

文章编号: 1674-5566(2025)01-0056-13

DOI: 10.12024/jsou.20241004659

上海城市河网冬季浮游植物功能群群落构建机制及其驱动因素

邢雅微^{1,2}, 卢智灵³, 王婷⁴, 徐肖莹¹, 王丽卿^{1,2}, 张玮^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 环境DNA技术与水生生态健康评估工程中心, 上海 201306; 3. 上海市水利管理事务中心, 上海 200002; 4. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092)

摘要: 浮游植物作为水体的重要初级生产者, 其功能群特征在维持水生生态系统稳定性方面发挥着关键作用。为揭示超大型城市河网浮游植物功能群特征和构建机制, 明确影响其变化的关键因子, 选取上海19条代表性中小河道, 对40个位点的浮游植物功能群特征以及环境因子开展了调查。结果表明, 本研究共鉴定出浮游植物8门175种, 可划分为23个功能类群, 其中B、D、J、MP、P、S1、X1、X2、X3、Y为优势功能群。聚类分析发现, 中小河道40个采样点可划分为低营养盐(G1)和高营养盐(G2)两个特征组, 两个特征组在Shannon-Wiener指数、Margalef指数、功能群群落组成以及环境因子方面, 均存在显著差异($P < 0.05$)。群落距离衰减曲线分析以及校正随机率(Modified stochasticity ratio, MST)分析显示, 上海河道浮游植物功能群的构建受到环境过滤和空间扩散限制两种因素的共同作用, 且随机性过程占主导; G1组群落构建主要受环境过滤作用影响, 而更高营养的G2组则主要受空间扩散作用影响。差异性分析和多元回归分析表明, 水体总氮、亚硝氮、总磷、电导率和溶解氧是影响上海河道浮游植物功能群结构的主要环境因子。本研究为深入了解超大型城市河网水体生物多样性和生态功能维持机制, 以及城市河网水生态系统保护提供基础资料。

关键词: 城市河道; 浮游植物; 功能群; 环境过滤作用; 随机性过程

中图分类号: Q 178.1 文献标志码: A

气候变化和人类活动加剧了城市河网的水质恶化、生物多样性丧失和生态功能的退化^[1-2], 并引发一系列的生态安全和经济发展问题。浮游植物是城市水生生态系统中重要的初级生产者, 能够快速响应水环境变化, 有效反映水体的健康状况^[3]。目前, 浮游植物的生态学研究多采用系统分类方法进行聚类分析, 但该方法不能很好地体现出浮游植物的生态功能^[4]; 2002年REYNOLDS等^[5]提出浮游植物功能群的概念, 根据生境和生态特征对浮游植物进行分类, 可以更加准确地描述其生境特征^[6]。近年来, 针对浮游植物功能群的相关研究逐渐全面, 同时也证实了浮游植物功能群对水环境健康的指示作用, 例如一项鄱阳湖的研究^[6]发现, 浮游植物功能群与浮游植物群落相比, 对环境的变化更加敏感; 武宇

圣等^[7]通过对骆马湖浮游植物功能群的分析发现, 相较于香浓-威纳多样性指数(Shannon-Wiener index)和综合营养状态指数(Comprehensive trophic level index, TLI), 利用功能群对水质进行评价有更好的适用性和预警性; ZHU等^[8]将浮游植物功能群应用至北运河水质评价中, 表明浮游植物功能群比常规理化指标法和浮游植物多样性指数法更适合城市河流水质的评价。不过, 这些研究主要关注湖泊、水库或某个单一的河流, 关于城市河网, 尤其是超大型城市河道浮游植物功能群的研究鲜有报道。

浮游植物群落构建的机制研究一直是水生生物多样性维持机制研究的主要问题^[9], 是开展水生生态保护的理论基础。目前, 关于群落构建机制有两种主流理论: 生态位理论和中性理论。生

收稿日期: 2024-10-12 修回日期: 2024-10-27

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(19DZ1204504); 上海市水务局项目(11N78361358220211402)

作者简介: 邢雅微(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游生物生态。E-mail: aquaxyw@163.com

通信作者: 张 玮, E-mail: weizhang@shou.edu.cn

版权所有 © 《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

态位理论认为确定性过程(环境过滤作用)影响了浮游植物群落组成^[10],而中性理论则强调随机性过程(扩散限制作用)在群落构建中的作用^[11]。随着群落构建研究的逐渐完善,越来越多的研究表明,环境过滤和扩散限制在浮游植物群落构建过程中共同发挥作用,二者的重要性占比会因生态环境和时空尺度产生变化^[12]。例如,吴强等^[6]在鄱阳湖和 MENG 等^[13]在武昌湖的研究均发现,浮游植物功能群的群落构建受到环境过滤和空间扩散限制的双重影响。但二者的研究却由不同的过程主导,可能是由于扩散限制会随研究区域的扩大而逐渐增强,后者研究区域较小,浮游植物在水体中易于扩散,因此群落构建主要受到环境因素的影响^[14]。尽管越来越多的人认识到了这两种不同的生态过程,但大多数研究仍局限于关注不同季节或不同区域下的浮游植物群落构建机制,针对于同一季节不同生境下浮游植物功能群群落构建机制的相关研究仍然匮乏。

上海是中国的经济中心,是居住人口最多的超大城市,河网水系发达,河湖水面率达到了10.30%,因水而生、依水而兴^[15],但城市发展也导致了河道面临生活污水、工业污水、建筑污水、大气沉降等多重因素的威胁,影响着城市的生态与人类的健康。因此,了解其河道浮游植物群落的构建机制及其驱动因素,是科学管理河道生态环境,保障水资源水生态健康的先决条件。上海中小型河道营养盐浓度偏高,蓝藻易在高温季节占据优势,导致物种单一,群落多样性较低,并且相较于高温季节而言,冬季的浮游植物群落结构更加稳定^[16-17]。因此本研究针对上海的冬季河道浮游植物及环境因子进行调查,根据经典功能群(Functional group, FG)法对浮游植物功能群进行划分,探究上海河道冬季浮游植物功能群的构建机制,分析浮游植物群落结构组成差异,通过校正随机率分析(Modified stochasticity ratio, MST)、方差分解分析(Variation partition analysis, VPA)量化环境因子和空间过程对浮游植物功能群群落的作用,以明确驱动大型城市河道浮游植物功能群群落结构变化的影响因素,以期为进一步了解全国乃至全球的大型城市水体生物多样性形成和维持机制,以及城市河网水生生态系统保护和治理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

根据最新统计,上海市共有河道(湖泊)46 822 条(个),且具有自然与人工挖掘河道交织、可控制调度的特征^[15,18]。本研究于2015年12月至2016年1月选取上海8个区内的19条典型的中小型河道,根据长度,每条河道设置2~3个采样位点,共对40个采样点进行了调查,河道分布位置如图1所示。

1.2 样品采集及测定

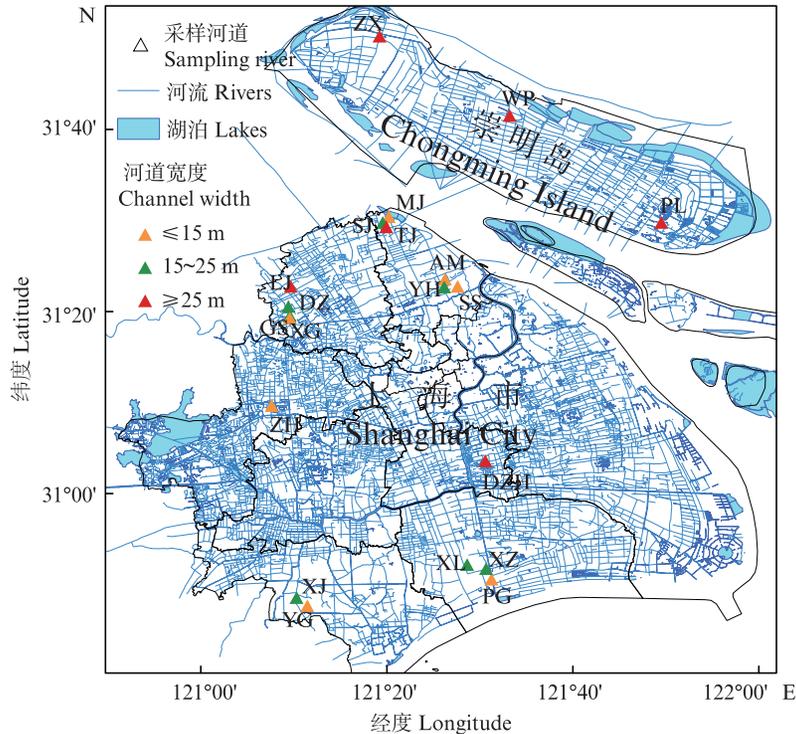
采用便携式多参数水质监测仪(YSI pro-plus, USA)测定现场指标:水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、盐度(Sal)、电导率(EC),并使用赛氏盘测定河道透明度(SD)。水质测定方法参考《水和废水监测分析方法(第四版)》,对采集的水样进行总氮(TN)、总磷(TP)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、叶绿素 a (*Chl.a*)、高锰酸盐(COD_{Mn})、溶解性硅酸盐(DSi)、总有机碳(TOC)的测定。取水深0.5 m 和 1.5 m 的混合水样 1 L,现场加入 15 mL 鲁哥试剂染色固定,避光条件静置 48 h 后,虹吸掉上层澄清液,浓缩至 30 mL,在 40 倍镜下进行浮游植物鉴定,分类鉴定主要参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[19]。

1.3 数据处理与分析

河道分布图由 ArcGIS 10.8 软件完成绘制。利用 R 4.3.1 中的 vegan 包进行层次聚类分析和主坐标分析(Principal coordinate analysis, PCoA)对浮游植物功能群(Functional groups, FGs)进行分组,并使用相似性分析(Analysis of similarities, ANOSIM)确定组间环境因子及生物因子的差异。通过分析浮游植物功能群的 Bray-Curtis 距离与地理距离(使用 R 语言的 geosphere 包中的 distm 函数计算)及环境距离(通过 vegan 包中的 vegdist 函数获得)之间的关系,并通过“NST”包计算校正随机率以评估在浮游植物功能群的群落构建过程中,确定性与随机性过程的相对重要性。将浮游植物功能群密度及环境因子(除 pH)数据进行 $\lg(x+1)$ 转换,对环境因子进行去共线性分析筛选,采用 SPSS 25.0 对数据进行正态检验后,进行逐步多元线性回归分析,计算不同生境条件下,环境参数与 FGs 之间的 Spearman 相关系数,探讨 FGs 与环境参数的相关性。采用多元回归模型来估计环

境参数的差异对 FGs 差异的解释程度,并在 R 中分别使用 psych、relaimpo、vegan 和 packfor 包进行

Spearman 相关性、多元回归和变差分解分析,使用 ggplot2 包进行可视化。



AM. 庵木港;DZ. 东周泾;DZH. 大寨河;GS. 顾泗泾;LJ. 陆泾河;MJ. 毛家塘;PG. 彭公塘;PL. 琵琶河;SJ. 东家湾;SS. 沈师浜;TJ. 陶家河;WP. 万平河;XG. 小顾浦;XJ. 斜泾港;XL. 新陆港;XZ. 新中河;YG. 勇敢河;YH. 杨行长浜;ZH. 中横港;ZX. 中心河。
AM. Anmu Port; DZ. Dongzhoujing; DZH. Dazhai River; GS. Gusijing; LJ. Lujing River; MJ. Maojiatang; PG. Penggongtang; PL. Pulu River; SJ. Shujia Bay; SS. Shenshibang; TJ. Taojia River; WP. Wanping River; XG. Xiaogupu; XJ. Xiejing Port; XL. Xinlu Port; XZ. Xinzhong River; YG. Yonggan River; YH. Yanghangchangbang; ZH. Zhongheng Port; ZX. Zhongxin River.

图1 上海市采样河道分布图

Fig. 1 Distribution of sampling rivers in Shanghai City

优势度指数(Y)计算公式如下:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为第*i*功能群的细胞总数; N 为样品中全部功能群的个数; f_i 为第*i*功能群在所有采样点中出现的频率;当 $Y \geq 0.02$ 时,认定为采样点内的优势功能群。

2 结果

2.1 上海市冬季中小型河道浮游植物群落组成

在40个采样点位中,共检出浮游植物8门75属175种,其中绿藻门种类最多,为77种,其次为硅藻门49种,蓝藻门23种;其他依次为裸藻门、金藻门、隐藻门、甲藻门和黄藻门。藻类丰度为 $3.14 \times 10^4 \sim 907.93 \times 10^4$ cells/L,平均为 239.99×10^4 cells/L,生物量平均为1.89 mg/L。硅藻门、蓝藻门和绿藻门占比较高,优势种为硅藻门的江河骨条藻(*Skeletonema potamos*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、

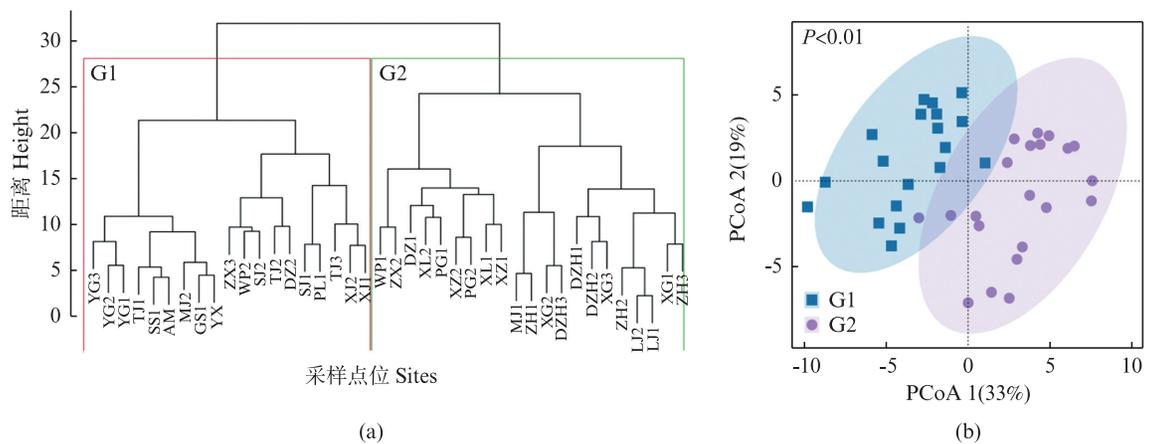
直链藻(*Melosira* sp.),绿藻门的普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)。

2.2 浮游植物功能类群组成及分布特征

按照REYNOLDS等^[5]和PADISÁK等^[20]提出的FG功能群划分方法进行划分,上海中小河道浮游植物共分为23个功能类群,分别为B、C、D、E、F、G、H1、J、K、Lo、M、MP、P、S1、S2、T、W1、W2、Ws、X1、X2、X3、Y(表1),其中10个功能类群占优,分别为B、D、J、MP、P、S1、X1、X2、X3、Y。通过对各采样点浮游植物功能群密度进行聚类分析发现,40个点位可以分为两组(图2a);PCoA分析显示,第一轴贡献率为33%,第二轴贡献率为19%,两轴总贡献率为52%,能够解释大部分浮游植物功能群的差异,两组之间在浮游植物功能群结构上存在显著差异($P < 0.01$),见图2b。

表1 上海河道浮游植物功能群组成
Tab. 1 Composition of phytoplankton functional groups in Shanghai River

功能群 Functional group	代表藻种 Representative algae species	适应生境 Habitat
B	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	中营养、浅水
C	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	中营养、中小型
D	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.、菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.、江河骨条藻 <i>Skeletonema potamos</i>	中营养、较混浊
E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	贫营养或异养型、小型、浅水
F	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.、蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp.	中活富营养、清洁、高混合
G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i> 、实球藻 <i>Pandorina morum</i>	富营养、停滞水层
H1	长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	富营养、氮缺乏
J	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 、双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i> 、四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	富营养、混合、浅水
K	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	富营养、浅水
Lo	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i> 、裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	寡至富营养型、中型或大型
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	中小型的富营养或重度富营养水体
MP	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.、舟形藻 <i>Navicula</i> sp.、双菱藻 <i>Surirella</i> sp.	经常性搅动、浅水、浑浊水体
P	直链藻 <i>Melosira</i> sp.、脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	持续或半持续的混合水层
S1	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.、浮丝藻 <i>Planktothrix</i> sp.	浑浊、透明度低水体
S2	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.	温暖的、浅的、中碱度的水体
T	游丝藻 <i>Planctonema</i> sp.	持续混合水体
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.、梨形扁裸藻 <i>Phacus pyrum</i>	有机质丰富、浅水
W2	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	中到富营养、浅水
Ws	黄群藻 <i>Synura</i> sp.	富含腐殖质
X1	旋转单针藻 <i>Monoraphidium contortum</i> 、纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	富到高度富营养、浅水
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.、尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	中到富营养、浅水
X3	普通小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> 、布纹藻 <i>Gyrosigma</i> sp.、弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.	中营养、混合、浅水
Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.、卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.	静水水体



(a)中每个分支的字母为每条河道名字缩写(图1),数字为每条河道采样点序号。
The letter of each branch in(a) is the abbreviation of each river name(Fig.1), and the number is the sampling point number of each river.

图2 基于浮游植物功能群的聚类分析(a)和主坐标分析(b)

Fig. 2 Cluster analysis (a) and Principal coordinates analysis (b) based on phytoplankton functional groups

对比G1和G2两组生物参数发现,G2组浮游植物的 α -多样性(Shannon指数、Margalef指数)和藻类丰度均显著高于G1组($P<0.001$),见图3a~3d;两组优势功能群存在差异,G1组以P、J、X2功能群为代表,而G2组则以J、B、P功能群为代表($Y>10%$),但总体上均为表征水体富营养化的类群;G2组中的适合浑浊、富营养水体的功能群(MP、S1)相对丰度显著高于G1组(图3e~3f)。

2.3 浮游植物功能群群落的构建机制

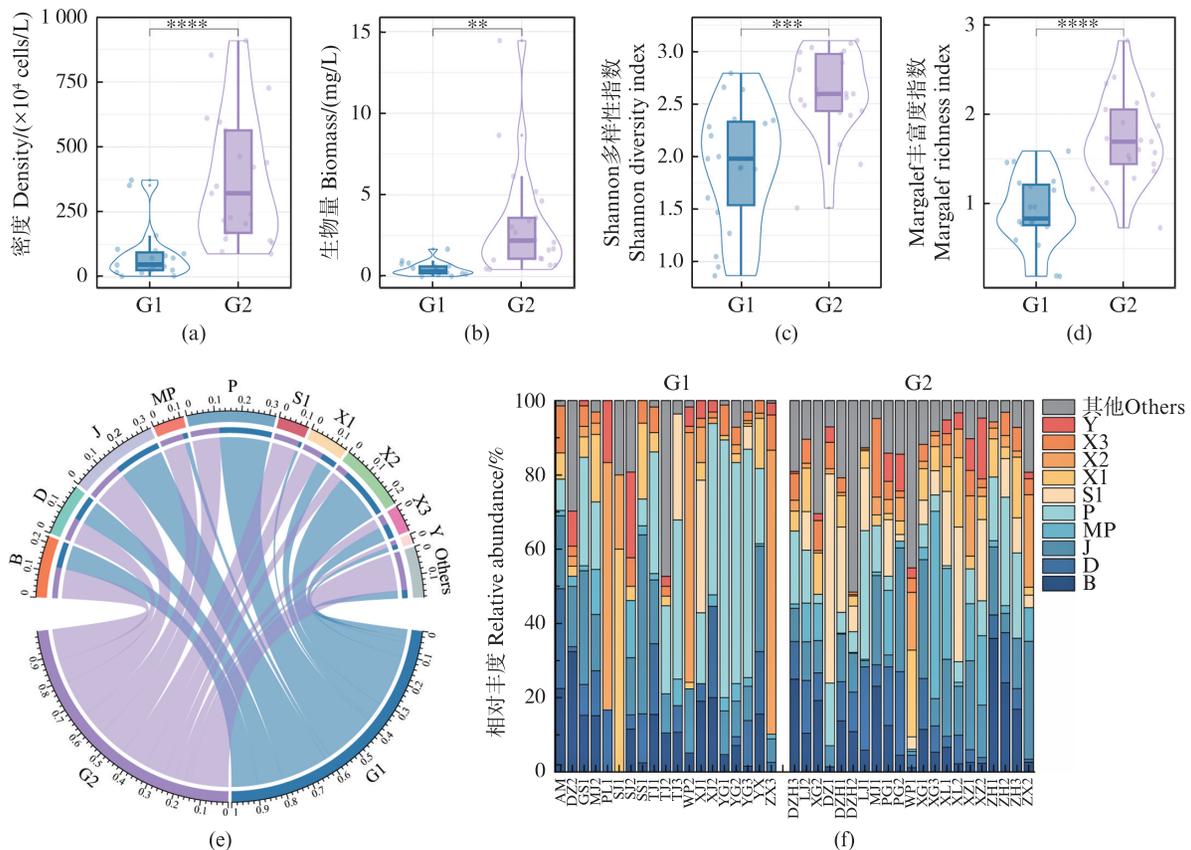
距离衰减分析结果表明:浮游植物群落相似度总体上随着地理距离和环境距离的增加而显著减小($P<0.01$),这表明上海河道浮游植物功能群群落的构建受环境过滤和扩散限制作用的共同影响(图4);通过对G1及G2组分别分析发现,两组之间的群落构建机制存在差异,G1组主要受环境距离的影响($P<0.01$),而G2组则主要受地理距离的影响($P<0.01$),表明G1组功能群群落构建由确定性过程主导(图4b、4e),而G2组则由

随机性过程主导(图4c、4f)。

校正随机率(MST)能够量化浮游植物功能群群落构建过程中随机性和确定性的相对贡献,其结果显示:不同组别间存在显著差异,与距离衰减分析结果一致(图5);G1组两两样点间MST的平均值低于0.5阈值线,表明G1组浮游植物功能群群落构建由确定性过程主导;而G2组两两样点间MST的平均值高于0.5阈值线,说明随机性过程占据主导地位。整体而言,上海冬季河道浮游植物功能群群落构建由确定性过程和随机性过程共同影响,但随机性过程占主导(图5)。

2.4 浮游植物功能群群落结构变化的影响因素

通过将G1、G2两组内的环境因子进行比较发现,两组之间总磷(TP)、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、电导率(EC)、高锰酸盐(COD_{Mn})、溶解氧(DO)、TLI等指标存在显著差异($P<0.05$),营养盐总体表现为G2组高于G1组,总氮(TN)、透明度、溶解性硅酸盐(DSi)、pH等指标无显著差异($P>0.05$),见图6。



** $P<0.01$; *** $P<0.001$; **** $P<0.0001$.

图3 上海河道生物参数差异分析(a-d)及优势功能群的相对丰度(e-f)

Fig. 3 Difference analysis of biological parameters(a-d) and relative abundance of dominant functional groups(e-f) in Shanghai River

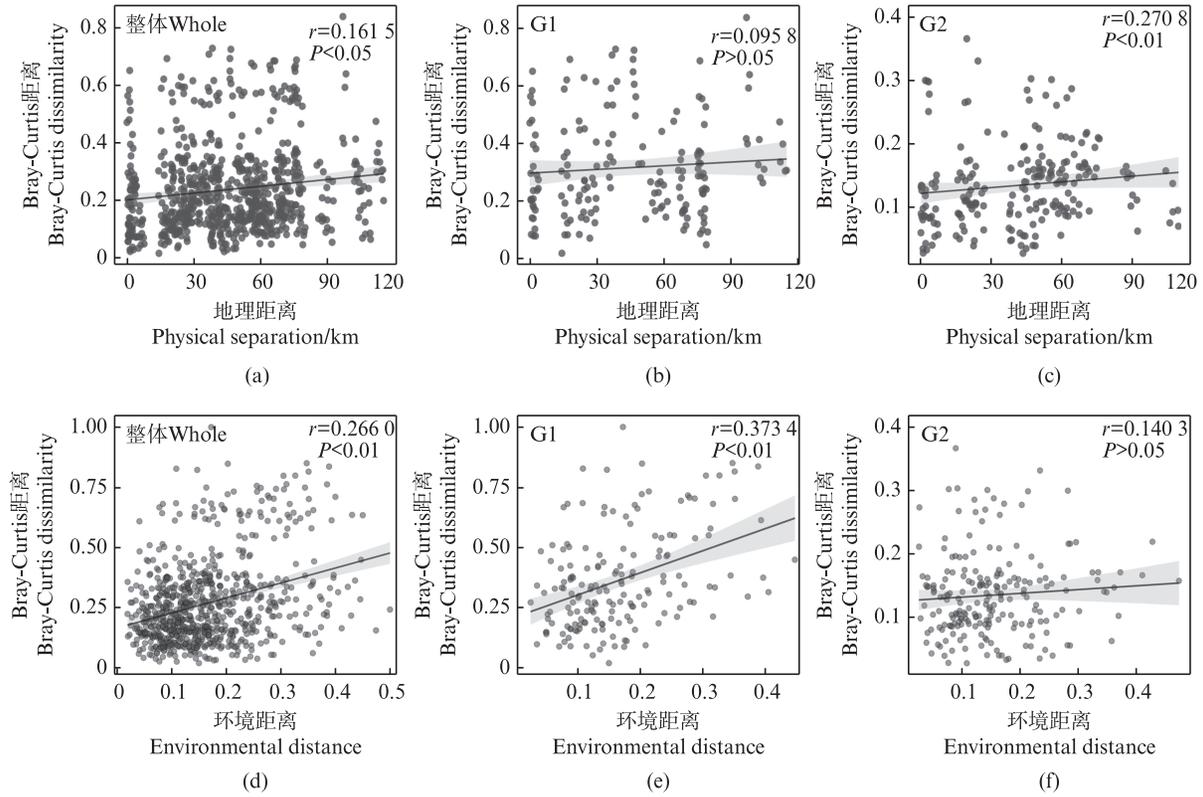
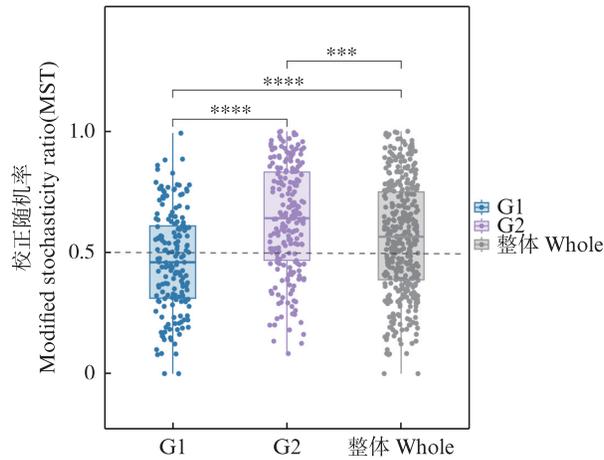


图4 地理距离(a-c)及环境距离(d-f)与浮游植物功能群Bray-Curtis距离的相关性

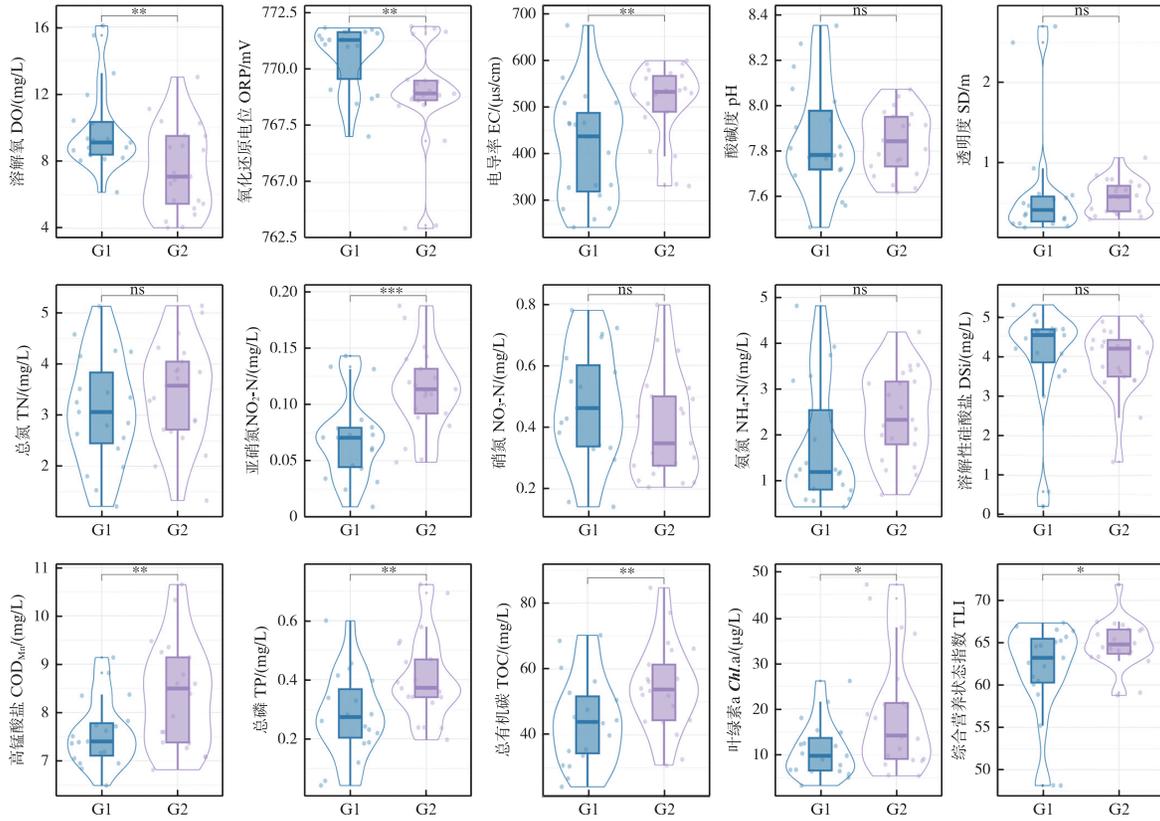
Fig. 4 Correlation between physical distance(a-c) and environmental distance(d-f) and Bray-Curtis dissimilarity of phytoplankton functional groups



*** $P < 0.001$; **** $P < 0.0001$.

图5 浮游植物功能群群落校正随机率(MST)差异分析

Fig. 5 Difference analysis of Modified stochasticity ratio (MST) of phytoplankton functional groups



ns. 无显著差异; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。
 ns. No significant difference; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

图6 基于聚类组的环境因子差异性比较

Fig. 6 Comparison of environmental factors based on cluster groups

逐步回归分析结果表明,上海中小河道浮游植物功能群丰度的变化主要有TN、TP、NO₂-N以及EC决定($R^2_{adj}=0.572, P < 0.001$);而G1组的浮游

植物丰度受TP、EC的影响,G2组相较于G1组而言,更易受水体氮浓度的影响($R^2_{adj}=0.588, P < 0.01$),见表2。

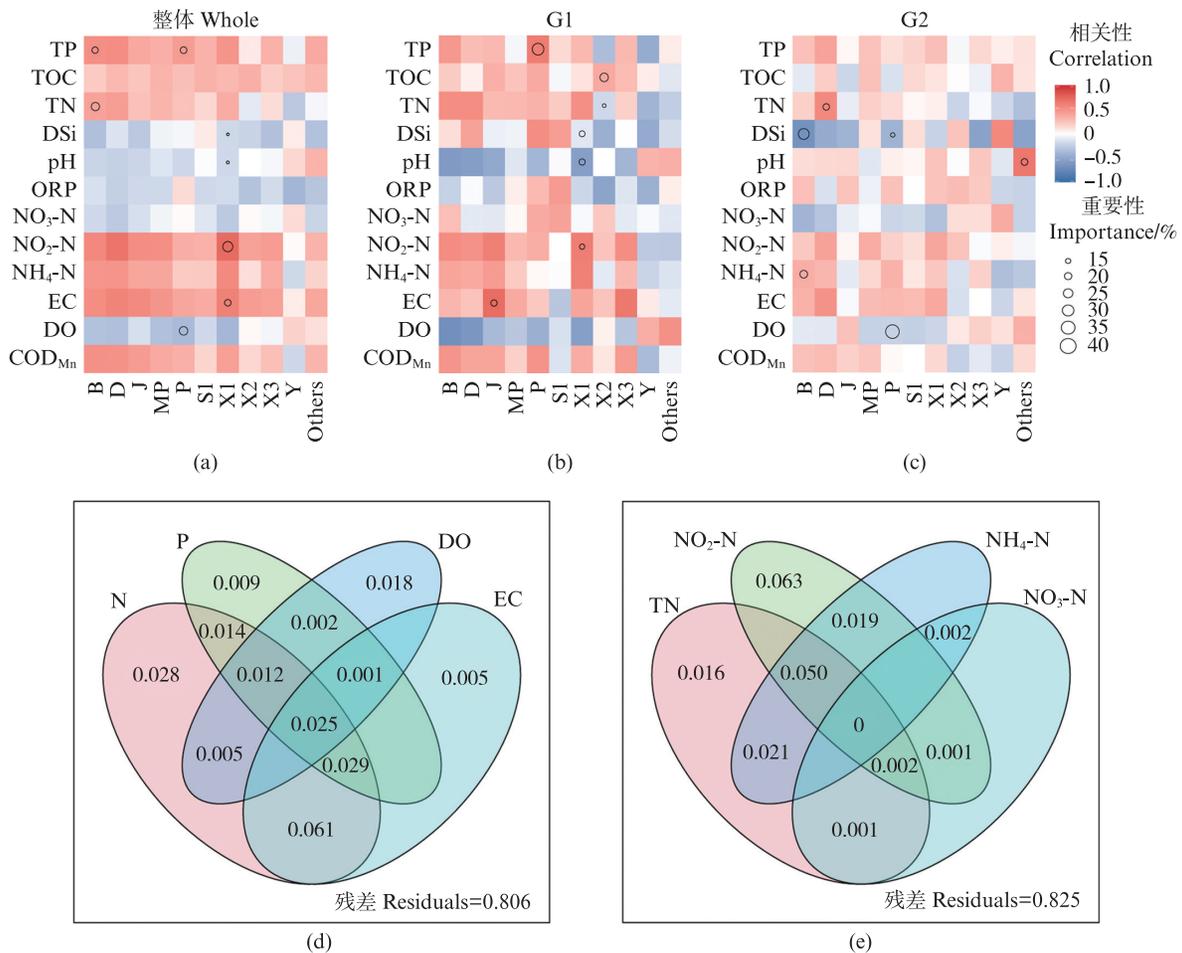
表2 环境因子与浮游植物功能群丰度的多元线性回归分析模型

Tab. 2 Multivariate linear regression analysis model of environmental factors and phytoplankton functional group abundance in the study area

组别 Group	线性回归方程 Linear model	R^2_{adj}	P
整体 Whole	$-2.174TN + 3.478TP + 1.432NO_2-N + 2.354EC$	0.572	<0.001
G1	$-3.042TP + 3.096EC$	0.627	<0.001
G2	$-2.011DO + 1.202NH_4-N - 0.75pH$	0.588	<0.01

将环境数据进行共线性筛选后,相关性分析及线性模型分析结果显示,不同组别间的环境参数对浮游植物功能群的影响有所差异,整体而言,TN、TP分别解释了B功能群25.02%和20.21%的变异,功能群X1受NO₂-N、pH、DSi、EC的共同影响,其中NO₂-N解释了X1功能群30.29%的变异(图7);在G1组中,TP对P功能群35.09%的变异进行了解释,EC解释了J功能群

20.10%的变异,TOC对功能群X2的变异解释了26.95%;在G2组中,环境因子对于浮游植物功能群的影响较小,NH₄-N、DSi共同解释了B功能群56.16%的变异,DO和DSi分别解释了P功能群39.25%、16.17%的变异率。方差分解分析(VPA)进一步表明,上海中小河道浮游植物功能群易受氮浓度的影响,尤其是亚硝酸盐氮。



热图表示了环境因子和浮游植物功能群的 Spearman 相关系数,圆圈大小表示环境因子的重要性。

Colors represent Spearman correlation coefficient values. Circle size represents the variable effect size.

图7 基于相关性和最优多元回归模型的环境参数对浮游植物功能群差异的贡献(a-c)以及关键环境变量对浮游植物功能群群落影响的变差分解(d-e)

Fig. 7 Contributions of environmental parameters to the difference of phytoplankton functional groups based on correlation coefficients and best multiple regression model(a-c)and Venn figures for variation partitioning of phytoplankton functional group community affected by key environmental variables(d-e)

3 讨论

3.1 上海城市中小河道浮游植物功能群结构特征

上海人口密集,河网密集,但除黄浦江外大多属于中小河道^[21],河道与外界河流的交换频率较低,导致部分河道水动力不足,并且河道周边影响因素比较复杂,可能受生活污水和农业面源污染双重干扰^[22],而特定的水体生境状态可以通过特定的浮游植物功能类群进行反应^[23],调查期间确定的优势功能群多适应干扰较为频繁、营养盐含量充足的浑浊水体^[24-25],这些优势功能群的存在间接说明了上海中小河道总体上处于富营养状态,这也与本次计算 TLI 值指示的结果一致。

优势功能群在两个分组的分布差异可能与关键功能群对环境的适应性有关,与 G1 组相比,

G2 组的氮磷营养盐、有机质浓度较高,以绿藻门的栅藻、单针藻为代表的 J 和 X1 功能群有更强的利用优势^[26-27];以蓝藻门的颤藻、假鱼腥藻和绿藻门为代表的 MP、S1 功能群占据较高比重(图 3),这也与中小河道较高的营养盐、水动力不足等因素密切相关,例如李衍庆等^[28]通过对李家河水库的研究以及张俊芳等^[29]对汤浦水库浮游植物功能群的研究发现,在水体稳定指数较高的环境下,伴随着营养盐逐渐升高,MP、S1 会逐渐成为主要优势功能群;而以硅藻门的直链藻为代表的 P 功能群和以衣藻、尖尾蓝隐藻为代表的 X2 功能群通常生活在中到富营养的混合水体中;研究发现,低浓度的磷有利于 P 和 X2 功能群的生长^[4,7,30],故二者易在磷浓度较低的 G1 组占据优势地位。

3.2 浮游植物功能群群落结构构建机制分析

浮游植物群落结构的构建由环境过滤作用和空间扩散限制作用共同决定,二者可以用环境距离和地理距离来进行衡量^[31-32],浮游植物功能群 Bray-Curtis 不相似度与地理距离、环境距离的相关性结果表明,上海河道浮游植物功能群群落的构建受到环境过滤和空间扩散限制作用的共同影响,这与吴强等^[6]对鄱阳湖和JIANG等^[33]对晋江龙湖的调查结果相似。但通过对浮游植物功能群进行分组后发现,营养程度不同的两组之间,其构建机制存在差异,低营养组(G1)由确定性过程主导,而高营养组(G2)的群落异质性受随机性过程影响(图4和图5)。研究发现,环境过滤作用和空间扩散限制作用对浮游植物群落构建的相对重要性取决于物种的扩散能力、环境梯度和空间程度^[12,35];本研究调查区域为超大城市河网水系,河道连通度高,部分采样点位距离较近,可能削弱了地理距离对其群落构建的相对重要性^[6,13],导致G1组受环境因素影响较大;而G2组可能营养盐较为充足,环境梯度较小,从而弱化了环境因子对浮游植物功能群群落结构的解释度,使得随机性过程占据主导地位。

3.3 影响浮游植物功能群的关键环境因子分析

本文逐步回归分析以及变差分解分析结果显示,上海中小河道水体氮元素含量(TN、NO₂-N)是影响浮游植物功能群组成的重要变量(表2)。氮磷营养盐是浮游植物生化功能中利用的两种关键常量营养素,也是限制浮游植物生长的主要营养素,但两种元素对浮游植物生长的相对重要性仍然存在争议^[35-36]。已有研究^[37-39]表明,在城市河口海岸,氮元素被认为是富营养化和初级生产力的限制养分,并且氮元素通常是驱动浮游植物功能群的主要因素^[40],对于超大型城市而言,其水生态环境面临着城市发展、人口活动、工业生产等多重影响,城市河网水动力不足加之外源污染物大量流入河道,导致水体透明度降低,氮养分负荷增加,从而促进了D、MP等优势功能群的生长^[41]。不少对上海河湖的调查研究中,也发现了氮元素会显著影响浮游植物群落结构^[42-44],并且研究发现,在较高的氮营养盐环境下,B、J、P、X1等功能群可以维持较长时间的增长,从而占据优势地位^[26,45-46]。

大型城市河网区的河道大多为缓流型河道,

水体易滞留,河道内的污染物难以排出,导致水环境中的氮元素污染日趋严重^[47]。同时,水体中的氮元素来源复杂多样,例如大气沉降、土壤氮等自然源和农业生活污水等人为源^[48],其在水体中的形态有所不同。本研究中采样点的TN平均含量(3.27 mg/L)和NH₄-N平均含量(2.10 mg/L)均超过了地表水V类水的限制值(2 mg/L),充足的氮营养元素为B、MP、J等优势功能群提供了良好的生长条件。NO₂-N是硝氮还原和氨氮氧化的中间产物^[49],在一定的浓度范围内可以为浮游植物生长提供所需的氮,并且研究发现,在夏季水温较高时NO₂-N更易转化为NH₄-N从而被藻类吸收^[50],它能显著促进X1功能群的生长,与B、D、J、MP等优势功能群丰度呈正相关关系;近年来我国鄱阳湖^[51]、南水北调水源地及补给湖库^[52]、晋江龙湖^[33]等很多水体的浮游植物功能群分布都会受到NO₂-N的影响,后续水质监测中,可加强对亚硝酸盐输入的关注。溶解氧(DO)浓度会影响水体中的硝化细菌的反硝化速率,常被作为判断水体中发生硝化和反硝化过程的重要指标^[53],影响水体中氮元素的转化,因此也可通过对水体氮组分的影响,进而间接地影响浮游植物群落的组成;研究^[54]表明,NO₂⁻、NO₃⁻是导致电导率(EC)变化的主要离子,从方差分解分析中也可看出电导率与氮元素有很高的共同解释部分,故在本研究中推测EC对浮游植物功能群的影响,主要还是水体营养盐等离子成分产生的影响。综上所述,氮元素是影响上海河道浮游植物功能群群落结构的重要因素,在后续的河道治理中,需要重点关注氮元素尤其是亚硝态氮的输入和治理。

4 结论

上海中小河道水体浮游植物可归为23个功能类群,其中B、D、J、MP、P、S1、X1、X2、X3、Y为优势功能群。总氮、亚硝氮、总磷、电导率和溶解氧是影响上海河道浮游植物功能群群落结构的主要环境因子。浮游植物功能群群落的构建机制由随机性过程主导,但不同生境条件下,构建机制存在差异,后续的水生态治理中,需要针对不同的生态环境,因地制宜地制定管理方案。

作者声明本文无利益冲突

参考文献:

- [1] 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 等. 武汉市3种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因子[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2093-2102.
ZHANG H K, MIN F L, CUI H R, et al. Characteristics of phytoplankton communities and key impact factors in three types of lakes in Wuhan [J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 2093-2102.
- [2] DOUTERELO I, PERONA E, MATEO P. Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters [J]. Environmental Pollution, 2004, 127(3): 377-384.
- [3] ZHANG M, YU Y, YANG Z, et al. Deterministic diversity changes in freshwater phytoplankton in the Yunnan - Guizhou Plateau lakes in China [J]. Ecological Indicators, 2016, 63: 273-281.
- [4] 常畅然, 王莹莹, 赵昶, 等. 查干湖浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1227-1233.
CHANG C R, WANG Y Y, ZHAO C, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in Chagan Lake and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(5): 1227-1233.
- [5] REYNOLDS 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.
- [6] 吴强, 刘聚涛, 温春云, 等. 丰水期鄱阳湖浮游植物群落构建机制及影响因素[J]. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1353-1365.
WU Q, LIU J T, WEN C Y, et al. Phytoplankton community assembly mechanisms and driving factors during wet seasons in Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(5): 1353-1365.
- [7] 武宇圣, 朱韻洁, 庞燕, 等. 基于功能群的浮游植物群落驱动因子及水质评价适用性分析: 以骆马湖为例 [J]. 环境科学研究, 2023, 36(10): 1915-1926.
WU Y S, ZHU Y J, PANG Y, et al. Driving factors of phytoplankton functional groups and applicability of water quality evaluation: a case study of Lake Luoma [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(10): 1915-1926.
- [8] ZHU L Y, CHEN Y Y, WANG Y W, et al. Ecological assessment of water quality in an urban river replenished with reclaimed water: the phytoplankton functional groups approach [J]. Environmental Research Communications, 2021, 3(11): 115006.
- [9] 巢欣, 杨胜娟, 刘惠秋, 等. 雅鲁藏布江下游浮游植物群落构建机制及驱动因素[J/OL]. 湖泊科学, (2024-06-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.P.20240623.1342.002.html>.
CHAO X, YANG S X, LIU H Q, et al. Mechanism and driving factors of phytoplankton community construction in the lower reaches of Yarlung Zangbo River [J/OL]. Journal of Lake Sciences, (2024-06-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.P.20240623.1342.002.html>.
- [10] VALENCIA R, FOSTER R B, VILLA G, et al. Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador [J]. Journal of Ecology, 2004, 92(2): 214-229.
- [11] HUBBELL S P. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography [M]. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [12] HEINO J, MELO A S, SIQUEIRA T, et al. Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: patterns, processes and prospects [J]. Freshwater Biology, 2015, 60(5): 845-869.
- [13] MENG Z H, CHEN K, HU F F, et al. Environmental and spatial factors play different roles in phytoplankton community assembly in different hydrological seasons in Lake Wuchang, China [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1154695.
- [14] IZAGUIRRE I, SAAD J F, SCHIAFFINO M R, et al. Drivers of phytoplankton diversity in Patagonian and Antarctic lakes across a latitudinal gradient (2150 km): the importance of spatial and environmental factors [J]. Hydrobiologia, 2016, 764(1): 157-170.
- [15] 贾易. 上海地区河道工程设计方案应注意问题的探讨 [J]. 珠江水运, 2023(9): 12-14.
JIA Y. Discussion on the problems that should be paid attention to in the design scheme of river engineering in Shanghai area [J]. Pearl River Water Transport, 2023(9): 12-14.
- [16] 申利亚, 赵丹, 马婕, 等. 上海青草沙水库生态护坡区浮游植物的群落结构 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(2): 400-410.
SHEN L Y, ZHAO D, MA J, et al. Phytoplankton community structure of ecological slope protection area of Shanghai Qingcaosha reservoir [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(2): 400-410.
- [17] 宋勇军, 戚菁, 刘立恒, 等. 程海湖夏季浮游植物群落结构与富营养化状况研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4106-4113.
SONG Y J, QI J, LIU L H, et al. Eutrophication status and phytoplankton community structure in Chenghai Lake in summer and winter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4106-4113.
- [18] 张海燕, 唐迎洲, 徐贵泉, 等. 上海市骨干河湖分级研究 [J]. 上海水务, 2011, 27(1): 2-5.
ZHANG H Y, TANG Y Z, XU G Q, et al. Study on the hierarchies of Shanghai backbone River network [J]. Shanghai Water, 2011, 27(1): 2-5.

- [19] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、生态及分类 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] 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.
- [21] 范华. 上海建成区56条黑臭河道整治的实践及探索 [J]. *中国水运*, 2018, 18(8): 92-93.
FAN H. Practice and Exploration of Remediation of 56 Black and Odorous Rivers in Shanghai Built-up Area [J]. *China Water Transport*, 2018, 18(8): 92-93.
- [22] 许志, 陈小华, 沈根祥, 等. 上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3621-3628.
XU Z, CHEN X H, SHEN G X, et al. Spatial and temporal variation of phytoplankton community structure and its influencing factors in Shanghai river channels [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3621-3628.
- [23] SEIP K L, REYNOLDS C S. Phytoplankton functional attributes along trophic gradient and season [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(3): 589-597.
- [24] 杨丽, 张玮, 尚光霞, 等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3158-3167.
YANG L, ZHANG W, SHANG G X, et al. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3158-3167.
- [25] 张雷燕, 刘成高, 贾玉山, 等. 石梁河水库浮游植物功能群的生态特征及其对水环境质量的指示 [J]. *环境生态学*, 2024, 6(2): 59-64.
ZHANG L Y, LIU C G, JIA Y S, et al. The ecological features of plant functional group and its indication on water quality in Shilianghe Reservoir [J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(2): 59-64.
- [26] JENSEN J P, JEPPESEN E, OLRİK K, et al. Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(8): 1692-1699.
- [27] 侯秀丽, 苑春刚, 李学平, 等. 滇池氮磷浓度变化对蓝、绿、硅藻年际变化的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(1): 16-22.
HOU X L, YUAN C G, LI X P, et al. Effect of nitrogen and phosphorus concentrations on the planktonic algae dynamics in Dianchi Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(1): 16-22.
- [28] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2158-2165.
LI Y Q, HUANG T L, ZHANG H H, et al. Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2158-2165.
- [29] 张俊芳, 胡晓红, 马沛明, 等. 汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 55-62.
ZHANG J F, HU X H, MA P M, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and key driving factors in Tangpu reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 55-62.
- [30] LIAO N, LI H, YOU L H, et al. Succession of phytoplankton functional groups and driving variables in a young canyon reservoir [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(7): 1911-1924.
- [31] LEIBOLD M A, HOLYOAK M, MOUQUET N, et al. The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(7): 601-613.
- [32] MELO A S, SCHNECK F, HEPP L U, et al. Focusing on variation: methods and applications of the concept of beta diversity in aquatic ecosystems [J]. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2011, 23(3): 318-331.
- [33] JIANG Y C, WANG Y, HUANG Z K, et al. Investigation of phytoplankton community structure and formation mechanism: a case study of Lake Longhu in Jinjiang [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1267299.
- [34] ALAHUHTA J, KANNINEN A, HELLSTEN S, et al. Environmental and spatial correlates of community composition, richness and status of boreal lake macrophytes [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 32: 172-181.
- [35] JIANG M Q, NAKANO S I. The crucial influence of trophic status on the relative requirement of nitrogen to phosphorus for phytoplankton growth [J]. *Water Research*, 2022, 222: 118868.
- [36] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [37] AARDEMA H M, RIJKEBOER M, LEFEBVRE A, et al. High-resolution underway measurements of phytoplankton photosynthesis and abundance as an innovative addition to water quality monitoring programs [J]. *Ocean Science*, 2019, 15(5): 1267-1285.

- [38] NIXON S W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns [J]. *Ophelia*, 1995, 41(1): 199-219.
- [39] MISCHLER J A, TAYLOR P G, TOWNSEND A R. Nitrogen limitation of pond ecosystems on the plains of Eastern Colorado[J]. *Plos One*, 2014, 9(5): e95757.
- [40] GAO W Q, XIONG F Y, LU Y, et al. Water quality and habitat drive phytoplankton taxonomic and functional group patterns in the Yangtze River [J]. *Ecological Processes*, 2024, 13(1): 11.
- [41] SHEN H L, XU H, ZHANG X R, et al. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and ecological assessment in a cold spring-type urban lake, China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1435078.
- [42] 童璐, 刘丹, 段骄阳, 等. 千岛湖浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(5): 1176-1186.
TONG L, LIU D, DUAN J Y, et al. Temporal and spatial changes of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Qiandao Lake [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(5): 1176-1186.
- [43] 王文婷, 李丰, 徐赛赛, 等. 上海青草沙水库浮游植物功能群时空变化特征及其影响因子[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(6): 1224-1236.
WANG W T, LI F, XU S S, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Shanghai Qingcaosha Reservoir [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(6): 1224-1236.
- [44] 王三秀, 魏莱, 王爽, 等. 上海水源地毗邻湖库浮游植物群落结构的季节变化及其影响因子[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1127-1139.
WANG S X, WEI L, WANG S, et al. Seasonal changes of phytoplankton community structure and its influencing factors in lakes and reservoirs adjacent to water sources in Shanghai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1127-1139.
- [45] 范小晨, 代存芳, 陆欣鑫, 等. 金海湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子[J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5726-5738.
FAN X C, DAI C F, LU X X, et al. Study on phytoplankton functional group succession and driving parameters in the Jinhewan Urban Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5726-5738.
- [46] 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.
WANG Y Y. Study on influence of nitrogen and phosphorus concentrations on the growth of four dominant species of algae in Taipu River [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [47] JI X L, SHU L L, CHEN W L, et al. Nitrate pollution source apportionment, uncertainty and sensitivity analysis across a rural-urban river network based on $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ isotopes and SIAR modeling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129480.
- [48] 刘音利, 廖忠鹭, 王芃玮, 等. 基于稳定同位素示踪的平原河网溶解无机氮来源解析: 以温瑞塘河为例[J/OL]. *中国环境科学*, (2024-09-03). <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240902.002>.
LIU Y L, LIAO Z L, WANG P W, et al. Dissolved inorganic nitrogen source apportionment in plain river networks based on stable isotopes: a case study of the Wen-Rui Tang River [J/OL]. *China Environmental Science*, (2024-09-03). <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240902.002>.
- [49] 王九龙, 张明明, 王金叶. 青岛农业大学生活饮用水亚硝态氮检测与情况分析[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 29(2): 111-114, 120.
WANG J L, ZHANG M M, WANG J Y. Detection and analysis of nitrite nitrogen content in the drinking water of Qingdao Agriculture University [J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2012, 29(2): 111-114, 120.
- [50] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 403-416.
HU Y M, LI Q H, ZHU C C, et al. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 403-416.
- [51] 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年)[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1035-1044.
QIAN K M, LIU B G, CHEN Y W. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1035-1044.
- [52] 贾世琪. 南水北调中线补给湖库浮游植物群落结构特征与环境因子研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
JIA S Q. Study on phytoplankton community characteristics and environmental factors of the recharge lakes and reservoirs in the Central Line Project of the South-to-North Water Diversion [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [53] 王圆忆, 许海, 张子宁, 等. 千岛湖流域典型河流附石生物膜反硝化潜力及其微生物群落特征分析[J/OL]. *环境科学学报*, (2024-09-23). <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2024.0363>.
WANG Y Y, XU H, ZHANG Z N, et al.

Characterization of denitrification potential of epilithic biofilm and its microbial community in typical rivers of Lake Qiandaohu [J/OL]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, (2024-09-23). <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2024.0363>.

[54] DENG J M, QIN B Q, PAERL H W, et al. Effects of nutrients, temperature and their interactions on spring phytoplankton community succession in Lake Taihu, China[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e113960.

Phytoplankton functional groups community assembly mechanisms and driving factors in Shanghai river network in winter

XING Yawei^{1,2}, LU Zhiling³, WANG Ting⁴, XU Xiaoying¹, WANG Liqing^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Environmental DNA and Ecological Water Health Assessment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Water Conservancy Management Department, Shanghai 200002, China; 4. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation Research Center, Shanghai 200092, China)

Abstract: Phytoplankton is an important primary producer of water, and its functional group characteristics play an important role in maintaining the stability of aquatic ecosystems. In order to reveal the characteristics and construction mechanism of phytoplankton functional group community and its driving factors in river networks of megacity, 19 representative small and medium-sized rivers in Shanghai were selected to investigate the characteristics of phytoplankton functional groups and environmental factors at 40 sites. The results showed that a total of 175 species of phytoplankton in 8 phyla were identified, which could be divided into 23 functional groups, and B, D, J, MP, P, S1, X1, X2, X3 and Y were the dominant functional groups. The results of cluster analysis showed that 40 sampling sites could be divided into two characteristic groups: low nutrient (G1) and high nutrient (G2). There were significant differences in Shannon-Wiener diversity index, Margalef index, phytoplankton functional group community structure and environmental factors between the two groups ($P < 0.05$). The modified stochasticity ratio (MST) and the decay relationship analysis showed that the community construction of phytoplankton functional groups in Shanghai River was affected by the environmental filtering and spatial diffusion limitation, and the stochastic process was dominant. The community construction of the low nutrient group (G1) was affected by environmental filtration, while the spatial diffusion affected the construction of phytoplankton functional groups in the higher nutrient group (G2). Difference analysis and multiple regression analysis showed that total nitrogen, nitrite nitrogen, total phosphorus, conductivity and dissolved oxygen were the main environmental factors affecting the community structure of phytoplankton functional groups in Shanghai River. This study provides new information for in-depth understanding of the biodiversity and ecological function maintenance mechanism of river networks in megacities, as well as the protection of water ecosystems in urban river networks.

Key words: urban river; phytoplankton; functional groups; environmental filtering effect; stochastic process