

DOI: 10.5846/stxb201501080057

易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 徐鑫. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Yi Q T, Chen Q W, Zhao D H, Xu X. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the artificial lakes created by mining subsidence in Huainan coal mine areas. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子

易齐涛^{1,2}, 陈求稳^{3,*}, 赵德慧¹, 徐 鑫¹

1 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 南京水利科学研究院生态环境研究中心, 南京 210024

摘要: 在淮南矿区设置潘谢潘集站(PXPJ)、潘谢顾桥站(PXGQ)和潘谢谢桥站(PXXQ)等 3 个塌陷湖泊站点, 分别代表 3 种典型矿区湖泊水文生态条件, 于 2013—2014 年分 4 个季度采样并分析了 3 个湖泊浮游植物功能群组成、季节演替规律及其与环境和生物因子的关系。结果显示, 3 个湖泊的浮游植物种类可归入 16 个功能群, 其主要优势功能群反映了小型富营养化湖泊水体的生境特征。PXPJ 春季 S1、X2 和 Y 为主要优势功能群, 分别以伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、具尾蓝隐藻(*Chroomonas caudata* Geitler)和卵形隐藻(*Cryptomonas ovata* Ehr.)为代表种属, 随后 3 个季节 C 为第 1 优势功能群, 以链形小环藻(*Cyclotella catenata*)为代表物种。PXGQ 春夏秋 3 个季节中均以伪鱼腥藻为代表的 S1 功能群占绝对优势地位, 冬季向 C(以链形小环藻为代表)和 D(以尖针杆藻为代表)为主的功能群演替。PXXQ 春季 X2 和 Y 为主要优势功能群, 分别以具尾蓝隐藻和卵形隐藻为代表, 夏秋季以伪鱼腥藻为代表的 S1 功能群占据优势地位, 冬季向 C(链形小环藻为代表)和 E(长锥形锥囊藻为代表)功能群为主的群落结构演替。水温和光照条件是驱动淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群季节演替的关键环境因子, 而营养盐和生物因素是导致 3 个湖泊功能群组成差异的重要原因。

关键词: 塌陷湖泊; 浮游植物; 功能群; 季节演替; 环境因子

Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the artificial lakes created by mining subsidence in Huainan coal mine areas

YI Qitao^{1,2}, CHEN Qiuwen^{3,*}, ZHAO Dehui¹, XU Xin¹

1 School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2 Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 CEER, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China

Abstract: Underground coal mining in the Huainan coal mine areas, Anhui, China, has created numerous small artificial lakes, which provide excessive water storage space as well as ecological benefits. Characterization of these freshwater ecosystems might have important implications on ecological rehabilitation and recovery in the mining areas. Phytoplankton community structure can provide important eco-environmental information in different habitats besides playing fundamental roles in trophic structures of the lake ecosystem. This study aimed to classify the phytoplankton community on the basis of functional groups (FGs), which has been reported to be more useful than the traditional taxonomic grouping methods for elucidating the ecological functions of phytoplankton. Three small lakes at the PXPJ, PXGQ, and PXXQ sites in Huainan

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2014M560127); 国家自然科学基金项目(51579001); 安徽省大学生创新创业计划训练项目(201310361126)

收稿日期: 2015-01-08; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@rcees.ac.cn

Panxie coal mine areas were selected as representative research sites considering their ecological conditions, and the phytoplankton community structure and water quality at these sites were assessed from 2013 to 2014. Next, the seasonal succession of phytoplankton FGs related to the biotic and abiotic factors in the three lakes was analyzed. The three lakes have different nutrient contents and levels. The lake at PXPJ is permanently connected with a local river that drains into the lake; thus, it has high nutrient concentration, with an annual average concentration of 0.10 mg/L of total phosphorus (TP) and 1.69 mg/L of total nitrogen (TN). The lake at the PXXQ site has the highest TN concentration of 2.81 mg/L due to seasonal drainage from a local polluted river. The lake at the PXGQ site has the lowest TN concentration of 0.91 mg/L, because it is not connected to any rivers. Moderate amount of phosphorus was detected at the PXGQ and PXXQ sites, with mean values of 0.075 mg/L and 0.045 mg/L, respectively. However, the trophic state index for the three lakes was meso-eutrophic and did not vary considerably across the three lakes. In all, 16 FGs were identified, 11 of which were predominant groups, representing features of typically eutrophic habitats in small lakes. At the PXPJ site, FGs of S1, X2, and Y sites were predominant in spring, with *Pseudanabaena* sp., *Chroomonas caudata* Geitler, and *Cryptomonas ovata* Ehr. as representative species, respectively, whereas C (*Cyclotella catenata* as a representative) was the first predominant group in summer, autumn, and winter. At the PXGQ site, S1 with *Pseudanabaena* sp. as a representative was predominant in spring, summer, and autumn, which was then replaced by FGs of C (*Cyclotella catenata* as a representative) and D (*Synedra acus* Kützing as a representative). At the PXXQ site, FGs of X2 and Y were the predominant groups in spring, which were succeeded by S1 group in summer and autumn, and then replaced by C (*Cyclotella catenata* as a representative) and E (*Dinobryon bavaricum* Imhof as a representative) in winter. Light and temperature were identified as the key environmental factors driving seasonal succession of phytoplankton FGs at the three lakes by using canonical correlation analysis. Nutrient and grazing pressure on phytoplankton could be the main causes for the differences in the community structure among the three sites.

Key Words: artificial lakes by mining subsidence; phytoplankton; functional groups; seasonal succession; environmental factors

淮南矿区由于特定水文地质条件,煤炭资源持续大规模开采导致了大面积的土地沉陷和积水,形成了大量以小型塌陷湖泊为主的水生态景观,其水资源储备和利用对区域社会、经济和环境的可持续发展意义重大^[1]。塌陷湖泊生态系统结构完整与功能健康是矿区水资源可持续利用的基础,浮游植物是水生态系统的初级生产者,在生态系统的能量流动和物质循环功能中占据基础性地位,其群落结构和演替规律对水体生境特征具有重要的指示作用。因此,浮游植物相关研究在湖泊生态学中具有十分重要的意义^[2-4]。

淮南矿区内塌陷湖泊水文生态条件及人为影响各异,水质和营养状况差异较大^[5],从而导致浮游植物群落结构不同湖泊水体中出现较大差异^[6-8]。此前矿区塌陷湖泊浮游植物调查研究分析一般都是基于传统的分类法进行,该方法能够在一定程度上反映浮游植物群落结构组成及变化,但不能更精确描述浮游植物的生态学功能^[9]。浮游植物功能群分类方法是以形态、生理、生态特性为基础,将具有相似环境适应性的浮游植物归为一类,能够很好对应浮游植物与生境之间的关系,在水环境生态学及水质管理领域显示出良好的应用前景^[10-12],在流域河流水系^[13-14]、湖泊湿地^[15-16]、分层水库^[17-19]等不同类型水生态系统中均有相关报道。本研究将以传统的分类法为基础,结合功能群分类方法对淮南矿区不同类型塌陷湖泊中浮游植物群落结构信息进行表征,分析优势功能类群与环境因子之间的关系,揭示其在不同环境和生物因素影响下浮游植物群落结构特征与演替规律,为深入理解这一类型水生态系统结构与功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与湖泊站点

研究区域为淮南潘谢矿区,其位于安徽省淮河北岸的冲击平原,矿区东西长近 58 公里,南北宽 6—25 公里,面积约 865 平方公里,是淮南井田分布最为密集、沉陷积水规模最大的矿区。矿区内天然河道主要有西淝

河、港河、黑河、济河、泥河和架河,人工河道有永辛河,均由西北向东南流入淮河。在矿区的东、中、西部诸多沉陷区水域内各选 1 个代表性的小型塌陷湖泊为研究站点,分别由潘一矿、顾桥矿和谢桥矿采煤沉陷而形成,3 个湖泊站点命名为 PXPJ、PXXQ 和 PXXQ。

其中 PXPJ 塌陷湖泊和泥河联通,常年接纳泥河径流,PXXQ 塌陷湖泊,为封闭型水体,和矿区河流没有水力学联系,而 PXXQ 塌陷湖泊则主要通过节制闸与其南边的济河联通,在汛期接纳济河季节性引水,水位波动较大。3 个湖泊均为失地农民进行渔业活动,但无饵料添加和肥料投放,利用外界输入的营养元素提供生态系统的初级生产和渔业生产,主要投放鱼苗为鲢鳙鱼。因此,3 个湖泊站点代表了淮南矿区不同类型小型塌陷湖泊水体的 3 种典型生态环境条件,各站点具体信息如表 1 所示。

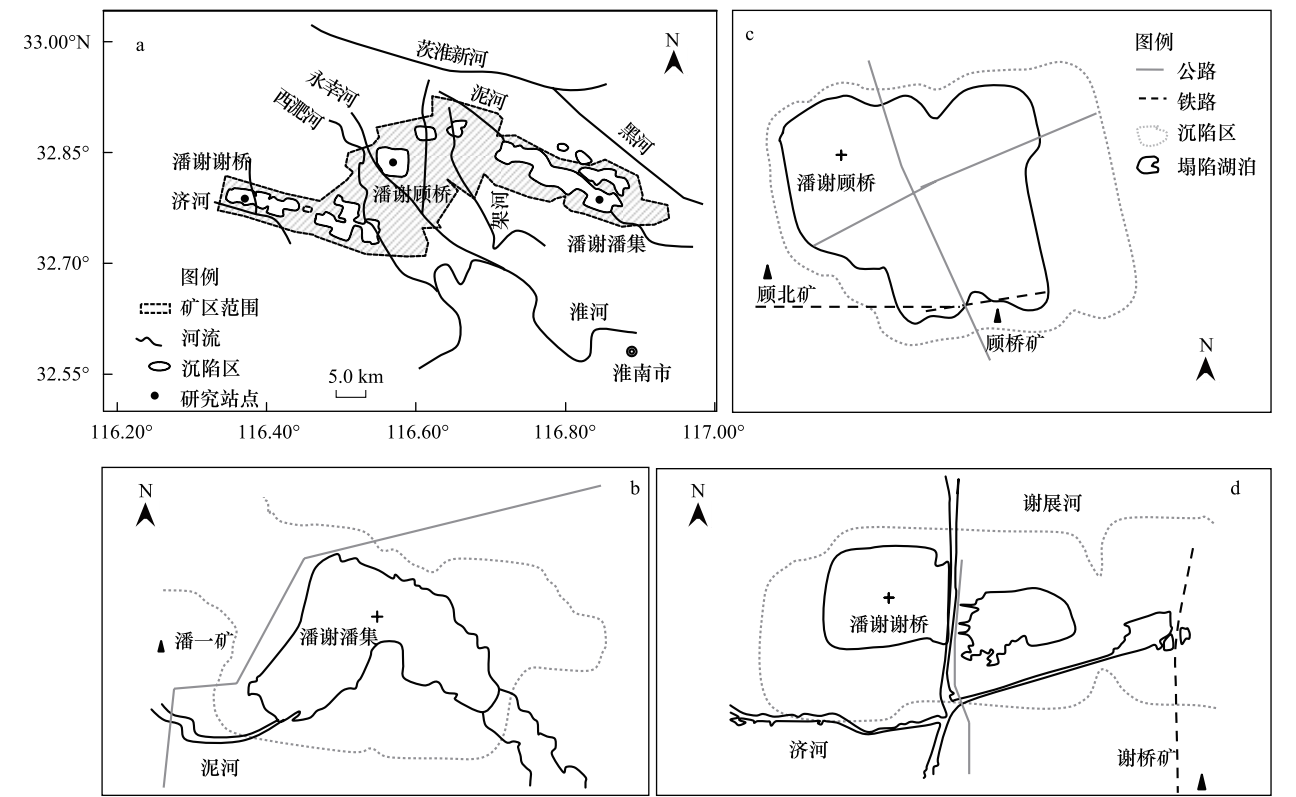


图 1 淮南潘谢矿区内沉陷区、河流水系及研究站点分布示意

Fig.1 Distribution of local rivers, subsidence areas and research sites in the Huainan Panxie coal mine areas

PXPJ 表示潘谢潘集站点;PXXQ 表示潘谢顾桥站点;PXXQ 表示潘谢谢桥站点

表 1 研究选取的 3 个塌陷湖泊水体主要特征

Table 1 Summary for features of the three studied artificial lakes						
站点 Site	面积 Area/km ²	深度 Depth/m	容积 Volume/10 ⁴ m ³	形成年龄 Formation age/a	联通状况 Connection with rivers	环境状况 Surrounding environments
PXPJ	3.5	4.7	1645	20	和泥河常年联通	河流输入、农业面源
PXXQ	10.0	5.4	5400	5	相对封闭	农业面源
PXXQ	4.0	6.8	2720	15	济河季节性联通	河流输入农业面源

PXPJ 表示潘谢潘集站点;PXXQ 表示潘谢顾桥站点;PXXQ 表示潘谢谢桥站点

1.2 水样、浮游生物样品采集与分析

浮游生物样品分 2013—2014 年的夏、秋、冬、春 4 个季度进行。2013 年夏季 PXPJ、PXXQ 和 PXXQ 等 3 个站点具体采样时间分别为 7 月 2 日、7 月 25 日和 7 月 11 日;秋季分别为 10 月 21 日、9 月 25 日和 10 月 19 日,冬季分别为 12 月 17 日,2013 年 12 月 27 日和 12 月 27 日;2014 年春季 3 个站点采样时间分别为 4 月 20

日、5月6日和5月15日。采样时间不同使得部分季节温度存在一定的差异。浮游植物和浮游动物定性样品分别用25号和13号浮游生物网采集,定量样品用5L采水器根据水深在上、中、下层采集,浮游植物混合样品后装入1L采集瓶后加入10%的鲁哥氏液固定,甲壳类浮游动物样品混合后用25号浮游生物网过滤后加5%的福尔马林固定。浮游生物样品鉴定分析参照相关的手册和研究方法^[20-21]。

和采集浮游生物样品同步采集水质样品,水质调查及分析指标包括:水温(Tem)、透明度(SD)、电导率(EC)、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD_{Cr})、碱度(ALK)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chla)。其中Tem、pH、DO和pH用水质参数仪(DO200和pH100,YSI公司)、SD用赛氏盘、EC用电导率仪现场进行测定。水质分析方法主要参照国家相关标准进行^[22],具体指标使用方法分别为:ALK用酸碱指示剂滴定法、TN用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、TP用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法、COD采用重铬酸钾法、Chla用分子荧光法分析测定。湖泊营养状态综合指数(TSI)根据同相关文献^[5]。

1.3 数据分析

采用优势度指标 Y 确定优势物种,其计算公式为: $Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$ 。其中 Y 为优势度, n_i 为样品中第 i 种浮游植物的个体数, N 为样品中浮游植物总个体数, f_i 为第 i 种浮游植物在各样点出现的频率,当 $Y \geq 0.02$ 时的物种为优势种。首先根据Padisák等确定的^[12]浮游植物功能类群分类方法对浮游植物进行功能类群划分,根据各功能群所有物种的细胞密度之和的百分比率大于5%的标准确定优势功能群。优势功能群与环境因子的关系采用Canoco 4.5软件进行分析,首先对数据进行去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)以检验其第一轴的梯度长,如果梯度长大于3,选择典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),否则进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)分析。在分析过程中通过蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo Permutation test)对环境变量进行自动筛选,最后作出优势功能群与环境因子的排序图^[23]。

2 结果与分析

2.1 三个塌陷湖泊水质特征

3个湖泊4个季度调查期间水温范围在5.7—32.0℃之间,pH在7.68—9.18之间,透明度最低约为0.5m,最高达1.0m,均具有较大的变化范围,可以满足生物与环境因子相关分析所需的环境梯度(见表2)。

由于3个湖泊面积、深度等物理环境相似,生境差异主要体现营养盐含量和结构的差异上(图2)。PXPJ常年受纳泥河污染负荷,其水体TN、TP浓度较高,二者年均值为1.68 mg/L和0.10 mg/L,分别超过或接近IV类水质标准。济河高浓度氮输入使PXXQ湖泊水体中TN年均浓度均超过V类水质标准,春季更是高达5 mg/L以上,而TP平均浓度仅为0.045 mg/L,略低于III类水质标准。封闭湖泊PXGQ中TN年均浓度略低于3类水质标准,TP均值为0.075 mg/L,介于III—IV水体之间。PXXQ湖泊Chla浓度明显高于其他两个站点,和浮游植物丰度一致,但3个湖泊营养状态指数差别不大,分别为65,62和64,均处于中度富营养化状态,表现为水体DO浓度较高而SD较低。3个湖泊站点Chla浓度和浮游植物细胞密度具有明显的季节变化特征,即生长较高而冬季最低,PXXQ站点要高于PXPJ和PXGQ站点。

2.2 浮游植物物种组成、功能群特征与季节变化

3个湖泊4个季度调查期间观察到浮游植物共计7门9纲18目34科70属131种,其中绿藻门种类最多,共59种,占浮游植物总种数的45.0%;其次是蓝藻,共24种,占浮游植物总种数18.3%;硅藻22种,占浮游植物总种数16.8%;裸藻14种,占浮游植物总种数10.7%;甲藻7种,占浮游植物总种数5.3%;隐藻3种,占浮游植物总种数2.3%,金藻2种,占浮游植物总种数1.5%。如附表1所示,PXPJ春季第1主要优势种为具尾蓝隐藻(*Chroomonas caudata* Geitler),夏季、秋季和冬季第1主要优势种均为链形小环藻(*Cyclotella catenata* (Brun) Bach.);PXGQ春夏秋季第1优势种均为伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.),冬季则为链形小环藻;PXXQ第1主要优势种在春季为具尾蓝隐藻,夏秋季为伪鱼腥藻,冬季则为链形小环藻。

表 2 PXPJ、PXGQ 和 PXXQ3 个研究湖泊水体水质指标
Table 2 Water quality in the three studied small artificial lakes at Site PXPJ, PXGQ and PXXQ

水质指标	PXPJ				PXGQ				PXXQ			
	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.
Water quality												
Tem /℃	18.5 ± 0.1	29.0 ± 0.2	24.1 ± 0.2	9.0 ± 0.2	21.6 ± 0.2	31.7 ± 0.3	27.8 ± 0.3	6.3 ± 0.3	23.4 ± 0.2	32.0 ± 0.3	21.5 ± 0.1	5.7 ± 0.1
EC / (μS/cm)	768 ± 25	1069 ± 16	462 ± 16	576 ± 27	406 ± 9	558 ± 6	489 ± 19	379 ± 2	730 ± 25	970 ± 6	663 ± 10	606 ± 2
SD /cm	72 ± 5	80 ± 5	88 ± 6	78 ± 6	58 ± 3	66 ± 4	62 ± 8	88 ± 3	59 ± 7	54 ± 5	63 ± 5	100 ± 5
pH	8.17 ± 0.03	8.51 ± 0.22	7.96 ± 0.23	7.68 ± 0.07	8.59 ± 0.27	8.28 ± 0.08	8.53 ± 0.16	8.14 ± 0.02	8.34 ± 0.09	9.18 ± 0.59	7.87 ± 0.18	7.95 ± 0.03
DO / (mg/L)	7.19 ± 0.17	8.46 ± 0.97	8.58 ± 0.48	8.66 ± 0.16	11.79 ± 0.45	7.51 ± 0.25	10.36 ± 1.09	12.32 ± 0.33	9.94 ± 0.64	10.49 ± 0.38	5.98 ± 0.54	10.12 ± 0.17
TSS / (mg/L)	14.6 ± 1.8	8.9 ± 2.0	5.6 ± 1.5	8.1 ± 1.6	14.9 ± 1.4	12.1 ± 2.0	9.8 ± 0.5	3.3 ± 0.5	11.8 ± 1.8	16.8 ± 2.9	2.5 ± 1.0	4.1 ± 1.9
COD _{Cr} / (mg/L)	26.0 ± 2.1	31.5 ± 0.9	28.2 ± 2.0	15.3 ± 7.8	23.8 ± 1.2	29.6 ± 2.2	27.4 ± 1.5	17.9 ± 2.4	21.4 ± 1.8	27.1 ± 2.3	21.6 ± 2.5	26.6 ± 9.5
ALK. / (mg/L)	230.0 ± 9.0	191.7 ± 3.9	157.1 ± 3.2	201.3 ± 5.3	152.8 ± 3.2	163.8 ± 1.9	152.5 ± 5.2	173.9 ± 8.1	203.2 ± 2.1	146.1 ± 3.3	192.2 ± 5.8	205.2 ± 1.7

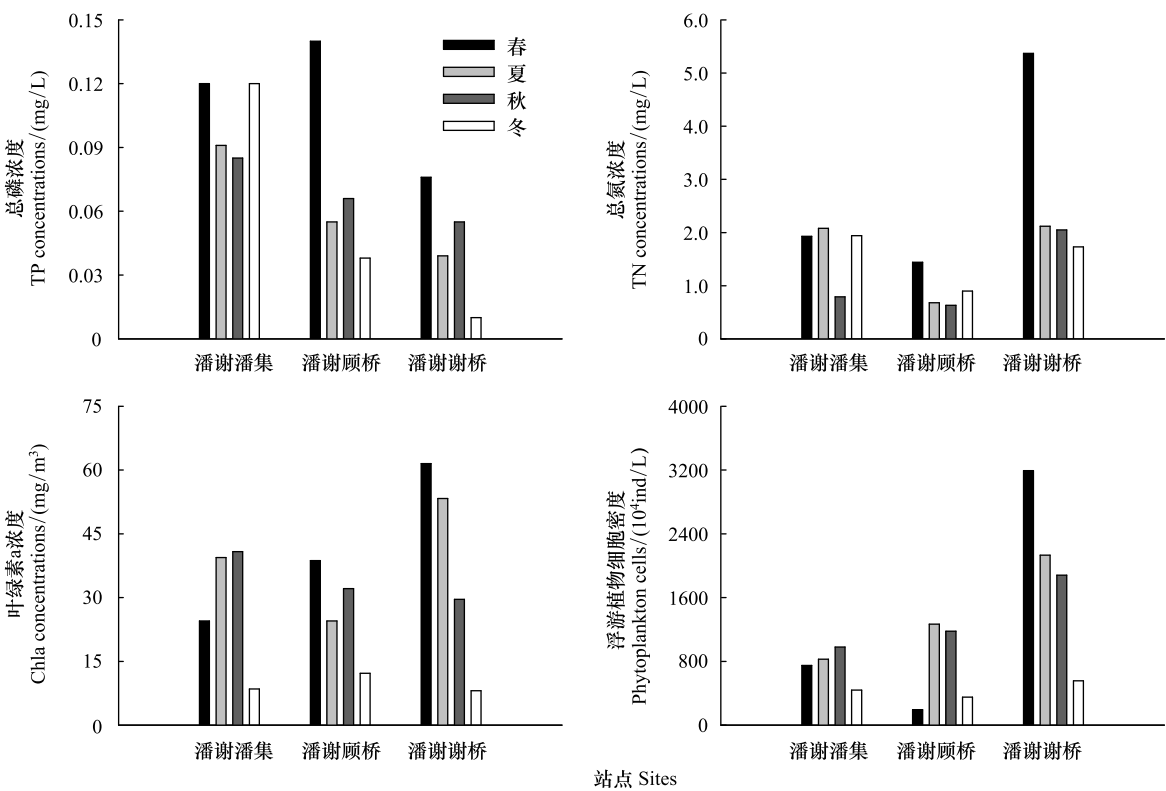


图2 PXPJ、PXGQ 和 PXXQ 3 个研究湖泊水体总磷 (a)、总氮 (b)、叶绿素 a (c) 浓度和浮游植物细胞密度 (d) 的季节分布

Fig.2 Seasonal distribution for concentrations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and chlorophyll a, and phytoplankton cell density in the three studied artificial lakes at Site PXPJ, PXGQ and PXXQ

3 个湖泊 4 个季度样品中出现的物种可以归入到 16 个功能群,分别为 C、D、E、F、H1、J、Lo、M、P、S1、S_N、W1、X1、X2、X3 和 Y,其中 11 个优势功能群及其所反映的生境特征见表 3。

表3 PXPJ、PXGQ 和 PXXQ 3 个研究湖泊中浮游藻类功能群组成及其所反映的生境特征

Table 3 Functional groups of phytoplankton and their representative habitats in the three studied artificial lakes at Site PXPJ, PXGQ and PXXQ

代码 Condon	代表类群 Typical representatives in this research	生境 Habitats/耐受性 Tolerance/ 敏感性 Sensitivity ^[11-12]
C	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach.	混合、富营养化的中小型湖泊/弱光,碳缺乏/低硅及分层
	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	
D	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing	河流在内浅的浑浊的水体/冲刷/低营养盐
	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> Ehrenberg	
E	长锥形锥囊藻 <i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof	寡营养型小型浅水湖泊或非自养的池塘/低营养盐/碳缺乏
J	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i> (Turp.) Lagerheim	浅水、混合型富营养水体/-/弱光
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Brébisson	
	四星藻属 <i>Tetrastrum</i> Chod.	
	四刺顶棘藻 <i>Chodatella quadriseta</i> Lemm	
Lo	坎宁顿多甲藻 <i>Peridinium cunningtonii</i> Lemm	寡营养型到富营养型,大中型深水或浅水湖泊/低营养/深层混合
	色球藻属 <i>Chroococcaceae</i> Nägeli. Elenkin	
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> Corda	
M	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing	富营养到高度富营养中小型湖泊/高度隔离/频繁扰动、弱光
P	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> (Ehr.) Ralfs	富营养化水体温跃层/弱光及低碳/分层及低硅
	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> O.Müller	

续表		
代码 Condon	代表类群 Typical representatives in this research	生境 Habitats/耐受性 Tolerance/ 敏感性 Sensitivity ^[11-12]
S1	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. 席藻属 <i>Phormidium</i> Kützing	均匀浑浊水体的混合层/弱光/冲刷
X1	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck 镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> (Cord.) Ralfs 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> .sp	富营养化的浅水环境/分层/低营养、虑食
X2	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler 衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg	中度富营养化水体/分层/混合及虑食
Y	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. 嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr.	小型富营养化湖泊/弱光/牧食

从具体站点来看,3 个湖泊功能群具有较大的相似性,C、M、S1 和 Y 这 4 个优势功能群在 3 个站点中均有出现,分别以链形小环藻、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* Kützing)、伪鱼腥藻、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata* Ehr.)为代表性物种,主要适应富营养化湖泊生境,PXGQ 和 PXXQ 功能群组成较为单一而 PXPJ 站点功能群组成相对复杂且分布较为均匀(图 3)。PXPJ 在春季 S1、X2 和 Y 优势功能群为主,分别以伪鱼腥藻、具尾蓝隐藻和卵形隐藻为代表种属,随后 3 个季节均以 C 为第 1 优势功能群,以链形小环藻为代表物种。PXGQ 春夏秋 3 个季节中 S1 功能群(以伪鱼腥藻为代表)占绝对优势地位,冬季向 C 和 D(以尖针杆藻为代表)为主的功能群演替。PXXQ 春季 X2 和 Y 为优势功能群,分别以具尾蓝隐藻和卵形隐藻为代表,夏秋 2 个季节以伪鱼腥藻为代表的 S1 功能群占据优势地位,冬季向 C(链形小环藻为代表)和 E(长锥形锥囊藻为代表)为主的群落结构演替。

2.3 浮游植物功能群与环境因子的关系

DCA 分析结果显示第一梯度长为 3.51,所以继续采用 CCA 进行相关性分析(图 4),结果显示第一轴和第二轴的特征值分别为 0.707 和 0.434,能够解释属种与环境因子累计方差的 72.2%。从 CCA 分析图中可以看出,与轴 1 相关性较强的环境因子主要有 SD、Tem 和 pH,相关系数分别为 0.813、-0.674 和 -0.561,其中 SD 和 Tem、pH 呈负相关。而与轴 2 相关性较强的环境因子为 TN 和 TP,其中和 TN 相关系数为 -0.645。甲壳类浮游动物丰度和 Tem 呈正相关。

尽管 D、X1、E 和 C 功能群与 SD 呈正相关,但除 E(以长锥形锥囊藻为代表物种)可能在透明度较高水体生境中具有较好适应性外,C、D 和 X1 均能耐受弱光环境,可能主要适应于低温的环境,表现为和 Tem 的负相关,在冬季浮游植物功能群群落结构中体现尤为明显。X2 和 Y 功能群与 TN 和 TP 正相关,分别以隐藻门中的具尾蓝隐藻和卵形隐藻为代表物种,春季 PXPJ 和 PXXQ 两个湖泊隐藻丰度较高。一方面,河流输入为湖泊带来了丰富的营养盐元素,使得隐藻生长迅速,另一方面,水温偏低的春季浮游动物捕食压力较小也可能使得其在群落结构中占据优势地位。S1 和 J 功能群与 pH 和水温 Tem 呈正相关,和 SD 成负相关,表明这两个功能群适应透明度低和水温较高的水环境特征,特别是夏秋季 S1 功能群在 PXGQ 和 PXXQ 浮游植物群落结构占据绝对优势地位。生物因子中,枝角类浮游动物(Cladocera)丰度同 X2 和 Y 功能群正相关,而桡足类浮游动物(Copepods)丰度同 S1 和 J 功能群正相关。

3 讨论

浮游植物功能群分类方法是根据大量温带湖泊生态系统研究而提出,尤其适用于小型湖泊或水库类水体^[24]。从研究结果可以看出,功能群分类方法大幅度简化了淮南矿区采煤塌陷湖泊中浮游植物群落结构信息和季节演替特征,比较准确的反映了小型富营养化湖泊的生境特征。Winder *et al.*^[25] 和 Wirtz *et al.*^[26] 等相关研究结果指出地理气候对浮游植物物种影响明显,但对功能群影响较小,研究中 3 个塌陷湖泊中有许多共有的指示富营养化生境的功能群即体现了此类特征。此外,功能群代表性物种也较为相似,如链形小环藻、具尾蓝隐藻、卵形隐藻、伪鱼腥藻等均以优势种在 3 个湖泊中出现,更加充分指示出这些塌陷湖泊基本生境的相

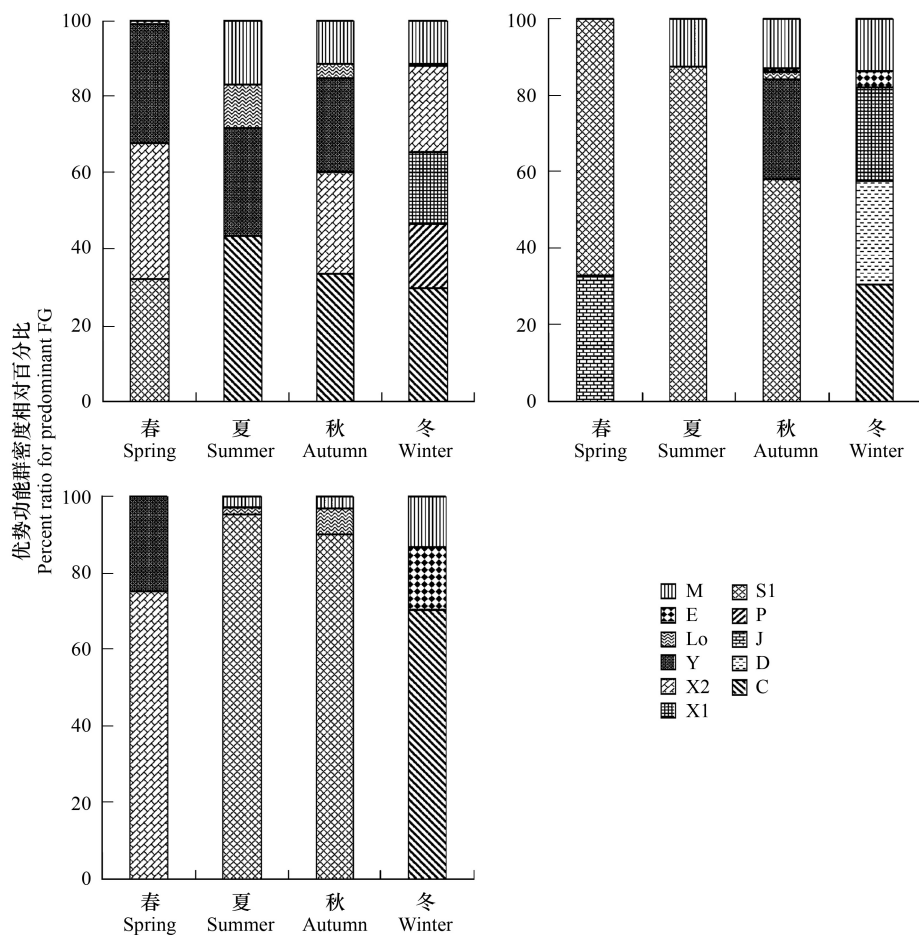


图3 PXPJ (a)、PXGQ (b)、PXXQ (c) 3个湖泊浮游植物优势功能类群组成与季节变化

Fig.3 Composition and seasonal changes of the dominant functional groups of phytoplankton in the three studied artificial lakes at Site PXPJ (a), PXGQ (b) and PXXQ (c)

似性:同一地理气候特征条件下小型塌陷湖泊面积、深度相似且均处于中度富营养化状态。

然而,短时间尺度内浮游植物群落结构组成及变化则其受他物理、化学或生物因素的影响,通常受“上行效应”和“下行效应”两种机制调控,从资源限制的角度看,浮游植物生长及群落结构受到营养盐、水温、光照、碳源等环境因子的影响,从营养级角度看,其受浮游动物或鱼类等捕食者的影响,消费者通过直接捕食或间接的营养盐循环影响浮游植物群落结构,不同因子在不同生态系统中均可能成为控制浮游植物生长、群落结构组成与演替的关键因素^[27-28]。和其他湖泊较为相似^[29-30],水温和光照是驱动淮南煤矿塌陷湖泊浮游植物功能群季节演替的关键环境因子,而3个湖泊异同主要体现在影响营养盐和生物因子上。营养盐是湖泊生态系统中重要的生源要素,也是导致水体富营养化的根本原因所在,其含量和比率结构对浮游植物生物量、生产力与群落结构有着直接的影响^[27]。在营养盐含量较高的富营养化湖泊中,浮游植物生物量通常会导致光因子的限制,耐受低光环境的浮游植物类群通常会占据优势地位^[31],3个塌陷湖泊水体处于富营养化状态,认定的优势功能群均具有对弱光环境的耐受特征,除冬季外,3个湖泊水体氮磷平均浓度超过 III 类水质标准,Chla 浓度高于 20 mg/m^3 ,特别是蓝绿藻在浮游植物群落结构中占据较大比率,其中 PXPJ 湖泊蓝绿藻种类占所有物种比率年均值为 59.0%,而 PXGQ 和 PXXQ 则高达 70.0%和 70.6%。此外,营养盐比率对浮游植物群落结构影响报道较多,如 Smith^[32]提出蓝藻水华发生的氮磷比学说,即在一定条件下($\text{TN}:\text{TP}>29$)蓝藻生物量与氮磷比成负相关关系,Hakanson *et al.*^[33]对 83 个湖泊水体的统计分析中将这一比值范围扩展至 $\text{TN}:\text{TP}>40$ 。PXGQ 湖泊无机氮缺乏,低氮磷比使其初级生产受氮元素限制^[34],在营养盐浓度较低的情况下,可能成

为生长季丝状蓝藻在其中占据优势地位的重要原因。从生物因素来看,相关研究表明“下行效应”可能对“贫-中营养”湖泊的作用更加重要,而富营养湖泊中“上行效应”更为突出,因为两类系统中浮游植物粒径对浮游动物的捕食存在较大的影响^[31, 35-36],塌陷湖泊中的丝状蓝藻在缺乏有效捕食的情况下易于占据统治地位。基于上述原因,3个塌陷湖泊浮游植物群落结构组成及演替规律可以总结如下:

春季来临时,PXPJ 和 PXGQ 营养盐丰富,在水温偏低的情况下捕食者压力相对较小,静水中隐藻类功能群(X2 和 Y)生长迅速而在群落结构中占有优势地位,由于采样时间不同,PXPJ 水体温度仅为 18℃,而 PXXQ 温度达到 23℃,捕食者开始大批出现,甲壳类浮游动物密度可达 310 ind/L(图 5c),表现为隐藻类功能群同枝角类浮游动物丰度的正相关性(图 4),而此时水温较低的 PXPJ 和 PXGQ 水体中甲壳类浮游动物密度仍然较低。夏秋季水温升高,浮游植物生物量迅速增加(图 2),适应高温和低光环境(由浮游植物自遮光效应所产生)的丝状蓝藻在 PXGQ 和 PXXQ 中迅速占据绝对优势地位,其具有抵御浮游动物捕食的形态特性,甲壳类浮游动物中大型枝角类丰度较小而小型桡足类浮游动物占据优势,表现为桡足类同丝状蓝藻的正相关(图 4)。但 PXPJ 中以隐藻、硅藻类代表的功能群为主,这可能与生物滤食有关,经现场调查,渔民为提高鱼类产量每年向 PXPJ 湖泊投放有大量的鲢鳙鱼苗,可能给丝状蓝藻和甲壳浮游动物带来了较大的滤食压力并显著降低了它们的丰度(图 5a)。进入冬季后,水温降低,硅藻代表的功能群在 3 个湖泊浮游植物群落结构中占据优势地位。

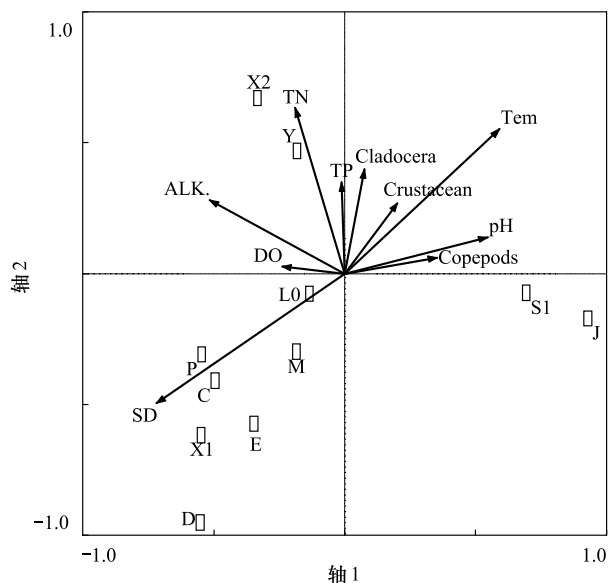


图 4 浮游植物功能群与环境因子的 CCA 分析

Fig.4 CCA bi-plot for functional groups of phytoplankton and environmental factors

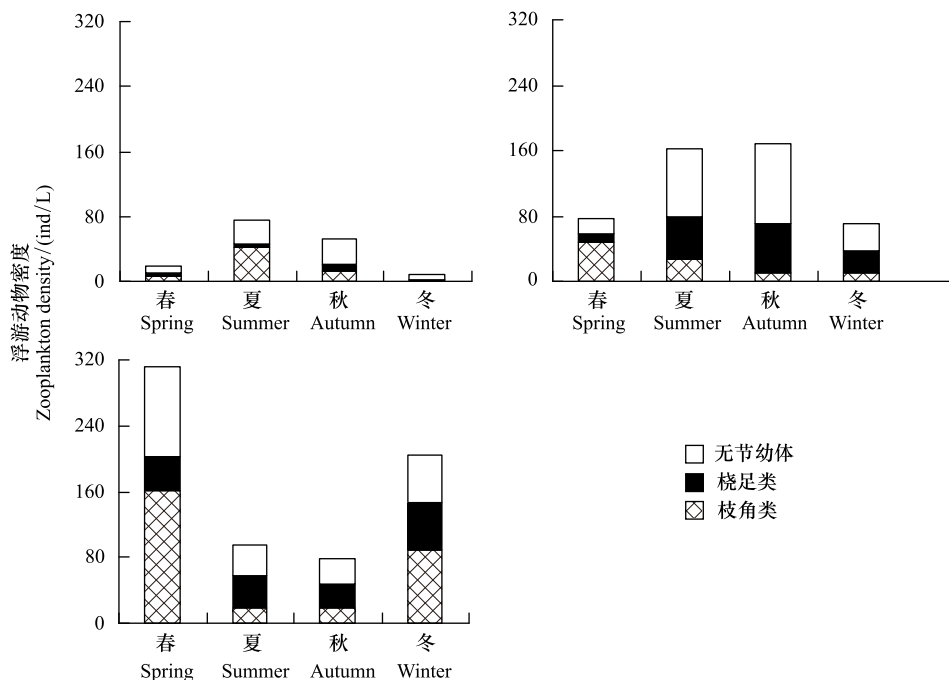


图 5 PXPJ(a)、PXGQ(b) 和 PXXQ(c) 3 个研究湖泊中甲壳类浮游动物密度季节动态

Fig.5 Seasonal distribution of crustacean zooplankton density in the three studied artificial lakes at Site PXPJ (a), PXGQ (b) and PXXQ (c)

值得指出的是,由于采样频率和时间影响较大,4个季度调查只能初步确定浮游植物功能群的季节演替特征,不同季节出现了一些功能群的重叠,而浮游生物群落快速交替的特征也未能得以明显体现,后续研究中,需要进一步加大采样频率(如采集月样品),加强对优势功能群代表性物种的生理、生态特征或生长动力学方面的研究,使塌陷湖泊生态系统结构与功能的研究更加深入。

4 结论

(1)淮南矿区3个塌陷湖泊4个季度调查期间观察到浮游植物共计7门131种,分属于16个功能群,其中优势功能群有11个,从功能群适应的生境来看,均体现了小型富营养化湖泊的典型特征,和富营养化评价指数的结果一致,在同一地理气候条件下,3个湖泊浮游植物优势功能群和代表物种组成较为相似。

(2)3小型塌陷湖泊水交换条件和营养负荷模式差异较大,从而造成湖泊氮磷含量与比率的显著差别,加上生物因子和季节温度影响,从而导致3个湖泊浮游植物群落结构组成及演替规律明显不同。春季来临时,氮磷浓度较高PXPJ和PXXQ湖泊中隐藻所代表的功能群生长迅速,在水温较低的情况下捕食压力较小,使其在群落结构中占据优势地位,而营养盐含量和氮磷比率均较低的PXCQ湖泊中丝状蓝藻所代表的S1功能群占据优势地位。夏秋季水温升高,丝状蓝藻在PXXQ和PXXQ湖泊生长迅速,其抵御浮游动物捕食的特性使其在群落结构中占据绝对优势地位,而PXPJ湖泊由于滤食性鱼类的作用,丝状蓝藻和甲壳类浮游动物丰度均较小,单细胞藻类代表的功能群占据优势地位。随着冬季水温下降,3个湖泊均向以C为第1优势功能群的群落结构演替,以链型小环藻为代表种属。

参考文献 (References):

- [1] 易齐涛,孙鹏飞,谢凯,曲喜杰,王婷婷. 区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究. 环境科学, 2013, 34(10): 3864-3903.
- [2] 李钦钦,邓建才,胡维平,胡柳明,高峰,朱金格. 太湖金墅湾水源地浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1844-1850.
- [3] 胡芳,许振成,姚玲爱,陈晓燕,马千里,张杏杏,王丽,赵学敏. 剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究. 环境科学学报, 2014, 34(4): 950-958.
- [4] 孟睿,何连生,过龙根,席北斗,李中强,舒俭民,刁晓君,李必才. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. 环境科学, 2013, 34(7): 2588-2596.
- [5] 曲喜杰,易齐涛,胡友彪,严家平,喻怀君,董祥林. 两淮采煤沉陷积水区水体营养盐时空分布及富营养化进程. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3249-3258.
- [6] 徐鑫,易齐涛,王晓萌,李慧,章磊. 淮南矿区小型煤矿塌陷湖泊浮游植物群落结构特征. 水生生物学报, 2015, 39(4): 740-750.
- [7] 王晓萌,易齐涛,徐鑫,李慧,章磊. 淮南采煤沉陷区内小型塌陷湖泊轮虫群落结构特征. 湖泊科学, 2015, 27(4): 657-666.
- [8] 邓道贵,孟小丽,雷娟,张赛,杨威,金显文. 淮北采煤塌陷区小型湖泊浮游植物群落结构和季节动态. 生态科学, 2010, 29(6): 499-506.
- [9] 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.
- [10] 杨文,朱津永,陆开宏,万莉,毛小华. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1833-1840.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 董静,李艳晖,李根保,李耀迪,刘永定,宋立荣. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子. 水生生物学报, 2013, 37(5): 836-843.
- [14] 刘足根,张柱,张萌,方红亚,弓晓峰. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 375-384.
- [15] 武安全,郭宁,覃雪波. 寒区典型湿地浮游植物功能群季节变化及其与环境因子关系. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1341-1349.
- [16] 高健,周敏,闵婷婷,刘正文. 惠州西湖生态修复对浮游植物功能类群的影响. 生态科学, 2013, 32(5): 540-546.
- [17] 高国敬,肖利娟,林秋奇,胡韧,雷腊梅. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价. 生态科学, 2013, 32(2): 144-150.

- [18] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 韩博平. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较. 生态环境学报, 2012, 21(1): 107-117.
- [19] 黄亨辉, 胡韧, 雷腊梅, 彭亮. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征. 生态环境学报, 2013, 22(2): 311-318.
- [20] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [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] 尹航. 环境监测方法标准汇编: 水环境. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [23] ter Braak C J F, Verdonschot P F M. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. Aquatic Science, 1995, 57(3): 255-289.
- [24] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, Marcé R, Armengol J, Crossetti L O, Huszar V L M. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. Water Research, 2010, 44(11): 3345-3354.
- [25] Wirtz K W, Sommer U. Mechanistic origins of variability in phytoplankton dynamics. Part II: analysis of mesocosm blooms under climate change scenarios. Marine Biology, 2013, 160(9): 2503-2516.
- [26] Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate. Hydrobiologia, 2012, 698(1): 5-16.
- [27] Litchman E, de Tezanos Pinto P, Klausmeier C A, Thomas M K, Yoshiyama K. Linking traits to species diversity and community structure in phytoplankton. Hydrobiologia, 2010, 653(1): 15-28.
- [28] 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.
- [29] Mieleitner J, Borsuk M, Bürgi H R, Reichert P. Identifying functional groups of phytoplankton using data from three lakes of different trophic state. Aquatic Science, 2008, 70(1): 30-46.
- [30] Drake J L, Carpenter E J, Cousins M, Nelson K L, Guido-Zarate A, Loftin K. Effects of light and nutrients on seasonal phytoplankton succession in a temperate eutrophic coastal lagoon. Hydrobiologia, 2010, 654(1): 177-192.
- [31] Kalff J. 湖沼学: 内陆水生生态系统. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 译. 北京: 高等教育出版社, 2011: 334-335.
- [32] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. Science, 1983, 221(4611): 669-671.
- [33] Håkanson L, Bryhn A C, Hytteborn J K. On the issue of limiting nutrient and predictions of cyanobacteria in aquatic system. Science of the Total Environment, 2007, 379(1): 89-108.
- [34] Yi Q T, Wang X M, Wang T T, Qu X J, Xie K. Eutrophication and nutrient limitation in the aquatic zones around Huainan coal mine subsidence areas, Anhui, China. Water Science & Technology, 2014, 70(5): 878-887.
- [35] Langeland A. Biomanipulation development in Norway. Hydrobiologia, 1990, 200-201(1): 535-540.
- [36] Jeppesen E, Jensen J P, Jensen C, Faafeng B, Hessen D O, Søndergaard M, Lauridsen T, Brettum P, Christoffersen K. The impact of nutrient state and lake depth on top-down control in the pelagic zone of lakes: a study of 466 lakes from the temperate zone to the arctic. Ecosystems, 2003, 6(4): 313-325.

附表 1 PXPJ、PXGQ 和 PXXQ3 个湖泊水体中浮游植物优势种名录及优势度分布

Appendix Table 1 The dominant species of phytoplankton in the three studied small artificial lakes at Site PXPJ, PXGQ and PXXQ			
季节 Season	潘谢潘集站 Site PXPJ	潘谢顾桥站 Site PXGQ	潘谢谢桥站 Site PXXQ
春 Spr.	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.151)		
	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.137)		
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.132)		
	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> Ehrenberg (0.067)		
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.063)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.307)	
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i> (Ehr.) Ralfs (0.062)	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Brébisson (0.150)	
	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.060)	螺旋弓形藻 <i>Schroederia spiralis</i> (Printz.) Korschikoff (0.093)	
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.040)	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.079)	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.707)
	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.037)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.067)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.234)
	蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i> (Kirchn.) Moebius (0.036)	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.051)	
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> Corda (0.033)	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.036)	
	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.028)	四星藻属 <i>Tetrastrum</i> Chod. (0.033)	
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Brébisson (0.024)	拟尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuropsis</i> (0.022)	
	小型月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i> (Näg.) Collinus (0.023)		

续表

季节 Season	潘谢潘集站 Site PXPJ	潘谢顾桥站 Site PXGQ	潘谢谢桥站 Site PXXQ
夏 Sum	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.193)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.379)	
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.128)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.055)	
	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.090)	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.055)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.574)
	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.088)	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.051)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.067)
	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.076)	固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i> Ley. (0.047)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.033)
	色球藻属 <i>Chroococcus</i> (Näg.) Elenkin (0.050)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.036)	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.025)
	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.045)	席藻属 <i>Phormidium</i> Kützing (0.027)	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.022)
秋 Aut.	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.025)	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i> O.Müller (0.025)	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.022)
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.023)		束丝藻属 <i>Aphanizomenon</i> Morren (0.022)
	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.195)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.239)	
	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.158)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.109)	
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.142)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.092)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.440)
	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.068)	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.054)	色球藻属 <i>Chroococcus</i> (Näg.) Elenkin (0.032)
	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.068)	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.053)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.026)
冬 Win.	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.048)	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.039)	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.021)
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.037)	坎宁顿多甲藻 <i>Peridinium cunningtonnii</i> Lemm (0.029)	固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i> Ley. (0.021)
	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> (Cord.) Ralfs (0.024)	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.023)	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.021)
	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.022)	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.022)	
	色球藻属 <i>Chroococcus</i> (Näg.) Elenkin (0.021)		
	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.020)		
		链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.160)	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.233)
冬 Win.	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i> (Brun) Bach. (0.221)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.140)	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing (0.119)
	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.169)	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.129)	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.090)
	小球藻属 <i>Chlorella</i> Beijerinck (0.140)	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.080)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing (0.088)
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i> (Ehr.) Ralfs (0.126)	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.071)	长锥形锥囊藻 <i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof (0.084)
	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.086)	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing (0.051)	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing (0.066)
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.054)	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.046)	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. (0.061)
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr. (0.038)	小型月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i> (Näg.) Collinus (0.040)	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i> O.Müller (0.054)
冬 Win.		嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Ehr. (0.040)	具尾蓝隐藻 <i>Chroomonas caudata</i> Geitler (0.040)
		四刺顶棘藻 <i>Chodatella quadriseta</i> Lemm (0.037)	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> Ehrenberg (0.022)
		球囊藻 <i>Sphaerocystis Schroeteri</i> Chod (0.031)	
		胶网藻 <i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> Næg (0.029)	
		长锥形锥囊藻 <i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof (0.023)	