

三峡库区支流花溪河浮游植物种间关联及影响因子分析

施军琼,何书晗,欧阳添,赵璐,纪璐璐,吴忠兴

(西南大学 生命科学学院,重庆 400715)

摘要:为了解三峡库区浮游植物群落的种间关联性及其影响因子,以花溪河为对象,通过 χ^2 检验、种间联结系数(C_A)和 Pearson 相关分析等指标探究浮游植物群落结构和物种的关系,共鉴定出藻类 8 门 103 属 380 种,四个季节均以绿藻和硅藻为主,裸藻和蓝藻次之。春季、夏季、秋季和冬季物种对联结性检验(χ^2 检验)中不显著相关占比分别为 78.4%,83.9%,83.0%和 74.0%,表明物种关联弱,独立性较强,群落结构松散。种间关联的影响因子主要是物种均匀度、高锰酸盐指数和叶绿素 a 。其中, $C_A > 0$ (正联结)主要受物种均匀度影响, $C_A = 0$ 主要受叶绿素 a 影响,表明花溪河浮游植物种间关联受生物因子和非生物因子的综合影响。

关键词:三峡库区;花溪河;浮游植物;种间关联

中图分类号:Q948

文献标志码:A

三峡大坝自建立后,其经济和社会效益显著,但也因库区“冬蓄夏排”的水体调度模式,使库区水体理化因子发生较大改变,影响了浮游植物群落结构,易引起浮游植物种间关联发生变化^[1-3]。目前,对三峡库区水体浮游植物的研究主要集中在物种组成与环境因子的研究,水生态系统的关联性分析研究较少。花溪河作为三峡库区的重要支流之一,其群落结构和水文情况受到不同程度的影响。本研究以三峡库区一级支流花溪河作为研究区域,通过 χ^2 检验、种间联结系数(association coefficient, C_A)和逐步回归等方法分析花溪河浮游植物种间关联情况及其与环境因子的关系,旨在探究三峡库区水位调度对浮游植物种间关系的影响,为三峡库区浮游植物研究及水生态管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

花溪河源于重庆市巴南区石岗乡碑垭岩口,属于三峡库区一级支流。本研究从 2017 年 11 月 16 日至 2018 年 10 月 18 日从花溪河源头到入江口共设置 11 个采样点,依次为 S0(碑垭村),S1(贺家湾),S2(南彭水库),S3(柏树湾),S4(蒲芦塘),S5(吉庆村),S6(虎啸村),S7(南泉镇),S8(堤坎),S9(建新村)和 S10(入江口)(图 1),每月对 11 个采样点分别进行调查。

1.2 水体理化指标的测定

水体理化性质主要通过多参数水质分析仪 DS5/DS5X(HydrolAB, USA),塞氏盘(黑白盘)和 LS45A 型旋杯式流速仪(华正水仪器有限公司,重庆)测定。水体中总氮(TN),硝态氮(NO_3^- -N),总磷(TP),正磷酸盐(PO_4^{3-} -N),高锰酸盐指数以及叶绿素 a (Chl. a)的测定详见文献[4]。

1.3 浮游植物及多样性指数

定性样品采集和分析:通过孔径为 20 μm 的浮游生物网采集,加入 Lugol 溶液进行固定,然后使用 Nikon E-Ci 显微镜进行物种鉴定,参考文献[5-8]。定量样品采集和分析:用 1 L 广口瓶取样,滴加 Lugol 溶液

收稿日期:2021-03-24;修回日期:2022-05-06。

基金项目:国家自然科学基金(41877410);中央高校基本科研业务费专项(XDJK2019C044)。

作者简介:施军琼(1977-),女,湖北枣阳人,西南大学高级实验师,研究方向为藻类生理生态学,E-mail:shijunqiong@163.com。

通信作者:吴忠兴,西南大学教授,博士生导师,E-mail:wuzhx@swu.edu.cn。

固定,避光处静置 96 h,浓缩至 30 mL.浮游植物定量采用面积为 20 mm×20 mm,容量为 0.1 mL 的浮游植物计数框进行计数.通过 Shannon 多样性指数(H),物种丰富度(S)和均匀度(J)计算物种的多样性情况.

1.4 种间关联分析

因每个季节物种数量和优势种所占比例不同,本研究春季选频率大于 60% 的 24 个物种,夏季选频率大于 40% 的 20 个物种,秋季选频率大于 40% 的 19 个物种,冬季选频率大于 40% 的 22 个物种进行种对联结性分析.通过基于 2×2 列联表的 χ^2 值、种间联结系数(C_A)以及成对物种的 Pearson 相关分析来衡量物种间的种间关联情况.通过 Yates 的连续性公式计算 χ^2 值^[9],其中 $\chi^2 < 3.814$ 为不显著种间联结, $3.814 \leq \chi^2 < 6.635$ 为显著种间联结, $\chi^2 \geq 6.635$ 为极显著种间联结.

种间联结系数 C_A 的计算公式:

$$C_A = \frac{ad - bc}{(a + b)(b + d)}, (ad > bc), \quad (1)$$

$$C_A = \frac{ad - bc}{(a + b)(a + c)}, (ad \leq bc, d \geq a), \quad (2)$$

$$C_A = \frac{ad - bc}{(d + b)(d + c)}, (ad \leq bc, d \leq a), \quad (3)$$

其中 a 是成对物种都出现的样方数, d 是成对物种都不出现的样方数, b 是仅有物种 B 出现的样方数, c 是仅有物种 A 出现的样方数.

C_A 的取值范围在 $[-1, 1]$ 之间, C_A 越靠近 1, 正联结性越强, C_A 越靠近 -1, 负联结性越强, C_A 等于 0, 物种对之间完全独立. $C_A \geq 0.67$ (正联结程度高)、 $0.67 > C_A > 0$ (正联结程度弱), $C_A = 0$ (无联结), $-0.67 < C_A < 0$ (负联结程度弱), $C_A \leq -0.67$ (负联结程度高) 5 种情况统计分析.

1.5 数据处理与分析

用 Excel 对数据进行整理统计;用 Origin 2019 进行作图;RStudio 的 spaa 包计算种间 C_A 分析群落种间关联情况以及绘制 C_A 值半矩阵图;SPSS 22.0 软件分析种间关联与环境因子间的相关性.

2 结果与分析

2.1 水体理化特征

水体流速(v)最大出现在夏季,最小出现在冬季(图 2).ORP 在春季最大,TN,Chl. a 和水温(WT)最大值出现在夏季, NO_3^- -N 和 DO 在秋季最大,TP, PO_4^{3-} -N,高锰酸盐指数,pH,电导率和透明度(SD)在冬季出现最高值(图 2). NO_3^- -N,TP, PO_4^{3-} -N,pH,电导率,DO 和 SD 等指标在春季、夏季和秋季 3 个季节之间均没有显著性差异,但与冬季相比,其余 3 个季节均具有显著性差异(图 2);单独与冬季相比,Chl. a 含量在春季、夏季和秋季没有显著性差异,但春季与夏季,夏季与秋季之间均有显著性差异(图 2).

2.2 群落结构

花溪河全年检测出蓝藻、绿藻、硅藻、裸藻、甲藻、隐藻、金藻和黄藻共 8 门藻类(附图 I),主要以硅藻和绿藻为主,均占总物种数的 32.6%;裸藻和蓝藻物种数量占比分别为 16.6% 和 9.2%.春夏季节物种数相对高于秋冬季节,5 月份达到最大值 197 种,2 月份最低为 140 种.对不同月份藻密度分析发现 2 月份、5 至 9 月份藻密度相对较高,在 7 月份达到最高密度.S1 和 S2 样点在一年中藻密度明显高于其他样点,5 月至 10 月份藻密度较高,在 7 月份 S2 样点藻密度最高达 $2.85 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$.

2.3 种间关联性

Pearson 相关性分析中,春季物种对不显著相关($P > 0.05$)占比高达 85.6%,夏季、秋季和冬季的种间关

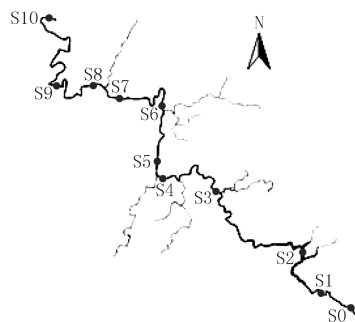
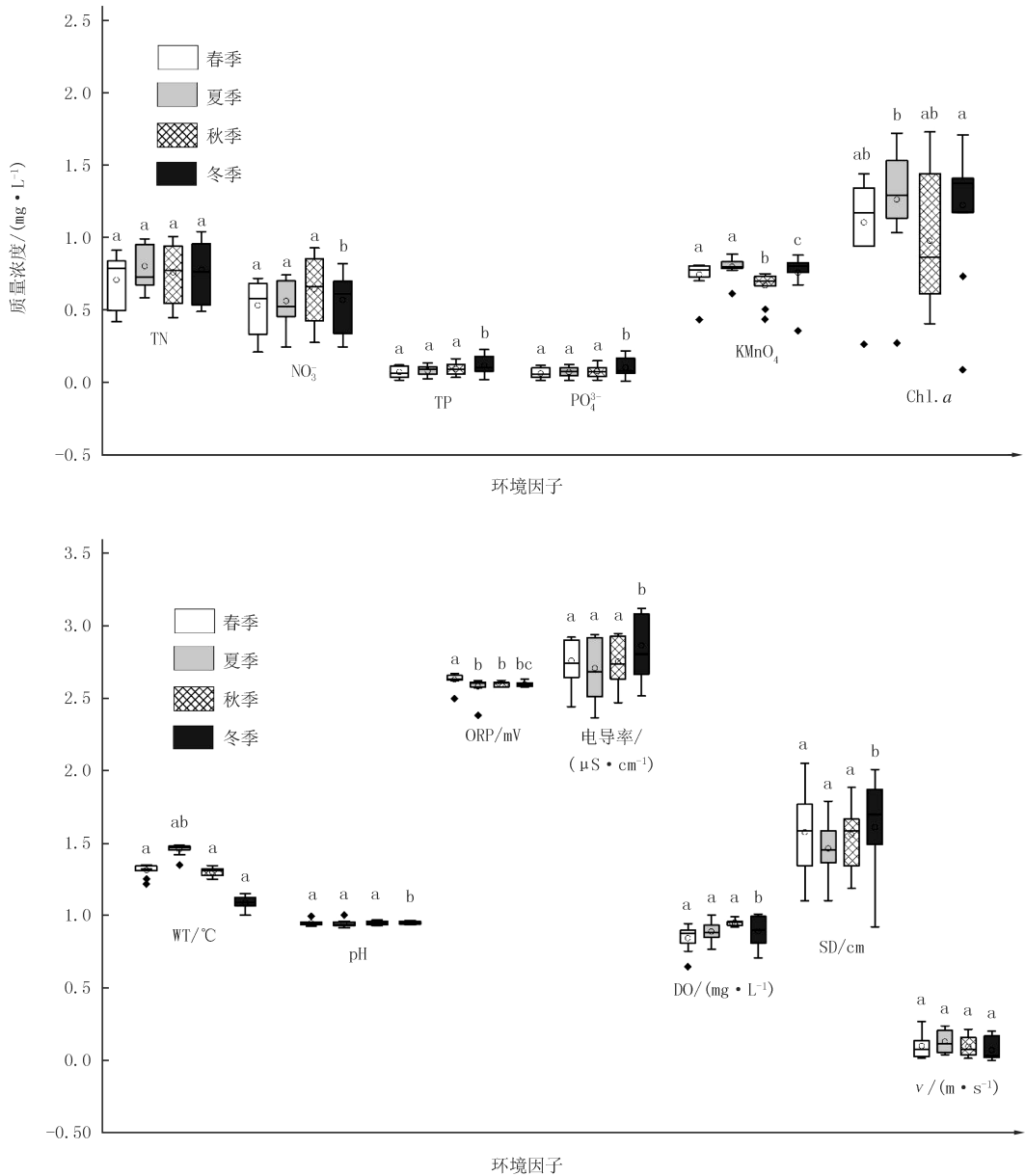


图1 花溪河样点分布示意图

Fig.1 Distributions of sampling sites in Huaxi River

联不显著相关($P > 0.05$)比例分别为 80.1%, 80% 和 80.1%, 均大于显著相关的物种对数(附表 I)。4 个季节大多数物种对的种间关联未达到显著相关水平, 物种对间的联结性总体呈松散状况。此外, 花溪河物种间关联情况以 χ^2 检验为基础, 结合 C_A 来定量分析。其中, 春季不显著联结性种对有 452 对, 占 78.4%, 只有 11.7% 表现为极显著性联结。夏季不显著联结物种对有 336 对, 占 83.9%, 只有 10.2% 表现为极显著性联结。同样, 秋季和冬季种对间不显著联结比例分别为 83% 和 74% (附表 I)。Pearson 相关性检验和 χ^2 检验均表明物种对间联结性不显著。



注: 不同小写字母表示处理间差异显著。

图2 花溪河不同季节环境因子变化

Tab.2 Environmental factors of Huaxi River change in different seasons

花溪河浮游植物 4 个季节主要物种间的种间联结系数 C_A 半矩阵图(图 3)可以看出, 春季联结程度弱和无联结藻类物种对数有占 87.7%, 物种对之间联结程度弱, 种间联结系数 $C_A \geq 0.67$ 的种对数有 31 对, 占全部对数 10.3% (图 3(a)). 其中尖针杆藻(*Synedra acus* var) 与颗粒直链藻(*Melosira granulata*), 菱形藻(*Nitzschia* sp.), 四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*) 以及假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.) 等大多说藻类的正联结程度高($C_A \geq 0.67$). $C_A \leq -0.67$ 的藻类物种只有 6 对。这 6 对之间表现为极强的负联结性, 占比为

2%,比如,尖针杆藻(*S. acus* var.)与舟形藻(*Navicula* sp.). 夏季种间联结系数 $C_A \geq 0.67$ 的物种对数有 9 对,占全部对数 4.3%,其中双双栅藻(*Scenedesmus bijuba*)与双棘栅藻(*Scenedesmus spinosus*)、四尾栅藻(*S. quadricauda*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)之间的正联结程度高.水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)与四尾栅藻(*S. quadricauda*)、尖针杆藻(*S. acus*)物种对负联结程度高,(图 3(b)).

秋季菱形藻(*N.* sp.)与尖针杆藻(*S. acus* var.),二形栅藻(*Scenedesmus dimorphus*)与小环藻(*Cyclotella* sp.)、尖针杆藻(*S. acus* var.)等物种之间的正联结程度高($C_A \geq 0.67$).尖针杆藻(*S. acus* var.)与四足十字藻(*Crucigenia tetrapedia*)负联结程度高($C_A \leq -0.67$)(图 3(c)).冬季浮游藻类尖针杆藻(*S. acus* var.)与其他物种间正联结程度和春季情况类似,即与大部分藻种之间的正联结程度都很高,总的 $C_A \geq 0.67$ 共有 28 对,占 11.1%.水华束丝藻(*A. flos-aquae*)与四足十字藻(*C. tetrapedia*)物种对负联结程度高($C_A \leq -0.67$)(图 3(d)).

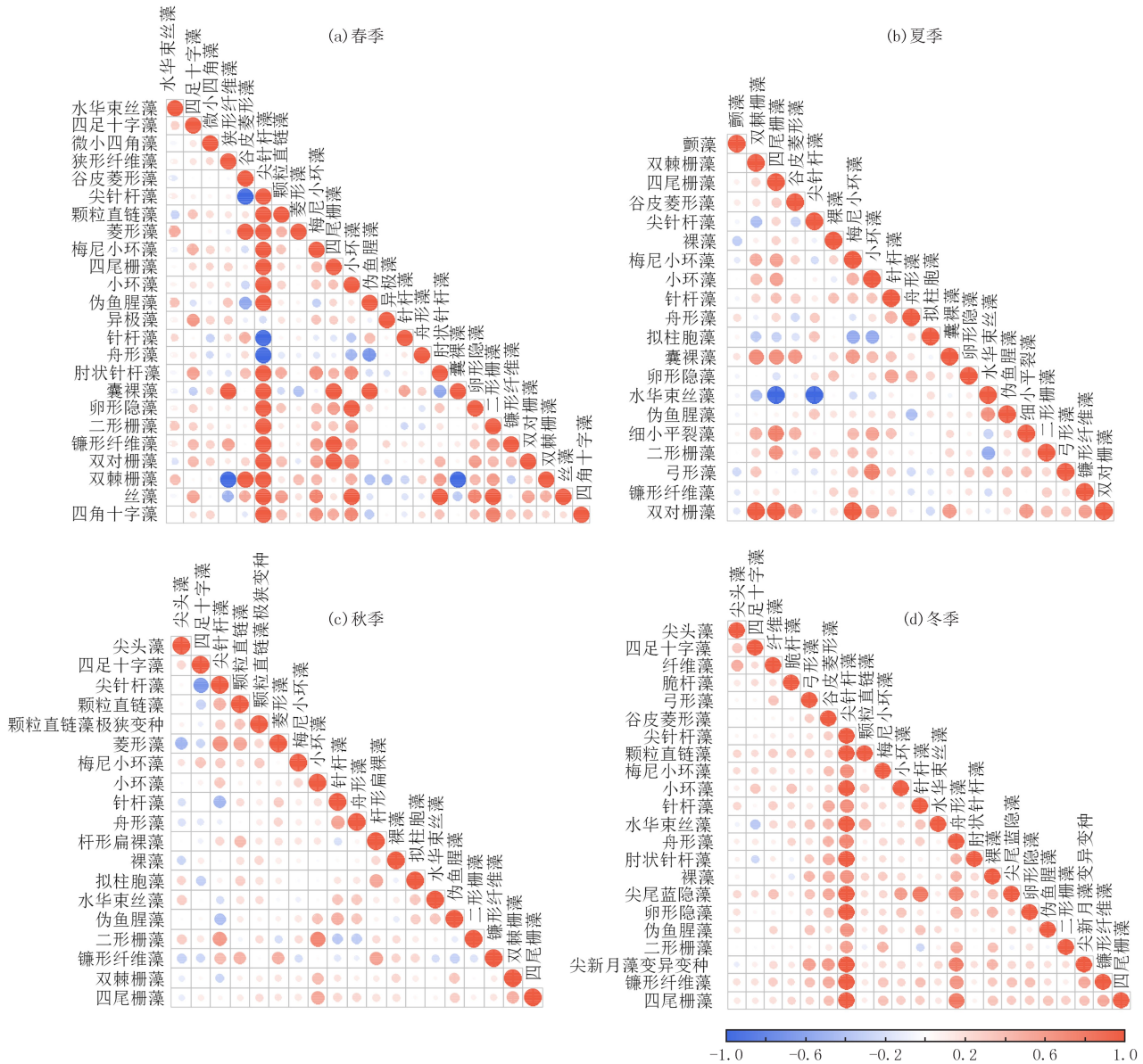


图3 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)种间联结系数半矩阵图

Fig.3 Semi-matrix diagram of interspecific association coefficient in in spring(a), summer(b), autumn(c) and winter(d)

2.4 种间关联影响因子

为探究影响不同程度种间关联的环境因子,将环境因子变化量与种间关联变化量进行逐步线性回归分

析,探究出引起浮游植物种间关联变化的主要环境因子.种间关联与环境因子之间的逐步回归关系(附表II). $C_A \geq 0.67$, $0.67 > C_A > 0$ 和 $C_A = 0$ 这三种情况与环境因子之间的逐步回归系数依次为 0.786, 0.738 和 0.615, P 值均小于 0.05. 其中,物种均匀度的变化是 $C_A \geq 0.67$ 和 $0.67 > C_A > 0$ 两种情况主要影响因素.叶绿素 a 的变化是影响物种间无联结($C_A = 0$)主要生物因子,两者的线性回归关系为: $Y = -0.01 + 0.003C_A$ (Y : Chl. a , $P = 0.033$).负联结($0 > C_A > -0.67$ 和 $C_A \leq -0.67$)情况未筛选出主要的影响因子.

在逐步线性回归定量分析种间关联与环境因子关系的基础上,通过主成分分析,剔除对总体种间关联影响较小的环境因子后,蒙特卡罗置换检验结果显示,花溪河物种均匀度变化对种间关联的贡献值为 56.7%,高锰酸盐指数变化对种间关联的贡献值为 11.7%,而总氮、电导率、叶绿素 a 、硝态氮和透明度等变化对种间关联的贡献值分别为 9.9%, 5.1%, 3.9%, 3.4% 和 2.8%,这 7 种环境因子对种间关联的贡献值高达 93.5%,是影响种间关联的主要因子.种间关联与环境因子进行 PCA 二维排序分析中(图 4), $C_A \geq 0.67$ (正联结程度高)与透明度、高锰酸盐指数、电导率、总磷、电导率和物种均匀度具有较强相关. $0.67 > C_A > 0$ (正联结程度弱)与硝态氮、总氮、氧化还原电位和物种均匀度有较强相关. $C_A = 0$ (正联结)与叶绿素 a 具有较强的相关,这与逐步线性回归结果一致.

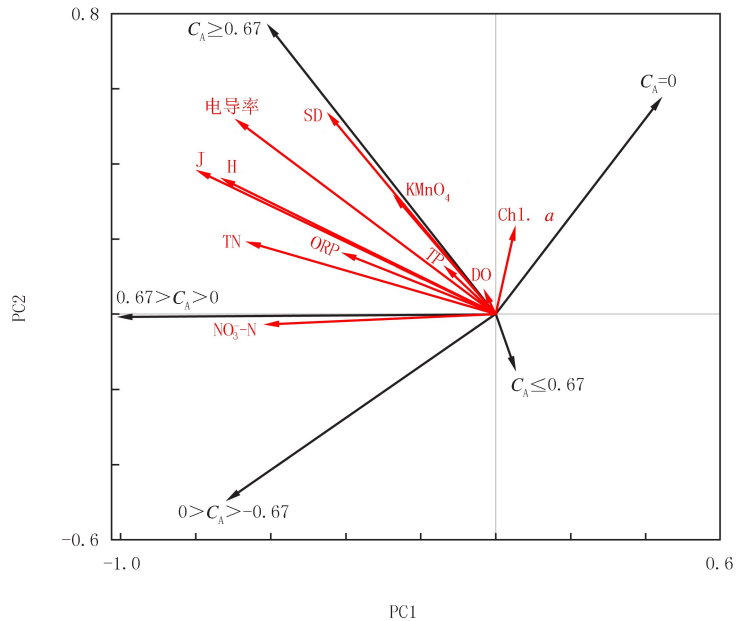


图4 花溪河种间关联与主要环境因子间的PCA二维排序图

Fig. 4 PCA two-dimensional ordination diagram for interspecific association and principal environmental factors in the Huaxi River

3 讨论

3.1 浮游植物种间关联分析

种对联结主要是反应物种在空间分布上的关联性^[9],物种关系外在的表现可以通过种间关系描述,体现群落的现状或群落内物种间竞争的结果^[10].花溪河浮游植物四个季节的种对联结性检验(Pearson 相关性和 χ^2 检验)结果中,种对不显著联结所占的比例远大于显著性联结所占比例,种间不显著联结物种对比比例由高到低为:夏季(83.9%),秋季(83.0%),春季(78.4%),冬季(74.0%).夏季的不显著联结物种对比最多.这可能与夏季藻类水华暴发相关,其主要因由是藻类现存量较高,物种多样性较单一引起.已有研究发现物种间竞争加强,种群结构容易发生变化;冬季种间不显著联结最小,可能与冬季水温过低和营养盐含量少限制了藻类生长,物种组成少,藻密度低群落相对稳定有关^[11].

种间联结可反映出群落结构和数量特点,与群落的演化形成紧密相关,是种间相互关系的表现形式^[12].种间 C_A 值半矩阵图中,四个季节的弱联结性显著大于其他联结程度,物种间多为相互独立,群落结构松散联结不紧密.对比南海湖浮游植物种间联结性多为弱联结或无联结,可能是在空间分布上的独立性造成的^[13].花溪河浮游植物种间多为弱联结的主要原因可能是优势种间生态位重叠少,物种间独立程度高.物种对环境要求的趋同性、趋异性和物种在生活型、生态型上的差异是影响种间关联的重要因素^[14].其中,正联结物种对生境要求相似,物种间因生物或非生物因子限制互相依存生长在一起,生态位重叠程度高.负联结

物种对由于对生境要求差异较大,或因为种间竞争相互排斥,导致物种间倾向于分离状态,生态位重叠少,最终表现为负联结($C_A < 0$)。负联结程度越高,因种间竞争导致物种消失的概率越大。在春季和冬季,尖针杆藻(*S. acusvar*)与菱形藻(*N. sp.*)和梅尼小环藻(*C. meneghiniana*)等种间正联结性程度高,这与它们对生活环境要求、生态策略和生态功能相似有关。在广泛使用的 FG (Functional Groups) 法中,针杆藻(*Synedra sp.*)、菱形藻(*Nitzschia sp.*)、小环藻(*Cyclotella sp.*)等都属于功能群 D,生境为穷营养,耐冲刷,较浑浊的浅水水体^[15]。舟形藻(*Navicula sp.*)属于功能群 MP,生境为浅水湖泊,频繁干扰的浑浊型水体。不同功能群物种间正联结程度弱,倾向于负联结。这也是尖针杆藻(*S. acusvar*)与舟形藻(*Navicula sp.*)负联结程度高的重要原因。

种间联结程度对研究群落的动态演替具有重要意义,不仅能体现目前群落结构,还可以反映群落未来的演替方向和趋势。一般正向演替中,演替初期,群落种间联结多为负联结,随着向顶级演替发展,群落稳定性增加,种对正联结比例增加,在一定时间内形成稳定状况。花溪河浮游植物四个季节种间弱联结占比大,物种间独立性较强,生境要求有差异,生态位重叠小。因此花溪河浮游植物群落结构不稳定,还需要较长时间的演替才能达到多物种共存的稳定状况。这与南四湖浮游植物种间负联结最大,群落结构稳定性差的研究结果一致^[16]。

3.2 种间关联与环境因子

种间竞争作用会促进物种均匀度的变化^[17]。花溪河浮游植物总体种间关联与环境因子的 PCA 排序结果中物种均匀度对种间关联贡献值高达 74.1%,不同的种间关联程度与环境因子关系的逐步线性回归分析中发现,物种均匀度与 $C_A \geq 0.67$ 和 $0.67 > C_A > 0$ 均具有较强的正相关(附表 II)。表明了物种均匀度是维持花溪河浮游植物种间关系极其重要的因素。高锰酸盐指数反映水体被还原性物质污染的程度,能体现水中所含有机物的多少,对浮游植物群落结构组成具有较大影响^[18]。本研究中高锰酸盐指数对种间关联的贡献值为 11.7%,仅次于物种均匀度,主要与 $C_A \geq 0.67$ 的关联性最强(图 4),高锰酸盐指数也是影响浮游植物种间关系不可忽视的因子。

叶绿素 *a* 含量和不同门类浮游植物密切相关,浮游植物优势种的变更会引起叶绿素 *a* 浓度也发生变化。花溪河浮游植物不同季节各优势种之间独立性较强,有着自己的生态位,种间多为无联结,而叶绿素 *a* 含量随优势种的变化而变化,所以呈现出叶绿素 *a* 与种间无联结($C_A = 0$)呈 $Y = -0.01 + 0.003X$ ($P = 0.033$) 的线性回归关系。整体而言,三峡库区浮游植物种间关联并非某一种因子作用的结果,而是受生物因子和非生物因子的综合影响。

附 录

附图、附表见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.05.015)。

参 考 文 献

- [1] 吴佳梦,徐娜娜,张文珺,等.浙江舟山定海护城河浮游植物优势种生态位与种间联结性季节性分析[J].湖泊科学,2019,31(2):429-439. WU J M, XU N N, ZHANG W J, et al. Seasonal analysis of the niche and interspecific association of dominant species of phytoplankton in the Dinghai Moat, Zhoushan City[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 429-439.
- [2] 米文梅,施军琼,杨燕君,等.三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系[J].环境科学,2020,41(4):1636-1647. MI W M, SHI J Q, YANG Y J, et al. Changes in epilithic algae community and its relationship with environmental factors in the meixi river, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1636-1647.
- [3] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等.武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):135-142. SONG G F, ZHU Y X, MI W J, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 135-142.
- [4] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类——系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [6] 李家英.中国淡水藻志(第十九卷)硅藻门:舟形藻科(2)[M].北京:科学出版社,2014.
- [7] 水利部水文局,长江流域水环境监中心.中国内陆水域常见藻类图谱[M].武汉:长江出版社,2012.
- [8] 朱蕙忠,陈嘉佑.中国西藏硅藻[M].北京:科学出版社,2000.

- [9] GLEASON H A. The individualistic concept of the plant association[J]. Bulletin of the Torrey Botanical Club, 1926, 53(1): 7.
- [10] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224-8233.
XU M H, LIU M, ZHAI D T, et al. A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8224-8233.
- [11] 田旺. 湖泊浮游生物群落对环境 and 生物多样性的响应机制[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
TIAN W. Response mechanisms of lake plankton community to environment and biodiversity[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [12] 郭志华, 卓正大, 陈洁, 等. 庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林乔木种群种间联结性研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 424-432.
GUO Z H, ZHUO Z D, CHEN J, et al. Interspecific association of trees in mixed evergreen and deciduous broadleaved forest in Lushan Mountain[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(5): 424-432.
- [13] 申涵. 寒旱区湖泊浮游植物生态位及种间联结特征分析[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
SHEN H. Analysis of phytoplankton niche and interspecific association in lakes in cold and arid regions[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.
- [14] 张鲜花, 陈爱萍, 朱进忠, 等. 天山北坡不同区域及海拔对天然草地鸭茅群落物种间关系影响[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 12-23.
ZHANG X H, CHEN A P, ZHU J Z, et al. Interspecific associations in *Dactylis glomerata* communities in different regions and altitudes on the northern slope of Tianshan Mountain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(8): 12-23.
- [15] PADISÁK J, CROSSETTI L O, NASELLI-FLORES L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 2009, 621(1): 1-19.
- [16] 杨文焕, 申涵, 周明利, 等. 包头南海湖浮游植物优势种生态位及种间联结性季节分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 383-391.
YANG W H, SHEN H, ZHOU M L, et al. Seasonal variation analysis of the niche and interspecific association with respect to the dominant phytoplankton species in Nanhai Lake[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 383-391.
- [17] BAKKER E S, OLFF H. Impact of different-sized herbivores on recruitment opportunities for subordinate herbs in grasslands[J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(4): 465-474.
- [18] 王汨, 杨柏贺, 马思琦, 等. 北运河水系浮游植物功能群与水体环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2020, 33(2): 70-76.
WANG M, YANG B H, MA S Q, et al. Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in north canal in Beijing[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020, 33(2): 70-76.

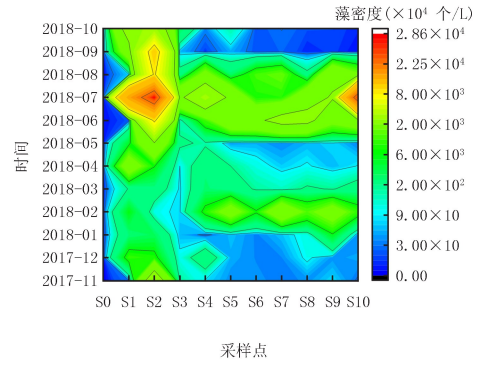
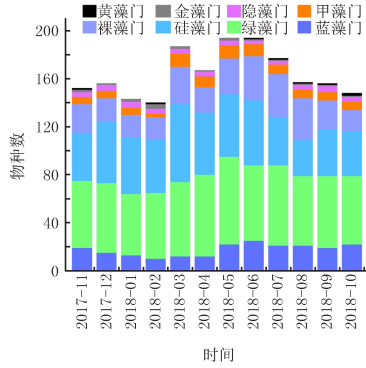
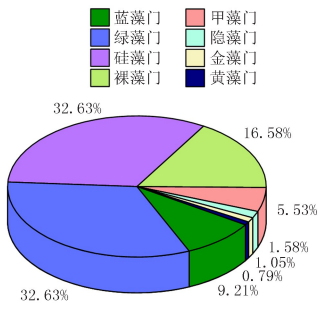
Analysis of phytoplankton interspecific association and its influencing factor in Huaxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir

Shi Junqiong, He Shuhan, Ouyang Tian, Zhao Lu, Ji Lulu, Wu Zhongxing

(School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to understand the interspecific association and influencing factors of phytoplankton communities in the Three Gorges Reservoir, we used χ^2 test, interspecific association coefficient (C_A) and Pearson correlation analysis to explore the relationship between phytoplankton community structure and species in Huaxi River. The results showed that 380 species belonging to 103 genera and 8 phyla were identified, furthermore the main dominant species were Chlorophyta and Bacillariophyta followed by Euglenophyta and Cyanophyta during four seasons. In spring, summer, autumn and winter, the proportion of nonsignificant associations (chi-square test) was 78.4%, 83.9%, 83.0% and 74.0%, respectively. The correlation between species was weak, suggesting that phytoplankton species was highly independent and community structure was loose and unstable. On the whole, phytoplankton evenness, permanganate index and chlorophyll a were the main influencing factors of interspecific association. Among them, $C_A > 0$ (positive association) was mainly affected by species evenness, while $C_A = 0$ (no association) was mainly affected by chlorophyll a. The results showed that the interspecific associations between phytoplankton species in Huaxi River were affected by both biological and abiotic factors.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Huaxi River; phytoplankton; interspecific association



附图I 不同时期各样点浮游植物种类组成

Attached Fig. I Composition of phytoplankton at sampling sites during the different hydrological periods

附表 I 花溪河浮游植物 Pearson 相关性检验和种对联结性检验 (χ^2 检验)

Attached Tab. I Pearson correlation test and chi-square test of phytoplankton in Huaxi River

检验类型	联结类型	数值范围	春季		夏季		秋季		冬季	
			种对数	比例	种对数	比例	种对数	比例	种对数	比例
Pearson 相关检验	正相关	$P \leq 0.05$	35	6.1	32	8.0	32	9	47	9.7
		$P > 0.05$	403	69.9	230	57.4	177	49	260	53.8
	负相关	$P \leq 0.05$	47	8.3	44	10.9	40	11	49	10
		$P > 0.05$	91	15.7	94	23.6	112	31	128	26.4
	总数		576	100.0	400	100.0	361	100	484	100.0
χ^2 检验	不显著联结	$P > 0.05$	452	78.4	336	83.9	300	83.0	358	74.0
	联结性显著	$0.01 < P \leq 0.05$	57	9.9	23	5.9	29	8.0	67	13.9
	联结性极显著	$P \leq 0.01$	67	11.7	41	10.2	32	9.0	59	12.1
	总数		576	100.0	400	100.0	361	100.0	484	100

附表 II 种间关联情况与环境因子之间的逐步回归分析

Attached Tab. II Stepwise regression analysis of interspecific association and ecological factors

联结系数(Y)	所筛选变量(X)	逐步回归方程	R	P
$C_A \geq 0.67$	J	$Y = 0.008 + 0.301X$	0.786	0.002**
$0.67 > C_A > 0$	J	$Y = 0.009 + 0.763X$	0.738	0.006**
$C_A = 0$	Chl.a	$Y = -0.01 + 0.003X$	0.615	0.033*
$0 > C_A > -0.67$	—	—	—	—
$C_A \leq -0.67$	—	—	—	—

注:逐步回归方程中各变量与所筛选变量(Chl.a, J)对应, Y 表示种间关联程度, X 表示各环境因子, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$.