DOI: 10.5846/stxb201710251916

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的演替及驱动因子研究.生态学报,2018,38(16): - . Fan X C, Dai C F, Lu X X, Fan Y W.Study on phytoplankton functional group succession and driving parameters in the Jinhewan Urban Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

金河湾城市湿地浮游植物功能类群的演替及驱动因子 研究

范小晨,代存芳,陆欣鑫,范亚文*

哈尔滨师范大学生命科学与技术学院,植物学省级重点实验室,哈尔滨 150025

摘要:于2015年春(5月)、夏(8月)、秋(10月)三季,在金河湾湿地4类水体共设置12个采样点对浮游植物功能类群演替及与 水环境变量关系进行分析。研究期间共鉴定浮游植物376个种,隶属于8门10纲19目19科101属。浮游植物种类组成主要 以硅藻门(39.62%)和绿藻门(35.64%)为主,其次裸藻门(10.11%)和蓝藻门(9.84%)的藻类所占比例较高,甲藻门、隐藻门、金 藻门和黄藻门所占比例较低。调查期间金河湾湿地浮游植物细胞丰度季节间差异显著(P<0.05),整体上呈现夏季>秋季>春季 的规律。春、夏、秋三季共划分20个不同的功能类群,双因素方差分析(Two-way ANOVA)和单因子交叉相似性检验(One-way ANOSIM)表明:代表性功能类群在季节间演替明显(P<0.05),群落构成差异显著(P<0.01)。SIMPER 分析指出,S2/H1/B/D/ Lo/X1/MP 是引起金河湾湿地各季节之间浮游植物群落结构差异的主要贡献类群。通过代表性功能类群和10个水环境变量 的典范对应分析(CCA)探索环境变量与功能类群演替的关系。经分析,总氮(TN)是驱动金河湾湿地浮游植物功能类群演替的 主要环境变量,电导率(SpCond)、pH 与功能类群演替密切相关。

关键词:金河湾湿地;浮游植物;功能类群;演替;驱动因子

Study on phytoplankton functional group succession and driving parameters in the Jinhewan Urban Wetland

FAN Xiaochen, DAI Cunfang, LU Xinxin, FAN Yawen^{*} College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: The Jinhewan Wetland is located in northeastern China, and plays an important role in protecting the biodiversity and regulating the microclimate in Harbin City. Although phytoplankton community studies on wetlands from northern China have increased recently, studies of the phytoplankton community in the Jinhewan Wetland are limited. To better understand processes of phytoplankton community succession in relation to environmental parameters, a detailed survey of phytoplankton functional groups in spring, summer, and autumn are necessary. Therefore, we studied the phytoplankton functional groups and 10 environmental parameters during spring (May), summer (August), and autumn (July). The aim of this study was to understand the succession process of phytoplankton functional groups between seasons, and furthermore explore the dynamic parameters in the Jinhewan Wetland. In this study, phytoplankton were qualitatively and quantitatively collected from 12 sampling sites in four typical habitats. A total of 376 phytoplankton species were identified, belonging to 8 families, 10 classes, 19 orders, 19 families, and 101 genera. The phytoplankton species composition was dominated by Bacillariophyta (39.62%) and Chlorophyta (35.64%), followed by Euglenophyta (10.11%) and Cyanobacteria (9. 84%), and the proportions of Pyrrophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, and Xanthophyceae were relatively low. Our study

收稿日期:2017-10-25; 修订日期:2018-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.31470308)

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

showed that the average abundance of phytoplankton in the Jinhewan Wetland was significantly different (P<0.05). The average abundance in summer was the highest (12.90×10^6 ind/L), followed by autumn (5.95×10^6 ind/L), and spring (2.55×10^6 ind/L). The range of change was $0.97-14.83 \times 106$ ind/L, ranging between $0.47-30.17 \times 10^6$, 5.95×10^6 , and 2.55×10^6 ind/L, respectively. We arranged phytoplankton taxa data from spring, summer, and autumn into 20 functional groups. Groups B/D/F/H1/J/MP/S2/X1 were predominant in spring, groups B/D/H1/Lo/S1/S2/SN/MP/Y were predominant in summer, and groups B/D/F/H1/J/MP/S2/X1 were predominant in autumn. A two-way ANOVA and single-factor cross-similarity test (one-way ANOSIM) showed that there were significant differences in representative functional groups between spring, summer, and autumn (P<0.05), the representative functional group succession was obvious (P<0.05), and functional group assemblages were significantly different (P<0.01). In addition, a SIMPER analysis indicated that the primary contributing phytoplankton functional groups were S2/H1/B/DLo/X1/MP in the Jinhewan Wetland. A Canonical Correspondence Analysis (CCA) based on representative functional groups of 10 environmental variables revealed that total nitrogen (TN) was the primary factor affecting the phytoplankton functional group succession in this wetland, and conductivity (SpCond) and pH were closely related to phytoplankton functional group distribution.

Key Words: Jinhewan Wetland; Phytoplankton; Functional groups; Succession; Driving factors

浮游植物在湿地生态系统中占据关键作用,它可以利用光能驱动光合作用产生有机物,是水生生物食物链的基础环节,促进了能量在食物链中的传递,最终影响整个湿地水域系统的稳定^[1]。浮游植物的时空分布模式是探索湿地生态系统功能的重要手段之一,它不仅影响了湿地生态过程、功能和稳定性,而且反映了湿地生态环境的变化^[2-3]。目前,浮游植物的生态分布在湿地生态系统的相关研究中,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^[4-6]。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。2002年,Reynolds等提出基于浮游植物的功能类群的概念^[7],随后 Padisák 等^[8]补充完善了功能类群的划分及生态特性,最终形成了探索浮游植物生态过程的重要理论^[9]。浮游植物功能类群分类法以浮游植物的功能性特征(functional properties)为基础(包括生理学、形态学和生态学特征),将同一生境下共存的藻类归为一组,同组内的浮游植物通常具有相似的环境适应性特征^[8]。关于浮游植物功能类群生理和生态的相关研究已成为当今水域生态学的热点问题,目前已经广泛应用于湖泊、水库等生态系统的研究与保护中^[10-12]。

城市湿地公园作为湿地生态恢复、湿地资源可持续利用以及湿地保护的有机结合体,是对《湿地公约》提 倡合理利用湿地资源原则的充分体现和具体实施^[13]。城市湿地公园对于改善城市气候、维护区域生态平衡、 调节区域小气候以及优化城市景观格局等方面具有重要的生态作用,另外城市湿地公园也是众多湿地保护和 利用模式中的一种较为理想的模式之一^[14]。目前对于城市湿地公园的生态研究,已经成为城市生态建设的 重点和研究的热点之一^[15-16]。金河湾湿地公园位于松花江哈尔滨段主城区左岸,西四方台大桥与阳明滩大 桥之间的滩地上,东西长 3800 m,南北最宽处 1500 m,总面积 1.8 km²。金河湾湿地对哈尔滨市保护生物多样 性、调节地区小气候等方面有着重要作用^[17]。目前,有关金河湾湿地的研究多为景观体验优化策略、规划设 计、POE 调查等^[17-18]。关于金河湾湿地浮游植物生态多样性的研究较少,且研究内容采用传统分类方法对浮 游植物群落结构进行探讨^[19]。

本研究将浮游植物功能类群运用于金河湾湿地浮游植物群落结构研究中,阐释了不同功能类群在季节间 的演替特征,同时探究影响浮游植物在群落演替过程中生长选择机制的主要环境变量。以期为金河湾湿地浮 游植物的多样性保护提供重要的生态学基础资料,同时为金河湾湿地公园的生态管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

我们于 2015 年春(5月)、夏(8月)、秋(10月)三季对金河湾湿地公园进行水样及浮游植物样品采集。 根据金河湾湿地的水体生态特征(与河道相通程度、水深、湿生植物等),本研究共设置 12 个采样点(图 1),基 本涵盖了金河湾湿地的 4 种典型水体;样点 S1—S7 的生境类型为湖泊型湿地,采集地水体为较开阔的湖面; 样点 S8—S10 为河流型湿地,所在水域与松花江河道相通;样点 S11 为沼泽湿地,有薄层常年积水,水面生长 大面积喜湿性草本植物;样点 S12 为人工湿地,是金河湾湿地植物园打造的圆形水池,平均水深 1 m。采样点 的设置定位采用 GPS 全球卫星定位系统。采样点地图的绘制通过 ArcMap 10.2 完成。



图 1 金河湾湿地采样点布设示意图 Fig.1 Map and sampling sites in Jin Hewan wetland

1.2 样品采集、处理及鉴定

根据常规方法对浮游植物标本进行定量、定性采集^[20],现场对采集样本用鲁格试剂固定,静止 24 h 后浓 缩至 50 mL,镜检计数^[21]。浮游植物的鉴定及生态分布信息主要参考胡鸿钧、魏印心等著作文献^[21-23]。

1.3 理化指标的测定

使用 pH 水温测试仪现场测定水温(WT)和 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)用 Hydrolab 多参数水质分析仪进行测定;采集现场用黑色密封袋将水样密封保存,12 小时内使用 DRB200 型数字反应器对总磷(TP)、总氮(TN)及化学需氧量(COD)进行测定。

1.4 数据分析

独立样本 t 检验(t-test)和双因素方差分析(Two-way ANOVA)使用 SPSS 22.0 软件完成;使用 PRIMER 5. 0 软件进行单因素交叉相似性分析(One-lway crossed ANOSIM)和 SIMPER 分析。去趋势分析(DCA)和典范 对应分析(CCA)采用软件 CANOCO 4.5 进行,在进行排序前,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。

2 结果与分析

2.1 金河湾湿地浮游植物群落结构

2.1.1 浮游植物种类组成

在研究期间共鉴定浮游植物 376 个种,包括 32 变种 2 变型,隶属于 8 门 10 纲 19 目 39 科 101 属。硅藻门 (Bacillariophyta)种类数最多,为 149 种及变种 2 变型,占浮游植物总种类数的 39.62%;绿藻门(Chlorophyta) 134 种及变种,占 35.64%;裸藻门(Euglenophyta) 38 种及变种,占 10.11%;蓝藻门(Cyanophyta) 37 种及变种,占 9.84%;甲藻门 (Dinophyta) 10 种及变种,占 2.66%;隐藻门(Cryptophyta) 4 种及变种,占 1.06%;黄藻门 (Xanthophyta) 3 种;占 0.79%;金藻门(Chrysophyta) 仅 1 种,占 0.26%(图 2)。主要优势种包括硅藻门的谷皮 菱形藻(*Nitzschia palea*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*);绿藻门的具尾四角藻(*Tetraëdron caudatum*)、螺旋弓形藻(*Schroederia spiralis*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*);蓝藻门的固氮鱼腥藻 (*Anabaena azotica*)、中华小尖头藻(*Raphidiopsis sinensia*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*);隐藻门的卵形隐藻 (*Cryptomonas ovata*)、啮噬隐藻(*Cryptomonas erosa*)以及金藻门的分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*)。

研究期间,整体上呈现夏季>秋季>春季的规律,经独立样本 t 检验,季节间丰度差异显著(P<0.05)。其中,夏季平均丰度最高为 12.90×10⁶个/L,变化范围在 0.47—30.17×10⁶个/L 之间,其次为秋季,平均丰度为 5. 95×10⁶个/L,变化范围在 0.97—14.83×10⁶个/L 之间,春季平均丰度最低为 2.55×10⁶个/L,变化范围在 0.23—6.12×10⁶个/L 之间。从空间分布来看,湖泊型湿地藻类丰度显著高于其他类型的湿地(P<0.05),而河流型湿地、沼泽湿地和人工湿地的采样点中藻类丰度相对较低(如图 3)。如,春季丰度最高值出现在样点 S4(6.12×10⁶个/L),夏、秋两季丰度最高值都出现在样点 S3,丰度分别为 30.17×10⁶个/L 和 14.83×10⁶个/L。春、夏两季浮游植物丰度最低值均出现在沼泽湿地样点 S11,丰度分别为 0.23×10⁶个/L 和 0.47×10⁶个/L。秋季藻类



2.2 浮游植物功能类群演替

根据 Reynolds^[7]和 Padisák^[8]等对浮游植物功能类群的划分标准,金河湾湿地浮游植物群落可划分为 20 个不同的功能类群,分别为 B/C/D/E/F/H1/H2/J/Lo/LM/MP/N/P/S1/S2/SN/W1/W2/X1/Y(表1)。浮游 植物功能类群出现频率分布如图 4 所示,J/Lo/X1/P/H1/W2/MP/D/F/W1 在四种水体中出现频率较高,均为 50%以上;LM/B/N/S2 出现频率相对较低,在 30%—50%之间,Y/SN/H2/C/E/S1 出现频率低于 30%,其中 E/S1 仅在人工湿地、沼泽湿地中被检测出。表 1 给出了本研究中各浮游植物功能群的代表性藻种(属)。

38 卷







表 1	全河湾湿地浮游植物功能类群的代表性属种
AX I	〒/5/15/12/15/17/11/19/12/16/77/16/77/16/77/16/17/16/17/16/17/

Table 1	Representative species	genera)	of nhytonlankton	functional grou	ns in Iin Hewan	wetland
I unic I	itepi eschuari e species	genera /	or phytophanicon	runchonar grou	po m gm menun	weenung

功能类群	代表性藻种(属)	耐受性	敏感性
Groups	Genus/Species Represent in the groups	Tolerance	Sensitive
В	小环藻属 Cyclotella Kütz.	低光照	pH升高、硅元素缺乏、水体分层
С	华丽星杆藻 Asterionella formosa	低光照、低含碳量	硅消耗、水体分
D	菱形藻属 Nitzschia Hass.	冲刷	营养缺乏
	针杆藻属 Synedra Ehr.		
Е	分歧锥囊藻 Dinobryon divergens	低营养	二氧化碳缺乏
F	蹄形藻 Kirchneriella lunaris	低营养、高浑浊	二氧化碳缺乏
	网球藻 Dictyosphaerium ehrenbergianum		
H1	鱼腥藻属 Anabaena Bory	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照、低含磷量
	水华束丝藻 Aphanizomenon flos-aquae		
H2	项圈藻 Anabaenopsis sp.	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照
J	栅藻属 Scenedesmus Meyen	_	高光照
	四角藻属 Tetraedrom Kütz.		
Lo	色球藻属 Chroococcus Näg.	营养分层	长时间或深层的混合
	平裂藻属 Merismopedia Meyen		
LM	裸甲藻 Gymnodinium aeruginosum	很低的碳含量	水体混合、低光照
	角甲藻 Ceratium hirundinella		
MP	舟形藻属 Navicula Bory	混合扰动	_
	异极藻属 Gomphonema Ehr.		
Ν	鼓藻属 Cosmarium Corda	冲刷	_
Р	角星鼓藻属 Staurastrum Meyen	中程度的低光照和低碳含量	水体分层、硅元素缺乏
	颗粒直链藻 Melosira granulata		
S1	鞘藻属 Oedogonium Link	极低的光照	冲刷
S2	螺旋藻属 Spirulina Turp	低光照	冲刷
SN	中华小尖头藻 Raphidiopsis sinensia	低光照和低营养	冲刷
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	高生化需氧量	牧食作用
W2	囊裸藻属 Trachelomonas Ehr.	_	酸性
X1	纤维藻属 Ankistrodesmus Corda	分层	营养盐缺乏、滤食作用
	螺旋弓形藻 Schroederia spiralis		
Y	啮蚀隐藻 Cryptomonas erosa	低光照	吞噬作用
	卵形隐藻 Cryptomonas ovata		

根据浮游植物代表性功能类群的划定标准,至少在一个采样点相对丰度超过10%的功能类群为代表性

功能类群^[24]。在本次研究中,共划分 12 个代表性功能类群,分别为 B/D/F/H1/J/Lo/MP/SN/S1/S2/X1/Y。 春季代表性功能类群有 7 个,包括 B/D/H1/Lo/MP/X1/Y;夏季代表性功能类群有 9 个,分别为 B/D/H1/Lo/ S1/S2/SN/MP/Y;秋季代表性功能类群共 8 个,分别为 B/D/F/H1/J/MP/S2/X1(图 5)。





双因素方差分析(Two-way ANOVA)表明,研究期间金河湾湿地代表性功能类群中 B/H1/Lo/S2/X1 的丰 度随着季节的变化存在显著差异(P<0.05),各水体代表性功能类群随季节变化呈现明显的演替现象(表 2)。 通过对代表性功能类群的单因子交叉相似性分析(One-way crossed ANOSIM)显示季节变化对金河湾湿地浮 游植物功能类群的生态分布具有极其显著的影响(P<0.01)(表3)。湖泊型湿地浮游植物功能类群季节性分 布为:春季 X1/B/Lo/D,夏季 S2/SN/Lo,秋季 H1/S2/B,其演替表现为春季代表性功能类群 X1(狭形纤维藻、 螺旋弓形藻)/B(梅尼小环藻)演替为夏季绝对优势类群 S2(螺旋藻)/SN(中华小尖头藻)再到秋季主要功能 类群 H1(水华束丝藻)/S2(螺旋藻)/B(小环藻属)。河流型湿地浮游植物功能类群季节性分布为:春季 X1/ B/D, 夏季 S2/H1/D/B, 秋季 B/X1/F, 其中春季优势类群 X1(狭形纤维藻)/B(梅尼小环藻), 夏季为 H1(水华 束丝藻)/B(小环藻属),最后秋季 B(小环藻属)/X1(狭形纤维藻)又重新回到优势地位,B(小环藻属)成为 3 个季节中的优势类群。沼泽湿地浮游植物功能类群季节性分布为:春季 D/MP/Y,夏季 MP/Y/S1/D,秋季 MP/D/B,D(菱形藻属)/MP(舟形藻属)在该水体的3个季节中都为优势类群。人工湿地浮游植物功能类群 季节性分布为:春季 D,夏季 B/D,秋季 J/B/F,其中春季优势类群 D(针杆藻属),夏季 B(梅尼小环藻)/D(菱 形藻属)演替为秋季主要功能类群 J(四尾栅藻)/B(梅尼小环藻)/F(蹄形藻)。SIMPER 分析指示了不同季 节间群落差异的主要贡献功能类群(表 3),S2/H1/B/D/Lo/X1/MP 在 3 组 SIMPER 分析中均有稳定贡献,经 分析 S2/H1/B/D/Lo/X1/MP 对于季节间水体环境变量变化的生态适应性,可能是导致金河湾湿地季节间功 能类群群落差异的主要原因。

2.3 金河湾湿地水环境变量变化

金河湾湿地春、夏、秋三季4种水体环境变量及双因素方差分析结果见表4。在本次研究期间,金河湾湿地 WT、pH、SpCond和TP在春、夏、秋季节间变化差异显著(P<0.05)。另外6项环境变量虽然在统计分析上差异不明显(P>0.05),但随着季节变化仍呈现一定的时空分布规律(表4)。在调查期间金河湾湿地夏季水温(29.40℃)明显高于春、秋两季(22.98℃和12.19℃)(P<0.05)。金河湾湿地水体为碱性,pH为8.78,变化

	Table 2	2 Abundance	of representa	tive functions	al groups in J	Jin Hewan W	Vetland and su	ummary of tv	wo-way ANO	VA for testing	g the effects		
奉	" "					Abu	代表性功能类 indance of repre	き群丰度(×10 ^{6/} sentative functic	↑/L) nal groups				
Seasons	Wetlands	в	D	ы	H1	ſ	L_0	MP	S1	S2	SN	X1	Υ
春季 spring	湖泊型湿地	0.45 ± 0.36	0.07 ± 0.18	0.00 ± 0.18	0.06+0.14	0.00 ± 0.00	0.30 ± 0.28	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.39 ± 0.86	0.00 ± 0.00
	河流型湿地	0.25 ± 0.02	0.13 ± 0.10	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	$0.00 {\pm} 0.00$	$0.00 {\pm} 0.00$	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.27 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	沼泽湿地	0.00	0.13	0.00	00.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	00.00	0.03
	人工湿地	0.00	1.08	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	00.00	0.00
夏季 summer	湖泊型湿地	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.26 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.70 ± 1.87	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	14.07 ± 5.04	0.48 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	河流型湿地	0.39 ± 0.28	0.20 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.15 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.91 + 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	沼泽湿地	0	0.06	0	0	0	0	0.15	0.08	0	0	0	0.08
	人工湿地	0.31	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
秋季 autumn	湖泊型湿地	0.41 ± 0.50	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	3.77 ± 3.22	$0.00 {\pm} 0.00$	$0.00 {\pm} 0.00$	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.70+0.62	$0.00 {\pm} 0.00$	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	河流型湿地	0.58 ± 0.08	0.00 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.16 ± 0.01	0.00 ± 0.00
	沼泽湿地	09.0	1.05	0.00	00.00	0.00	0.00	1.78	0.00	0.00	0.00	00.00	0.00
	人工湿地	0.32	0.00	0.00	0.22	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	00.00	0.00
Two-way ANOVA (P-va.	lue)												
季节	间	P < 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P<0.05 I	⁹ >0.05 F	>0.05 P	<0.05 P>	0.05 P<	0.05	P > 0.05
不同水	体间	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P>0.05 I	[∞] <0.05 F	×0.05 P.	>0.05 P>	0.05 P>	0.05	P < 0.05
由于采样点数目限带	1,沼泽湿地和人工湿	建地无标准差数据											

16 期

表2 金河湾湿地代表性功能类群丰度(×10⁶个/L)及双因素方差分析

7

范围在 7.40—9.82 之间。总磷(TP)呈现从春季到秋季下降的规律,平均为 0.19 mg/L,变化范围在 0.08— 0.36 mg /L之间。叶绿素 a(Chl-a)平均浓度为 19.82µg/L,变化范围在 5.98—39.77 µg/L 之间。溶解氧 (DO)、氧化还原电位(ORP)和浊度(Tur)呈现随着春、夏、秋三季的推移逐渐升高的规律,平均 DO、ORP 和 Tur 分别为 7.42 mg/L、344.28 U/mV 和 14.06 NTU,变化范围分别在 5.15—10.51 mg/L、173.00—548.00 U/mV 和 2.30—38.50 NTU 之间。总氮(TN)和化学需氧量(COD)呈现春季最高,夏季最低的规律,平均 TN 和 COD 分别为 0.99 mg/L 和 21.81 mg/L,变化范围分别在 0.13—2.00 mg/L 和 7.00—35.00 mg/L 之间。

表 3	金河湾湿地功能类群能群落结构的单因子(季节)交叉相似性分析
-----	-------------------------------

Table 5 One-way cros	sseu ANOSINI IOI tesu	ng the season on phytopia	ankton functional grou	ps in jin newan wenanu
季节	总差异	组间差异	显著水平	主要贡献功能类群
Seasons	Global test R	Pairwise test R	P value	Main contribute groups
	0.384			
春季+夏季 Spring + Aummer		0.5	0.001	S2/X1/B/D/Lo/H1
春季+秋季 Spring + Autumn		0.335	0.001	X1/H1/B/D/S2/Lo
夏季+秋季 Summer + Autumn		0.303	0.005	S2/H1/B/D/Lo/X1/MP

2.4 浮游植物功能类群演替的驱动因子

对金河湾湿地 WT、pH、SpCond、DO、ORP、Tur、Chl-a、TP、TN 和 COD 共 10 种环境变量与代表性功能类群 进行排序分析,寻找金河湾湿地功能类群在季节间和空间上的分布规律,并探索驱动功能类群演替的主要环 境变量。将代表性功能类群进行去趋势分析(DCA),DCA 结果显示排序轴最长梯度长度值为 6.466,因此属 于单峰模型的典范对应分析(CCA),可更准确的分析金河湾湿地浮游植物功能类群的时空分布规律。结果 显示,CCA 排序轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.738 和 0.512,功能类群与环境变量相关系数达到 0.955 和 0. 878,前四个排序轴共解释 88.5%的累计种类环境变量百分比。说明本次 CCA 排序结果可靠,基本反映了研 究期间金河湾湿地代表性功能类群与环境变量之间的生态关系。经蒙特卡洛检验,TN、pH 和 SpCond 与浮游 植物功能类群时空动态变化关系密切(图 6)。



图 6 代表性浮游植物功能类群与环境变量的 CCA 分析

Fig.6 CCA of representative functional groups and environmental variables in Jin Hewan wetland

	Tai	ble 4 Environm	ental variables in	Jin Hewan Wo	etland and summ	ary of two-way A	NOVA for testin	ig the effects of s	ampling site and	season	
季节 Seasons	湿地 Wetlands	水油 WT/°C	НА	溶解氧 DO/ (mg/L)	点多率 SpCond/ (µs/cm)	氧化还原电位 ORP/ (U/mV)	浊度 Tur/ (NTU)	叶绿素 Chl-a/ (µg/L)	总氮 TN/ (mg/L)	总鞣 TP/ (mg/L)	化学需氧量 COD/ (mg/L)
春季 spring	湖泊型湿地	23.01±2.00	9.08±0.25	6.52±0.71	222.86±8.81	227.14±23.5.	7.71±2.36	21.84 ± 3.96	1.64 ± 0.34	0.17 ± 0.08	24.00±3.85
	河流型湿地	21.87±0.67	8.51±0.07	6.41±0.10	223.33±5.77	257.33±11.02	19.93±7.51	21.32±6.44	1.63 ± 0.55	0.18 ± 0.06	31.33 ± 4.73
	治洋湿地 人工湿地	26.00 23.00	7.40 8.65	6.03 5.70	460.00 260.00	295.00 255.00	3.50 2.90	6.01 9.85	1.80 0.80	0.27 0.36	33.00 14.00
夏季 summer	湖泊型湿地	29.26±0.78	9.55 ± 0.23	7.80 ± 0.29	180.96 ± 7.09	366.00±6.63	10.51 ± 3.14	13.48 ± 1.68	0.20 ± 0.09	0.13 ± 0.04	17.29 ± 4.23
	河流型湿地	29.90 ± 0.44	8.93 ± 0.19	7.52 ± 0.27	203.00 ± 1.73	379.00 ± 6.56	18.80 ± 2.88	23.17 ± 4.98	0.15 ± 0.00	0.27 ± 0.15	11.33 ± 3.51
	沼泽湿地	28.40	7.56	6.99	334.00	389.00	19.80	7.80	0.80	0.27	28.00
	人工湿地	29.90	8.37	7.66	211.00	387.00	2.30	5.98	0.18	0.26	7.00
秋季 autumn	湖泊型湿地	12.30 ± 0.92	8.62 ± 0.361	8.57 ± 0.91	164.29 ± 9.76	424.71 ± 126.72	20.36 ± 10.02	28.92 ± 6.60	1.10 ± 0.21	0.18 ± 0.03	26.29 ± 4.54
	河流型湿地	12.70 ± 2.13	8.19 ± 0.05	8.27 ± 0.53	166.67 ± 5.77	413.33±72.76	17.20 ± 6.23	18.64 ± 9.40	1.23 ± 0.06	0.19 ± 0.11	16.00 ± 4.58
	沼泽湿地	9.50	7.69	5.97	360.00	436.00	33.60	13.88	1.40	0.26	33.00
	人工湿地	12.60	8.73	7.94	130.00	358.00	6.20	29.91	1.00	0.14	21.00
Two-way ANOV	A (P-value)										
季节间		P < 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05
不同水体间		P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P > 0.05	P > 0.05	P < 0.05	P < 0.05
沼泽湿地和	一人工湿地,由于3	<样点数目限制.	无标准差数据								

表4 金河湾湿地水体环境变量以及双因素方差分析

http://www.ecologica.cn

9

3 讨论

10

3.1 浮游植物功能类群演替特征

浮游植物功能类群演替主要是由水体营养盐、稳定性及浮游植物的形态、生理适应特征、悬浮机制、营养盐吸收利用效率、光能捕获能力以及固碳速率等相互作用的结果^[25]。这些因素共同决定着浮游植物对其特定生长环境的选择机制,成为浮游植物在水环境中生存或者消失的限制因素^[24-25]。

金河湾湖泊型湿地浮游植物功能类群特征为,由春季的 B(梅尼小环藻)/X1(狭形纤维藻)演替为夏季 S2(螺旋藻)/Lo(平裂藻)/SN(中华小尖头藻),最后被秋季的H1(水华束丝藻)/B(小环藻属)所取代。金河 湾湿地春季营养盐浓度相对较高,光照强度和水体温度相对较低(23℃),功能类群 B 的代表种类为小环藻 属,其生境类型为浑浊较浅的富营养类型水体,耐受条件为弱光和低温。与此同时,B类群小环藻属的形态有 利于维持高水平的 s/v 比值,同时具有高效的捕光能力,因此在春季较低光照条件中获得良好的竞争优势。 S2 类群的螺旋藻为夏季绝对优势的种类,此类群种类适宜生长在温暖、浅层且呈碱性的水体中,对河流冲刷 较为敏感。夏季平均水温 29.3℃,平均 pH 值 9.1,且湖泊型湿地受雨水河流波动影响较小,为此种藻类的生 长提供了适应条件。夏季浮游植物生长时吸收了水体中大量的 CO,,对 pH 升高起到促进作用,春季占据优势 的 B 类群对水体 pH 升高敏感,这可能是 B 类群在夏季环境适应中处于相对劣势的原因之一,而 S2 类群(螺 旋藻)成为了夏季优势类群。H1类群(固氮鱼腥藻、水华束丝藻)通常适宜生存在营养水平较高的水体中,同 时可耐受较低氮含量的条件^[9]。一些研究指出,低 N、P 营养环境中,水华束丝藻(H1 类群)可通过调节自身 的酶系统来提高对营养的吸收和利用,从而满足自身生长和细胞增殖的需要^[26]。金河湾湖泊型湿地水体总 氦含量从春季到秋季存在明显的先下降后回升过程(p<0.05),夏季较低的营养含量下,H1类群虽然相对丰 度较低,由于其特殊的生态适应性,仍在此条件下存活并占据一定比例。到了秋季,营养盐水平升高,H1类群 (水华水丝藻)重新占据优势地位,成为秋季的绝对优势类群。相应的 B 类群(小环藻属)随着秋季水体温度 及 pH 降低也重新回到优势地位。

从河流型湿地浮游植物功能类群分析,春季以 X1/B/D 为代表性功能类群,其优势种类为狭形纤维藻、梅尼小环藻及菱形藻属。夏季演替为 S2/B/H1 的优势种类螺旋藻、水华束丝藻,S2/H1 类群浮游植物均为蓝藻 门植物,喜较高温度、低氮的水体环境,夏季高水温(28.4 ℃)及 TN 含量的降低(0.15 mg/L)使得蓝藻门浮游 植物(固氮鱼腥藻、水华束丝藻)在群落中占据生长优势。秋季水温降低,水体营养盐浓度升高,B(小环藻属)/X1(狭形纤维藻)代替了夏季大量生长的蓝藻门种类,其中 B(小环藻属)为3 个季节的优势类群藻种,小环藻属的种类(Cyclotella sp.)具有高效的捕光能力,因此可以进行良好的光合作用供自身生长繁殖。

从沼泽湿地来看,其浮游植物功能类群变化特征为春季 D/MP/Y,夏季 MP/Y/S1/D,秋季 MP/D/B,湿地 中 D(菱形藻属)/MP(舟形藻属、曲壳藻属)在该水体中一直处于优势地位。沼泽湿地大量杂草丛生,在水体 低光照条件下,耐受低光条件的功能类群长势良好,所以 D/MP 处于 3 个季度沼泽湿地功能类群中优势地位。 Y 类群(啮蚀隐藻)能够利用鞭毛在水体中浮动,适应于较高水温、低光照的夏季沼泽水体^[7],因此,啮蚀隐藻 在夏季的该类型的湿地中占据较高优势。同时此类型水体具有相对较高的营养盐条件,D/MP/Y 一般生存在 营养盐较高的小型水体中^[25],而此生境中低光条件在一定程度上限制了其他种类的生长,因此 D/MP/Y 在环 境适应和生存空间竞争中处于绝对的优势,所以该类型湿地藻种丰富度相对较低,优势种突出。

从人工湿地来看,其浮游植物季节演替为春季 D,夏季 B/D,秋季 J/B/F,主要优势藻种为 D(针杆藻属、 菱形藻属)/B(梅尼小环藻)。B/D 类群的藻类可耐受人为活动干扰所带来的光缺乏以及水体冲刷,而 F 类群 又可耐受相对较低的营养水平^[25]。该湿地为人工打造的圆形水池,水体面积较小,水体受人为活动扰动明 显,水体营养盐水平为4种水体最低。因此,其功能类群季节演替特征不明显,浮游植物种类丰富度相比湖泊 型湿地和河流型湿地明显降低。

在本次研究中,所选取的水体类型多样,水体环境变量时空变化较为明显,浮游植物种类丰富,而功能类

38 卷

11

群的演替过程,反映了金河湾湿地浮游植物群落结构对季节间环境变化的响应。对于决定群落结构演替的功能类群如 S2/H1/B/D/Lo/X1/MP,可视为金河湾湿地季节间水体环境变化的指示类群。

3.2 浮游植物功能类群演替的影响因子

浮游植物的生长和代谢受多种环境变量的共同作用,如光照、营养盐含量(氮、磷)等,在不同的环境变量 驱动下,可使浮游植物功能类群发生规律性的演替^[27-28]。在 CCA 排序图中,采样点沿着排序轴的分布情况, 体现了该样点中所有物种的贡献率及对环境梯度的响应过程^[27]。本研究中,金河湾湿地不同季节和生境的 采样点沿着 CCA 排序轴分布特征明显,基本反映了浮游植物功能类群在演替过程中对于主要环境变量分布 模式所做出的响应。

TN 是评估湿地水体富营养水平的重要指标,作为浮游植物生长代谢所需的大量元素之一,当水体中 TN 含量过高或过低时,往往会成为影响浮游植物群落结构的演替的限制因子^[29-30]。调查期间,金河湾湿地 TN 含量在 0.12—2.00 mg/L 之间变化,最小值出现在夏季的河流型湿地。从整体来看,夏季总氮含量最低,该季 节降雨量充沛,而金河湾湿地整体水域环境较为封闭,不受来自其余河流冲刷的影响,导致氮磷含量降低,而 此时该湿地水体中大量生长的为 H1/S2/Lo 蓝藻类群(固氮鱼腥藻、水华鱼腥藻及平裂藻等),这种现象在其 他的一些研究中得到相同结论[31]。蓝藻之所以能够爆发性生长代替其他藻种,一方面与其自身生理特征有 关,如固氮、伪空泡、光吸收及营养盐利用的能力,另一方面则与系统内物理、化学和生物环境有关。蓝藻因其 自身的固氮作用,能在氮含量较低水体中大幅度生长[32]。此外,还与蓝藻本身的某些生理特性有关,如气囊 及抗拒紫外线伤害的能力,从而避免了夏季高光照射条件,进而在氮含量较低的夏季水环境中处于优势地 位^[25]。类群 X1/J/F/B 体现为,随着 TN 含量的升高丰度成上升的趋势,并且成为春、秋两季河流和湖泊湿地 中的优势类群(图 6)。推测在春、秋两季 TN 含量相对较高的水体环境中,如 X1 类群作为"先锋种"可在资源 竞争中占据优势^[7,9],较高浓度的氮营养盐也可以维持纤维藻的藻细胞较长时间的增长^[33]。因此,在不同浓 度 TN 环境中,会衍生不同的功能类群分布模式。另外,水体中氮磷比的含量会影响浮游植物种群适应及群 落组成^[25]。通常情况下,浮游植物对营养盐的吸收利用大致遵循 N/P 比为 16:1 的 Redfield 定律,当氮磷比 大于 16:1 时,表现为磷限制,而 N/P 小于 16:1 时,为氮限制^[34]。春、夏、秋三季间,金河湾湿地平均氮磷比为 5.96,属于氮限制。因此,通过对水体中 TN 含量的调控,可对金河湾湿地浮游植物群落演替起到一定的限制 作用。

SpCond 是与水体中浮游植物生长密切相关的环境变量,也是反映水体富营养化程度的重要环境指标之 一,其离子种类的组成和水域地质及土壤特征密切相关^[35]。通常水体纯净度越高,则 SpCond 越低^[36]。研究 期间,金河湾湿地 SpCond 均值为 208 μs/cm,在四种不同类型的湿地中 SpCond 差异显著(p<0.05)。CCA 排 序图显示, D/MP/Y/S1 分布与 SpCond 含量变化密切,并呈现随着 SpCond 升高, 丰度上升的趋势, 而这些功能 类群主要在沼泽湿地水体中体现较高的权重(图6b)。沼泽湿地水体较浅,丛生大量杂草水环境营养物质充 足,不受河流冲击和降雨量的影响,所以沼泽湿地平均 SpCond 最高为 385 μs/cm。水体中 SpCond 的高低,在 一定程度上也会反映营养盐浓度的水平^[35]。沼泽湿地水体较高的 SpCond 伴随着相对较高的营养盐含量,D 组对营养盐缺乏敏感,较高的电导率条件,在一定程度上避免了该类群的生存环境压力。同时沼泽湿地水体 光照条件相对较低,因此可耐受于低光条件的S1/Y类群在藻类群落中占据优势^[25]。经分析,由SpCond变化 所反映的水体营养盐和纯净度的改变,影响了沼泽湿地中 D/MP/Y/S1 类群的生长、演替和分布。这与在哈 尔滨同纬度的另一个城市湿地(呼兰河湿地)的研究得出的结论一致^[37]。pH 与浮游植物群落生态分布密切 相关,尤其是一些硅藻门种类^[38]。CCA 排序表明,MP/B 类群与 pH 呈现负相关,类群 MP(舟形藻属)为喜弱 碱藻种,类群 B 对 pH 升高比较敏感^[25],金河湾湿地整体 pH 值为 7.40—9.82 之间,均值 8.78,呈碱性状态,因 此 MP/B 类群在环境适应性中处于劣势。H1/J 类群在排序轴中呈现与 pH 正相关的趋势,但多位于坐标轴原 点附近,经分析,适度的 pH 可以促进部分类群藻类的生长,但湿地水体酸碱度过高时,有可能会限制大部分 藻类生长^[39]。综合来看,TN 是驱动金河湾湿地浮游植物功能类群生长选择机制的主要环境变量,而水体中

SpCond 浓度和 pH 值与功能类群演替过程密切相关。

水华束丝藻是引起我国淡水水华常见种之一,在水华过程中可产生碱类神经毒素^[26]。在本研究中,包含 水华束丝藻和固氮鱼腥藻的 H1 类群在秋季成为金湾湿地湖泊型水体中优势类群。以往的研究也认为水华 束丝藻易出现在营养水平较高的水体中^[7,26],虽然与杭州西湖 1981 年发生的束丝藻水华相比,本次研究中水 化束丝藻丰度较低,但当 TN 浓度>0.2 mg/L、TP 浓度>0.02 mg/L 时水体易出现富营养化,综合来看,金河湾 湿地水体未来可能存在富营养化的风险。城市湿地易受到人为活动干扰,导致湿地水体环境变化多样、生态 结构较为复杂^[13]。在浮游植物功能类群的划分过程中,每个类群不仅体现了浮游植物生态适应特点,还结合 了相应的环境特征^[9]。虽然以往对于浮游植物功能类群的生态研究多集中在湖泊和河流生态系统中^[11,24], 但在本研究中,金河湾湿地浮游植物功能类群的时空分布特征与水体某些环境变量(如 SpCond、pH 和 TN)变 化特点相匹配,因此通过分析城市湿地浮游植物功能类群季节间的演替,基本可以有效地反映浮游植物在湿 地生态系统中的生态位及对水环境变化做出的响应,并对未来环境的变化做出一定的预测。

参考文献(References):

- [1] Cardoso S J, Roland F, Loverde-Oliveira S M, de Moraes Huszar V L. Phytoplankton abundance, biomass and diversity within and between Pantanal wetland habitats. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2012, 42(3): 235-241.
- [2] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] 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.
- [4] Fang L, Wong P K, Lin L I, Lan C, 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.
- [5] Wondmagegne T, Wondie A, Mingist M, Vijverberg J. Seasonality in abundance, biomass and production of the phytoplankton of Welala and Shesher wetlands, Lake Tana Sub-Basin (Ethiopia). Journal of Water Resource & Protection, 2012, 4(10): 877-884.
- [6] Roy A, Sarkar D, Dutta S, Roy R, Mondal S, Roy M, Mitra A. Phytoplankton community of East Kolkata Wetlands as an indicator of the water quality. International Journal of Advanced Research, 2017, 5(4): 104-110.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G, Reynolds C S. Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement. Journal of Plankton Research, 2002, 24(9): 901-912.
- [11] Padisák J, Borics G, Fehér G, Grigorszky I, Oldal I, Schmidt A, Zámbóné-Doma Z. Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes. Hydrobiologia, 2003, 502(1/3): 157-168.
- [12] Sevindik T O, Çelik K, Naselli-Flores L. Spatial heterogeneity and seasonal succession of phytoplankton functional groups along the vertical gradient in a mesotrophic reservoir. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2017, 53: 129-141.
- [13] 封晓梅.《湿地公约》与我国的湿地保护[D].青岛:中国海洋大学, 2008.
- [14] 殷康前, 倪晋仁. 湿地研究综述. 生态学报, 1998, 18(5): 539-546.
- [15] 周俊. 苏州湿地公园藻类群落结构的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
- [16] 陆强,陈慧丽,邵晓阳,王莹莹,陶敏,何京,唐龙.杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系.生态学报,2013,33 (9):2803-2815.
- [17] 周芳菲. 基于 AHP 的哈尔滨金河湾湿地公园景观体验优化策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [18] 马婷慧. 哈尔滨金河湾湿地公园 POE 调查及优化策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] 林聪,李志国,梁庆宇,王影,范亚文.黑龙江省金河湾湿地藻类植物的初步研究.哈尔滨师范大学:自然科学学报,2015,31(4): 92-96.
- [20] 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.
- [21] 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.

- [22] Bao W M, Wang Q X, Reimer C W. Diatoms from the Changbaishan Mountain area. Bulletin of Botanical Research, 1992, 12(2): 125-143.
- [23] Rumrich, U., Lange-Bertalot, H. and Rumrich, M. 2000. Diatoms of the Andes from Venezuela to Patagonia/Tierradel Fuego. Icon. Diat. 9: 1

 673.
- [24] Xiao L J, Wang T, Hu R, Han B P, Wang S, Qian X, Padisák J. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. Water Research, 2011, 45(16): 5099-5109.
- [25] Reynolds C S. Ecology of Phytoplankton. Cambridge : Cambridge University Press, 2006.
- [26] 刘永梅, 刘永定, 李敦海, 沈银武. 氮磷对水华束丝藻生长及生理特性的影响. 水生生物学报, 2007, 31(6): 774-779.
- [27] Droop M R. Some thoughts on nutrient limitation in algae. Journal of Phycology, 1973, 9(3): 264-272.
- [28] Rochelle-Newall E J, Chu V T, Pringault O, Amouroux D, Arfi R, Bettarel Y, Bouvier T, Bouvier C, Got P, Nguyen T M H, Mari X, Navarro P, Duong T N, Cao T T T, Pham T T, Ouillon S, Torréton J P. Phytoplankton distribution and productivity in a highly turbid, tropical coastal system (Bach Dang Estuary, Vietnam). Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(11): 2317-2329.
- [29] Pavlou S P, Friederich G E, Macisaac J J. Quantitative determination of total organic nitrogen and isotope enrichment in marine phytoplankton. Analytical Biochemistry, 1974, 61(1): 16-24.
- [30] Paparazzo F E, Williams G N, Pisoni J P, Solís M, Esteves J L, Varela D E. Linking phytoplankton nitrogen uptake, macronutrients and chlorophyll- *a* in SW Atlantic waters: The case of the Gulf of San Jorge, Argentina. Journal of Marine Systems, 2017, 172: 43-50.
- [31] 秦伯强,杨桂军,马健荣,邓建明,李未,吴挺峰,刘丽贞,高光,朱广伟,张运林.太湖蓝藻水华"暴发"的动态特征及其机制.科学通报,2016,61(7):759-770.
- [32] Varnoosfaderani A M, Khoii J A, Rafiee G R. Investigating the effect of Biodrof systems based on algae-bacterial biofilm for removing total Nitrogen, Phosphorus from domestic wastewater. Journal of Aquatic Ecology, 2015, 4(4): 18-18.
- [33] 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.
- [34] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. Science Progress, 1960, 11: 150-170.
- [35] Flores L N, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy).
 Hydrobiologia, 1998, 369-370: 163-178.
- [36] Trebitz A S, Nestlerode J A, Herlihy A T. USA-scale patterns in wetland water quality as determined from the 2011 National Wetland Condition Assessment. Environmental Monitoring & Assessment, 2017.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Ter Braak C J F, Van Dame H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. Hydrobiologia, 1989, 178(3): 209-223.