MBFG 功能类群 6 个; ANOSIM 分析表明不同季节之间 FG 和 MFG 功能类群结构差异显著; SIMPER 分析表明 S1/L0/W1/P/J/Y、9b/5a/11b/6a/2c/2d/1c 和 III/I 类群是影响不同季节之间功能类群变化的主要类群; RDA 分析表明, FG、MFG 和 MBFG 功能类群的演替受多种环境因素共同影响,其中 pH、BOD₅、Tur 和 COD_{Mn} 与功能类群演替关系密切。相较于 MBFG 功能类群, FG 和 MFG 功能类群能更好的响应呼兰河口湿地水环境的空间异质性。

关键词:呼兰河口湿地; 功能类群; 浮游植物; 演替; RDA

Analysis of phytoplankton structure based on different functional groups in Hulanhe Wetland

JIA Peng¹, FAN Yawen^{1,2}, LU Xinxin^{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 Hulanhe Wetland is located in northeastern of China, and plays an important role in maintaining the biodiversity and regulating the microclimate in Harbin city. Although phytoplankton functional group studies on wetlands in northern China have increased recently, studies of the phytoplankton functional group in the Hulanhe Wetland are limited. To better understand processes of phytoplankton community succession in relation to environmental parameters, the functional mechanisms of biological communities may be better understood if species are pooled into groups with similar characteristics. Therefore, a detailed survey of three phytoplankton functional groups in spring, summer, and autumn are necessary. In this study, three different phytoplankton functional group methods were used to study phytoplankton community structure. Phytoplankton was qualitatively and quantitatively collected from 11 sampling sites in four typical habitats. The samples were collected in spring (April, May), summer (June, July, August), and autumn (September,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31870187); 哈尔滨师范大学科研启动金项目(XKB201912); 哈尔滨师范大学高等教育教学改革研究项目, 哈尔滨师范大学研究生教育教学改革项目

收稿日期:2019-11-15; **网络出版日期:**2020-12-14

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

October). A total of eleven sample sites were selected. We explored the succession characteristics of FG (Functional Group), MFG (Morpho—Functional Group) and MBFG (Morphology—Based Functional Group) functional groups by applying ASNOSIM and SIMPER analysis. A total of 243 phytoplankton species were identified, belonging to 7 phyla, 9 classes, 18 orders, 32 families and 75 genera. The phytoplankton species composition was dominated by Chlorophyta (46.09%), followed by Euglenophyta (19.34%), Bacillariophyta (18.52%) and Cyanophyta (11.11%). During the study, the results showed that the average abundance of phytoplankton in the Hulanhe Wetland was significantly different ($P < 0.05$). According to the abundance of phytoplankton, B (*Cyclotella* Kützing), J (*Scenedesmus* Meyen, *Tetrastrum* Chodat), D (*Nitzschia* Hassall), S1 (*Pseudanabaena* *limnetica* (Lemmermann) Komárek), Y (*Cryptomonas* *erosa* Hering, *Cryptomonas* *ovata* Hering) and W1 (*Euglena* Ehrenberg, *Phacus* Dujardin) were dominant in the functional groups. 25 functional groups, 20 Morpho-Functional Groups and 6 Morphology-based Functional Groups were identified during the study. The ANOSIM analysis showed significant differences in FG and MFG functional group structures between seasons. The SIMPER analysis indicated that the primary contributing phytoplankton functional groups were S1/Lo (*Merismopedia* Meyen)/W1/P (*Melosira* *granulata* (Ehrenberg) Ralfs)/J/Y, 9b (small unicells-Chlorococcales)/5a (thin filaments Oscillatoriales)/11b (Chlorococcales-Gelatinous colonies)/6a (large Centrics)/2c (small Euglenophytes)/2d (Cryptophytes)/1c (large Euglenophytes) and III (large filaments)/I (small organisms with high S/V). Redundancy Analysis (RDA) based on FG, MFG and MBFG and eleven environmental variables revealed that COD_{Mn} was the key factor driving the phytoplankton functional group succession, and Turbidity (Tur.), BOD_5 and pH were closely related to phytoplankton functional group patterns. We found that MBFG approach was not as sensitive as FG and MFG approach in describing the variability of phytoplankton groups in the environment. We suggested that MBFG approach was not suitable for indicating the temperate wetland water environment condition.

Key Words: Hulanhe Wetland; functional groups; phytoplankton; succession; RDA

浮游植物是湿地生态系统中的重要初级生产者,也是水生生物食物链中能量流动、物质循环的基础环节^[1-2],其群落结构、物种组成的变化是反映水环境状况的重要指标^[3-4]。浮游植物的时空分布格局不仅可以影响湿地的生态功能和稳定性,而且可以反映湿地生态环境的变化,也是探索湿地生态系统功能的重要手段之一^[5-6]。目前,在湿地生态系统中有关浮游植物的生态研究,主要集中在不同环境梯度和不同生活类型下浮游植物群落结构的差异性分析^[7-9]。这类研究多使用传统的浮游植物集群方法,不能有效地反映浮游植物在湿地生态系统中的功能。Reynolds^[10]从个体环境适应性、生态位竞争机制角度出发,将具有相同环境适应策略的浮游植物种类划分为同一个类群,形成了具有相同生态适应特征的分组,即“功能类群”。随着功能类群研究的不断深入,Salmaso^[11]等通过植物功能型和FG功能类群的优点提出了MFG划分法;Kruk^[12]等根据浮游植物的形态特征,提出了MBFG划分法,这种划分方法大大简化了功能类群的应用。目前,浮游植物功能类群方法已广泛应用在湖泊^[13]、河流^[14]、水库^[15]及湿地^[16]等水域生态系统中。

湿地生态系统是水陆两种生态系统的过渡区域,与湖泊、河流等水体相比,水体流动性和营养物质更稳定,具有防控洪水、调节径流等功能^[17]。近年来,由于人为活动干扰,导致湿地生态环境不断恶化、生物多样性降低和生态功能退化^[18]。呼兰河口湿地保护区位于哈尔滨市呼兰区南部,松花江北岸,呼兰河河口,东西长63.5km,南北宽21.3km,总面积为192.6 km²^[19]。该湿地具有调节周边小气候、蓄洪调水和保护物种多样性等生态功能^[20]。随着对湿地生态系统保护研究的不断深入,目前已对呼兰河口湿地高等动物^[19]、高等植物^[20]、水生生物^[16]和浮游植物群落结构^[21-22]开展了相关生态研究,以往的研究结果表明该湿地的浮游植物群落结构表现出明显的空间差异,FG功能类群分布特征对该湿地水环境空间异质性响应明显^[22]。

以呼兰河口湿地保护区水域为主体,通过FG、MFG和MBFG三种功能类群对呼兰河口湿地浮游植物群落进行研究。定性、定量的评估浮游植物功能类群的演替模式;基于多元统计分析对驱动不同功能类群演替

的环境因子进行筛选与识别;初步分析不同功能类群对于呼兰河口湿地水环境变化的响应效果。为温带湿地生态特征研究提供新的分析手段,为我国温带河口湿地水生生物多样性保护与受损湿地恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

呼兰河口湿地自然保护区位于黑龙江省哈尔滨市,北部与双井镇、方台镇相连,南与黄土山乡、巨源镇隔江相望。属于北温带大陆性气候,封冻期较长,气温较低,冬天漫长而寒冷;夏天暑期短,炎热、多雨,年平均温度 3.6°C [21]。呼兰河口湿地自然保护区内水源地主要为两处:一是呼兰河,发源于小兴安岭西侧、自东向西流动的中型河流;二是松花江,湿地核心区域则是由呼兰河进入松花江后形成 [23]。

本研究于 2018 年春季(4、5 月)、夏季(6、7、8 月)和秋季(9、10 月)三个季节对呼兰河口湿地进行样品的采集,根据呼兰河口湿地的生境特点共设置 11 个采样点(图 1),各采样点的海拔在 110—130m 之间。根据其生态特征,将 11 个采样点划分为四个生态功能区域,其中 S1、S3、S11 为入水口区域,受人为活动影响较大;S5、S7、S10 为出水口区域,属于松花江流域;S4、S6、S8、S9 为湿地保护区域,保护区正在治理与恢复;S2 为农田区域,受农田耕种影响较大。利用 GPS 全球卫星定位系统收集采样点经纬度信息,采样点地图的绘制通过 ArcMap 10.2 完成。

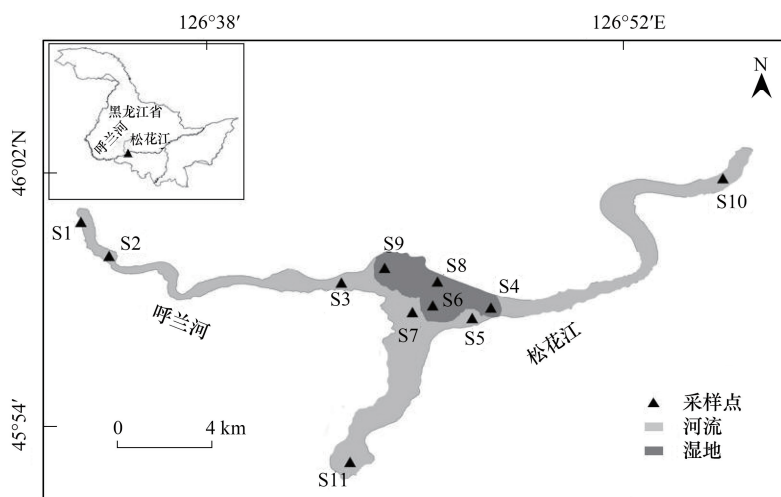


图 1 呼兰河口湿地采样点布设示意图

Fig.1 Map and sampling sites in Hulanhe Wetland

样点 S1、S3、S11 为入水口区域;样点 S2 为农田区域;样点 S5、S7、S10 为出水口区域;S4、S6、S8、S9 为湿地保护区域

1.2 样品采集、处理及鉴定

分别于 2018 年 4—10 月末的上午对 11 个采样点进行定量样品与定性样品的采集。定性样品采用 25 号浮游生物网在水面表层下 0.5m 处作“∞”字形缓慢捞取;定量样品用 1L 的采水器在水表层以下 0.5m 处进行水样的采集,现场加入 1.5% 的鲁格氏固定液 15mL 进行固定,带回实验室沉淀 24h 后,浓缩至 50mL,用光学显微镜进行镜检计数 [24]。浮游植物的鉴定、功能类群的划分、生态分布信息主要参考胡鸿钧、魏印心、胡韧等文献 [25-28]。将至少在一个采样点相对丰度超过 15% 的功能类群定义为代表性功能类群。

1.3 理化指标的测定

采集水质样品与采集浮游植物样品同步进行,采用 Hydrolab 多参数水质分析仪现场测定水温 (WT)、pH、电导率 (SpCond.)、溶解氧 (DO)、氧化还原电位 (ORP)、浊度 (Tur.) 以及叶绿素 a (Chl-a)。现场采集的水样用棕色玻璃瓶避光保存,带回实验室 24h 内依据《水和废水监测方法》(国家环境保护总局,2002) 进行总氮

(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)^[29]的测量。

1.4 数据分析

使用 PRIMER 5.0 软件进行 ANOSIM 和 SIMPER 分析。独立样本 T 检验通过 SPSS 20.0 软件完成。去趋势分析(DCA)和冗余分析(RDA)采用软件 CANOCO 4.5 进行,在进行排序分析前,对解释变量和响应变量数据进行 $\log(x+1)$ 转换,使样本总体趋于正态分布。通过蒙特卡洛置换检验,判断解释变量对响应变量生态分布影响的显著性,建立二维排序图。使用 Origin 2018 与 Excel 2018 软件对图表进行绘制。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子变化

独立样本 t 检验表明在不同季节之间水体理化因子变化明显,除 TP 和 SpCond.外其他理化指标在季节之间均存在一定的变化规律($P<0.05$) (表 1)。DO、pH 和 Tur.都呈现随春、夏、秋季节变化逐渐升高的规律($P<0.05$),三季平均值分别为 2.66、8.73、41.48mg/L,变化范围分别在 0.83—5.34mg/L、7.28—10.04 和 21.93—97.60mg/L 之间;夏季的 WT 高于春、秋两季($P<0.05$),三季平均值为 19.45℃,变化范围在 9.89—31.23℃ 之间; COD_{Mn} 呈现出随着春、夏、秋季节变化逐渐降低的规律($P<0.01$),三季平均值为 5.49mg/L,变化范围在 0.82—10.50mg/L 之间;SpCond.和 ORP 呈现出春季最高,夏季最低的规律,三季平均值分别为 402.57mS/cm 和 414.91mV,变化范围在 161.13—1180.00mS/cm 和 340.00—511.00mV 之间。

表 1 呼兰河口湿地水体理化因子季节变化

Table 1 Seasonal variation of physical and chemical factors in Hulanhe Wetland

理化指标 Environmental factors	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		独立样本 T 检验 Independent-samples T test		
	平均值 Average	标准偏差 SD	平均值 Average	标准偏差 SD	平均值 Average	标准偏差 SD	春季×夏季 Spring×Summer	春季×秋季 Spring×Autumn	夏季×秋季 Summer×Autumn
水温 WT/℃	16.89	5.77	24.69	2.35	14.16	2.65	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
pH	8.10	0.50	8.76	0.70	9.31	0.55	$P>0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
溶解氧 DO/(mg/L)	2.03	0.73	2.51	1.08	3.59	1.01	$P<0.05$	$P<0.05$	$P>0.05$
高锰酸盐指数 COD_{Mn} /(mg/L)	7.33	1.56	5.73	2.73	3.28	1.10	$P>0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
五日生化需氧量 BOD_5 /(mg/L)	0.75	0.42	1.58	0.42	1.21	0.55	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
总氮 TN/(mg/L)	1.52	0.16	0.89	0.47	1.77	0.95	$P>0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
总磷 TP/(mg/L)	0.32	0.29	0.36	0.21	0.20	0.12	$P>0.05$	$P>0.05$	$P>0.05$
浊度 Tur./(mg/L)	28.40	1.76	41.59	14.64	54.39	21.31	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
叶绿素 a Chl-a/(μg/L)	17.42	12.68	10.88	5.25	24.58	19.96	$P>0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$
氧化还原单位 ORP/(U/mV)	436.72	20.92	390.75	31.25	429.33	42.23	$P<0.05$	$P>0.05$	$P<0.05$
电导率 SpCond./(μS/cm)	607.11	245.50	317.50	97.81	325.63	92.80	$P>0.05$	$P>0.05$	$P>0.05$

$P<0.05$,表示显著相关

2.2 呼兰河口湿地浮游植物种类组成

在研究期间共鉴定浮游植物 243 个分类单位,包括 10 变种,隶属于 7 门 9 纲 18 目 32 科 75 属。绿藻门(Chlorophyta)种类最多,为 104 种及 8 变种,占浮游植物种类总数的 46.09%;裸藻门(Euglenophyta)种类 46 种及 1 变种,占 19.34%;硅藻门(Bacillariophyta)种类 44 种及 1 变种,占 18.52%;蓝藻门(Cyanophyta)种类 27 种,占 11.11%;甲藻门(Dinophyta)种类 7 种,占 2.88%;隐藻门(Cryptophyta)种类 3 种,占 1.23%;金藻门(Chrysophyta)种类仅 2 种,占 0.82%。在空间尺度上,呈现湿地保护区域(188 种)>入水口区域(183 种)>出

水口区域(172种)>农田区域(135种)的规律;在时间尺度上,呈现夏季(198种)>秋季(152种)>春季(143种)的规律。

2.3 呼兰河口湿地浮游植物丰度的时空变化

浮游植物丰度在时间尺度上表现为夏季平均值最高,变化范围在 $(0.67-26.26) \times 10^6$ 个/L之间;其次为秋季,变化范围在 $(0.39-20.15) \times 10^6$ 个/L之间;春季最低,变化范围在 $(0.50-27.78) \times 10^6$ 个/L之间。

浮游植物平均丰度呈现出湿地保护区域>入水口区域>农田区域>出水口区域的规律。湿地保护区域内的浮游植物平均丰度最高,变化范围在 $(15.92-95.44) \times 10^6$ 个/L之间;入水口区域浮游植物丰度次之,变化范围在 $(4.47-25.40) \times 10^6$ 个/L之间;农田区域浮游植物丰度变化范围在 $(1.28-27.78) \times 10^6$ 个/L之间;出水口区域浮游植物丰度最低,变化范围在 $(2.44-11.33) \times 10^6$ 个/L之间(图2)。

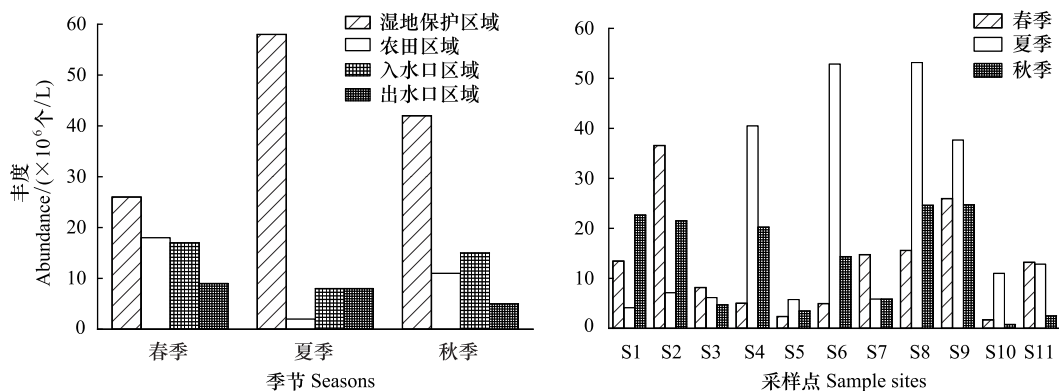


图2 呼兰河口湿地浮游植物丰度分布特征

Fig.2 Phytoplankton abundance spatial and temporal distribution of Hulanhe Wetland

2.3 FG、MFG 和 MBFG 功能类群演替

根据 Reynold 和 Padisák 等提出的 FG 功能类群划分方法,共划分 FG 功能类群 25 个,分别为 B/C/D/E/F/G/H1/J/LM/Lo/M/MP/N/P/S1/S2/SN/T/TB/W1/W2/X1/X2/X3/Y。其中代表性功能类群为 B/D/F/J/Lo/MP/P/S1/W1/W2/X1/Y(表2,表3)。出现频率超过 50% 的功能类群为 B/D/F/H1/J/Lo/MP/P/S1/W1/W2/X1/X3/Y,出现频率在 30%—50% 的功能类群为 E/G/LM/X2,出现频率小于 30% 的功能类群为 C/M/N/T/TB/S2/SN(图3)。FG 功能类群季节演替特征为春季 B(梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana* Kützing)/D(谷皮菱形藻 *Nitzschia palea* (Kützing) W.Smith)/Y(嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa* Hering)→夏季 B/D/S1(湖泊假鱼腥藻 *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek)→秋季 B/X1(狭形纤维藻 *Ankistrodesmus angustus* Bernard)(图4)。

根据 Salmaso 等对功能类群的划分^[11],本次研究中呼兰河口湿地共划分 MFG 功能类群 20 个,分别为 1b/1c/2c/2d/3a/3b/5a/5d/5e/6a/6b/6c/7a/8a/9a/9b/10a/11a/11b/11c。代表性功能类群为 1c/2c/2d/5a/6a/6b/7a/9b/10a/11a/11b(表3)。出现频率大于 50% 的功能类群为 1b/1c/2c/2d/5a/5d/5e/6a/6b/7a/8a/9b/10a/11a/11b,出现频率大于 30% 且小于 50% 的功能类群为 11c/3b/6c/9a,功能类群 3a 出现频率小于 30%(图3)。MFG 功能类群季节演替特征为春季 2d(隐藻门小个体)/7a(中心纲小个体)/6b(羽纹纲大个体)→夏季 5a(颤藻目丝状体)/6b/7a/→秋季 7a/10a(绿藻纲丝状体)(图4)。

基于 Kruk 等研究结果^[12],在呼兰河口湿地共划分 MBFG 功能类群 6 个,分别为 I/Ⅲ/Ⅳ/V/Ⅵ/Ⅶ(表2,表3)。研究期间 6 种功能类群均出现,其中 V 类群在三个季节中都占据主要地位,出现频率 100%,Ⅳ和Ⅵ出现频率超过 98%,Ⅲ功能类群出现频率最低但也超过了 50% 以上(图3)。MBFG 功能类群季节演替特征为春季Ⅵ(具有硅质外壁且无鞭毛的种类)/V(具鞭毛中到大型的单细胞种类)→Ⅵ/Ⅳ(不具有明显特征的中等大小种类)→Ⅵ/Ⅳ(图4)。

表 2 呼兰河湿地浮游植物功能群 ANOSIM 分析及 SIMPER 分析

Table 2 One-way crossed ANOSIM and SIMPER for testing the season on different functional groups in Hulanhe wetland

功能类群 Functional Group	季节 Seasons	组间差异 Pairwise test <i>R</i>	显著水平 <i>P</i> value	主要贡献物种 (累计贡献率超过 50%) Main contribute species
FG	春季×夏季	0.378	$P<0.05$	S1/Lo/W1/P/J
	春季×秋季	0.178	$P<0.05$	Y/S1/Lo/W1/P
	夏季×秋季	0.400	$P<0.05$	Y/Lo/S1/W1
MFG	春季×夏季	0.289	$P<0.05$	9b/5a/11b/6a/2c
	春季×秋季	0.191	$P<0.05$	2d/9b/1c/11b/2c
	夏季×秋季	0.283	$P<0.05$	2d/1c/5a/9b
MBFG	春季×夏季	0.378	$P<0.05$	Ⅲ/Ⅰ
	春季×秋季	0.105	$P>0.05$	Ⅲ/Ⅰ
	夏季×秋季	0.174	$P>0.05$	Ⅲ/Ⅰ

$P<0.05$, 表示差异显著; FG: FG 功能类群 Functional group; MFG: MFG 功能类群 Morpho—Functional group; MBFG: MBFG 功能类群 Morphology—Based functional group

表 3 呼兰河口湿地三种浮游植物功能类群的代表性属种

Table 3 Representative species (genera) of three phytoplankton functional groups in Hulanhe Wetland

FG	MFG	MBFG	代表种/属 Genus/Species Represent in the groups	生境 Habitats
B	6a/7a/1b/2d/6c	V/VI	小环藻属 <i>Cyclotella</i> Kützing	中营养水平的中小型浅水湖泊, 硅藻、隐藻和甲藻
C	6a/7a/6c	VI	华丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i> Hassall 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	富营养的中小型湖泊, 硅藻, 无分层现象
D	6a/6c/7a/7b	VI	菱形藻属 <i>Nitzschia</i> Hassall	含有营养盐的浑浊型浅水河流, 耐受冲刷, 硅藻
F	8a/9a/9b/11a/11b	I/IV/VII	<i>Kirchneriella obesa</i> (West) Schmidl 湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i> Chodat	中营养或富营养清澈的、充分混合的深水湖泊, 无鞭毛的绿藻群体
J	9b/11a/11b	I/IV/VII	栅藻属 <i>Scenedesmus</i> Meyen 四星藻属 <i>Tetrastrum</i> Chodat	混合型高富营养的浅水水体, 或高低差较小的河流, 无鞭毛的绿藻群体
Lo	1b/2c/5d	I/V/VII	平裂藻属 <i>Merismopedia</i> Meyen	中型到大型、贫营养到富营养、深水或浅水湖泊, 具有广适性
MP	5a/5c/6b/8a/9b/10a	Ⅲ/IV/VI	桥弯藻属 <i>Cymbella</i> Agardh 舟形藻属 <i>Navicula</i> Bory	经常性搅动、易浑浊的、无机的浅水湖泊, 多为硅藻、绿藻和蓝藻
P	6a/6c/8a	IV/VI	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> (Ehrenberg) Ralfs	湖泊中 2—3m 连续或半连续混合水层, 高营养指数, 以绿藻和硅藻为主
S1	5a	Ⅲ/IV	湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i> (Lemmermann) Komárek	透明度低、混合型水体, 以丝状蓝藻为主, 适应暗环境, 对冲刷敏感
W1	1b/1c/2c/3b	I/V/VII	裸藻属 <i>Euglena</i> Ehrenberg 扁裸藻属 <i>Phacus</i> Dujardin	富集有机污染的小池塘或暂时性小水体
W2	2c	V	囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i> Ehrenberg	中或富营养的浅水湖或暂时性池塘, 底栖裸藻或囊裸藻
X1	2a/8a/9a/11a	IV	纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> Corda	富营养或超富营养的浅水水体
Y	1b/2d	V	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Hering 卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Hering	静水环境, 耐受低光照环境

基于 FG、MFG 和 MBFG 功能类群群落相似性分析 (ANOSIM), 表明季节变化对浮游植物群落演替驱动作用明显 ($P<0.05$)。SIMPER 分析表明, B/S1/Y/W2/X1/D/Lo、7a/5a/10a/2d/6b/2c/11a 和 VI/IV 类群, 分别为不同季节之间 FG、MFG 和 MBFG 类群演替的主要贡献者。

2.4 多元统计分析

对呼兰河口湿地的 11 种环境变量 (WT、pH、SpCond、DO、ORP、Tur、Chl-a、TP、TN、COD_{Mn} 与 BOD₅) 与 FG、MFG 和 MBFG 功能类群进行排序分析, 不同功能类群对环境变化的响应模式进行识别。三种功能类群

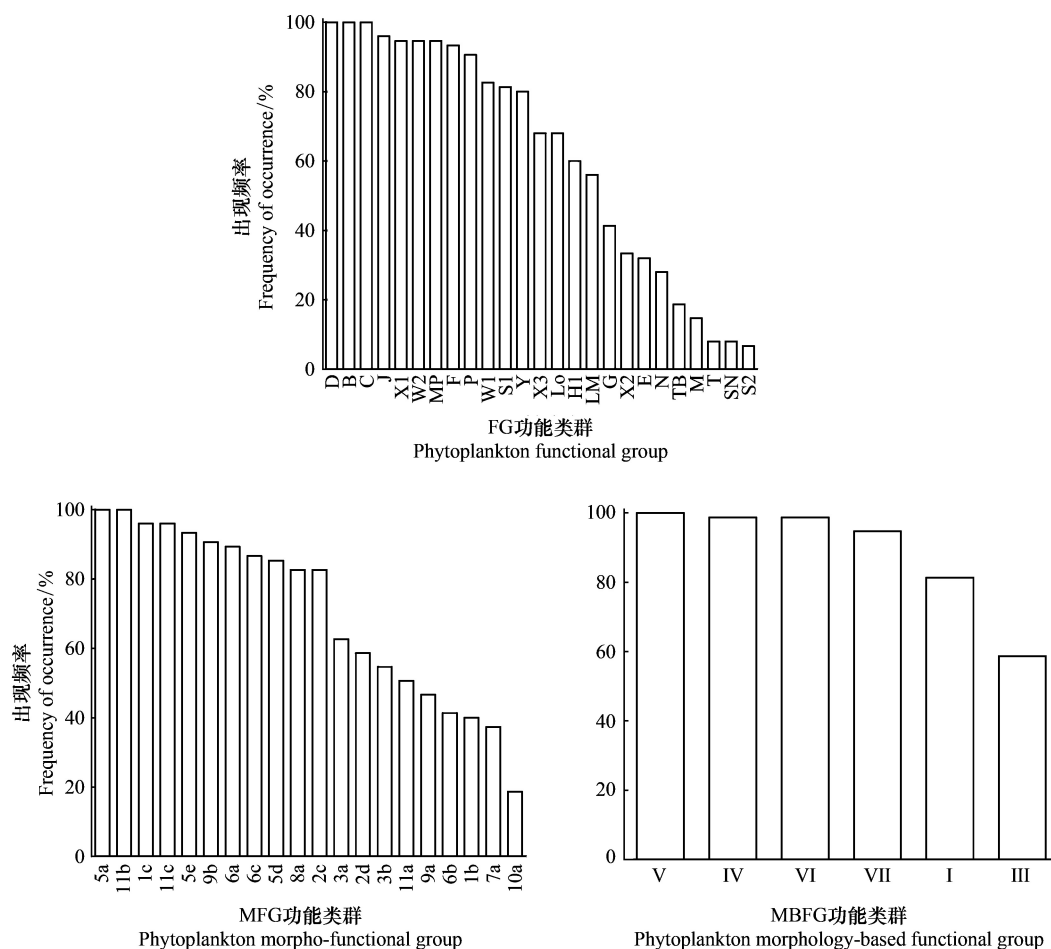


图3 呼兰河口湿地浮游植物功能类群出现频率

Fig.3 Frequency distribution of functional groups in Hulanhe Wetland

DCA 分析显示最长长度梯度分别为 3.003 和 0.920 和 1.222, 因此选择线性模型 RDA 对优势功能类群与环境变量进行排序分析。经蒙特卡洛置换检验表明, 呼兰河口湿地三种功能类群的生态分布受多种环境因子共同作用影响, 驱动功能类群生态分布的环境因子为: COD_{Mn} 、WT、TP、SpCond.、pH、 BOD_5 、Tur.、ORP 和 DO。

3 讨论

3.1 呼兰河口湿地浮游植物功能类群演替特征

浮游植物功能类群方法从个体生态学角度出发, 基于物种生态适应性角度分析种群的生态选择机制^[30]。不同功能类群内的浮游植物种类具有其自身独特的生态特征, 其演替通常与水体营养状态、光照及水温密切相关^[31], 在“上行效应”和“下行效应”两种机制调控下, 当栖息地水环境发生变化时, 浮游植物自身的形态、生理适应特征会主动或被动的适应环境特征的改变, 以演替的形式来维持湿地的生态平衡^[32]。

呼兰河口湿地受温带季风气候影响, 季节之间水体理化环境特征变化明显^[14]。FG 功能类群将物种的生态属性划分到功能类群当中, 其演替模式被认为是响应水环境变化的有效指标^[18]。在本研究中 FG 功能类群季节演替特征为, 春季 B/D/Y 类群演替为夏季 B/D/S1 类群, 最后被秋季的 B/X1 类群所取代。B 类群是硅藻门中的小环藻属, 为 α -ms(中营养)指示种, 其生活环境适宜在温度 20℃ 左右^[33-34]、高营养盐的中小型较浅的水体中。水体中营养盐含量的升高是导致富营养化的根本原因, 其变化会直接影响浮游植物的丰度。在高营养盐的水体中, 浮游植物的丰度通常会受光照的限制, 光的可利用性也会影响浮游植物的竞争和群落多样

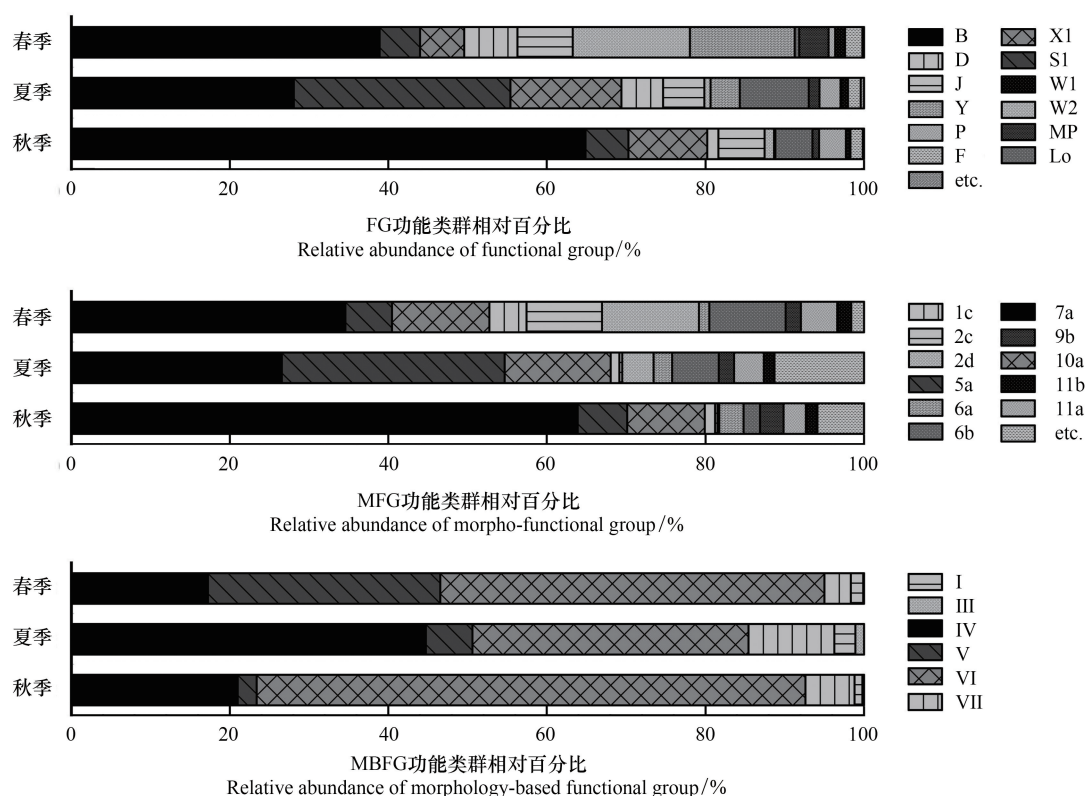


图4 呼兰河口湿地三种功能类群丰度相对百分比

Fig.4 Relative percentage of abundance of three functional groups in Hulanhé Wetland

性^[35],因此耐受低光环境的类群通常会占据优势地位。呼兰河口湿地在春季期间,水温较低,日照时间相对较少,处于营养盐积累阶段,低水温的条件会限制大部分浮游植物的生长,与此同时 B 类群具有高捕光效率和高相对表面积比的特点,因此在栖息地的适宜性及较低光照的基础上,B 类群在群落中占据优势地位^[36]。Y 类群的代表性物种为卵形隐藻和嗜蚀隐藻,适宜生活在磷浓度较高的水体中,对低光耐受,为广适应性种类^[32]。由于春季湿地保护区域人为干扰较少,水体流动性差,磷浓度较高,同时 Y 类群物种具有鞭毛,有较强的运动性,使其能在水体中垂直运动,可以更好地躲避捕食者,进而在资源竞争中占据有利地位^[35]。因此,B 和 Y 类群能在春季占据优势。D 类群适应于营养盐含量较高的浅水水体、耐受于低光条件。呼兰河口湿地夏季水体温度升高,溶解氧含量和 pH(平均值 pH=8.76)增加,水体呈碱性。在一定范围内,温度和溶解氧的升高会促进 B/D 类群的生长^[37]。同时,水体的弱碱性为 D 类群提供了良好的生活条件,因此 D 类群能在夏季占据优势地位^[38]。呼兰河口湿地夏季降雨充沛,周边土地中的营养物质通过淋溶作用进入水体,入水口区域、农田区域和湿地保护区域具有较多的人为活动干扰,因此导致水体变浑浊(浊度平均值为 41.59 mg/L),限制光照摄入,进而影响耐受低光环境的 B/D 类群生长。营养盐是水体中重要的生源要素,由于呼兰河口湿地水体氮磷比小于 16:1,水体受氮限制明显。低氮的水体限制了大部分浮游植物的生长,而蓝藻的生长与水体的氮磷比密切相关^[39],S1 类群中的丝状蓝藻具有固氮能力,因此营养盐水平降低可能是 S1 类群中的丝状蓝藻(中富营养)占据优势的重要原因。本文 SIMPER 分析也证明 S1 类群的变化是影响不同季节之间 FG 功能类群差异的主要功能类群之一。从生物因素的角度看,“上行效应”和“下行效应”对不同营养类型的水体作用是不一样的,这是由浮游植物的粒径大小导致的^[40]。S1 类群中的丝状蓝藻可抵御浮游动物的捕食,在低牧食压力的情况下容易占据优势,因此 S1 类群代替了春季广适应性的 Y 类群,在夏季浑浊且温暖的水体中与 B/D 类群共同占据主要优势地位。呼兰河口湿地夏、秋两季之间存在总氮含量明显升高的过程

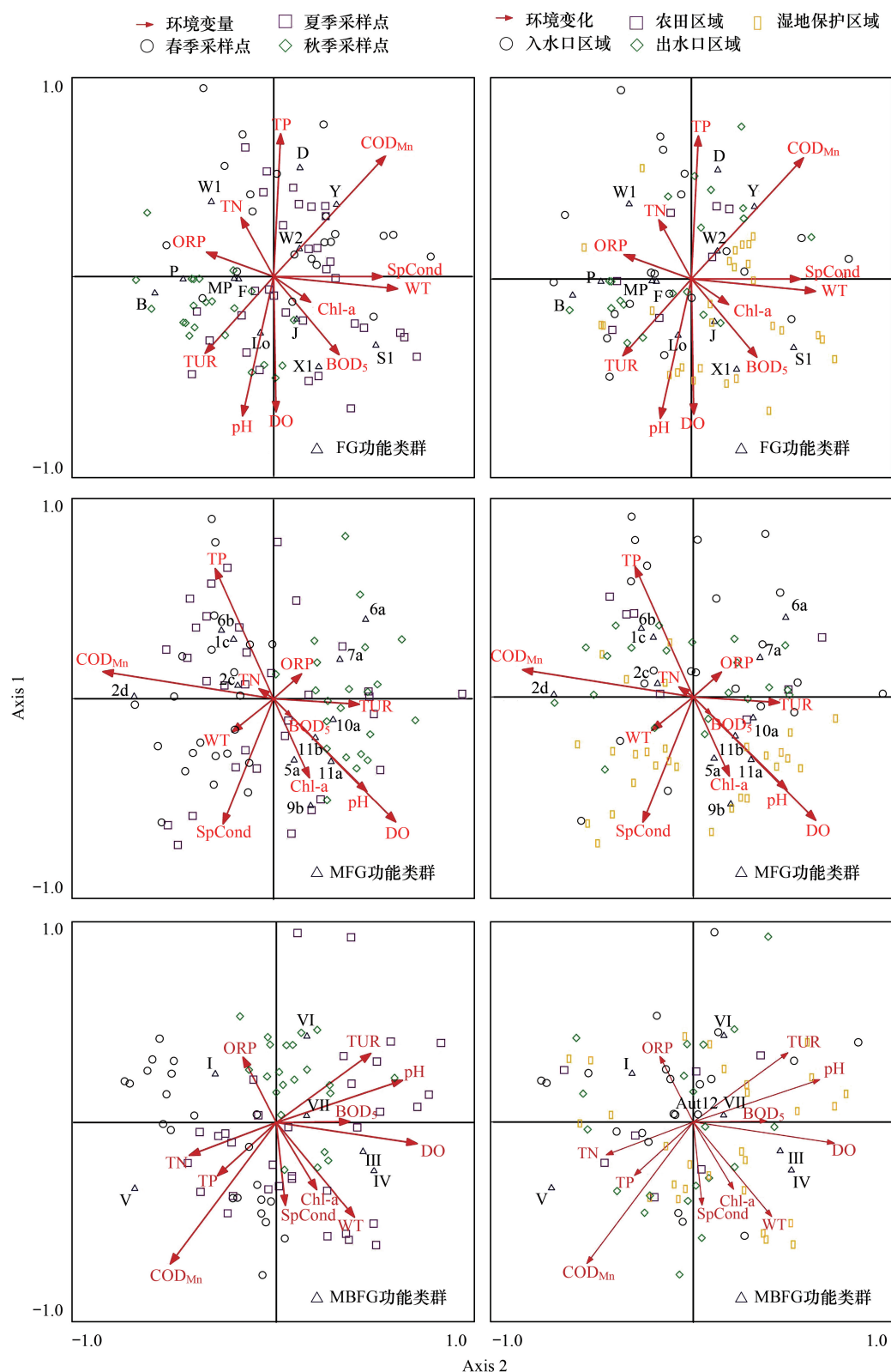


图5 呼兰河湿地植物功能类群与环境变量的 RDA 分析

Fig.5 RDA of representative functional groups and environmental variables in Hulanhe wetland

($P<0.05$), X1 类群的代表性种为狭形纤维藻,为 α -ms(富营养)指示种,能够耐受低温环境,适宜在含氮量高的水体中生长^[35]。因此替代了夏季的蓝藻门 S1 类群。陆欣鑫等^[22]对呼兰河口湿地的研究也证明了 X1 类群在秋季占据优势地位。

MFG 功能类群反映了浮游植物运动能力、大小、形状、营养物质喜好、营养盐和碳的获取能力等^[40]。本次研究中,MFG 功能类群季节性演替特征为由春季的 2d/7a/6b 类群演替为夏季的 5a/7a/6b 类群,最后由秋季的 10a/7a 类群所替代。MFG 功能类群的季节演替特征所反映的水环境变化过程与 FG 功能类群差异不大。MBFG 功能类群方法是利用浮游植物对水环境变化特征的响应为标准,反映某一特定生境模块的状况。ANOSIM 分析表明,以 MBFG 功能类群为研究手段分析季节之间群落结构差异效果不明显。季节之间 SIMPER 分析也表明,在不同季节之间影响群落结构差异的类群无变化。其原因可能是 V 类群(具鞭毛中到大型的单细胞种类)和 VI 类群(具有硅质外壁且无鞭毛的种类)为春季的主要优势功能类群,两类群主要为隐藻和硅藻。春季低温且低光照,具有鞭毛的隐藻根据自身的形态特点以及对低温低光的耐受性,使其能在春季具有很强的竞争能力,与 VI 类群的硅藻在春季共同占据优势地位。夏季和秋季主要为 VI 类群的硅藻种类和 IV 类群中不具有明显特征的中等大小种类,IV 类群种类繁多,包含大部分除硅藻以外的其他浮游植物种类,此类群具有广适应性的特点,因此在夏、秋两季占据优势地位。由于呼兰河口湿地夏、秋两季 IV/VI 类群对资源具有很强的竞争力,导致 V 类群在水体中的生长被限制,这可能是 V 类群在夏、秋两季不占据优势的原因之一。

对比 FG、MFG 和 MBFG 三种功能类群的演替模式不难发现,FG 与 MFG 类群在描述呼兰河口湿地浮游植物演替特征上有重叠部分,差异较小;MBFG 与其他两种功能类群相比,在表征季节间水环境的变化过程中效果并不理想。应用功能类群方法对温带典型水库中的研究曾指出,MBFG 功能类群分类方法在水生态研究中虽然具有简单、高效的优势,但对环境的解释度不够^[41]。FG 功能类群将浮游植物的定量和定性数据与多种水环境数据相结合,很大程度上提高了浮游植物对环境的响应能力,将包含多种环境因子的复杂生态环境与浮游植物的耐受性和敏感性相关联,进而说明浮游植物与环境因子之间的相关性,同时预测研究水体的营养状态。虽然 MFG 弱化了对生态环境的考虑,导致对环境的解释不如 FG 功能类群清晰,但仍然能够揭示呼兰河口湿地浮游植物群落季节变化特征。MBFG 在响应温带湿地季节间环境变化梯度的分析中,效果没有 FG 和 MFG 功能类群理想。

3.2 影响呼兰河口湿地浮游植物功能类群演替的环境因子

大量研究表明,温带湖泊、水库及湿地水体中浮游植物群落的演替受浮游动物、滤食性鱼类通过下行效应影响,另一方面,水温、光照、营养盐及资源可利用率等上行效应更是驱动群落演替的主要原因^[39]。通过对中国 3 个典型湖泊浮游植物研究发现,浮游植物功能类群对不同营养类型的湖泊响应明显^[42]。基于 MBFG 功能类群对亚马逊河流域浮游植物群落特征研究,得出 MBFG 类群能有效的指示水体电导率和 pH 分布特征^[43]。呼兰河口湿地是中型恢复性湿地,其入水口区域与农田区域受季节性的人为活动干扰较大。浮游植物功能类群对湿地栖息环境的时空异质性响应存在独特模式,优势类群的支配地位会随着空间异质性的改变而被其他类群所替代。营养盐、pH、水温、浊度和水动力特征等都是影响浮游植物出现或者消失的重要因素,同时影响各种功能类群的组成。RDA 分析得出三种功能类群的演替是由多种环境因子共同作用的结果。经过蒙特卡洛置换检验分析表明,pH、Tur、BOD₅和 COD_{Mn}是影响呼兰河口湿地浮游植物功能类群演替的最主要因子。

COD_{Mn}为指示浮游植物栖息环境有机污染的重要指标之一,其数值越高说明水体富营养程度越高^[44]。COD_{Mn}的变化往往会影响浮游植物的演替^[45]。在研究期间,呼兰河口湿地 COD_{Mn}值在(0.82—10.50)mg/L 之间变化,三种功能类群在三个季节间 COD_{Mn}差异性都呈显著水平($P<0.01$)。RDA 排序图显示,FG 功能类群中的 Y/D/W2 类群、MFG 功能类群中的 2d/2c 类群和 MBFG 功能类群中的 V 类群都与 COD_{Mn}值变化密切相关,并都呈现出随着 COD_{Mn}值升高各类群丰度上升的趋势,这些类群主要在春季和夏季中具有较高的权重。

春季研究区域水体较浅且浑浊,营养物质积累,由于春季农田区域与入水口区域人为活动干扰,造成水体中有机污染物增多,因此春季的 COD_{Mn} 值最高,平均值为 7.33mg/L 。呼兰河口湿地春季较高的 COD_{Mn} 值也伴随着相对较高的磷含量, Y/D/2d/V 类群对水体中的磷浓度需求较大,因此在春季水体中高磷浓度的条件下,促进了这些类群的生长。同时春季水温和光照较低,耐受低光和低温的 B/D/7a/6b/VI 类群在浮游植物群落中也占据优势地位。在一定程度上, COD_{Mn} 值变化所反映出的水体有机物质含量的改变也影响了 FG 功能类群的 B/D/Y/S1/X1 类群的生长与演替,此结果与同气候带的另一湿地(金河湾湿地)的研究结果近乎一致^[16]。 BOD_5 与 COD_{Mn} 共同反映水体中的有机物含量, RDA 排序分析表明, S1/X1/5a/10a/VII 类群的分布与 BOD_5 含量密切相关,随着 BOD_5 的升高,其种类丰度逐渐升高。 BOD_5 值在夏、秋两季较高,平均值分别为 1.58mg/L 和 1.21mg/L , 水体呈富营养状态,因此 S1/X1/5a/10a 类群较适应夏、秋两季的水体环境。 VII 类群体内可贮存营养盐,多为具有外胶被和较小表面积比的绿球藻目、颤藻目的群体,属于冗余耐受生长策略^[26],通过形成较大群体,以抵御外部的捕食压力。同时 BOD_5 与 Chl-a 也密切相关,在适当的范围内,有机物质会促进浮游植物的代谢^[39],浮游植物通过自身光合作用会产生大量的有机物释放到水体中,使水体中的 BOD_5 进一步升高,这一结论在对巢湖相关的功能类群研究中也得到证明^[46]。可见, BOD_5 所反映的水体中有机物含量的变化,对湿地中 S1/X1/5a/10a/VII 类群的生长、演替和分布都有着明显的影响。

pH 与浮游植物的分布关系密切,特别是与一些硅藻种类^[47]。相关研究表明, pH 变化可以通过影响胞内部分酶活性或跨膜质子梯度来影响浮游植物的光合作用过程,进而影响浮游植物的生长^[48]。 RDA 排序表明, FG 功能类群的 D/Y 类群、 MFG 功能类群的 6b 类群和 MBFG 功能类群的 V 类群均与 pH 呈负相关。浮游植物的光合及呼吸作用日变化研究表明,通常情况下浮游植物夜间进行呼吸作用会释放大量的 CO_2 ,造成水体 pH 降低,本研究样品采集时间多为清晨至上午,这也是 pH 与浮游植物丰度呈负相关的原因之一^[42]; MBFG 功能类群的 IV/VI 类群与 pH 变化密切相关,浮游植物通过光合作用利用水中无机碳(H_2CO_3),产生氢氧根离子,导致水体 pH 升高,随着其上升,导致水体 pH 与浮游植物丰度呈正相关,因此水体中的 pH 适度的升高会影响 IV/VI 类群浮游植物的生长^[49]。浊度是由有机与无机漂浮物、微生物和尘土等微小颗粒悬浮物质所共同引起的^[40],与光照强度、水体理化性质以及气候条件具有密切的关系,水体的浊度直接会影响浮游植物的丰度。 RDA 排序分析表明, Y/6b/V 类群随着浊度的升高表现出丰度下降的趋势。由于夏、秋两季降雨充沛,营养盐通过淋溶作用进入水体,与此同时水体扰动较大,导致水体的浊度逐渐升高^[39],较高的浊度会影响浮游植物的光合作用,使浮游植物产生的有机物质减少,由于 Y/6b/V 类群的个体相对较大,在相对面积的光照射下,这些类群的浮游植物光合作用更弱,从而导致 Y/6b/V 类群在夏、秋两季高浊度的水体中处于不利地位。 B/10a/VI 类群丰度的变化也与浊度密切相关,由于浊度的增加会使水体的透明度下降,进而限制了光照的射入,由于 B 类群的梅尼小环藻以及 10a/VI 类群的部分个体相对较小,在相同光照条件下,这些类群的光合作用更强,因此 10a/VI 类群更具有竞争优势。因此 B/10a/VI 类群在浊度升高的条件也会占据优势地位。呼兰河口湿地是正在恢复中的湿地,本次研究与近 8 年前研究相比^[21-22],虽然优势种略有改变,但水生植物整体群落结构较为稳定。综合来看,呼兰河口湿地浮游植物群落演替受多种环境因子共同影响,其中 pH、Tur、 BOD_5 和 COD_{Mn} 与三种浮游植物功能类群演替密切关系。本研究通过分析不同功能类群分布特征及环境相关性,以期进一步完善湿地水生态系统的评价体系,这对呼兰河口湿地水生生物多样性保护与生态恢复具有一定的理论与指导意义。

4 结论

(1) 呼兰河口湿地在调查期间共鉴定浮游植物 7 门 243 个分类单位。共划分 FG 功能类群 25 个, MFG 功能类群 20 个, MBFG 功能类群 6 个。

(2) 相较于 MBFG 功能类群, FG 和 MFG 功能类群能更好的响应呼兰河口湿地水环境的空间异质性。

(3) COD_{Mn} 和 BOD_5 、pH、Tur. 是驱动呼兰河口湿地浮游植物群落结构空间变化的主要环境因子。

参考文献 (References):

- [1] Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, Sommer U. Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCoI—a new phytoplankton community Index. *Ecological Informatics*, 2016, 31: 22-29.
- [2] 刘懂, 陈晨, 王莉, 焦海峰, 孙元, 王一农, 尤仲杰. 象山港海洋牧场示范区浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2016, 47(5): 1024-1032.
- [3] 刘林峰, 周先华, 高健, 刘梅群, 潘晓斌, 贺磊, 蔡世耀, 赵以军, 潘超, 王卉君, 张佳敏, 叶有旺, 刘伟. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 417-430.
- [4] Blais M, Ardyna M, Gosselin M, Dumont D, Bélanger S, Tremblay J É, Gratton Y, Marchese C, Poulin M. Contrasting interannual changes in phytoplankton productivity and community structure in the coastal Canadian Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(6): 2480-2497.
- [5] Sebastiá M T, Rodilla M, Sanchis J A, Altur V, Gadea I, Falco S. Influence of nutrient inputs from a wetland dominated by agriculture on the phytoplankton community in a shallow harbour at the Spanish Mediterranean coast. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 152: 10-20.
- [6] 国超旋, 刘妍, 范亚文, 李慧. 2012 年夏季三江平原湿地抚远地区浮游植物群落结构及多样性. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 759-766.
- [7] Fang L, Wong P K, Lin L, Lan C Y, Qiu J W. Impact of invasive apple snails in Hong Kong on wetland macrophytes, nutrients, phytoplankton and filamentous algae. *Freshwater Biology*, 2010, 55(6): 1191-1204.
- [8] Yuan Y X, Jiang M, Liu X T, Yu H X, Otte M L, Ma C X, Her Y G. Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 1-12.
- [9] Bhat N A, Wanganeo A, Raina R. Seasonal dynamics of phytoplankton community in a tropical wetland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(1): 4136.
- [10] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [11] Salmaso N, Padisák J. Morpho-functional groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia*, 2007, 578(1): 97-112.
- [12] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, Bonilla S, Costa L, Lüring M, Reynolds C S, Scheffer M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2010, 55(3): 614-627.
- [13] Thuy H T T, Loan T T C, Phuong T H. The potential accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in phytoplankton and bivalves in Can Gio coastal wetland, Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(18): 17240-17249.
- [14] Stanković I, Vlahović T, Udovič M G, Várbíró G, Borics G. Phytoplankton functional and morpho-functional approach in large floodplain rivers. *Hydrobiologia*, 2012, 698(1): 217-231.
- [15] Rodrigues L C, Pivato B M, Vieira L C G, Bovo-Scomparin V M, Bortolini J C, Pineda A, Train S. Use of phytoplankton functional groups as a model of spatial and temporal patterns in reservoirs: a case study in a reservoir of central Brazil. *Hydrobiologia*, 2018, 805(1): 147-161.
- [16] 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.
- [17] Pinckney J L, Zingmark R G. Modeling the annual production of intertidal benthic microalgae in estuarine ecosystems. *Journal of Phycology*, 1993, 29(4): 396-407.
- [18] 吴燕锋, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述. *生态学报*, 2018, 38(7): 2588-2598.
- [19] 高智晟, 肖茹心, 任阿楠, 赵文阁. 黑龙江呼兰河口湿地自然保护区夏季鸟类群落结构及多样性. *四川动物*, 2015, 34(2): 285-289.
- [20] 程旭. 呼兰河口湿地自然保护区植物区系研究. *防护林科技*, 2013, (8): 14-17, 19-19.
- [21] 惠洪宽, 马跃, 范亚文. 黑龙江呼兰河湿地藻类植物群落结构及分布特点. *湖泊科学*, 2011, 23(6): 949-954.
- [22] 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.
- [23] 刘曼红. 呼兰河口保护区及周边水域水生动物生态监测与健康评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [24] 《环境监测方法标准汇编·水环境》编写组. 环境监测方法标准汇编-水环境. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [25] 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.
- [26] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 韩博平. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 11-23.
- [27] 王全喜. 上海九段沙湿地自然保护区及其附近水域藻类图集. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱(第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [30] 张囡囡, 刘宜鑫, 臧淑英. 黑龙江扎龙湿地不同功能区浮游植物群落与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 554-565.

- [31] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 欧腾, 李红梅, 陈峰峰, 高永春, 骆兰. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水浮游植物群落结构特征. 湖泊科学, 2018, 30(2): 403-416.
- [32] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, 621(1): 1-19.
- [33] 田永强, 俞超超, 王磊, 黄邦钦. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子. 应用生态学报, 2012, 23(09): 2559-2565.
- [34] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 夏明芳, 许海, 朱梦圆, 费国松, 陈伟民. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析. 湖泊科学, 2016, 28(1): 9-21.
- [35] Reynolds C S. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [36] O'Sullivan P E, Reynolds C S. *The Lakes Handbook: Limnology and Limnetic Ecology*. Malden: Blackwell Science, 2003.
- [37] 李磊, 李秋华, 焦树林, 李钊, 邓龙, 孙荣国, 高永春, 骆兰. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3604-3611.
- [38] 向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析. 环境科学, 2017, 38(8): 3290-3301.
- [39] Cellamare M, De Tezanos Pinto P, Leitão M, Coste M, Boutry S, Haury J. Using functional approaches to study phytoplankton communities in a temperate region exposed to tropical species dispersal. *Hydrobiologia*, 2013, 702(1): 267-282.
- [40] Allende L, Tell G, Zagarese H, Torremorell A, Pérez G, Bustingorry J, Escaray R, Izaguirre I. Phytoplankton and primary production in clear-vegetated, inorganic-turbid, and algal-turbid shallow lakes from the pampa plain (Argentina). *Hydrobiologia*, 2009, 624(1): 45-60.
- [41] Petar Ž, Marija G U, Koraljka K B, Anđelka P M, Judit P. Morpho-functional classifications of phytoplankton assemblages of two deep karstic lakes. *Hydrobiologia*, 2014, 740(1): 147-166.
- [42] Xiao L J, Zhu Y Q, Yang Y, Lin Q Q, Han B P, Padisák J. Species-based classification reveals spatial processes of phytoplankton meta-communities better than functional group approaches: a case study from three freshwater lake regions in China. *Hydrobiologia*, 2018, 811(1): 313-324.
- [43] Lobo M T M P S, De Souza Nogueira I, Sgarbi L F, Kraus C N, De Oliveira Bomfim E, Garnier J, Da Motta Marques D, Bonnet M P. Morphology-based functional groups as the best tool to characterize shallow lake-dwelling phytoplankton on an Amazonian floodplain. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 579-588.
- [44] 张艳会, 李伟峰, 陈求稳. 太湖水华程度及其生态环境因子的时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(14): 4337-4345.
- [45] 刘洋, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 冯佳. 太原汾河蓄水区浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系. 生态学报, 2018, 38(3): 991-1002.
- [46] 王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, 30(2): 431-440.
- [47] Jin M, Champagne P, Hall G. Effects of different substrates in the mitigation of algae-induced high pH wastewaters in a pilot-scale free water surface wetland system. *Water Science & Technology*, 2017, 75(1): 1-10.
- [48] Braak C J F T, Van Dame H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia*, 1989, 178(3): 209-223.
- [49] 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.