

淮河中游浮游植物群落结构时空格局及 影响因子

杨晓曦¹ 刘凯 刘燕 龚江 周彦锋*

(农业农村部长江下游渔业资源环境科学观测实验站,

中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏无锡 214081)

【摘要】:为了解淮河中游浮游植物群落时空格局,于2019年6月(平水期)、9月(丰水期)和2020年2月(枯水期)对淮河中游河段28个断面的浮游植物和环境因子进行调查。淮河中游共鉴定出8门63属128种,平水期、丰水期和枯水期物种数分别为94、77和68,密度分别为 $0.06 \times 10^6 \sim 16.04 \times 10^6$ 、 $0.47 \times 10^6 \sim 41.62 \times 10^6$ 和 $0.43 \times 10^6 \sim 10.79 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$,生物量分别为 $0.03 \sim 3.54$ 、 $0.12 \sim 14.99$ 和 $0.14 \sim 25.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,优势种分别以微囊藻、微囊藻和梅尼小环藻等为主。空间格局方面,闸上的浮游植物密度和生物量显著高于其他区段。浮游植物密度与总磷、温度、高锰酸盐指数等环境因子呈显著正相关。CCA分析表明温度是影响淮河中游干流浮游植物群落结构的主要环境因子。

【关键词】:淮河中游 浮游植物 群落结构 优势种 水环境因子

【中图分类号】:Q948.8 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)010-2207-11

DOI:10.11870/cjlyzyhj202210010

浮游植物是水体生态系统中主要的初级生产者^[1],对水域生态系统的物质循环、能量流动和生态系统稳定等方面起到关键作用^[2]。浮游植物对水体环境变化的感知能力强,其群落结构和主要优势种在水体环境变化时会随之改变^[3,4],因此,浮游植物已成为国内外研究人员研究水域生态系统和评价水质环境的重要内容之一。王岳等^[5]从浮游植物种类、密度、多样性指数等方面,分析了长江干流浮游植物群落组成和水质营养状态。陈倩等^[6]利用浮游植物功能群和水质理化因子等指标对太湖水库蓄水前后浮游植物群落结构和水体富营养状态进行评估。时空格局是反映群落在空间的位置以及随时间变化的动态。鄱阳湖浮游植物时空分布差异明显,入湖口物种数显著多于出湖口,且受季节的因素影响浮游植物物种数差异明显^[7]。松花江哈尔滨段浮游植物群落结构具有一定的时空特征,不同季节优势种显著改变,受人为活动干扰明显区域浮游植物种群分布与其他区域存在差异^[8]。白石水库^[9]、丹江口水库^[10]等水域浮游植物也具有显著

¹收稿日期:2021-10-09;修回日期:2021-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD0900500);中国水产科学研究院基本科研业务费(2020XT13);中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD61);中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费专项(2021JBFM17)

作者简介:杨晓曦(1997~),男,硕士,实习研究员,主要研究方向为渔业资源与保护。E-mail:1298476977@qq.com

*通讯作者 E-mail:zhouyf@ffrc.cn

的时空分布特征。

淮河，起源于河南省桐柏山区，流经河南、安徽、江苏三省，干流全长约 1000km。淮河是我国重要水系之一，也是我国地理南北方的分界线。由于流域内人口密度高、产业结构不均衡等情况，导致水体污染严重，生物多样性降低，河流生态系统受到破坏^[11, 12]。目前，已有科研工作者在 2013 年对淮河流域春季浮游植物群落结构^[13]、淮河流域支流(如在 2016~2017 年对西淝河的浮游植物群落结构的调查^[14]等)浮游植物群落结构进行调查。但是对不同水期淮河干流中游的浮游植物群落结构及水质状况的调查存在空白。

本文以淮河中游干流为研究对象，通过对不同水期浮游植物群落结构状况进行调查，旨在为淮河流域生态系统的评估和恢复提供数据支持，为后续评估淮河流域水域生产能力等工作提供科学理论依据

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

淮河干流以洪河口和洪泽湖出口中渡为分界，其中，洪河口以西为淮河上游，洪河口至洪泽湖出口中渡为中游，中渡至三江营为下游。淮河干流中游全长约 366km，其中，洪河口至蚌埠闸段设有荆涂峡鲤、长吻鮠国家级水产种质资源保护区，本次调查西起三河尖，途径淮南市、蚌埠市，东至洪山头。

1.2 采样时间和样点设置

本次采样根据鱼类繁殖、索饵和越冬习性的时期，并结合淮河流域水期的特征，选择在 2019 年 6 月(平水期)、9 月(丰水期)和 2020 年 2 月(枯水期)开展采样工作。按照 10km×10km 将调查河段分成 32 个网格，三河尖至蚌埠闸段每个网格设置 1 个调查断面，共计 22 个;蚌埠闸至洪山头段每 2 个网格设置 1 个调查断面，共设置 6 个。每个断面设置 3 个采样点，共计设置 84 个采样点。其中，临淮岗闸和蚌埠闸为分界，1~6 号断面为三河尖至临淮岗闸上(闸上)，7~22 为临淮岗闸至蚌埠闸间(闸间)，23~28 号断面为蚌埠闸至洪山头(闸下)。

1.3 样品采集与鉴定

1.3.1 水质样品采集与检测方法

水质样品采集方法按照《水质采样方案设计技术规范(HJ495-2009)》进行^[15]，水体理化监测项目为温度(Tem)、pH、溶解氧(DO)、浊度(Tur)、透明度(SD)、水深(WD)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、高锰酸盐指数(CODMn)、叶绿素 a(Chl-a)共 13 项，按照《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》来进行分析^[16]。其中 Tem、pH、DO、Tur 和 WD 使用 HACHHydroLabDS5 便携式多参数水质测定仪现场测定，SD 使用塞氏盘进行现场检测;TP 和 DTP 采用钼酸铵分光光度法;TN 和 DTN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法;NO₂-N 采用紫外分光光度法;CODMn 采用酸式滴定法;Chl-a 采用丙酮提取分光光度法测定。

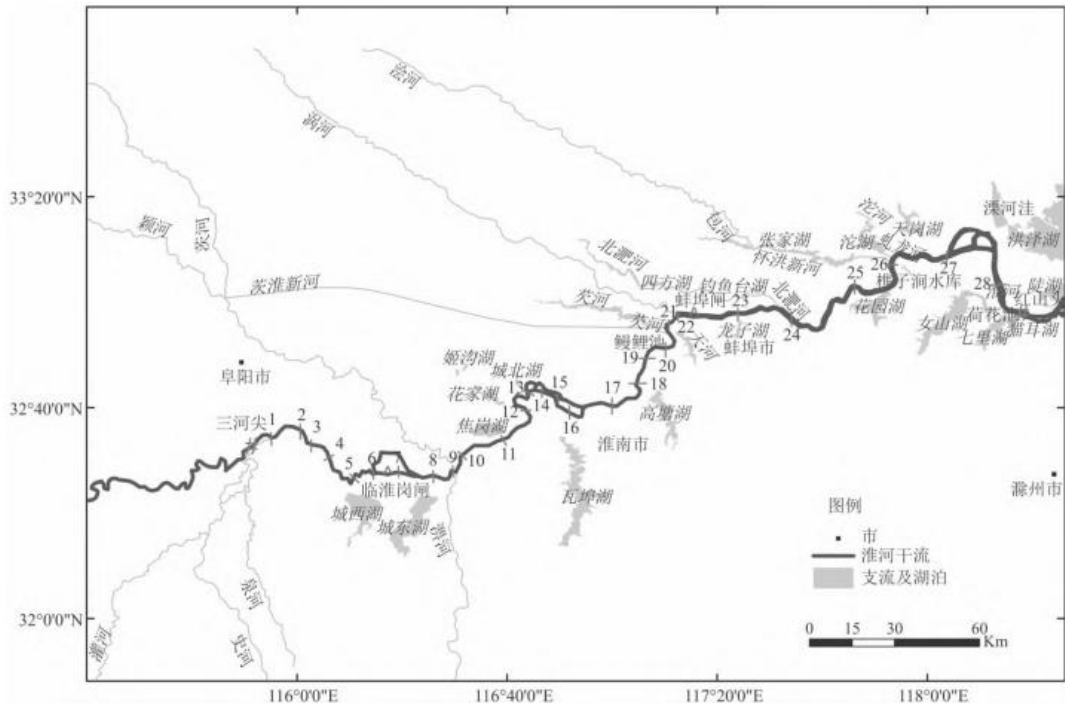


图1 断面设置示意图

1.3.2 浮游植物样品采集与鉴定方法

浮游植物样品的采集及处理方法参照《淡水浮游生物研究方法》^[17]。浮游植物定量样品:使用 1L 有机玻璃采水器采集水面以下 0.5m 处水样,按照 1.5%的体积比例加入鲁哥试剂进行固定,将采集的样品带回实验室静置 48h 后,虹吸上清液浓缩至 50mL。浮游植物定性样品:用 25#浮游生物网在表层至 0.5m 处拖动浮游生物网数次,待水滤去后打开浮游生物网下面的阀门,将采集到的浮游植物样品收集至 50mL 的标本瓶中,加入 4%的甲醛溶液现场固定。浮游植物鉴定主要参考《淡水微型生物与底栖动物图谱(第二版)》^[18]和《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[19]。

浮游植物在 10×40 倍显微镜下采用目镜视野法观察,定性时优势种应鉴定到种,其他种类鉴定到属。定量样品记录 100~200 个视野,记下每种浮游植物的细胞个数。每升水中浮游植物的数量按公式(1)进行计算:

$$N = \frac{C_s}{F_s \times F_n} \times \frac{V}{U} \times P_n \quad (1)$$

式中: C_s 为计数框面积, mm^2 , $C_s = 20\text{mm} \times 20\text{mm} = 400\text{mm}^2$; F_s 为视野面积, mm^2 , $F_s = \pi / 4d^2 = 0.159\text{mm}^2$, $d = 450 \mu\text{m}$; F_n 为计数视野数; V 为浓缩体积, mL; U 为计数框容积, mL; P_n 为计数, 个。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理汇总,使用 IBM SPSS 25.0 进行单因素方差分析 (Oneway ANOVA) 和 Pearson 相关性分析,采用 Duncan 法进行组间多重比较。使用 Origin Pro 2018 进行图片绘制。浮游植物群落结构特征采用生物多样性指数进行分析,Shannon-Wiener 多样性指数 (H')^[20,21]、Pielou 均匀度指数 (J')

^[22]和Margalef 丰富度指数(D) ^[23] 计算公式分别为:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (N_i / N) \log_2(N_i / N) \quad (2)$$

$$J' = H' / \log_2 S \quad (3)$$

$$D = (S-1) / \log_2 N \quad (4)$$

式中:S 为浮游植物物种数;N 为浮游植物个体总数;N_i 为第 i 种个体数。

浮游植物优势度根据浮游植物出现频率及密度 ^[24], 依照以下公式进行计算:

$$y = f_i \cdot P_i \quad (5)$$

式中:y 为优势度;f_i 为第 i 浮游植物的出现频率;P_i 为第 i 浮游植物密度占总浮游植物密度的比例, 当 $y \geq 0.02$ 时, 定为优势浮游植物 ^[25]。选择优势度 ≥ 0.02 的浮游植物功能群进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 分析。采用 Canoco for Windows 5.0 软件对优势种群数据和环境数据进行 RDA 分析。浮游植物优势种群矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换, 环境因子数据除 pH 外全部进行 $\lg(x+1)$ 转换 ^[26]。首先进行去趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA) 选择合适的排序和分析方法, 得出第 1 轴长度为 3.5, 根据分析结果, 本文选用了典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA), 并采用蒙特卡洛置换检验, 以逐步迭代的方式筛选出有显著解释性的环境因子, 进行分析作图, 以揭示显著环境因子对优势浮游植物功能群的影响。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成及优势种

淮河干流中游共计鉴定出 8 门 63 属 128 种, 其中, 绿藻门种类最丰富, 共计 29 属 63 种, 其次为硅藻门 13 属 28 种, 蓝藻门 9 属 18 种, 裸藻门 3 属 8 种, 金藻门和甲藻门分别 3 属 3 种, 裸藻门 2 属 3 种, 黄藻门 1 属 1 种。采样期间浮游植物种类组成和群落结构变化情况见图 2。浮游植物种类数呈现丰水期和枯水期显著高于平水期, 闸上显著高于闸间的时空分布特征。各个时期浮游植物种类相对占比前三位均为绿藻门、硅藻门和蓝藻门, 合计贡献浮游植物群落组成相对占比超过 80%。蓝藻门的物种数丰水期显著高于平水期和枯水期;甲藻门的物种数平水期显著高于枯水期;硅藻门、隐藻门和黄藻门的物种数枯水期显著高于平水期和丰水期;金藻门的物种数枯水期显著高于平水期。绿藻门的物种数闸下显著高于闸间, 其他浮游植物门类无显著空间差异。

采样期间浮游植物优势种及优势度详见表 1。浮游植物优势种共计 10 种, 平水期和丰水期均采集到微囊藻 (Microcystis), 平水期和枯水期均采集到梅尼小环藻 (Cyclotella meneghiniana) 和尖尾蓝隐藻 (Chroomonasacuta)。主要优势种呈现蓝藻门—蓝藻门—硅藻门的变化趋势。

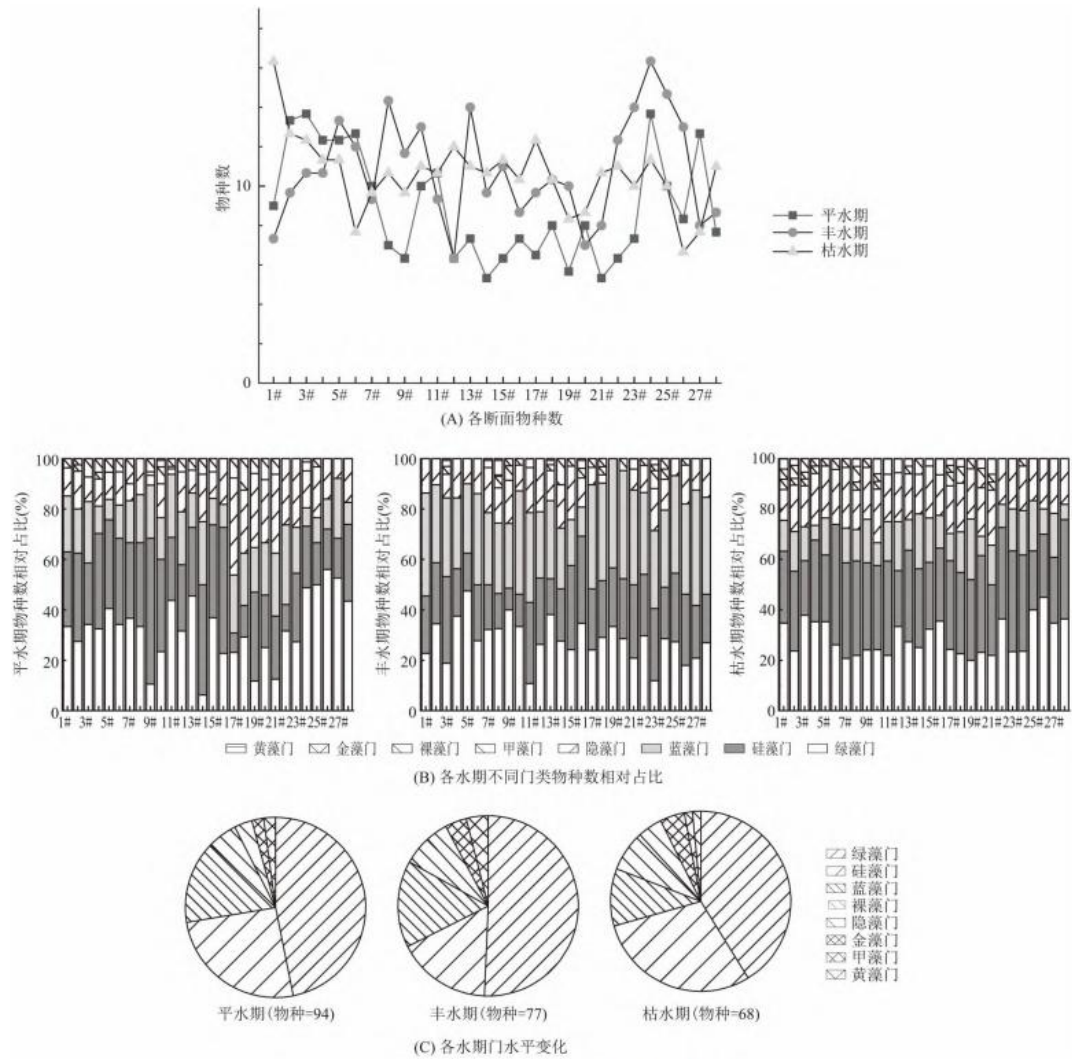


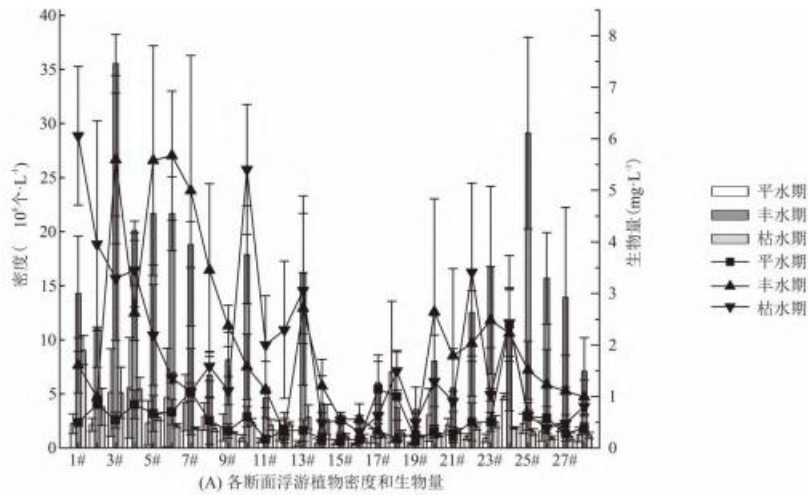
图2 淮河中游干流浮游植物物种数统计结果

2.2 浮游植物密度和生物量

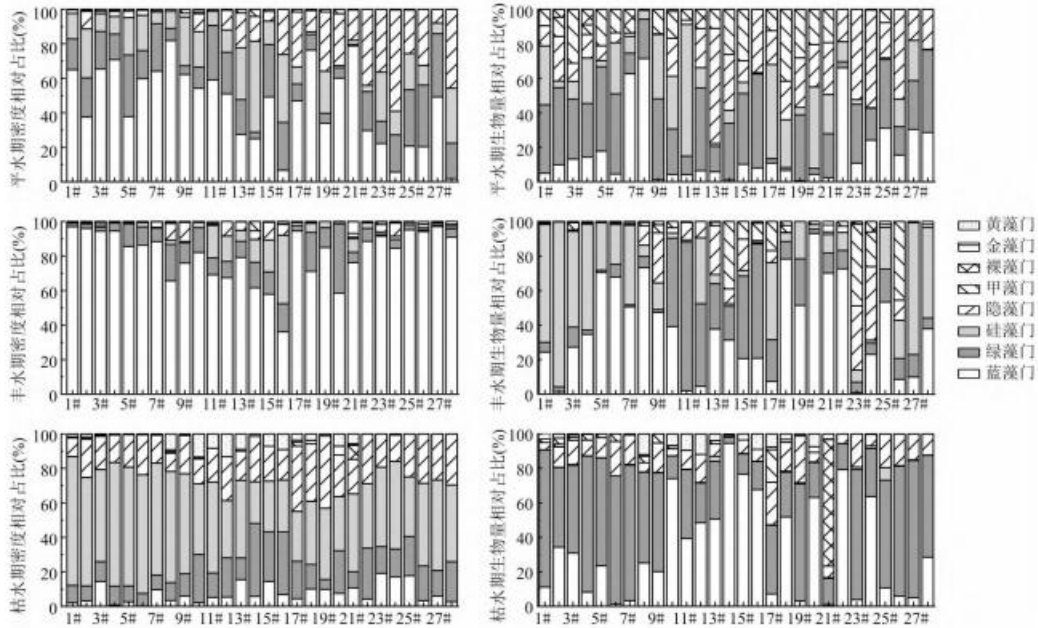
采样期间浮游植物密度和生物量变化情况见图3。淮河中游浮游植物密度变化范围为 $0.06 \times 10^6 \sim 41.62 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ ，平均密度为 $6.40 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浮游植物密度呈现丰水期显著高于平水期和枯水期，闸上显著高于闸间的时空分布态势；生物量变化范围分别为 $0.03 \sim 25.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，平均生物量为 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浮游植物生物量呈现枯水期和丰水期显著高于平水期，闸上显著高于闸下的时空分布态势。各物种密度和生物量在不同时期存在一定差异，其中，蓝藻门和绿藻门密度丰水期显著高于平水期和枯水期，硅藻门密度枯水期显著高于平水期和丰水期；蓝藻门生物量丰水期显著高于平水期和枯水期，甲藻门生物量丰水期显著高于枯水期，硅藻门和绿藻门生物量枯水期显著高于平水期和丰水期。空间分布蓝藻门和硅藻门密度闸上显著高于闸下和闸间，隐藻门密度闸下显著高于闸间，黄藻门闸间显著高于闸下；蓝藻门和硅藻门生物量闸上显著高于闸间和闸下，黄藻门生物量闸间显著高于闸下。

表 1 淮河中游浮游植物优势种及其在不同水期的优势度

优势种	优势度			水质指示状态
	平水期	丰水期	枯水期	
微囊藻 <i>Microcystis</i>	0.15	0.43	—	α-β 中污
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.04	—	0.45	α-β 中污
尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	0.06	—	0.15	α-β 中污
假鱼腥藻属 <i>Pseudanabaena</i>	—	0.08	—	α-中污
细小平裂藻 <i>Merismopediaminima</i>	—	0.16	—	α-中污
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	—	—	0.02	α-β 中污
(性菱形藻 <i>Nitzschia linearis</i>)	—	—	0.02	α-β 中污
嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonaserosa</i>	—	—	0.03	α-β 中污
丝藻 <i>Ulothrix</i>	—	—	0.02	α-β 中污
衣藻 <i>Chlamydomonas</i>	—	—	0.02	α-β 中污



(A) 各断面浮游植物密度和生物量



(B) 各断面浮游植物密度和生物量门水平相对占比

图 3 浮游植物密度和生物量

2.3 群落结构多样性

采样期间群落多样性结果见图4。淮河中游干流浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变动范围为 0.42~2.64, 平均值为 1.52。Shannon-Wiener 多样性指数时间格局呈现枯水期显著高于平水期和丰水期的态势, 空间格局无显著差异; Pielous 均匀度指数变动范围为 0.14~0.97, 平均值为 0.65。Pielous 均匀度指数时空格局呈现枯水期和平水期显著高于丰水期, 闸下和闸间显著高于闸上的态势。Margalef 丰富度指数变动范围为 0.09~1.21, 平均值分别为 0.61。Margalef 丰富度指数时空格局呈现枯水期显著高于平水期, 闸上显著高于闸间的态势。

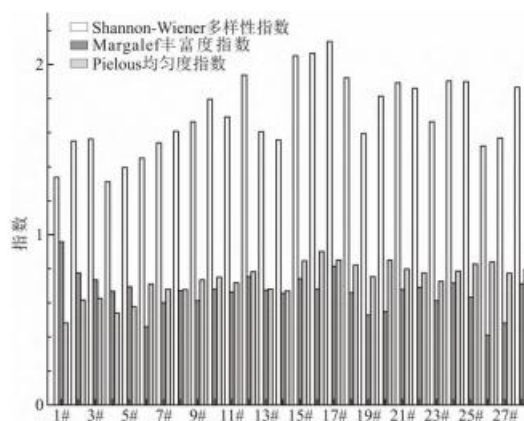


图4 不同断面多样性指数变化情况

2.4 浮游植物与环境因子的关系

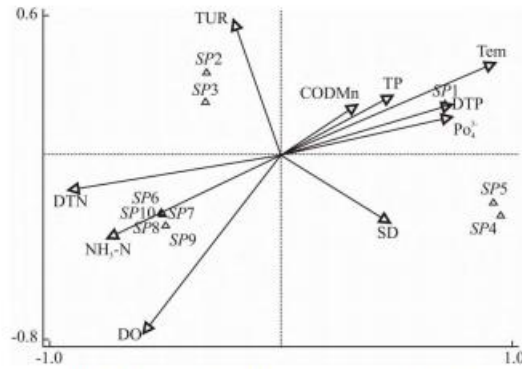
浮游植物密度和生物量与水体环境因子结果见表2。Pearson 相关性分析表明, 淮河中游干流平水期浮游植物密度与 TP、CODMn 和 Chl-a 呈显著正相关, 平水期生物量与 Chl-a 和 DO 呈显著正相关; 淮河中游干流丰水期浮游植物密度与 TP、CODMn 和 Chl-a 呈显著正相关, 丰水期生物量与 Chl-a 和 DO 呈显著正相关; 淮河中游干流枯水期浮游植物密度与 TN、DTN、TP、DTP、NH₃-N、PO₃-4、CODMn、Chl-a、DO 和 pH 呈显著正相关, 枯水期生物量与 TP 和 Chl-a 呈显著正相关。

为了解环境因子对浮游植物优势种的影响, 经蒙特卡洛置换检验对主要环境因子进行筛选, 保留 $p < 0.05$ 的理化因子, 共筛选出 10 个环境因子。选取浮游植物优势种与筛选出的环境因子进行 CCA 分析, 分析结果如图 5 所示, T_{em} 、DO、TUR、DTN、DTP、CODMn、TN、NH₃-N 和 TP 与浮游植物呈显著相关 ($p < 0.01$), 与 SD 和 PO₃-4 与浮游植物呈显著相关 ($p < 0.05$)。结果显示, 第 1 排序轴和第 2 排序轴特征值分别为 0.853 和 0.166, 两轴累计变异百分率解释了物种数据的 55.15%, 解释了物种与环境之间关系的 95.46%, 这说明优势种与环境因子之间存在显著相关性, 其中最重要的是 T_{em} , 解释了总变异率的 44.9%, 其后四位分别为 DO (12.4%)、TUR (2.4%)、TP (1.1%)、DTP (1.0%)。环境因子对浮游植物密度解释了 61.39%, 这说明还有其他的环境因子对浮游植物密度的变化产生了重要影响。

表 2 浮游植物密度和生物量与环境因子相关性分析

相关性	平水期		丰水期		枯水期	
	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量
TN	0.125	0.201	0.285**	-0.021	0.499**	0.052
DTN	0.037	0.159	0.018	-0.235*	0.395**	-0.038
NO ₂	0.025	0.040	0.004	-0.029	0.154	-0.143
NH ₄	-0.019	-0.034	0.083	-0.021	0.589**	0.068
TP	0.242*	0.061	0.532**	0.352**	0.636**	0.284**
DTP	0.054	-0.034	0.146	0.114	0.425**	0.170
PO ₄	-0.027	-0.076	0.080	0.081	0.402**	0.166
COD	0.275*	0.130	0.465**	0.324**	0.662**	0.199
Chl	0.580**	0.600**	0.546**	0.273*	0.871**	0.255*
Tem	-0.062	0.107	0.123	0.239*	0.019	-0.016
DO	0.075	0.273*	-0.001	0.112	0.541**	0.152
SD	-0.175	-0.035	-0.199	-0.179	0.056	-0.045
TDS	0.133	0.031	0.026	0.289**	0.097	0.054
pH	-0.095	0.164	0.023	0.138	0.312**	0.068
H	-0.135	-0.061	-0.142	-0.142	-0.017	0.064

注:**在 0.01 级别(双尾), 相关性显著;*在 0.05 级别(双尾), 相关性显著



注: SP1: 微囊藻; SP2: 梅尼小环藻; SP3: 尖尾蓝隐藻; SP4: 假鱼腥藻; SP5: 细小平裂藻; SP6: 尖针杆藻; SP7: 线性菱形藻; SP8: 嗜蚀隐藻; SP9: 丝藻; SP10: 衣藻.

图 5 浮游植物优势种与环境因子 CCA 分析

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

浮游植物群落结构与分布特征对水体生态系统的平衡起到非常重要的作用^[27~29]。相关研究表明,浮游植物存在一定季节演变规律,主要呈现春、秋季以喜低温的硅藻、金藻为主,夏季以喜高温的蓝藻^[30]和绿藻为主,冬季浮游植物种类和数量都相对较少^[19]。淮河中游的浮游植物群落结构变化与上述规律相符。在本次调查中,按种类分类汇总,平水期、丰水期和枯水期均呈现绿藻—硅藻—蓝藻型,这与沂河(淮河流域内较大的河流)^[31]、南水北调中线干渠^[32]和富春江水库^[33]的调查结果类似。水体浮游植物群落结构因环

境变化也会随之变化。黑河营养水平较低的上游以硅藻为主, 营养水平较高的下游主要以蓝、绿藻中的中富营养型为主^[34]。本次调查发现, 淮河中游密度平水期和丰水期呈现蓝藻型, 枯水期呈现硅藻—绿藻型, 同时, 平水期和枯水期的优势种指示水体水质呈现中富营养型, 丰水期的优势种指示水体水质呈现中富—富营养型。另外, 物种多样性数据显示, 枯水期 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielous 均匀度指数均显著高于其他时期, 这说明淮河水体受水期影响, 其营养水平会随之变化, 进而影响到浮游植物群落结构。

空间格局上, 淮河中游浮游植物密度闸上显著高于闸间, 生物量闸上显著高于闸下。闸坝可以控制水体的流动, 形成弱水力条件, 促使大量营养物质沉积, 为蓝藻门提供较适宜的生长环境^[35]。同时, 闸坝调控水位对硅藻门浮游植物的生长有显著影响^[36, 37]。本次调查中, 蓝藻门与硅藻门的密度和生物量均呈现闸上显著高于闸下和闸间。该结果表明, 水利设施是浮游植物群落结构的影响因素。

3.2 环境因子对浮游植物群落结构的影响

相关研究表明, 环境因子会影响浮游植物的群落分布^[38, 39]。Tem 是影响浮游植物生长最直接的环境因子^[40]。Tem 升高会促进浮游植物的生长繁殖, 并且不同物种对 Tem 的响应存在差异, 例如, 蓝藻的最适生长温度为 25℃~35℃^[30], 而在低温环境下, 小型、繁殖速率快的硅藻门较易占据优势^[42]。在本次调查中, Tem 与蓝藻门的三个优势种呈正相关, 与硅藻门、隐藻门和绿藻门呈负相关。当丰水期温度较高时, 喜温的蓝藻门会大量繁殖; 当枯水期温度较低时, 喜冷的硅藻门会大量繁殖。因此, Tem 影响淮河浮游植物群落结构。

自然水体中 DO 主要来源于空气和浮游植物光合作用。浮游植物密度的变化会引起水体中 DO 的变化, DO 参与浮游植物的生命活动^[43]。Tem 是影响 DO 的一大因素, Tem 升高 DO 含量随之降低。CCA 分析结果显示, 淮河中游 Tem 与 DO 呈负相关。同时, 硅藻门、绿藻门的物种与 DO 存在正相关性, 说明 DO 受 Tem 和浮游植物的共同影响。

TUR 是反映液体对光线通过时产生阻碍程度的指标。通常情况下, 浮游植物初级生产力最大值出现在水下 0~1.6m^[44]。航运河道内受航船和水动力条件等因素的影响, 水体含沙量大, 降低光在水中的传播, 进而降低光补偿点深度。同时, 粒径相似的浮游植物和泥沙会随着水体运动发生迁移, 因此, 浮游植物群落结构会随着 TUR 的变化而改变^[8]。本次调查发现, 相较于其他水期, 受枯水期水体流动较缓的影响, 浮游植物优势种与 TUR 相关性较平水期浮游植物优势种低; 同时, TUR 与硅藻门、隐藻门种类关系密切, 该结果表明, TUR 变化会引起浮游植物群落结构的改变。

氮、磷是浮游植物生长所必需的元素。在自然环境中, 浮游植物可利用的 N 远比 P 多, 水体内的 TP 含量对浮游植物分布、群落结构、演替等特征关系密切。Reynold 等研究发现, 蓝藻门的种类适宜生活在 P 含量相对较高且温度适宜的水体环境中^[45]。本研究发现, 蓝藻门的种类分布呈现随 P 含量升高而升高的趋势。氮磷比 (N:P) 被认为是可以用于界定水中浮游植物生长限制因素的指标^[46], 结合浮游植物“经验分子式”, 按质量计 N:P=7.2 为界限, 当大于该比值时, 可以认为 P 为限制浮游植物生长的因素; 当小于该比值时, 可以认为 N 为限制浮游植物生长的因素。淮河干流 3 个水期按质量计 N:P 均值分别为 11.86、20.14 和 41.96, 属于磷限制。CCA 分析结果发现, 硅藻门的优势种与 NH₃-N 的相关性较高, 而与 P 元素呈负相关。通常情况下, 溶解于水中的分子态氮通过固氮作用转化为可被植物利用的 NH₃-N 或 NO₃-N, 一般情况下浮游植物最先利用的是 NH₃-N^[43]。硅藻生长的最适 p 浓度较低, 枯水期磷浓度在 3 个水期最低, 此时水体营养条件更适宜硅藻的生长。

4 结论

(1)本次调查在淮河中游干流共计鉴定出 128 种浮游植物,群落结构以蓝藻门、绿藻门和硅藻门占据主导地位。

(2)浮游植物物种数呈现丰水期和枯水期显著高于平水期,闸上显著高于闸间的特征;密度呈现丰水期显著高于平水期和枯水期,闸上显著高于闸间的特征;生物量呈现枯水期和丰水期显著高于平水期,闸上显著高于闸下的特征。

(3)Tem 是影响淮河中游干流浮游植物群落结构的主要环境因子。

参考文献:

[1] 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.

[2] MANICKAM N, SA RAVANA BHAVAN P, SANTHANAM P, et al. Phytoplankton biodiversity in the two perennial lakes of coimbatore, tamil nadu, india [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1) : 80—89

[3]吴天浩,刘劲松,邓建明,等.大型过水性湖泊—洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J].湖泊科学,2019,31(2):440—448.

[4] 张佳敏, 高健, 杨诚, 等. 以鲢、鳙养殖为主的长江中下游武山湖浮游植物群落结构特征 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(6):1771—1783.

[5] 王岳, 夏爽, 裴国凤. 长江干流湖北段浮游藻类群落结构特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6):916—922.

[6] 陈倩, 吴琼, 罗欢. 太湖水库蓄水前后浮游植物群落结构特征 [J]. 生态科学, 2020, 39(6):75—82.

[7] 陈明华. 鄱阳湖浮游植物时空格局及环境解析 [D]. 南昌:南昌大学, 2019.

[8] 马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性 [J]. 生态学报, 2021, 41(1):224—234.

[9] 李沂軒. 白石水库浮游植物群落结构的时空格局及粒径谱研究 [D]. 大连:大连海洋大学, 2016.

[10] 王英华. 丹江口水库浮游植物的时空格局 [D]. 长春:吉林建筑大学, 2016.

[11] 李瑶瑶. 淮河流域(河南段)河流生态系统健康评价及修复模式研究 [D]. 郑州:郑州大学, 2015.

[12] 左其亭, 陈豪, 张永勇. 淮河中上游水生态健康影响因子及其健康评价 [J]. 水利学报, 2015,

46(9):1019—1027.

[13] 朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏, 等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(3):637—645.

[14] 张珊, 商乃萱, 张金羽, 等. 淮河流域西淝河浮游植物群落结构特征 [J]. 水生态学杂志, 2020, 41(4):81—89.

[15] 中华人民共和国国家环境保护部. 水质采样方案设计技术规定:HJ495-2009 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.

[16] 国家环境保护总局国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB3838-2002 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

[17] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京:科学出版社, 1995.

[18] 周凤霞. 淡水微型生物与底栖动物图谱 [M]. 北京:化学工业出版社, 2011.

[19] 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.

[20] HUGHES B D. The influence of factors other than pollution on the value of Shannon diversity index for benthic macroinvertebrates in streams [J]. Water Research, 1978, 12: 359—364.

[21] LAN F S, PETER J F. A tribute to Claude Shannon (1916—2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ Index [J]. Global Ecology and Biogeography, 2003, 12: 177—179.

[22] WASHINGTON H G. Diversity and community comparison indices [J]. Water Research, 1984, 18(6): 653—694.

[23] MARGALEF D R. In perspective marine biology (A Buzzati Traverso ed) [M]. California: University California Press, 1958: 323—347.

[24] AKSNES D L, WASSMANN P. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production [J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(5): 978—985.

[25] LAMPITT R S, WISHNER K F, TURLEY C M, et al. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton [J]. Marine Biology, 1993, 116(4): 689—702.

[26] 王华, 杨树平, 房晟忠, 等. 滇池浮游植物群落特征及与环境因子的典范对应分析 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(2):544—552.

- [27] 孙莹蓓, 罗淑葱, 韦桂峰, 等. 大沙河水库浮游植物种类组成及季节性变化 [J]. 资源科学, 2014, 36(8):1732—1738.
- [28] 马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性 [J]. 生态学报, 2021, 41(1):224—234.
- [29] 葛优, 周彦锋, 王晨赫, 等. 阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(7):3027—3039.
- [30] 陈开宁, 周万平, 鲍传和, 等. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应——以太湖五里湖大型围隔示范工程为例 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(4):359—366.
- [31] 高远, 慈海鑫, 亓树财, 等. 沂河 4 条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价 [J]. 环境科学研究, 2009, 22(2):176—180.
- [32] 张春梅, 朱宇轩, 宋高飞, 等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(3):675—686.
- [33] 盛海燕, 虞左明, 韩轶才, 等. 亚热带大型河流型水库—富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(2):235—243.
- [34] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(1):159—170.
- [35] 胡智华, 林妙丽, 李港, 等. 城市闸控河流浮游植物群落结构特征及影响因素 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(9):1—10.
- [36] 李飞鹏, 高雅, 张海平, 等. 流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(1):44—49.
- [37] 张显忠. 三峡库区重庆段泥沙对硅藻生长影响试验研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [38] JIANG Y J, HE W, LIU W X, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 58—67.
- [39] ARHONDITSIS G B, WINDER M, BRETT M T, et al. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. Water Research, 2004, 38:4013—4027.
- [40] 田永强. 淡水浮游植物功能类群划分方法及其生态学应用研究进展 [J]. 亚热带植物科学, 2015, 44(4):349—354.
- [41] NALEWAJKO C, MURPHY TP. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of Anabaena and Microcystis in Lake Biwa, Japan: An experimental

approach [J]. *Limnology*, 2001, 2(1):45-48.

[42] 于宗灵, 陈威, 赵然, 等. 松花江干流 2014~2019 年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 [J]. *环境科学*, 2021, 42(2):819-830.

[43] 王武. 鱼类增养殖学 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000:62-68.

[44] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 等. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布 [J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5):853-860.

[45] Reynold C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5):417-428.

[46] 王玉琳, 汪靓, 华祖林, 等. 氮磷比对湖泊富营养化模型参数敏感性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6):2893-2901.