

◆海洋科学◆

贵州草海湿地夏季浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系*

李青, 张 姗, 何 斌**, 李望军, 邹 顺, 白晓龙, 陈 洋, 薛晓辉

(贵州工程应用技术学院生态工程学院, 贵州省典型高原湿地生态保护与修复重点实验室, 贵州毕节 551700)

摘要: 为了解贵州草海湿地浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系, 于2022年夏季对贵州草海湿地浮游植物进行调查。结果表明, 2022年夏季草海湿地的浮游植物有8门51科104属, 其中绿藻门(Chlorophyta)种类最丰富, 其次是硅藻门(Bacillariophyta)和蓝藻门(Cyanophyta)。浮游植物丰度平均值为 $18.82 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 各采样点之间差异较大; 从浮游植物优势属和丰度看, 均是蓝藻和绿藻占绝对优势。冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)结果表明, 草海湿地浮游植物群落结构主要受总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总磷(TP)、有机碳(TOC)、悬浮物(TSS)等影响。浮游植物多样性指数和丰度评价结果表明, 2022年夏季草海湿地处于富营养状态, 为中度污染水平, 水体有发生微囊藻水华的风险。

关键词: 草海湿地; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 冗余分析

中图分类号: X171, X82 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)01-0052-08

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240417.021

人类活动和全球环境变化导致淡水生态系统频繁发生水体污染和富营养化。高海拔湖泊生态系统对外界环境变化的反应非常敏感, 即使是小规模的扰动也会显著影响湖泊的物理化学性质和生物群落^[1], 因此, 湖泊生态系统是监测环境变化、人为干扰和全球气候变化的理想对象^[2,3]。云贵高原的湖泊通常呈现出一定的封闭或半封闭特性, 生态系统相对脆弱, 生态环境恶化问题普遍存在^[4]。作为我国亚热带

高原湿地生态系统中的典型代表, 贵州草海湿地是一个完整、典型的喀斯特高原湿地生态系统, 其水体主要依靠水中的生物进行净化, 对候鸟的越冬和迁徙停歇至关重要, 被誉为“高原明珠”。近年来, 由于人口增长以及农业、工业、旅游业等快速发展, 草海生态明显退化, 这严重制约了当地的可持续发展。

浮游植物在水生生态系统中扮演着重要角色, 具有分布广泛、生命周期短等特点, 对生态系统的物质

收稿日期: 2023-09-02

修回日期: 2023-09-27

* 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2020]2002), 贵州省教育厅科技拔尖人才项目(黔教技[2022]096), 毕节市揭榜挂帅项目(毕科合重大专项字[2021]1)和毕节市科学技术项目(毕科联合字-贵工程[2021]08)资助。

【第一作者简介】

李青(1989—), 女, 副教授, 主要从事水生生物学研究, E-mail: liqingdream@163.com。

【**通信作者简介】

何斌(1980—), 男, 教授, 主要从事湿地生态学研究, E-mail: hebin123kewen@163.com。

【引用本文】

李青, 张姗, 何斌, 等. 贵州草海湿地夏季浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 广西科学, 2024, 31(1): 52-59.

LI Q, ZHANG S, HE B, et al. Summer Phytoplankton Community Characteristics and Its Relationship with Water Environmental Factors in Caohai Wetland, Guizhou Province [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(1): 52-59.

循环和能量流动至关重要^[5,6]。作为水生生态系统的初级生产者和食物链的基础,浮游植物的生物量和群落结构特征与水环境密切相关^[7]。水环境变化不仅影响水质,还会改变水体中的生物群落组成。浮游植物群落对环境变化的响应非常迅速,可提供水质变化的早期预警信息,因此常被用作评估水体健康状况的指示生物^[8]。某些浮游植物,如蓝藻门(Cyanophyta)的一些种类在生长旺盛时会聚集在水面,这不仅会影响景观、破坏水生生态系统平衡,而且会散发出难闻的气味,甚至释放毒素及其衍生物到水体中,对人畜饮用水安全构成严重威胁^[9]。因此,浮游植物成了湖泊、河流和水库等水环境监测的重要组成部分,特别是在饮用水源地^[10]。然而,浮游植物群落与水环境因子之间的关系十分复杂,不同类型水体中浮游植物群落结构的影响因子也有所不同^[11]。

目前,对于贵州草海湿地水环境的研究主要集中在重金属污染物^[12,13]、营养物的空间分布特征^[14-16]和生态系统评价^[17,18]等方面,关于浮游植物及其与水环境因子之间的关系研究相对较少。因此,本研究通过调查草海湿地的浮游植物,检测草海湿地的水环境因子,并利用典范对应分析来揭示草海湿地浮游藻类与水环境因子之间的关系。本研究的结果不仅可以弥补高原湿地水生态状况的研究基础,而且可为草海湿地的现状和演变提供基础数据,为草海湿地的可持续发展和利用提供重要的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州草海国家级自然保护区(104°10′16″—104°20′40″E, 26°47′32″—26°52′52″N)位于贵州省毕节市威宁彝族回族苗族自治县县城西南侧。草海是贵州省内最大的天然淡水湖泊,面积为96 km²,属长江水系,其水源补给主要为大气降水,其次为地下水,汇入草海的河流主要为白马河、大中河与东山河^[19]。目前,草海正常蓄水面积为19 km²,丰水期(5—9月)蓄水面积增至26.05 km²,枯水期(10月至翌年4月)蓄水面积降至15 km²,平均水深1.35 m,最大水深2.80 m。当地属亚热带季风气候,年均气温为10.50℃,年均降水量为950.9 mm,降水主要集中在夏季,干湿季明显,昼夜温差大^[20]。

1.2 采样点设置

参照《湖泊生态调查观测与分析》^[21]和《湖泊富营养化调查规范》^[22]并结合草海水域实际情况,于

2022年7月在草海湿地核心区设定3条间隔1 km的平行样带,每条样带每间隔1 km设置一个采样点,共设置20个采样点,详见图1。

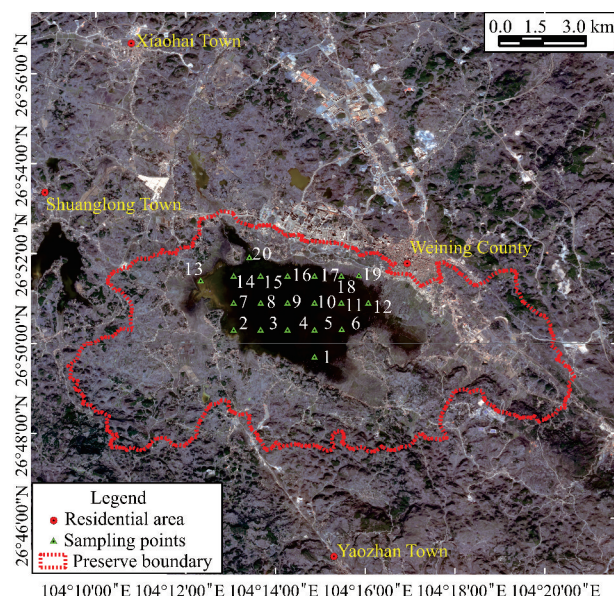


图1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.3 样品采集与分析

1.3.1 浮游植物

浮游植物采样方法遵循《水环境监测规范》(SL 219—2013)。对于用于定性的样品,使用25#浮游生物网,在采样点0.5 m水深处按照“∞”状匀速拖拽3 min,将样品收集到100 mL聚乙烯瓶中,加入2 mL鲁哥氏液固定,保存,待进一步检测;对于用于定量的样品,使用1 L采水器在采样点下取水,将样品收集到1 L聚乙烯瓶中,加入10 mL鲁哥氏液固定,样品静置48 h后,反复用细小虹吸管吸取上清液,最后浓缩至30 mL,保存用于显微镜检查^[23]。

参照 *Phytoplankton manual*^[24]和《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[25],对浮游植物进行种类鉴定。将浮游植物样品充分摇匀后,使用移液枪吸取0.1 mL样品滴入0.1 mL计数框内,盖好载玻片,在显微镜(CX22,日本 Olympus公司)下使用10×40倍镜计数,每个样品至少计数2片,计算其平均值。

1.3.2 水环境因子测定

采集浮游植物样品的同时,用采水器采集表层水样1 L,带回实验室,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)测定总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD₅)、总碳(TC)、有机碳(TOC)、氯离子(Cl⁻)、悬浮物(TSS)、溶解氧(DO)等水化学

指标。

1.4 数据处理和统计分析

采用 Margalef 丰富度指数 (D)、Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 和优势度指数 (Y) 描述浮游植物的群落特征, 具体计算公式^[26]如下:

$$D = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (1)$$

$$H' = - \sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}, \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S}, \quad (3)$$

表 1 藻类丰度、Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数的评价标准

Table 1 Evaluation criteria of algae abundance, Shannon diversity index and Pielou evenness index

丰度(A)/(cell·L ⁻¹) Abundance(A)/ (cell·L ⁻¹)	营养状态 State of nutrition	Shannon 多样性 指数(H') Shannon diversity index (H')	水质类型 Water quality type	Pielou 均匀度 指数(J) Pielou evenness index (J)	水质类型 Water quality type
A > 10 ⁸	Heavy eutrophication	0 < H' ≤ 1	Heavy pollution	0 < J ≤ 0.3	Heavy pollution
80 × 10 ⁶ < A ≤ 10 ⁸	Eutrophication	1 < H' ≤ 2	α medium pollution	0.3 < J ≤ 0.5	Medium pollution
40 × 10 ⁶ < A ≤ 80 × 10 ⁶	Moderately eutrophication	2 < H' ≤ 3	β medium pollution	J > 0.5	Light pollution
10 × 10 ⁶ < A ≤ 40 × 10 ⁶	Mesotrophication	H' > 3	Light pollution		
A < 10 ⁶	Oligotrophication				

参照杨毓鑫等^[11]的方法, 对浮游植物优势属与水环境因子之间的关系采用 CANOCO 4.5 软件进行分析, 其中用于排序的物种数据在不同采样点出现的频率大于 2.5%, 且该种群中至少在一个采样点的丰度大于 1%; 其他数据分析和作图采用 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成及优势属

本研究共鉴定出草海湿地夏季浮游植物 8 门 51 科 104 属, 其中绿藻门 (Chlorophyta) 种类最丰富, 有 37 属, 占总属数的 35.58%; 其次是硅藻门 (Bacillariophyta), 有 29 属, 占总属数的 27.88%; 蓝藻门 (Cyanophyta) 有 16 属, 占总属数的 15.38%; 金藻门 (Chrysophyta) 和裸藻门 (Euglenophyta) 各 6 属, 分别占总属数的 5.77%; 甲藻门 (Pyrrophyta) 5 属, 占总属数的 4.81%; 隐藻门 (Cryptophyta) 和 黄藻门 (Xanthophyta) 种类最少, 分别为 3 属和 2 属, 分别占总属数的 2.88% 和 1.92% (图 2)。

各采样点中, D13 采样点的浮游植物种类最多,

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i, \quad (4)$$

式中, S 为样点中浮游植物的物种数, N 为样点中浮游植物的个体总数, n_i 为第 i 种藻类的个体总数, f_i 为第 i 种藻类在各监测点出现的频率。当 $Y \geq 0.02$ 时, 将该种浮游植物确定为优势种。

根据参考文献^[9, 27], 丰度 (A)、Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 的评价标准详见表 1。

有 37 属, 占总属数的 35.58%; 其次是 D8 采样点, 浮游植物有 30 属, 占总属数的 28.85%; D17 采样点的物种数最少, 仅为 10 属, 占总属数的 9.62% (图 3)。

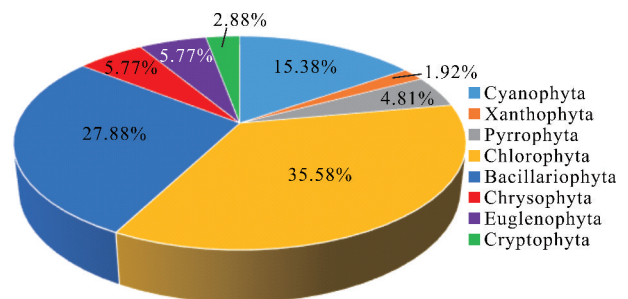


图 2 2022 年草海湿地夏季浮游植物种类组成比例

Fig. 2 Proportion of phytoplankton composition of Cao-hai wetland in the summer of 2022

以优势度指数 $Y \geq 0.02$ 为标准, 本研究中有 8 种浮游植物为优势属, 分别为蓝藻门的平裂藻属 (*Merismopedia*, $Y=0.18$) 和微囊藻属 (*Microcystis*, $Y=0.09$), 绿藻门的小球藻属 (*Chlorella*, $Y=0.03$)、盘星藻属 (*Pediastrum*, $Y=0.05$)、栅藻属 (*Scenedesmus*, $Y=0.07$) 和月牙藻属 (*Selenastrum*, $Y=0.02$), 硅藻门的针杆藻属 (*Synedra*, $Y=0.02$), 黄藻门的黄

丝藻属 (*Tribonema*, $Y=0.02$)。从出现频度 ($f_i \geq 75\%$) 来看, 平裂藻属、微囊藻属、盘星藻属、栅藻属和月牙藻属为常见优势属。

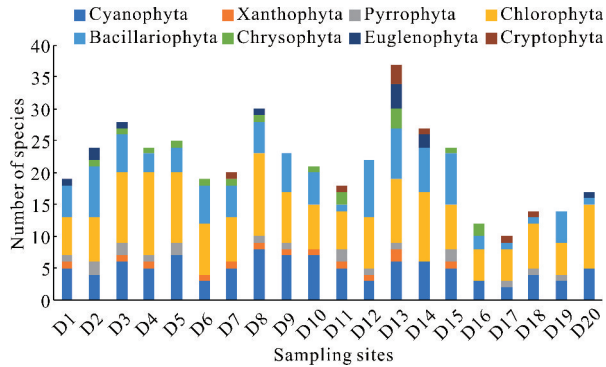


图3 2022年夏季草海湿地不同采样点浮游植物种类组成

Fig. 3 Composition of phytoplankton species at different sampling site in Caohai wetland in summer of 2022

2.2 浮游植物的丰度特征

草海湿地夏季浮游植物丰度为 $0.39 \times 10^6 - 333.14 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $18.82 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ (表2)。其中, 蓝藻门丰度最大, 为 $0.67 \times 10^6 -$

表2 浮游植物丰度特征

Table 2 Abundance characteristics of phytoplankton

种类 Species	丰度/ $(\times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$ Abundance/ $(\times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$	丰度平均值/ $(\times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$ Average value of abundance/ $(\times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$	百分比/% Percentage/%
Cyanophyta	0.67—333.14	49.58	40.53
Chlorophyta	0.52—169.15	18.87	35.67
Bacillariophyta	0.39—66.10	8.49	12.58
Euglenophyta	0.67—6.66	3.50	1.07
Xanthophyta	5.37—76.56	40.97	4.19
Pyrrophyta	3.50—16.33	11.13	2.27
Chrysophyta	0.67—40.37	9.22	2.39
Cryptophyta	0.39—23.85	6.40	1.31

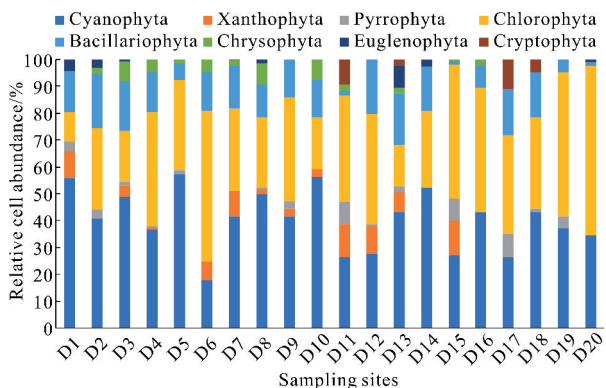


图4 草海湿地不同采样点浮游植物相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of different phytoplankton taxa among different sites in the Caohai wetland

$333.14 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $49.58 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物丰度的 40.53%; 绿藻门丰度为 $0.52 \times 10^6 - 169.15 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $18.87 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物丰度的 35.67%; 硅藻门丰度为 $0.39 \times 10^6 - 66.10 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $8.49 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物丰度的 12.58%; 裸藻门丰度最小, 为 $0.67 \times 10^6 - 6.66 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $3.50 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物丰度的 1.07%。

不同采样点的浮游植物丰度为 $70.68 \times 10^6 - 100.00 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $93.16 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异较大。其中, 只有 1 个采样点 (D13) 为中度富营养, 占有所有采样点的 5%, 其余采样点均为富营养。从不同采样点浮游植物的相对丰度 (图4) 来看, 11 个采样点 (D1、D2、D3、D5、D7、D8、D9、D10、D13、D14、D18) 的蓝藻门浮游植物丰度相对较高, 其平均值为 48.20%; 其余采样点的绿藻门浮游植物丰度相对较高, 其平均值为 47.73%。

2.3 浮游植物的多样性分析

草海湿地夏季浮游植物群落 Shannon 多样性指数 (H') 为 0.97—2.25, 平均值为 1.65; Pielou 均匀度指数 (J) 为 0.21—0.48, 平均值为 0.35; Margalef 丰富度指数 (D) 为 1.94—7.75, 平均值为 4.39。

浮游植物多样性指数在不同采样点间存在空间差异 (图5), 其中 H' 值在重度污染范围的采样点有 1 个 (D17), 占有所有采样点的 5%, 其余采样点属于中度污染范围; J 值在重度污染范围的采样点有 3 个 (D16、D17、D18), 占有所有采样点的 15%, 其余采样点属于中度污染。

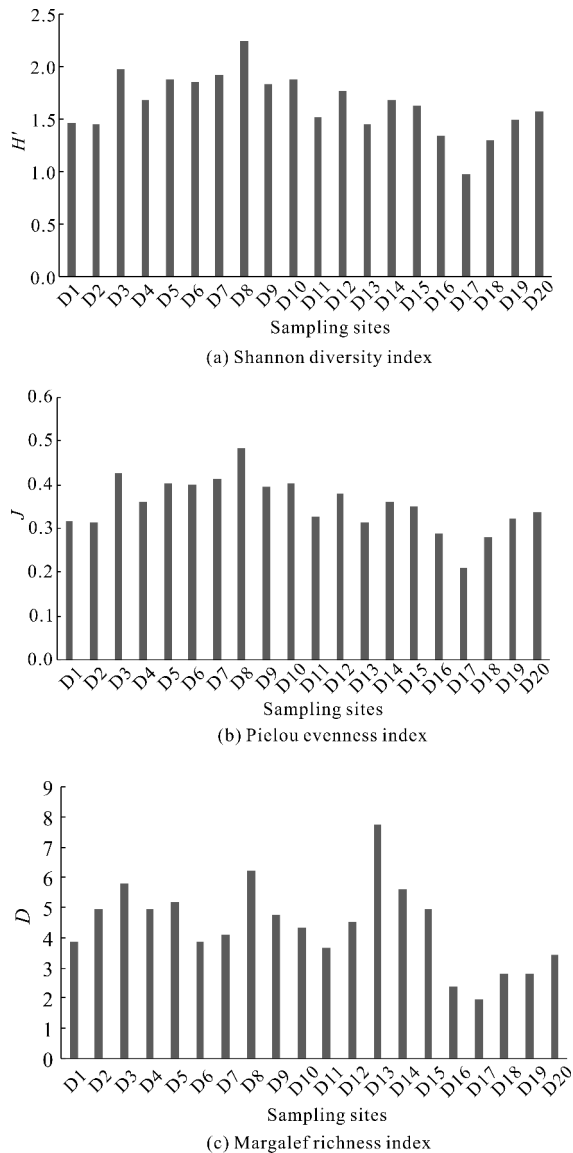


图5 草海湿地浮游植物多样性指数

Fig. 5 Diversity index of phytoplankton in Caohai wetland

2.4 浮游植物群落结构与环境因子的关系

对主要浮游植物与环境因子数据进行消除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 排序轴中长度均小于 3, 故对数据进行冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA) (表 3, 图 6)。第一轴和第二轴的特征值分别为 0.314 和 0.127, 共解释了浮游植物物种变异的 44.14%; 前 4 轴共解释了环境因子的 88.7%, 其中第一轴揭示了 50.7%; 环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为 0.827 5 和 0.863 6, 表明排序结果良好。

平裂藻属、黄丝藻属、栅藻属、针杆藻属、月牙藻属和纤维藻属 (*Ankistrodesmus*) 分布在排序轴的右上方, 与 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和悬浮物呈正相关; 盘

星藻属和微囊藻属分布在排序轴的左上方, 与 DO 、 TP 和 TOC 呈正相关; 锥囊藻属 (*Dinobryon*)、小球藻属 (*Chlorella*) 和色球藻属 (*Chroococcus*) 分布在排序轴的右下方, 其中锥囊藻属与 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和悬浮物呈正相关, 色球藻属与 Cl^- 呈正相关。

表 3 主要浮游植物与环境因子的 RDA 结果

Table 3 RDA results of dominant phytoplankton genus to environmental factors

轴 Axis	特征值 Eigenvalue	物种-环境因子的相关性 Species-environment correlation	物种变异累计百分数/% Cumulative percentage variance of species/%	物种-环境变异累计百分数/% Cumulative percentage of variance of species-environment relation/%
I	0.314 4	0.827 5	31.44	50.70
II	0.127 0	0.863 6	44.14	71.18
III	0.062 7	0.690 0	50.41	81.28
IV	0.046 0	0.741 1	55.01	88.70

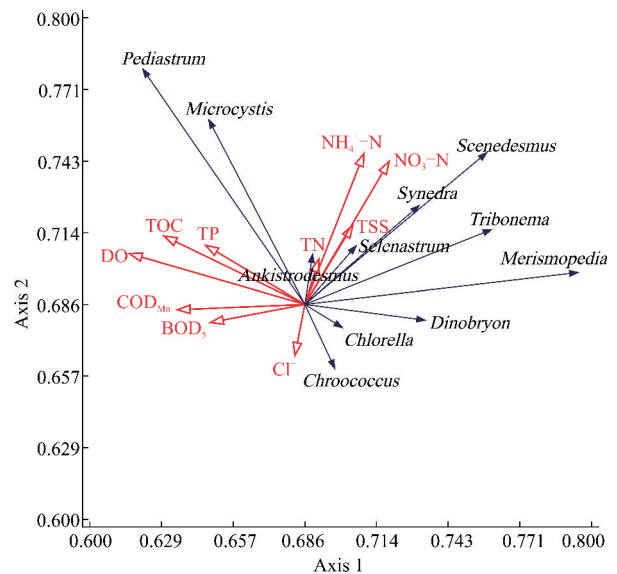


图6 浮游植物优势属与环境因子的 RDA 排序

Fig. 6 RDA ordination of dominant phytoplankton genus and environmental factors

3 讨论

3.1 浮游植物的群落结构特征

浮游植物群落结构与水环境及自身的生存策略关系密切^[28], 其种类组成和数量变化可以反映环境条件的变化^[29]。本研究发现, 草海湿地 2022 年夏季浮游植物以绿藻门 (35.58%) 和硅藻门 (27.88%) 物种为主, 这与代亮亮等^[30]对草海湿地秋季浮游植物群落结构的研究结果一致。有研究表明, 浮游植物优

势种与其稳定性紧密相关,优势种越少、优势度越大的浮游植物群落结构越简单和越不稳定^[31]。草海湿地夏季浮游植物有 8 种优势种,以蓝藻和绿藻为主,并且优势度均较低,表明草海浮游植物种类组成丰富,稳定性较强。

3.2 浮游植物群落结构与环境因子的相关性

浮游植物群落结构直接影响水生生态系统的结构和功能^[26],二者的关系一直是水生生态系统研究的核心问题之一。有研究表明,浮游植物的群落结构和分布受营养盐、pH 值、温度、透明度和水动力条件等条件的影响^[32]。通常不同水生生态系统中,影响浮游植物群落结构的主要环境因子会有较大差别。本研究中的 RDA 结果表明,TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TSS、TP 和 TOC 对草海浮游植物群落结构的影响较大。

营养盐是浮游植物生长的重要影响因子,不同种类浮游植物对营养盐的需求和适应性不同。一般认为,蓝藻和绿藻在富营养水体中占优势,甲藻、隐藻和硅藻在中营养水体中占优势^[33,34]。本研究中,绿藻和蓝藻在浮游植物的优势度和丰度中均占优势,表明营养盐是影响草海湿地浮游植物结构的关键限制因子。其中,氮和磷作为主要的限制因子,过量或不足都会影响到浮游植物的生长和繁殖活动,当 N:P 大于 16 时,说明氮过量,浮游植物主要受磷含量限制;当 N:P 小于等于 16 时,说明氮不足,浮游植物主要受氮含量限制。本研究发现,各采样点 N:P 的均值为 25.87,除了采样点 D15 和 D20 外,其他采样点的 N:P 均大于 16,表明草海湿地的浮游植物主要受磷限制,与总氮呈正相关。此外,浮游植物对不同氮形态的吸收和利用效率不同,浮游植物优先利用铵态氮^[35]。本研究中,浮游植物结构与 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 紧密相关,这与陈康等^[36]对鄱阳湖柘林水库水体浮游植物群落结构的研究结果一致。

此外,部分学者认为水体中的溶解氧(DO)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})和五日生化需氧量(BOD_5)也会对浮游植物的生长产生影响^[37]。但是在本研究中,DO、 COD_{Mn} 和 BOD_5 与大多数浮游植物优势种的相关性不显著,表明 DO、 COD_{Mn} 和 BOD_5 不是影响浮游植物群落结构的主要因子。

3.3 草海湿地水质评价

水体富营养化评价有多种方法,但是往往单一方法不能反映出水体营养状态的真实状况,需要多种方法综合比较评价^[38],因此本研究选用丰度和多样性

指数对草海湿地进行综合分析。本研究表明,草海湿地 20 个采样点的浮游植物丰度为 $70.68 \times 10^6 - 100.00 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $93.16 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$,其中 19 个采样点处于富营养范围,占有所有采样点的 95%,表明草海湿地大部分水体处于富营养状态。一般认为,蓝藻和绿藻为富营养化水体的优势种^[33,34]。当浮游植物优势种大量生长且优势度高度集中时,水体发生水华的风险较大^[39]。本研究鉴定的 8 种优势种包括 2 种蓝藻和 4 种绿藻,且 20 个采样点中均是蓝藻和绿藻的细胞丰度占绝对优势,在条件适宜的情况下,草海湿地有暴发规模较大微囊藻水华的风险。另外,虽然草海水体中总氮、总磷浓度较高,但并未发生蓝藻水华,这可能与草海湿地的地貌特征和调查时间有关。一方面,草海属于浅水湖泊,周边有多个进水口和出水口,有利于水体的流动;另一方面,夏季的降水量最为集中,降水有利于水体的垂直运移。

生物多样性指数在一定程度上能反映水体营养状况^[40],一般来说,生物多样性指数越高,水质状况越好^[31]。本研究中,Shannon 多样性指数(H')表明草海水质大部分处于中度污染状态,Pielou 均匀度指数(J)也表明草海水质大部分处于中度污染状态。丰度和多样性指数对草海的评价结果基本一致,基本能够反映出草海水体的真实营养状态。

4 结论

本研究共鉴定出草海湿地夏季浮游植物 8 门 51 科 104 属,主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成。浮游植物细胞丰度变化较大,其中蓝藻丰度最大,绿藻次之。综合评价表明,草海基本处于中度污染状态,并且大部分水体为富营养状态。RDA 结果表明,草海湿地浮游植物群落结构受总氮、铵态氮、硝态氮、悬浮物、总磷和有机碳影响较大。

基于目前草海湿地水体的情况,应加强对草海湿地周围土地农业面源污染的控制和管理,同时还需加强贵州草海国家级自然保护区内水污染的综合治理和水生态修复工程的实施,控制氮、磷等营养盐的输入,防止水质的进一步恶化和水华的发生。本研究仅对草海湿地夏季浮游植物和部分水体环境因子进行了调查分析,鉴于草海湿地的特殊生态价值,后期应该在不同季节和年份对草海湿地浮游植物群落结构及其影响因子进行长期调查,以期为草海湿地的生态保护和可持续发展提供科学依据。

参考文献

- [1] MACHATE O, SCHMELLER D S, SCHULZE T, et al. Review: mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2023, 35(1): 3.
- [2] DU X, SONG D, MING K, et al. Functional responses of phytoplankton assemblages to watershed land use and environmental gradients [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 9: 819252.
- [3] DIEGO F, YAMILA B, GISELA M, et al. Controlling factors in planktonic communities over a salinity gradient in high-altitude lakes [J]. *International Journal of Limnology*, 2015, 51(3): 261-272.
- [4] 倪兆奎, 王圣瑞, 金相灿, 等. 云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2681-2689.
- [5] 君珊, 王东波, 周健华, 等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 787-798.
- [6] 张国庆, 杨雨玲, 唐爱国, 等. 新安江流域(屯溪段)浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 527-540.
- [7] GAYOSO A M. Long-term phytoplankton studies in the Bahía Blanca estuary, Argentina [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1998, 55(4): 655-660.
- [8] CARONNI S, CALABRETTI C, CITTERIO S, et al. The interactive effect of herbivory, nutrient enrichment and mucilage on shallow rocky macroalgal communities [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6908.
- [9] 汪琪, 黄蔚, 陈开宁, 等. 大溪水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1286-1297.
- [10] KATSIAPI M, MOUSTAKA-GOUNI M, MICHA-LOUDI E, et al. Phytoplankton and water quality in a Mediterranean drinking-water reservoir (Marathonas Reservoir, Greece) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 181: 563-575.
- [11] 杨毓鑫, 杜春艳, 钱湛, 等. 洞庭湖区南汉垵水体浮游植物群落结构特征及其影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 147-154.
- [12] 朱成斌, 胡菁, 龙云川, 等. 贵州草海沉积物重金属元素分布特征及健康风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2212-2221.
- [13] 张转玲, 谭红, 何锦林, 等. 贵州草海表层沉积物重金属污染特征及来源分析 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(12): 2314-2320.
- [14] 杨羽, 夏品华, 林陶, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 164-172.
- [15] 吴胜利, 夏品华, 林陶, 等. 贵州草海不同水位梯度下沉积物氮赋存形态及分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 407-415.
- [16] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1479-1485.
- [17] 秦趣, 陈忠全, 姚世美. 贵州威宁草海湿地生态安全评价 [J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(2): 27-33.
- [18] 秦趣, 黄艳, 崔小平. 基于 PSR 模型的云贵高原湿地生态系统健康评价 [J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(5): 26-31.
- [19] 尹晓爱, 江波, 洪江. 草海流域水质时空分布特征及污染评价 [J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(9): 40-45.
- [20] 徐婷, 徐跃, 江波, 等. 贵州草海湿地生态系统服务价值评估 [J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4295-4303.
- [21] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [22] 刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [23] 朱明明, 范存祥, 吴中奎, 等. 海珠国家湿地公园浮游植物群落结构时空变化 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1501-1508.
- [24] SOURNIA A. *Phytoplankton manual* [M]. Paris: UNESCO, 1978.
- [25] 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.
- [26] 孟顺龙, 陈家长, 范立民, 等. 2007年太湖五里湖浮游植物生态学特征 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 845-854.
- [27] SHANNON C E, WEAVER W. *The mathematical theory of communication* [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1998.
- [28] XIAO L J, WANG T, HAN B P. Grazing of *Daphnia galeata* and *Phyllodiatomus tunguidus* on phytoplankton in Liuxihe Reservoir, South China: in situ bottle experiments [J]. *Ecological Science*, 2008, 27(5): 363-367.
- [29] WANG Y, LIU Y J, GUO H, et al. Long-term nutrient variation trends and their potential impact on phytoplankton in the southern Yellow Sea, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41: 54-67.
- [30] 代亮亮, 李莉杰, 何梅, 等. 贵州草海秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系 [J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(2): 62-67.
- [31] 张家路, 王银平, 蔺丹清, 等. 安庆新洲水域浮游植物群

- 落结构特征[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 680-688.
- [32] 林岩璇, 汪星, 王瑜, 等. 镜泊湖浮游藻类功能群的演替特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2017, 30(4): 520-528.
- [33] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [34] 王洪铸, 王海军, 李艳, 等. 湖泊富营养化治理: 集中控磷, 或氮磷皆控? [J]. 水生生物学报, 2020, 44(5): 938-960.
- [35] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239-1247.
- [36] 陈康, 孟子豪, 李学梅, 等. 鄱阳湖流域柘林水库秋季浮游植物群落结构及其构建过程驱动机制[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 433-444.
- [37] 刘洋, 吕俊平, 刘琪, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 991-1002.
- [38] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [39] 姜庆宏, 潘彤, 李卫平, 等. 南海湖冬季浮游植物特征及与水质因子关系[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(4): 71-75.
- [40] 白海锋, 宋进喜, 龙永清, 等. 红碱淖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(8): 1064-1075.

Summer Phytoplankton Community Characteristics and Its Relationship with Water Environmental Factors in Caohai Wetland, Guizhou Province

LI Qing, ZHANG Shan, HE Bin^{**}, LI Wangjun, ZOU Shun, BAI Xiaolong, CHEN Yang, XUE Xiaohui

(Guizhou Province Key Laboratory of Ecological Protection and Restoration of Typical Plateau Wetlands, College of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie, Guizhou, 551700, China)

Abstract: In order to understand the community structure of phytoplankton and its relationship with water environmental factors in Caohai wetland, Guizhou Province, a survey of phytoplankton was conducted in the summer of 2022. The results showed that there were 8 phyla, 51 families and 104 genera of phytoplankton in Caohai wetland in summer of 2022, among which Chlorophyta was the most abundant, followed by Bacillariophyta and Cyanophyta. The average abundance of phytoplankton was 18.82×10^6 cells $\cdot L^{-1}$, and there were significant differences among sampling sites. From the perspective of dominant genera and abundance of phytoplankton, Cyanobacteria and Chlorophyta were overwhelmingly dominant. The results of Redundancy Analysis (RDA) showed that the community structure of phytoplankton in Caohai wetland was mainly affected by Total Nitrogen (TN), $NH_4^+ - N$, $NO_3^- - N$, Total Phosphorus (TP), Total Organic Carbon (TOC), and Total Suspended Solid (TSS). The results of phytoplankton diversity index and abundance evaluation showed that the Caohai wetland was in a eutrophic state in the summer of 2022, which was at a moderate pollution level, and the water body had the risk of Microcystis bloom.

Key words: Caohai wetland; phytoplankton; community structure; environmental factors; redundancy analysis

责任编辑: 陆雁, 陈少凡